



SOMMAIRE

Nettoyage et impuretés : prédire l'effet du nettoyage pour optimiser les décisions en OS Pages 1 - 4

Peut-on déterminer la teneur en impuretés d'un lot à l'aide de méthodes rapides ? Pages 5 - 7



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>

NETTOYAGE ET IMPURETÉS : PRÉDIRE L'EFFET DU NETTOYAGE POUR OPTIMISER LES DÉCISIONS EN OS

Le nettoyage permet d'améliorer la qualité du grain, en agissant sur plusieurs critères de qualité différents : poids spécifiques, contaminants sanitaires, insectes, ou tout simplement impuretés. Quelle est son efficacité sur les teneurs en impuretés ? Depuis 2015, ARVALIS a réalisé plusieurs expérimentations pour mesurer l'effet du nettoyage sur les teneurs en impuretés du blé tendre, telles que définies par la norme NF EN 15587. Les 90 lots de blé nettoyés sur notre site de Boigneville ont servi à construire des modèles de l'effet du nettoyage sur les teneurs en grains brisés, en impuretés constituées par des grains et en impuretés diverses. Nous sommes ainsi en mesure de prédire, à partir d'une mesure préalable des teneurs en impuretés d'un lot, les teneurs en impuretés qu'on obtiendrait après nettoyage.

Les modèles, construits avec les données obtenues sur notre site d'expérimentation, ont été validés grâce à la participation d'un groupe d'agriculteurs et de responsables de silo volontaires, sur des nettoyeurs séparateurs équipant des installations de stockage.

6 ans d'expérimentation sur le site de Boigneville pour constituer une importante base de données

Entre 2015 et 2021, 90 lots de blé tendre de 5 à 10 tonnes ont été nettoyés sur notre site de Boigneville (91), sur trois appareils différents. Des échantillons étaient prélevés sur circuit avant et après le passage au nettoyeur-séparateur, en conservant une pression d'échantillonnage constante de 1 échantillon par tonne de blé. Les teneurs en impuretés selon la norme NF EN 15587 étaient mesurées sur chaque échantillon (figure 1). Cette norme définit quatre catégories principales d'impuretés : les grains brisés, les impuretés constituées par des grains, les grains germés et les impuretés diverses.

Les trois appareils utilisés, les jeux de grilles et les débits appliqués sont présentés dans le tableau 1, ainsi que la répartition des lots nettoyés dans ces différentes conditions. Le plein débit est d'au moins 60 % du débit nominal, et le débit réduit est strictement inférieur à 60 % du débit nominal. Le nettoyeur-séparateur à mouvement planétaire est le seul des trois appareils à avoir été testé avec deux jeux de grilles différents. Pour la description statistique des données, on considère qu'il y a deux appareils différents, selon les grilles utilisées.

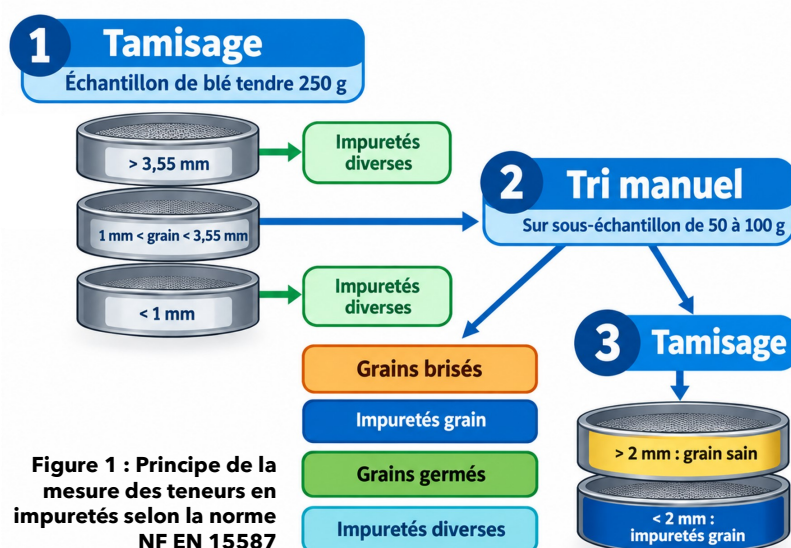


Figure 1 : Principe de la mesure des teneurs en impuretés selon la norme NF EN 15587

