



SOMMAIRE

Trier des lots de céréales contaminés en mycotoxines.... Pages 1 - 7

Impact du nettoyage des grains sur la performance de la ventilation de refroidissement..... Pages 8 - 11



INSCRIVEZ-VOUS

Si vous souhaitez recevoir cette lettre technique, merci de bien vouloir vous inscrire à l'aide du formulaire prévu sur notre site :

<https://www.arvalis.fr/contacter-arvalis>

TRIER DES LOTS DE CÉRÉALES CONTAMINÉS EN MYCOTOXINES

Les toxines secrétées par certains champignons pathogènes des cultures, lorsqu'elles sont ingérées par des humains ou des animaux d'élevage, ont un effet néfaste sur leur santé, notamment dans le cas d'une exposition sur le long terme. Plusieurs de ces toxines font donc l'objet de seuils réglementaires dans les matières premières destinées à l'alimentation humaine et parfois animale.

Les grains infectés par des champignons se caractérisent souvent par une taille plus petite, une densité moindre et une couleur différente de celle des grains sains, ce qui permet de les trier et ainsi faire baisser les teneurs en mycotoxines des lots contaminés. Dans l'Union Européenne, les techniques reposant sur la ségrégation des grains sains et contaminés sont les seules autorisées pour faire baisser les teneurs en mycotoxines dans les grains de céréales. Cela inclut le nettoyage (tamisage + aspiration), le tri par densité, avec une table ou une colonne, et le tri optique. Quelle est l'efficacité de ces techniques pour faire baisser les teneurs en mycotoxines des céréales ?

Un inventaire des travaux sur le nettoyage et le tri des céréales contaminées en mycotoxines

36 articles scientifiques concernant la ségrégation des grains sains et contaminés ont été retenus pour constituer une base de données indiquant notamment les teneurs avant et après process pour diverses toxines contaminant des lots de blé tendre, blé dur, maïs et avoine. Les archives d'ARVALIS ont permis de retrouver 7 comptes-rendus d'essais, réalisés sur blé tendre et maïs. Les travaux sur la décontamination de l'orge reposent principalement sur les opérations de décorticage et de polissage, qui n'ont pas été retenues dans cette étude.

La Figure 1 représente le nombre d'articles et comptes-rendus par espèce et par toxine. Les travaux consacrés au blé tendre concernent surtout le DON, alors que pour le maïs plusieurs toxines différentes ont été étudiées, ce qui reflète la fréquence des contaminations observées par espèce. Les principales toxines étudiées pour le maïs sont les fumonisines et les aflatoxines.

Sur la Figure 1, la catégorie « Autres » représente principalement des toxines de *Fusarium* qui, comme le DON, appartiennent à la famille des trichothécènes (T2 et HT2, 15 ADON...). La catégorie « Aflatoxines » regroupe des articles où seule l'aflatoxine B1 a été mesurée et des articles où la somme des aflatoxines B1, B2, G1, G2 est présentée. De même, la catégorie « Fumonisines » regroupe des travaux qui présentent soit la somme FB1+FB2, soit la somme FB1+FB2+FB3, voire des formes dérivées des fumonisines.

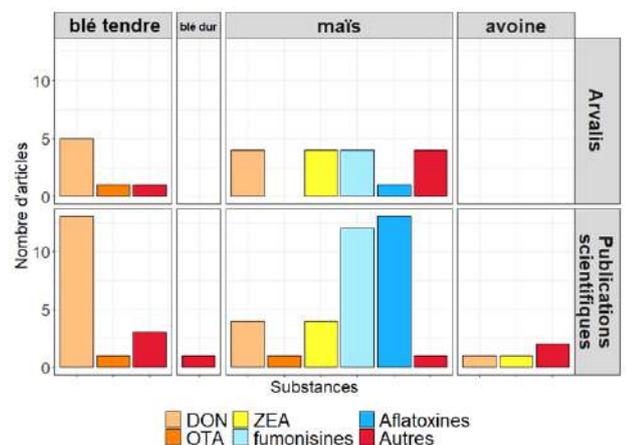


Figure 1 : Nombre d'articles et comptes-rendus par espèce et par substances

▶ Blé tendre contaminé en DON : les trieurs optiques et tables densimétriques bien plus efficaces que le nettoyeur-séparateur

Avec 12 publications et 2 comptes-rendus ARVALIS, les études sur blé à l'échelle laboratoire ou semi-industrielle sont plus fréquentes que les études à l'échelle industrielle (2 publications et 3 comptes-rendus ARVALIS). Ces études comportent aussi, individuellement, davantage de modalités et de répétitions.

On définit le taux d'abattement comme la différence, en pourcentage, entre la teneur en mycotoxine après nettoyage et avant nettoyage, ramenée en pourcentage de la teneur initiale. Le taux d'abattement est négatif lorsque la teneur en mycotoxine après nettoyage est inférieure à celle avant nettoyage. A l'échelle du laboratoire, le taux d'abattement médian du DON pour le nettoyage du blé est de - 25 %, pour des niveaux de contamination allant de 139 à 10 529 µg/kg (Figure 2). Avec des taux d'abattement respectifs de - 82 % et - 70 %, la table densimétrique et le trieur optique sont plus efficaces que les nettoyeurs-séparateurs.

A l'échelle industrielle, le taux d'abattement médian du nettoyage est de - 35 %, pour des teneurs en DON comprises entre 600 et 4 000 µg/kg. En combinant nettoyeur et table densimétrique, la teneur en DON baisse d'au moins 75 %.

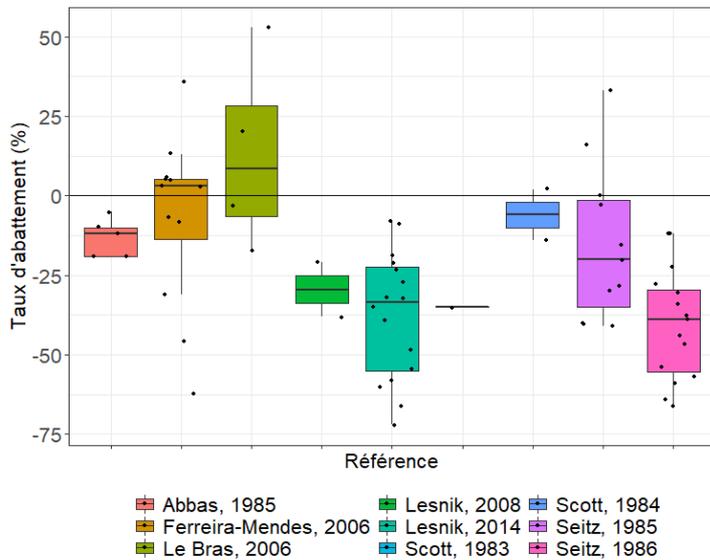


Figure 2 : Taux d'abattement du DON observés dans les différentes études portant sur le nettoyage du blé tendre en laboratoire

Concernant les 9 expérimentations faites en laboratoire sur le nettoyage, on constate des différences importantes d'un essai à l'autre (Figure 3). Cela peut s'expliquer par le matériel et les réglages utilisés, en interaction avec le grain utilisé (dimensions des grains, PMG, niveau de contamination...). Les essais où le nettoyage a été le plus efficace sont ceux réalisés par Seitz en 1986 (- 40 % de DON en moyenne, essai à l'échelle semi-industrielle, dans un moulin pilote en combinant divers appareils de nettoyage par criblage et par aspiration) et par Lesnik en 2014 (- 38 % de DON en moyenne, avec un nettoyeur-séparateur de laboratoire).