Tableau 1 : Expérimentations ARVALIS - Répartition des lots de blé nettoyés sur les différents appareils et réglages de grille et de débit

Appareil	Grilles d'émottage	Grilles de criblage	Débit	Nombre de lots nettoyés
Nettoyeur-séparateur plan - Denis NS D2 - 50 t/h	4,5*20 mm 4*20 mm	2,1*20 mm Trous ronds 3 mm	Plein : 30 à 50 t/h	33
			Réduit : 20 t/h	5
Nettoyeur-séparateur rotatif - Marot EAC 153 - 15 t/h	Trous ronds 8 mm Trous ronds 7 mm	Trous longs de 2,1*20 mm	Plein : 12 t/h	16
			Réduit : 7 t/h	7
Nettoyeur-séparateur plan à mouvement planétaire - Schneider-Jacquet SNST 550 - 50 t/h	Très soigné : Trous ronds 8 mm	Très soigné : Trous longs 2,2*20 mm	Plein : 20 à 25 t/h	8
			Réduit : 12 t/h	6
	Sommaire : Trous ronds 12 mm	Sommaire : Trous longs 1,5*20 mm	Plein : 40 à 55 t/h	8
			Réduit : 18 à 21 t/h	7

A l'échelle pilote, jusqu'à 18 % d'impuretés en moins grâce au nettoyage

Les freintes représentaient en moyenne 0,95 % du tonnage de départ. Selon les lots, cela variait entre 0,1 et 4,6 %. Cette valeur maximale de 4,6 % de freinte est exceptionnelle, elle correspondait à un lot particulièrement riche en impuretés. Le reste des nettoyages générait au plus 2,9 % de freinte. A débit nominal, le nettoyage générait en moyenne 0,8 % de freintes. A demi-débit, les freintes représentaient en moyenne 1,4 % du tonnage initial.



Avant nettoyage, les lots de blé contenaient en moyenne 2 % de grains brisés, 2,9 % d'impuretés grains, 0,27 % de grains germés et 0,84 % d'impuretés diverses. Les impuretés grains étaient principalement des grains échaudés. Les impuretés diverses étaient quant à elles principalement des grains avariés. Les teneurs en grains brisés variaient entre 0,36 % et 7,2 %. Cette valeur maximale très élevée est très loin d'être la norme : environ 80 % des lots étudiés contenaient moins de 3 % de grains brisés. Les teneurs en impuretés grains variaient entre 0,45 % et 12,8 %. Là encore, la valeur maximale relève presque de l'exception, puisque 90 % des lots contenaient moins de 6,1 % d'impuretés grains. Les teneurs en grains germés variaient entre 0 % et 2,7 %, et celles en impuretés diverses entre 0,13 % et 3 %.

Tableau 2 : Teneurs moyennes en impuretés avant et après nettoyage

Catégorie	Blé avant nettoyage (%)	Blé après nettoyage (%)	Taux de réduction moyen (%)
Grains brisés	2,0	1,8	10
Impuretés grains	2,9	2,5	11
Grains germés	0,27	0,29	Pas d'effet significatif du nettoyage
Impuretés diverses	0,84	0,69	18

grains germés ont des dimensions identiques à celles des bons grains¹, et ne sont donc pas discriminés par les grilles.

Le fait de **nettoyer à demi-débit permettait de retirer davantage d'impuretés grains**. En moyenne, le nettoyage à débit nominal permettait de retirer 9 % des impuretés grains, et le nettoyage à demi-débit 18 %. **En revanche, le débit n'avait pas d'effet significatif sur les grains brisés, et son effet sur les impuretés diverses dépendait de l'appareil utilisé.**

Des modèles statistiques qui reflètent bien les données expérimentales

Les teneurs en impuretés du blé déterminent le niveau de réfraction appliquées et éventuellement le déclassement d'un lot. Pour prédire l'intérêt ou non de nettoyer un lot de blé, la variable à prédire est donc la teneur en impuretés après nettoyage. Pour cela, on dispose de trois variables prédictives : la teneur en impuretés avant nettoyage, le débit et l'appareil. L'appareil est connu dans notre expérience, mais pour généraliser ces modèles statistiques à d'autres appareils ou d'autres réglages de grilles, il faut pouvoir s'affranchir de cette information. On va donc retenir comme prédicteurs uniquement la teneur en impuretés avant nettoyage et le débit (nominal ou réduit).

¹ Martin C., Herrman T.J., Loughin T., Oentong S. (1998). Micropycnometer Measurement of Single-Kernel Density of Healthy, Sprouted and Scab-damaged Wheats. Cereal Chemistry, Vol. 75, Issue 2: p. 177-180; <https://doi.org/10.1094/CHEM.1998.75.2.177>

Tableau 3 : Les modèles prédictifs des impuretés après nettoyage sont évalués sur la base de leur précision (RMSE), qui doit être la plus faible possible

Pour évaluer les performances des modèles, on calcule la précision (RMSE). Cet indicateur mesure à quel point les prédictions des modèles sont éloignées des observations. La RMSE s'exprime ici en points de pourcentage. Les modèles finaux permettent de prédire les teneurs en grains brisés avec une précision de $\pm 0,27$ point (tableau 3). Les teneurs en impuretés grains étaient prédites avec une précision de $\pm 0,36$ point, et les impuretés diverses avec une précision de $\pm 0,12$ point.

Si vous souhaitez faire ces calculs sur votre site, voici les équations qui permettent de prédire les teneurs en impuretés après nettoyage. Ces équations sont sous la forme suivante :



Si débit $\geq 60\%$ du débit nominal : $\text{Impuretés}_{\text{après}} = a + b \times \text{Impuretés}_{\text{avant}}$
 Si débit $< 60\%$ du débit nominal : $\text{Impuretés}_{\text{après}} = a + b \times \text{Impuretés}_{\text{avant}} + c$

**Tableau 4 :
Coefficients des
modèles de
prédiction des
impuretés après
nettoyage**

Catégorie	a	b	c	Précision (RMSE OS)
Grains brisés	0,01616	0,9099	0	±0,26
Impuretés grains	0,0014	0,9336	-0,4411	±0,96
Impuretés diverses	-0,0723	0,9130	-0,0562	±0,32

▶ *Des modèles validés sur sites industriels et fermiers*

Les partenaires de notre projet nous ont fourni des échantillons de blé tendre prélevés avant et après nettoyage selon un protocole commun, défini en concertation avec eux. Nous avons reçu des échantillons pour caractériser le nettoyage de 9 lots de blé différents. Le tableau 5 présente les appareils, grilles et débits utilisés pour ces opérations de nettoyage. Les teneurs en impuretés mesurées sur les échantillons avant et après nettoyage sont représentées par un figuré bleu dans la figure 2.

Tableau 5 : Détail des appareils, grilles et réglages utilisés pour la validation des modèles

Type de nettoyeur - séparateur	Modèle de l'appareil	Grille d'émottage	Grille de criblage	Débit	Nombre de lots nettoyés
Plan	Denis D100	4,5*20 mm	2,1*20 mm	Nominal	0
				Réduit	2
Rotatif	FAO 703 Ep.BCZ50	Trous ronds 6,5 mm Trous ronds 7 mm	1,5*20 mm	Nominal	0
				Réduit	1
	Marot C5/1260	Trous ronds 10 mm Trous ronds 9 mm Trous ronds 8 mm	Trous ronds 3,5 mm	Nominal	2
				Réduit	0
A mouvement planétaire	Schneider-Jacquet SNST 1150	Trous ronds 12 mm	?	Nominal	0
				Réduit	1
	Schneider-Jacquet SNST 200	Trous ronds 6 mm	1,75*20 mm	Nominal	0
				Réduit	2
	Schneider-Jacquet SNST 2150	Trous ronds 14 mm	2*20 mm	Nominal	1
				Réduit	0

PEUT-ON DÉTERMINER LA TENEUR EN IMPURETÉS D'UN LOT À L'AIDE DE MÉTHODES RAPIDES ?