Pour ce dernier, on note que la grille de criblage ayant permis d'aboutir à ce résultat avait des ouvertures de 2.4 mm (les auteurs ne précisent pas si c'étaient des trous longs ou ronds), soit une ouverture plus importante que les grilles classiquement utilisées pour le nettoyage du blé. Dans le cas de Lesnik, 15 à 40 % du blé avait été écarté, ce qui est très élevé. Les pourcentages de freintes de Seitz, dans son essai de 1986, variaient entre 2 et 15 %.

Le taux d'abattement du DON n'est pas corrélé à la teneur en DON avant nettoyage, comme le montre la Figure 4. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de 0.06. La Figure 4 montre également qu'il n'y a pas de confusion d'effet entre les différentes études faites sur le sujet et le niveau de contamination initial.

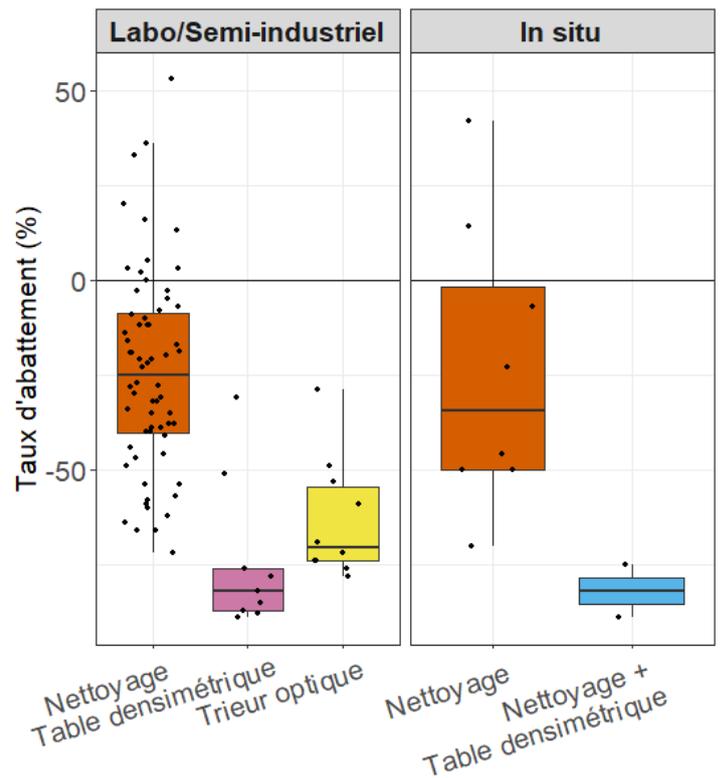


Figure 3 : Taux d'abattement du DON pour les différentes machines testées à l'échelle du laboratoire et à l'échelle industrielle

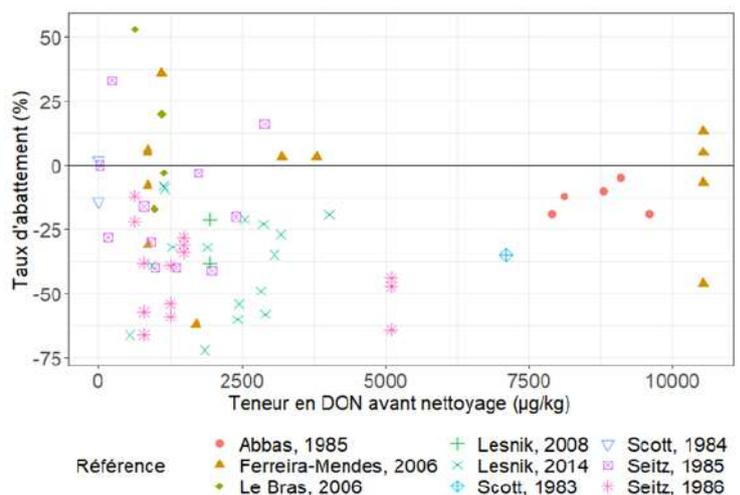


Figure 4 : Relation entre le taux d'abattement et la teneur en DON avant nettoyage, pour les 9 études sur le nettoyage réalisées en laboratoire

Pour le blé contaminé en DON, les résultats à l'échelle du laboratoire et à l'échelle industrielle indiquent de meilleures performances des tables densimétriques (Tableau 1). Toutefois, les freintes peuvent être très importantes avec ces appareils. Dans la plupart des cas, les niveaux de contaminations sont tels que l'utilisation d'un nettoyeur-séparateur est suffisant pour les rendre conformes à la réglementation.

Tableau 1 : Synthèse des résultats pour le blé tendre contaminé en DON

Echelle	Taux d'abattement médian du nettoyage	Commentaires
Laboratoire / Semi-industrielle	- 25 % (9 études)	Pas de relation entre la teneur initiale en DON et le taux d'abattement. La table densimétrique est la méthode la plus efficace (- 82 %) - Le tri optique est également intéressant (- 70 %)
Industrielle	- 35 % (5 études)	Un passage à la table densimétrique après le nettoyage a permis de faire baisser la teneur en DON de 82 %.