Les contrats commerciaux définissent des seuils d'impuretés à ne pas dépasser. Par exemple, pour le blé tendre vendu en meunerie, les seuils habituels sont de 4 % de grains brisés, 2 % de grains germés et 2 % d'impuretés commerciales. La référence officielle pour la mesure des teneurs en impuretés est la norme NF 15587. Cette méthode qui repose sur une succession de tamisage et de tri manuel nécessite du personnel formé, ou de faire appel à un laboratoire externe. Dans tous les cas, il y a un délai avant d'avoir les résultats. Le tamisage, sur de simples tamis ou à l'aide d'un nettoyeur-séparateur de laboratoire, est parfois utilisé pour apprécier la propreté d'un lot. Quelles relations existent-ils réellement entre ces mesures de tamisage et la teneur réelle en impuretés, telle que mesurée par la méthode de référence ? A partir d'une base de données de mesures des teneurs en impuretés sur 72 lots de blé tendre, ARVALIS a tenté de répondre à cette question.

► Tamisage ou nettoyeur-séparateur de laboratoire ? Trois modalités d'analyse étudiées

On dispose de données pour 72 lots de 10 t blé tendre. Des échantillons prélevés dans chaque lot par un échantillonneur de circuit ont permis de mesurer les teneurs en impuretés selon la norme NF 15587, et de tester trois méthodes d'analyse rapide. Ces méthodes, détaillées dans le tableau 1, consistent soit à tamiser l'échantillon, soit à le passer dans un nettoyeur-séparateur de laboratoire, en l'occurrence un appareil Quatuor II, mis à disposition par Chopin Technologies., équipé de deux jeux de tamis (T1 et T2 dans le tableau 1).

La méthode par tamisage consiste à tamiser un échantillon de 100 g sur un jeu de 3 tamis (tableau 1, figure 2). L'échantillon est tamisé manuellement, pendant 30 s, avec des mouvements de va-et-vient dans le sens des fentes, avec une cadence d'un mouvement arrière et avant par seconde. Chaque analyse par tamisage est répétée une fois.

Tableau 1 : Détail des analyses réalisées pour construire un indicateur de salissement (les noms des variables étudiées font référence à la figure 1 pour le Quatuor II, et à la figure 2 pour le tamisage)

Analyse	Tamis	Variables étudiées
Quatuor II – programme blé tendre	T1 : 2,2 x 20 mm et 3,75 x 20 mm	• a+b+d (total déchets) • a+d (aspiration + émottage) • b (criblures)
Quatuor II – programme blé tendre	T6 : 2.0 x 20 mm et 3,50 x 20 mm	
Tamisage	3 tamis à fentes oblongues de 3,5 mm, 2 mm et 1 mm	• Sup. 3,5 + Inf. 2 mm (refus tamis 3,5 mm + extraction tamis 2 mm) • Inf. 2 mm (extraction tamis 2 mm) • Sup. 3,5 mm (refus tamis 3,5 mm) • Sup. 1 mm (refus tamis 1 mm) • Inf. 1 mm (extraction tamis 1 mm)

Figure 1 : Le Quatuor II, un nettoyeur-séparateur de laboratoire qui sépare un échantillon en 4 fractions

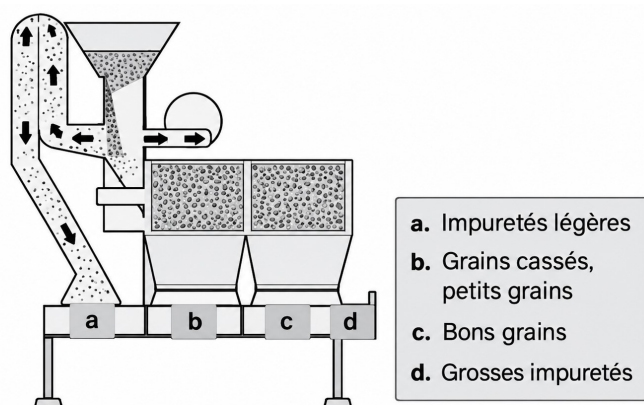
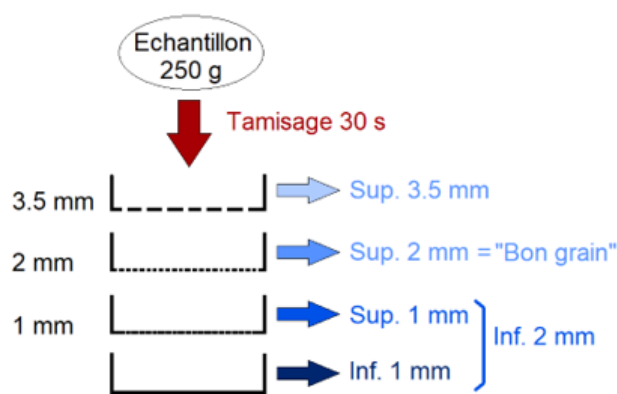


Figure 2 : Jeu de tamis utilisés pour construire un indicateur de salissement



► Une gamme de teneurs en impuretés grain et diverses représentative de la collecte française

Les lots étudiés contenaient en moyenne 1,7 % de grains brisés, 3,8 % d'impuretés grain et 0,96 % d'impuretés diverses. Les teneurs en impuretés maximales étaient de 3,8 % pour les grains brisés, 13,9 % pour les impuretés grain et 3,0 % pour les impuretés diverses.

Ces échantillons sont plutôt pauvres en grains brisés et en impuretés diverses, par rapport aux données de FranceAgriMer, qui indiquent que les lots de blé peuvent contenir jusqu'à 12 % de grains brisés et jusqu'à 10 % d'impuretés diverses. Néanmoins, il est assez rare que les impuretés diverses dépassent 2,5 %, et cela se produit certaines années exceptionnelles (2016, 2018...). On peut donc considérer que nos échantillons permettent d'explorer de manière satisfaisante la gamme des teneurs en impuretés grain et diverses observées dans la collecte française. Les teneurs en grains brisés peu élevées sont liées au fait que la récolte a été réalisée avec une moissonneuse axiale, qui casse peu les grains.

Des résultats partiellement satisfaisants

Les coefficients de corrélation (notés ρ) entre les teneurs en impuretés et les fractions issues du passage au Quatuor II ou au tamis à impuretés ont été calculés selon la méthode de Pearson. Les résultats sont présentés dans la figure 3, avec une échelle de couleur qui varie selon le coefficient de corrélation.

Pour les grains brisés, les corrélations sont faibles ($< -0,5$) et insatisfaisantes. La partie gauche de la figure 4 illustre cette mauvaise corrélation.

Les impuretés grain sont particulièrement bien corrélées aux criblures du Quatuor II avec tamis T1. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est $\rho=0,97$. La relation entre ces deux variables est représentée sur la figure 4, en partie centrale. Pour le Quatuor II avec tamis T6, ce sont également les criblures qui sont les mieux corrélées aux impuretés grain, avec un coefficient de corrélation de 0,95. Concernant la méthode par tamisage, la fraction la mieux corrélée aux impuretés grain est le refus du tamis de 1 mm (Sup. 1 mm), avec un coefficient de corrélation de 0,93.

Concernant les impuretés diverses, le coefficient de corrélation le plus élevé ($\rho=0,65$) est obtenu avec l'extraction du tamis de 1 mm. Mais cette variable ne permettra pas d'aller plus loin dans la modélisation, car dès lors que les teneurs en impuretés diverses étaient inférieures à 2 %, les extractions du tamis de 1 mm représentaient dans la plupart des cas 0 ou 0,1 % de la masse de l'échantillon. Le coefficient de corrélation entre la teneur en impuretés diverses et l'aspiration + criblage du Quatuor II équipé des tamis T1 était de 0,62, ce qui reste satisfaisant. La relation entre ces deux variables est représentée sur la figure 4, ci-dessous.