► Pour le maïs, la meilleure technique dépend du contaminant ciblé

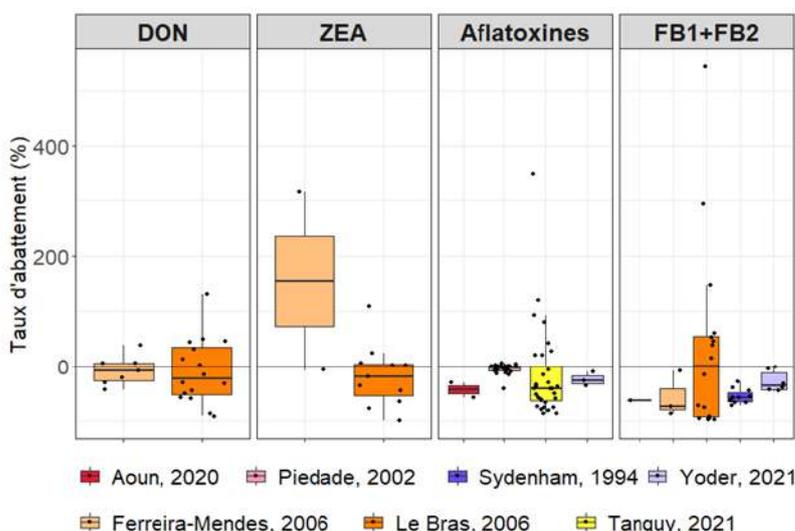


Figure 5 : Taux d'abattement observés dans 7 études en laboratoire sur le nettoyage ou le tamisage de maïs contaminé en mycotoxines

A l'échelle du laboratoire et semi-industrielle, 7 études ont été retenues (Figure 5). Les échantillons avant nettoyage pèsent entre 1 et 30 kg, sauf pour un essai fait sur des échantillons de 150 kg (Yoder, 2021). A cette échelle, seuls des tamis et des nettoyeurs-séparateurs ont été testés pour les 4 mycotoxines présentées sur le graphique (certains essais faits uniquement sur l'aflatoxine B1 ne sont pas représentés sur la figure). La plupart des travaux indiquent que les teneurs en mycotoxines après nettoyage sont en baisse par rapport à la situation avant nettoyage (i.e. le taux d'abattement est négatif). On trouve toutefois quelques valeurs de taux d'abattement positifs très élevés, jusqu'à 500 % (Le Bras, 2006, concernant les fumonisines). Ces observations sont probablement liées à l'échantillonnage.

L'efficacité du nettoyage est très variable pour le DON et la zéaralénone (les taux d'abattement médians sont de - 17 et - 8 % respectivement, il existe plusieurs observations avec des taux d'abattement positifs). Pour les aflatoxines et les fumonisines, les taux d'abattement médians sont de - 8 % et - 58 %. La variabilité des résultats est importante, entre les essais, et même au sein de chaque essai.

A l'échelle industrielle (Figure 6), on remarque des différences importantes entre études pour le DON et la zéaralénone, alors que pour les aflatoxines et les fumonisines, les résultats se confondent davantage. Pour le DON et la zéaralénone, l'étude faite par l'équipe de Pascale en 2022 est celle qui présente les meilleurs taux d'abattement : ces résultats ont été obtenus en station de semences, en combinant plusieurs appareils (nettoyeur-séparateur, table densimétrique et trieur optique). Le pourcentage de freintes correspondant était d'environ 5 %.

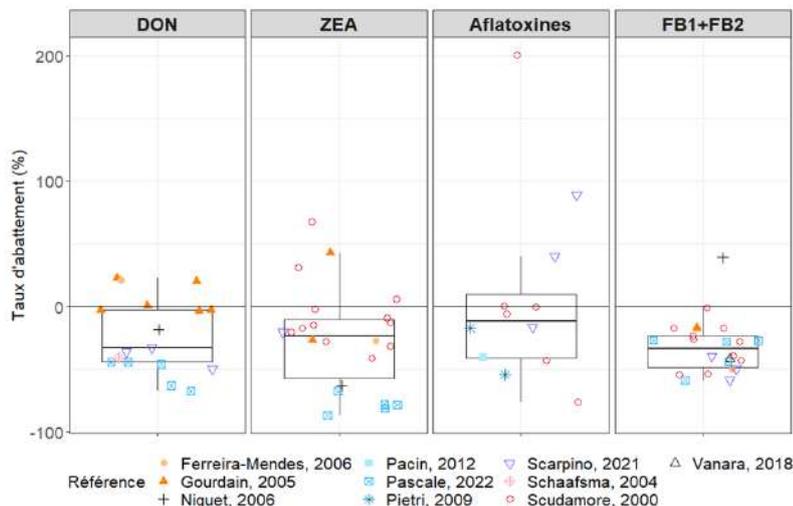


Figure 6 : Taux d'abattement observés dans 10 études sur la décontamination industrielle du maïs

Concernant les aflatoxines, l'efficacité des appareils de tri est très variable : les taux d'abattement vont de - 80 % à +200 % et l'effet médian du nettoyage n'est que de - 3 %. Certains travaux, et notamment l'étude réalisée par Brekke en 1975, ne présentent des résultats que pour l'aflatoxine B1 et ne figurent donc pas sur le graphique : leurs résultats sont comparables à ceux qui sont présentés ici. Des taux d'abattement proches de - 40 % ont été obtenus par *Pietri et al.*, en combinant plusieurs appareils., En 2012, Pacin et Resnik ont obtenu des résultats comparables avec un tamis de 7 mm. Les

pourcentages de déchets obtenus sont de 4,5 et 8 % respectivement.

Le taux d'abattement médian pour les fumonisines est de - 26 %. La majeure partie des observations est regroupée dans l'intervalle de 0 à - 60 %. La technique la plus efficace pour retirer les fumonisines semble être de combiner plusieurs appareils, comme dans l'étude de Pascale *et al.* en 2022 (nettoyeur-séparateur, table densimétrique et trieur optique).



Photo ARVALIS / Nettoyeur-Séparateur

Tableau 2 : Synthèse des résultats pour quatre contaminants du maïs

Echelle	Contaminant	Taux d'abattement médian du nettoyage	Commentaires
Laboratoire / Semi- industrielle	DON	- 17 % (2 études)	En utilisant une table densimétrique après nettoyage, on peut aller jusqu'à - 28 % de taux d'abattement. Pas de données sur le tri optique.
	ZEA	- 8 % (2 études)	Peu de données - Tri densimétrique inefficace (+ 29 % de zéaralénone, 1 seule étude avec lot déjà conforme)
	Aflatoxines	- 41 % (4 études)	Le nettoyage (tamisage et aspiration) est la plus efficace des techniques testées (comparé à aspiration simple et tamisage simple). Pas de données sur le tri par densité ni le tri optique.
	Fumonisines	- 16 % (5 études)	Jusqu'à - 97 % de fumo. en combinant aspiration et tri manuel -> le tri optique pourrait être une solution efficace. La table densimétrique a fait baisser les teneurs en fumonisines de 87 %.
Industrielle	DON	- 1 % (3 études)	Le tri optique semble la méthode la plus efficace (- 63 %)
	ZEA	- 17 % (4 études)	Le tri optique semble la méthode la plus efficace (- 78 %) - Combiner tri optique et table densimétrique présente peu d'intérêt (- 80 %)
	Aflatoxines	- 3 % (1 étude)	En combinant plusieurs appareils, un taux d'abattement de - 36 % a été obtenu. Un essai avec un tamis de 7 mm a permis de réduire les teneurs en aflatoxines de 40 % (Pacin & Resnik, 2012 - pas de répétitions)
	Fumonisines	- 26 % (4 études)	Effet du nettoyage comparable à celui du trieur optique. Le nettoyage suivi d'un passage à la table densimétrique semble la technique la plus efficace

Le nettoyeur-séparateur et la table densimétrique sont assez peu efficaces sur la zéaralénone, à l'échelle du laboratoire comme à l'échelle industrielle. En revanche, le trieur optique, à l'échelle industrielle, permettait de faire baisser la teneur en zéaralénone de 78 %.