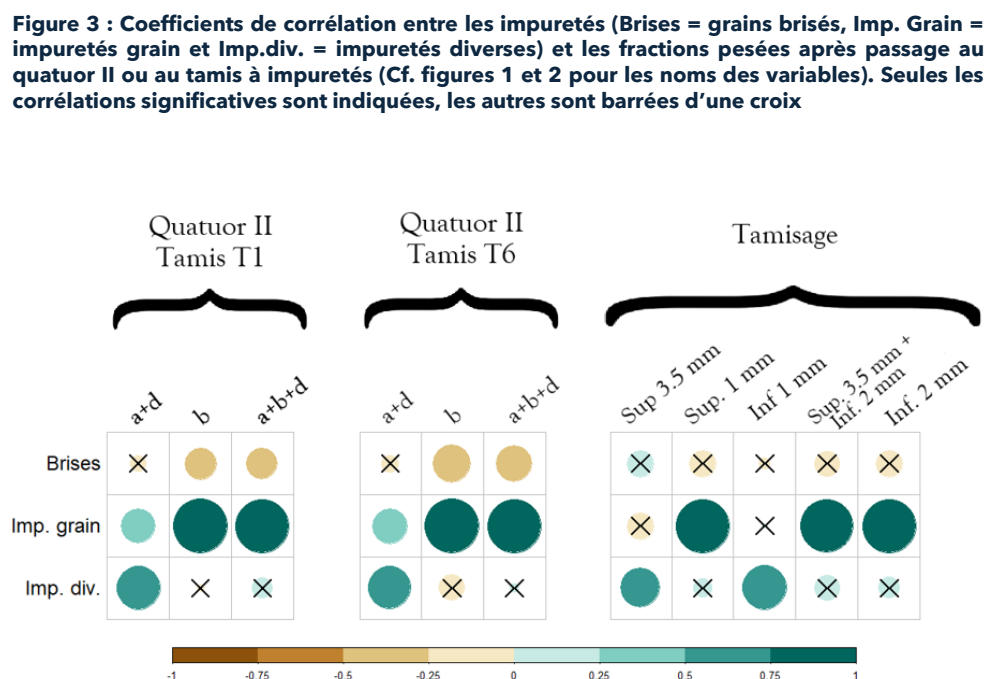
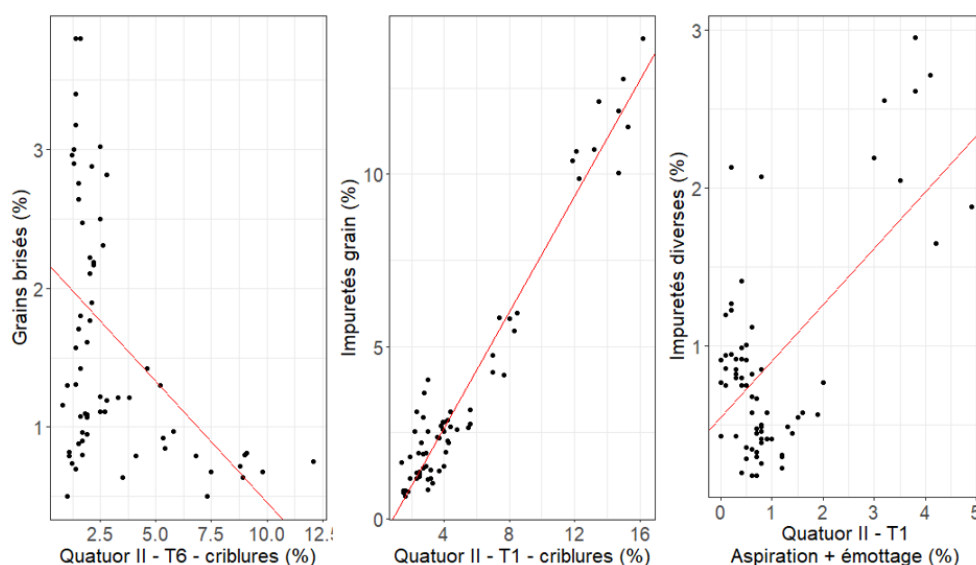


Figure 4 : Représentation des meilleures corrélations identifiées pour chaque type d'impureté



Avancées technologiques dans la détection des impuretés

Dans une optique de standardisation et d'accélération des méthodes d'analyse, plusieurs technologies ont été développées pour détecter des impuretés dans les céréales¹. Développées en laboratoires, la plupart de ces méthodes reposent sur des capteurs optiques, qui mesurent des ondes électromagnétiques du spectre visible, proche-infrarouge ou térahertz. Des sondes acoustiques peuvent aussi être utilisées pour la détection des grains germés². Les signaux reçus par les capteurs sont ensuite traités par des modèles statistiques de classification.

Les grains brisés, les grains germés, les grains échaudés ou encore les balles ont reçu le plus d'attention de la part des chercheurs. La publication la plus complète sur le sujet, celle de Bagherpour & Peyruo³, portait sur 10 types d'impuretés différents. Des échantillons d'une vingtaine de particules (grain et impuretés) étaient placés sous un appareil photo. Les images étaient ensuite traitées par un algorithme, afin que chaque particule soit délimitée et classée comme impureté (10 types possibles) ou bon grain. Pour 9 des 10 impuretés recherchées, les impuretés détectées par le modèle étaient bien des impuretés dans au moins 90 % des cas (précision > 90 %). Concernant les grains échaudés, seuls 63 % des objets classés comme grains échaudés étaient réellement des grains échaudés. Pour cette catégorie, dont l'aspect visuel est très proche des grains sains, et qui représente une part importante des impuretés grain, le recours à l'imagerie hyperspectrale semble prometteur, comme les travaux de Zhang et Ji l'ont montré en 2019³.

Peu de publications sont allées jusqu'à quantifier les impuretés. Concernant le blé tendre, on peut citer celle de Zhang *et al.*⁴, parue en 2024.

Les modèles construits par cette équipe de recherche chinoise prédisaient les teneurs en grains brisés avec 5 à 10 % d'erreur relative. Les impuretés spécifiques du blé dur, et en particulier les grains mitadinés, offrent aussi des perspectives pour la quantification. En 2023, ARVALIS a travaillé sur la mesure de ces impuretés. Deux appareils d'imagerie travaillant dans le spectre de la lumière visible (imagerie RGB) ont été testés.

Ces deux appareils sont l'EyeFOSS (FOSS France, Nanterre (92)) et le Cqrain VALUE (Cqrain AB, Uppsala, Suède).

Les teneurs en grains mitadinés mesurées selon la méthode de référence (NF 15585) variaient entre 2 et 40 % dans les échantillons passés à l'EyeFOSS, et entre 3,6 et 53 % dans les échantillons passés au Cgrain VALUE (Tableau 2). La quantité d'échantillons est comparable dans les deux cas, avec 118 échantillons pour l'EyeFOSS et 108 pour le Cgrain VALUE. L'EyeFOSS se distingue du Cgrain VALUE par un biais bien moindre (0,1 % au lieu de 5,9 %).

Il est donc possible de mesurer le pourcentage de grains mitadinés par imagerie RGB, les modèles construits à partir des données EyeFOSS et Cgrain VALUE sont satisfaisants. Pour ce dernier appareil, le modèle pourrait être amélioré par une correction de biais.

¹Optical techniques in non-destructive detection of wheat quality: a review. Li L., Chen S., Deng M., Gao Z., Grain and Oil Science and Technology 5 (2022) 44-57

²Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm, Guo M., Ma Y., Yang X., Mankin R.W., Biosystems Engineering 184 (2019) 37-44

³Identification of wheat grain in different states based on hyperspectral imaging technology. L. Zhang, H. Ji, *Spectroscopy Letters* (2019); <https://doi.org/10.1080/00387010.2019.1639762>

⁴Research on wheat broken rate and impurity rate detection method based on DeepLab-EDA model and system construction, Zhang Q., Wang L., Ni X., Wang F., Chen D., Wang S., Computers and Electronics in Agriculture (2024)

Tableau 2 : Données d'entrée et résultats des modèles pour l'évaluation des pourcentages de grains mitadinés dans le blé dur

Appareil	Nombre d'échantillons	Etendue des données (%)	Biais	Pente	R ²
EyeFOSS	118	2 – 40	0.1	0,9	0,7
Cgrain VALUE	108	3,6 – 53	5,9	0,9	0,7



Que retenir de cet article ?

Le nettoyeur-séparateur de laboratoire et le jeu de tamis à impuretés sont un matériel simple, relativement peu onéreux, et potentiellement déjà présents en OS. C'est pourquoi il aurait pu être intéressant de les utiliser pour des analyses rapides des teneurs en impuretés. Malheureusement, notre étude a montré que seules les impuretés grain seraient susceptibles d'être prédites par ces méthodes. Il n'est donc pas à l'ordre du jour de remplacer, en routine, les mesures d'impuretés selon la norme NF 15587 par de simples tamisages.

Concernant le blé dur, les deux appareils d'imagerie testés par ARVALIS donnaient de bons résultats pour prédire les pourcentages de grains mitadinés, mais pas ceux de grains mouchetés.

Amélie TANGUY - a.tanguy@arvalis.fr

Norbert FUMAT - n.fumat@arvalis.fr