Pour les aflatoxines, les résultats du nettoyeur-séparateur en laboratoire et à l'échelle industrielle divergent. Alors qu'en laboratoire, les résultats étaient assez prometteurs, à l'échelle industrielle le taux d'abattement médian n'est que de - 3 %. Seule une étude a testé le nettoyeur-séparateur à l'échelle industrielle, donc compte tenu des résultats des autres expérimentations et du fait que dans cette étude, le niveau de contamination semblait influencer le taux d'abattement (Scudamore, 2000), il pourrait être intéressant de poursuivre les travaux sur le nettoyage industriel du maïs contaminé en aflatoxines.

C'est la table densimétrique qui est l'appareil le plus efficace pour retirer les fumonisines du maïs. A l'échelle industrielle, cette technique peut être utilisée après un passage au nettoyeur-séparateur. Pour des lots dont la teneur dépasse de peu le seuil de 2 000 µg/kg, le nettoyeur-séparateur peut suffire. Par exemple, un lot de maïs dont la teneur en fumonisines serait de 2 400 µg/kg a une forte probabilité (environ 50 %) d'être conforme après nettoyage.



Photo ARVALIS / Trieur optique

► Estimer son besoin en nettoyage pour limiter les freintes

Les opérations de nettoyage et de tri permettent de retirer une part variable des mycotoxines contaminant le blé et le maïs. Selon le niveau de contamination initial, cela n'est pas toujours suffisant pour ramener les lots contaminés en dessous des seuils réglementaires, mais cela reste un préalable nécessaire. Selon l'espèce et le ou les contaminants, les tables densimétriques ou les trieurs optiques peuvent être plus efficaces. Le fait de combiner plusieurs appareils peut aussi avoir un intérêt. Dans tous les cas, il faut trouver un compromis entre l'efficacité sur le ou les contaminants ciblés et la perte de matière due au nettoyage ou au tri. Par ailleurs, les tables densimétriques et trieurs optiques travaillent à des débits très inférieurs à ceux des manutentions des silos. Ce type d'équipement

ne peut donc être envisagé pour une utilisation de routine dans les installations de stockage. Ils peuvent en revanche être complémentaires des nettoyeurs-séparateurs couramment installés sur les sites de stockage, soit sur des lots identifiés comme très contaminés (après un travail d'allotement) ou pour valoriser les petits grains issus du nettoyage de lots contaminés.

Les opérateurs peuvent utiliser ces données pour estimer leur besoin de nettoyage et ainsi choisir le matériel adapté. Par exemple, pour le blé, 95 % des lots contiennent moins de 1 610 µg/kg de DON (EFSA, 2013). Pour passer de 1 610 à 1 250 µg/kg, le seuil réglementaire européen, il faut retirer au moins 22 % du DON. Vu que le taux d'abattement médian du nettoyage est de - 35 % (à l'échelle industrielle), on peut considérer que le nettoyage est suffisant pour remettre une grande majorité des lots de blé français en conformité.

A quoi ressemblent les grains infectés par des champignons ?

En se développant à l'intérieur des grains, les hyphes de champignons consomment une partie des ressources de la plante, ce qui peut d'une part limiter la croissance des épis et des grains, et d'autre part faire baisser la densité du grain. C'est pourquoi le fait d'aspirer, tamiser ou trier le grain par sa densité ont une efficacité sur les mycotoxines. Par exemple, on estime que pour le blé, la densité des grains contenant plus de 3 900 ppb de DON est significativement plus faible que celle des grains contenant moins de DON.

Pour ce qui est de la taille des grains, le mode d'infection particulier d'*Aspergillus flavus* sur les épis de maïs (cf. Lettre Stock@ge n° 19, septembre 2022) fait que les grains contaminés sont généralement parmi les plus petits d'un lot.

La couleur des grains est aussi affectée par les infections fongiques. Typiquement, les grains de blé fusariés, qui constituent une des catégories d'impuretés de la norme NF 15587, se distinguent par une couleur soit rose avec



un aspect racorni, soit blanche avec un aspect crayeux. Une étude réalisée en 2007 (Beyer *et al.*, 2007) a montré une forte corrélation entre le pourcentage de grains fusariés et la teneur en DON. Toutefois, selon les variétés et leur mode de défense face aux *Fusarium spp.*, les grains peuvent montrer les symptômes sans contenir de DON, ou inversement (Lesnik *et al.*, 2014). Ce cas de figure existe également pour les fumonisines sur maïs, où des grains ayant peu de symptômes ont parfois des teneurs très élevées en fumonisines.

Figure 7 : Les grains de blé fusariés peuvent avoir une couleur rose typique. Ils sont aussi flétris et plus légers que les grains sains. Mais les grains présentant des symptômes d'infection par *Fusarium spp.* ne sont pas les seuls à contenir des toxines !

Rappel des seuils réglementaires concernant les mycotoxines dans les céréales destinées à l'alimentation humaine et animale

Dans l'Union Européenne, c'est le règlement CE n° 2023/915 du 25 avril 2023 qui fixe les teneurs maximales pour certains contaminants, dont les mycotoxines, dans les denrées alimentaires (c'est-à-dire des produits destinés à l'alimentation humaine). Selon ce règlement, les denrées alimentaires ne peuvent être mises sur le marché ni utilisées comme matières premières ou ingrédients de denrées alimentaires si ces seuils sont dépassés pour un ou plusieurs contaminants. Ce règlement établit aussi que les denrées alimentaires conformes ne doivent pas être mélangées avec des denrées dont les teneurs maximales sont dépassées, ni décontaminées par un procédé chimique

Pour les matières premières destinées à l'alimentation animale, seule l'aflatoxine B1 est réglementée par un seuil contraignant (directive 2002/32). Pour les autres toxines, la Commission Européenne a simplement émis des recommandations (Recommandation 2016/319). Le Tableau 3 récapitule les seuils fixés par ces textes pour les céréales brutes, destinées à être transformées avant d'arriver au consommateur final.

Tableau 3 : Teneurs maximales en mycotoxines dans les matières premières destinées à l'alimentation humaine ou à l'alimentation animale (en gras les seuils obligatoires, en police normale les seuils recommandés)

Produit	Substance	Alimentation humaine Teneur maximale Selon le règlement n° 2023/915 (µg/kg)	Alimentation animale Teneur maximale (mg/kg)
Toutes céréales	Ochratoxine A	5	0.25
Céréales autres que maïs	Déoxynivalénol	1 250 (sauf blé dur et avoine : 1 750)	8
	Zéaralénone	100	2
	Fumonisines (FB1+FB2)	-	-
	Aflatoxine B1	2	0.02
	Aflatoxines totales	4	-
Maïs	Déoxynivalénol	1750	12
	Zéaralénone	350 (sauf amidonnerie)	2 (3 pour les sous-produits du maïs)
	Fumonisines (FB1+FB2)	4 000 (sauf amidonnerie)	60
	Aflatoxine B1	5	0.02
	Aflatoxines totales	10	-

Amélie TANGUY - a.tanguy@arvalis.fr

Références

Comptes-Rendus ARVALIS, non publiés

- Ferreira-Mendes F., 2006, L'incidence du nettoyage sur les teneurs en mycotoxines du maïs et céréales à paille.
- Gourdain E., 2005, Bilan des essais nettoyage réalisés entre 2004 et 2005 par Arvalis - Institut du Végétal.
- Gourdain E., 2005, Incidence du nettoyage du blé tendre au silo sur la contamination en trichothécènes et en micro-flore - CR Arvalis.
- Gourdain E., 2006, Incidence du nettoyage du blé tendre au silo sur la contamination en trichothécènes et en micro-flore - CR Arvalis Q8.
- Le Bras A., 2006, Incidence du nettoyage sur la teneur en mycotoxines.
- Tanguy A., 2021, Le nettoyage permet-il de réduire la contamination en aflatoxines d'un lot de maïs ?

Publications scientifiques

- Abbas H.K., Mirocha C.J., Pawlosky R.J., Pusch D.J., 1985, Effect of cleaning milling and breadbaking on deoxynivalenol in wheat, Applied and environmental microbiology, Vol. 50, No. 2.
- Aoun M., Stafstrom W., Priest P., Fuchs J., Windham G.L., Paul Williams W., Nelson R.J., 2020, Low-cost grain sorting technologies to reduce mycotoxin contamination in maize and groundnut, Food Control.
- Brekke O.L., Peplinski A.J., Griffin E.L., 1975, Cleaning trials for corn containing aflatoxin, American Association of Cereal Chemists.
- Brodal G., Udnes Aamot H., Almvik M., Skow Hofgaard I., 2020, Removal of small kernels reduces the content of Fusarium mycotoxins in oat grain, Toxins.
- Delwiche S.R., Pearson T.C., Brabec D.L., 2005, High-speed optical sorting of soft wheat for reduction of deoxynivalenol, Plant Disease.
- Fandohan P., Zoumenou D., Hounhouigan D.J., Marasas W.F.O., Wingfield M.J., Hell K., 2005, Fate of aflatoxins and fumonisins during the processing of maize into food products in Benin, International Journal of food microbiology.

Publications scientifiques (Suite)

- Generotti S., Cirlini M., Dall'Asta C., Suman M., 2015, Influence of the industrial process from caryopsis to cornmeal semolina on levels of fumonisins and their masked forms, Food Control.
- Johansson A.S., Whitaker T.B., 2006, Predicting aflatoxin and fumonisin in shelled corn lots using poor-quality grade components, Journal of AOAC International.
- Lesnik M., Cencic A., Vajs S., Simoncic A., 2008, Milling and bread baking techniques significantly affect the mycotoxin (deoxynivalenol and nivalenol) level in bread, Acta Alimentaria.
- Lesnik M., Vajs S., Kramberger B., Zerjav M., Zemljic A., Simoncic A., Kolmanic A., 2014, *Fusarium* infected grain removal efficacy in cleaning wheat grain prior to milling, Zemdiryste-Agriculture, Vol. 101, No. 3.
- Pacin A.M., Resnik S.L., 2012, Reduction of mycotoxin contamination by segregation with sieves prior to maize milling, in Novel technologies in food science: their impact on products, consumer trends and the environment, Chapter 10.
- Pascale M., Haidukowski M., Lattanzio V.M.T., Silvestri M., Ranieri R., Visconti A., 2011, Distribution of T-2 and HT-2 Toxins in milling fractions of Durum wheat, Journal of Food Protection, Vol. 74, No. 10.
- Pascale M., Logrieco A.F., Lippolis V., De Girolamo A., Cervellieri S., Lattanzio V.M.T., Ciasca B., Vega A., Reichel M., Graeber M., Slettengren K., 2022, Toxins.
- Pearson T.C., Wicklow D.T., Brabec D.L., 2010, Technical note: characteristics and sorting of white food corn contaminated with mycotoxins, Applied engineering in agriculture, Vol. 26 (1).
- Pearson T.C., Wicklow D.T., Pasikatan M.C., 2004, Reduction of aflatoxin and fumonisin contamination in yellow corn by high-speed dual-wavelength sorting, Cereal Chemistry.
- Piedade F.S., Fonseca H., Glória E.M., Calori-Domingues M.A., Piedade S.M.S., Barbin D., 2002, Distribution of aflatoxins in contaminated corn fractions segregated by size, Brazilian Journal of microbiology.
- Pietri A., Zanetti M., Bertuzzi T., 2009, Distribution of aflatoxins and fumonisins in dry-milled maize fractions, Food additive and contaminants.
- Seitz, L. M., Eustace, W. D., Mohr, H. E., Shogren, M. D., & Yamazaki, W. T. (1986). Cleaning, milling, and baking tests with hard red winter wheat containing deoxynivalenol. *Cereal Chemistry*, 63(2), 146-150.

Références réglementaires

Alimentation animale

- Arrêté du 12 janvier 2001 fixant les teneurs maximales pour les substances et produits indésirables dans l'alimentation des animaux (NOR : ECOC0000124A).
- Directive 2002/32/CE du parlement européen et du conseil du 7 mai 2002 sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux.
- Recommandation 2016/1319 de la Commission du 29 juillet 2016 modifiant la recommandation 2006/576/CE en ce qui concerne le déoxynivalénol, la zéaralénone et l'ochratoxine A dans les aliments pour animaux familiers.

Alimentation humaine

- Règlement UE 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) n°1881/2006.

Un des intérêts du nettoyage des grains, par aspiration et / ou par triage est d'améliorer la performance de la ventilation. Voyons dans quelle mesure cette opération est pertinente.

Lors du remplissage d'un contenant, case à plat ou cellule de stockage, par un système de manutention, une ségrégation des grains et des impuretés s'opère, la porosité du milieu n'est alors plus homogène.

► Des mécanismes physiques complexes à l'œuvre pendant le chargement des cellules

Jian et al. (2021) décrivent dans leur publication, « *implication of dockage and foreign material distribution for fumigation and controlled atmosphere storage of grain in bins* » les principaux mécanismes de ségrégation qui se produisent lors du remplissage d'une cellule. On peut citer entre autres des phénomènes de roulement, de glissement, d'incrustation, d'avalanche, d'impact, de déplacement par courant d'air, de différence de trajectoires en fonction de la taille et de la densité des particules. Plusieurs de ces mécanismes se produisent simultanément, rendant ces interactions de ségrégation

complexes à décrire. Il en résulte généralement, dans les cellules rondes remplies par un flux de matière centré, une concentration importante des petites particules de forte densité au centre de la cellule tandis que les grosses particules de faible densité se retrouvent plutôt en périphérie du tas de grains. Ce type de répartition induit des résistances à l'écoulement de l'air différentes entre le centre et les bords de la cellule. L'accroissement de la présence de fines particules au centre augmente les pertes de charge tandis que la présence accrue des matériaux de faible densité diminue ces dernières en périphérie.

► Le lien entre brisures et pertes de charge pour le maïs est quantifié depuis les années 1980

Ce phénomène d'augmentation des pertes de charges liées à la présence de brisures est également décrit par Grama et al. (1984) dans leur article « *airflow resistance of mixture of shelled corn and fines* ». Leurs essais consistent à introduire, dans un premier temps une proportion croissante de brisures présentant un même profil granulométrique dans un lot de maïs grain, puis dans un second temps de faire varier la proportion de particules de petites taille (appelées « fines ») dans la fraction de brisures introduites. Il en résulte pour le premier, une augmentation des pertes de charge en fonction du pourcentage d'incorporation de brisures quel que soit le débit spécifique du ventilateur (Figure 1).

En mécanique des fluides, la perte de charge correspond à la dissipation de l'énergie mécanique d'un fluide en mouvement. Le plus souvent, le terme de perte de charge quantifie la perte de pression, entre deux points distants, générée par les frottements du fluide sur la paroi interne d'un circuit d'air.

(Source Wikipédia)

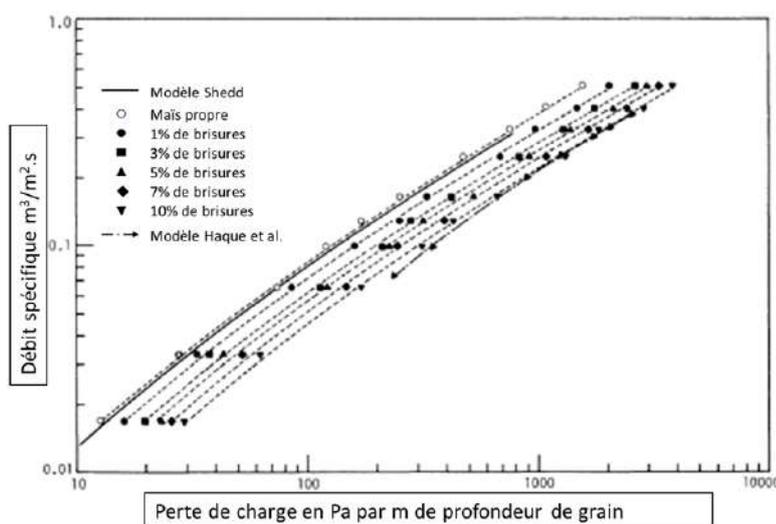
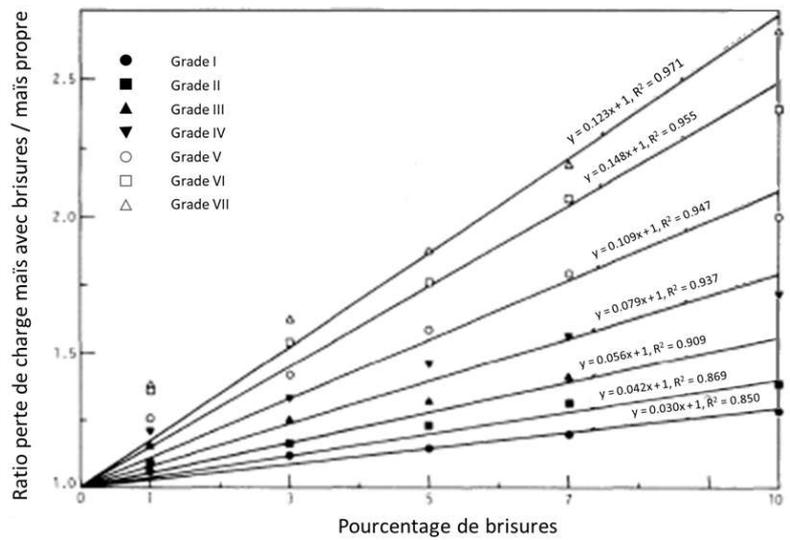


Figure 1 : Evolution des pertes de charges en fonction du pourcentage d'incorporation de brisures à différents débits spécifiques (Extrait de Grama et al., 1984)

La seconde expérience montre quant à elle que les pertes de charges sont d'autant plus fortes que la proportion de particules fines dans les brisures est élevée (Figure 2). Le grade I correspond à du maïs propre dans lequel on incorpore uniquement les fractions les plus grosses des brisures. On ajoute progressivement les fractions de plus en plus fines au fur et à mesure qu'on augmente de grade jusqu'au grade VII. Pour ce dernier, la granulométrie des brisures correspond à la moyenne des brisures habituellement retrouvées dans le maïs grain.

Nalladurai *et. al.* Dans leur article « *airflow resistance of paddy and its byproducts* » confirment ce phénomène sur le riz. Leur étude montre également que les pertes de charge augmentent avec la présence de brisures. La présence de pailles impacte plus faiblement la diminution des pertes de charge et donc les flux d'air.

Figure 2 : Evolution du ratio de pertes de charges en fonction de la granulométrie des brisures et de leur taux d'incorporation (Extrait de Grama *et al.*, 1984)



▶ Des mesures de l'effet du nettoyage sur la ventilation du blé en conditions réelles

Le nettoyage des grains, en retirant une partie des impuretés améliore les conditions de circulation de l'air lors de la ventilation. Cette amélioration se mesure sur deux critères. Le premier est une diminution globale des pertes de charges du circuit qui, au regard des courbes caractéristiques de fonctionnement des ventilateurs, entraîne une augmentation du débit de ce dernier. Le second est la réduction de l'hétérogénéité de la porosité de la masse de grain qui améliore l'homogénéité de la circulation de l'air et par conséquent limite les zones où le grain risque d'être peu ou mal refroidi. Ces effets du nettoyage ont été mis en évidence à travers un essai réalisé sur la plate-forme métiers du grain en novembre 2023.

Un lot de blé variété Forcali de la récolte 2023 a été récolté en dérégulant la moissonneuse batteuse, (serrage des contres batteurs, diminution des vents et resserrage des grilles) afin d'obtenir un lot volontairement sale. Ce lot de 40 T a été ensilé dans une cellule métallique de 3.60 m de diamètre et de 7 m de hauteur. Le lot a été échantillonné avec un échantillonneur traversier avant et après passage au nettoyeur séparateur pour le caractériser (PS et teneur en impuretés). Des mesures de vitesses d'air ont été réalisées dans la conduite d'adduction d'air au ventilateur selon la méthode normalisée, à une distance de cinq fois le diamètre en amont de la première singularité. Une deuxième série de mesures de vitesses a été réalisée sur le sommet du tas de grains dans la cellule selon deux diamètres perpendiculaires, les diamètres ont été positionnés de façon à inclure le sommet du tas et le point le plus bas. Sept points de mesures ont été réalisés par diamètre (Figure 3).



Photo ARVALIS / Moissonneuse batteuse : écart batteur - contre-batteur

La pointe du tas de grains n'a pas été aplaniée. Une mesure de pression statique correspondant aux pertes de charges globales du circuit a été réalisée en sortie de ventilateur. Le lot est ensuite passé sur un nettoyeur séparateur Denis NSD2 à demi-débit en réalisant un nettoyage soigné avant d'être réensilé dans la même cellule. Les mesures aérauliques ont été répétées dans les mêmes conditions après nettoyage du lot.

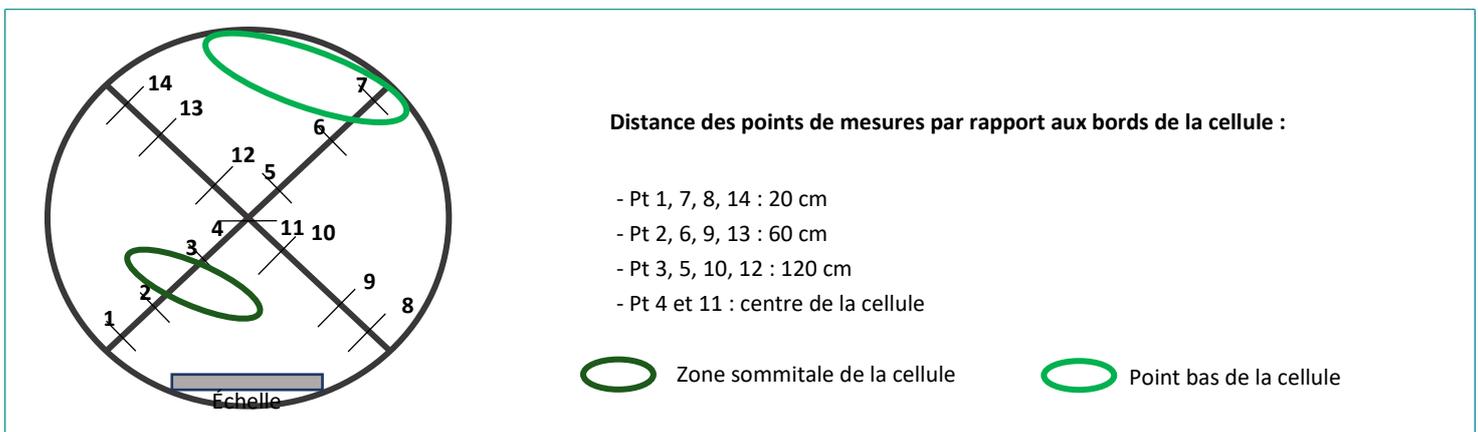


Figure 3 : Positionnement des points de mesures sur le dessus du tas de grains

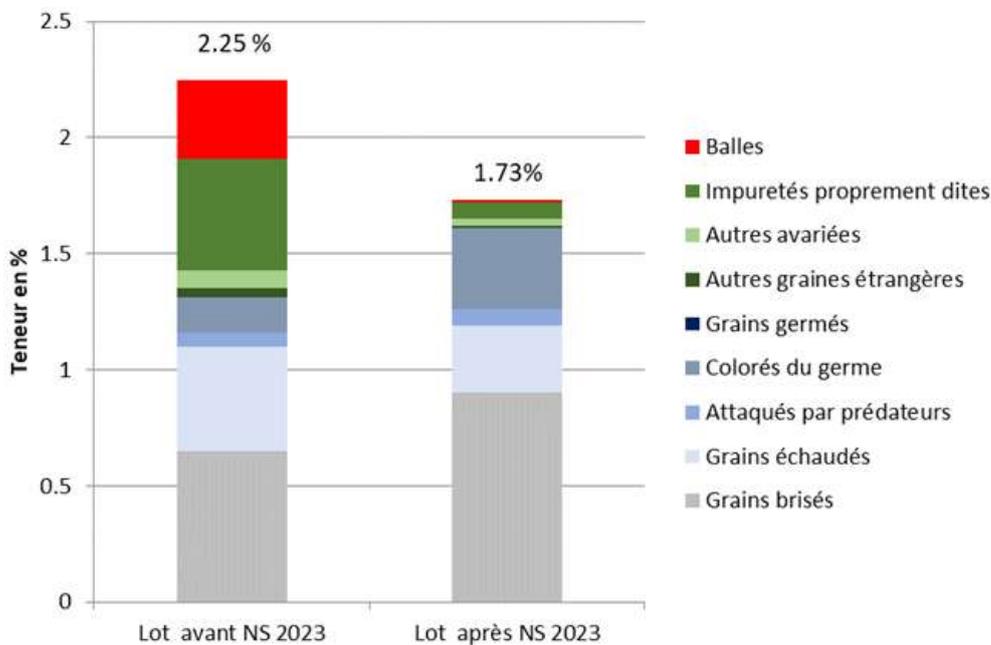


Figure 4 : Evolution de la teneur en impuretés avant / après nettoyage

Figure 5. Plus précisément, avant nettoyage, on observait des vitesses d'air nulles ou très faibles au sommet du tas de grains et un passage préférentiel de l'air au niveau du point 7 (Figure 6). Après nettoyage, il y a de l'air qui circule à tous les points de mesure, avec des vitesses beaucoup plus homogènes (Figure 7).



La teneur en impuretés initiale du lot était relativement faible, 2,25 %, mais contenant une forte proportion de balles et d'impuretés proprement dites. Le passage au nettoyeur séparateur a permis de faire fortement baisser ces deux sous catégories d'impuretés (Figure 4).

Le nettoyage de ce lot a permis de faire baisser les pertes de charge exprimées en pression statique de 3,0 %, ce qui a permis un gain de débit spécifique de 8,1 %.

La cartographie des vitesses d'air mesurées sur le dessus du tas indique clairement une amélioration de l'homogénéité des vitesses d'air bien que le tas n'ait pas été arrasé. Elles sont beaucoup plus homogènes après nettoyage, comme le montre la

Le nettoyage des grains contribue incontestablement à limiter les infestations dans les céréales stockées. En ôtant les impuretés des grains, ce procédé impacte fortement les insectes secondaires ou à formes libres, qui nécessitent pour survivre la présence de grains brisés ou de fines particules dans le lot de céréales colonisé. Parmi ces insectes, les triboliums roux (*Tribolium castaneum*) et silvains dentelés (*Oryzaephilus surinamensis*) sont les espèces les plus répandues dans les silos français.

Plusieurs études démontrent que plus la quantité d'impuretés dans un lot est importante, meilleur sera le développement des populations de ces insectes. McGregor (1964) a établi une corrélation positive entre le nombre de triboliums roux et le taux d'impuretés dans un lot. De surcroît, la teneur en impuretés peut influencer sur le déplacement des insectes secondaires dans le stock. Watters (1969) a constaté une concentration de petits silvains plats (*Cryptolestes ferrugineus*) dans du grain brisé, dans lequel ils peuvent se nourrir, pondre et se développer plus facilement que sur des grains entiers. Enfin, Sinha (1975) a testé l'effet de différents niveaux de propreté des lots sur le développement d'infestations et il a observé que le silvain dentelé et le tribolium roux proliféraient davantage sur les lots avec une forte teneur en impuretés de céréales.

Marine CABACOS - m.cabacos@arvalis.fr

Sources

- McGregor HE, 1964. Preference of *Tribolium castaneum* for wheat containing various percentages of dockage. *Journal of Economic Entomology*, 57 (4), 511-513
- Sinha RN, 1975. Effect of dockage in the infestation of wheat by some stored-product insects. *J Econ Entomol* 68:699-703
- Watters FL, 1969. The locomotor activity of *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Cucujidae) dans le blé. *Canadian Journal of Zoology*, 47, 1177-1182

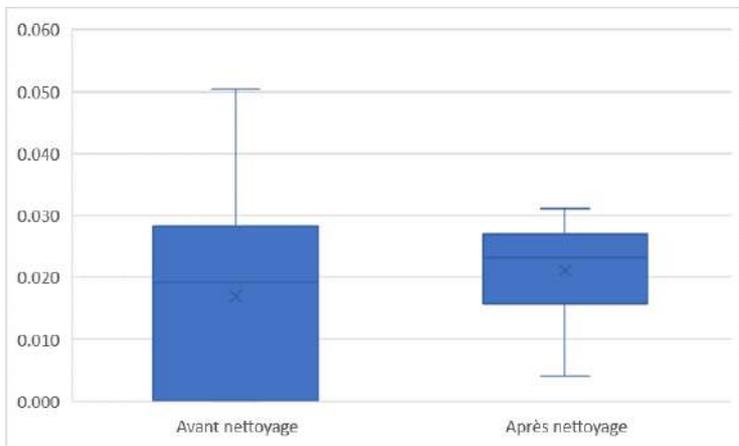


Figure 5 : Répartition des vitesses d'air avant et après nettoyage sur le dessus du grain



Photo ARVALIS / Tas de grains avant et après nettoyage



Figure 6 : Cartographie des vitesses d'air sur le tas de grains avant nettoyage

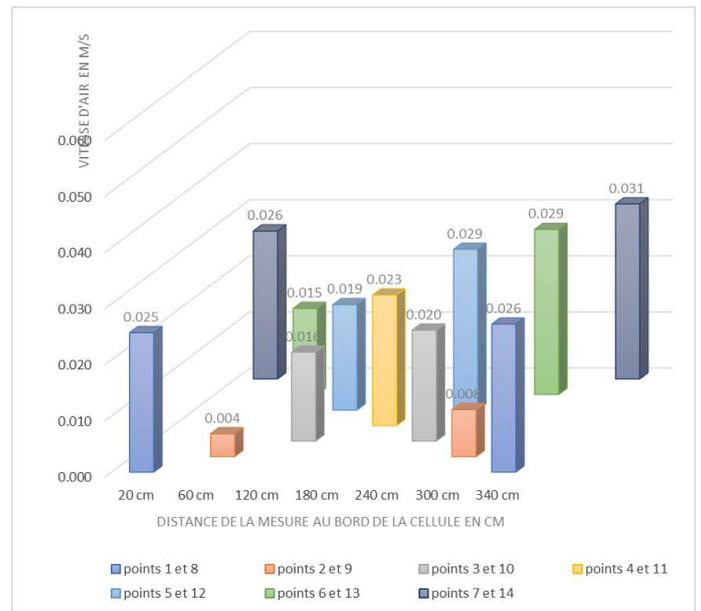


Figure 7 : Cartographie des vitesses d'air sur le tas de grains après nettoyage

Conclusion : La présence d'impuretés telles que les balles ou les brisures, et particulièrement la fraction la plus fine de ces dernières, engendre des pertes de charges supplémentaires lors de la ventilation qui diminuent ses performances : les débits et les débits spécifiques diminuent ce qui augmente les durées de ventilation et fait baisser la performance énergétique de cette dernière.

Par ailleurs, la répartition des impuretés dans la cellule est hétérogène du fait de la ségrégation des particules lors du remplissage. Il y a de ce fait une hétérogénéité des résistances à l'écoulement de l'air, ce qui crée des zones peu ou mal ventilées dans les stocks refroidis.

Le nettoyage des grains permet de réduire la teneur en impureté des grains, améliorant ainsi les performances de la ventilation : augmentation du débit et du débit spécifique, réduction de la durée du palier, amélioration des performances énergétique et homogénéisation des vitesses d'air. La ventilation est ainsi plus efficace et de meilleure qualité.

Jean-Yves MOREAU - jy.moreau@arvalis.fr