
Qualité technologique et sanitaire des céréales alimentaires

Evaluation de leur qualité panifiable et bonnes pratiques pour s'assurer de leur aptitude à la transformation

Partie 2

v2026



B. Godin et P.-Y. Werrie

Plateforme de Technologie des céréales, oléagineux et protéagineux

Unité Valorisation des produits, de la biomasse et du bois

Département Connaissance et valorisation des produits

Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W)

Table des matières

Partie 2

5. Bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire

Variété et qualité technologique

Phytotechnie et fumure azotée

Pré-récolte et récolte

Allotement, échantillonnage et analyses avant transformation

Stockage

Tri

6. Outils de tri des grains pour obtenir la qualité recherchée

Moissonneuse-batteuse

Pré-Nettoyage

Trieurs

Application du tri au regard de la qualité technologique

Application du tri au regard de la qualité sanitaire

7. Evolution de la qualité technologique des variétés de froment

8. Réactions adverses au froment

5. Bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire

Des bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire en termes de variété, fumure, phytotechnie, pré-récolte, récolte, allotement, échantillonnage, analyses avant transformation, stockage et tri sont à suivre. **Il faut toujours s'assurer d'un débouché avant de semer une céréale alimentaire afin de mutualiser les risques et bénéfices avec les acteurs en aval.**

Bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire

- Variété et qualité technologique
 - Levier principal
 - Pas de variété parfaite unique
 - Force boulangère par unité de protéine (W/P)
- Phytotechnie et fumure azotée
 - Fumure (Quantité, Forme, Fractionnement)
 - Précédent, Semis, Fertilité de la parcelle
- Pré-récolte et récolte
 - Pré-récolte protéines (Hagberg, Mycotoxines)
 - Grains à maturité, secs et sains
 - Moissonneuse propre et bien réglée
- Allotement, échantillonnage et analyses avant transformation
 - Silo par type de qualité/variété (et protéines)
 - Echantillon moyen par silo pendant moisson
- Stockage
 - Nettoyage et vide sanitaire du silo
 - Ventiler et refroidir le plus vite possible
- Tri
 - Pré-nettoyage directement après moisson pour retirer poussières, pailles, grains malsains et insectes
 - Nettoyeur-Séparateur après moisson



S'assurer un débouché avant de semer et mutualiser les risques et bénéfices

Figure - Bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire

Variété et qualité technologique

FROMENT

Le choix variétal est essentiel car il est le principal levier conditionnant la qualité technologique. Un classement de variétés par groupes en fonction de leur aptitude à la panification en pur et sans additif est actualisé chaque année. Il est basé sur des essais agronomiques et analyses technologiques menés en Wallonie et communiqué par le Livre Blanc Céréales de septembre. Ces groupes sont établis en se basant principalement sur la valeur de la qualité technologique à la panification des protéines, le W/P (W : Force boulangère à l'alvéographe Chopin ; P : Protéines), en tenant compte également des valeurs critiques du temps de chute de Hagberg, de la teneur en protéines et des autres paramètres (Alvéographe et Mixolab+).

Les groupes sont de plus panifiable au moins panifiable :

- **Q1A (Froment panifiable améliorant belge)** est de qualité panifiable semblable aux blés correcteurs en France et qualité E en Allemagne.
- **Q1 (Froment panifiable premium belge)** est de qualité panifiable semblable aux VRM (Variétés Recommandées par la Meunerie) en France et qualité A en Allemagne.
- **Q2 (Froment panifiable supérieur belge)** est de qualité panifiable semblable aux BPMF (Blés Pour la Meunerie Française) en France et qualité B en Allemagne. Elle est également destinée à l'amidonnerie exigeante en protéines.
- **Q3 (Froment amidonnerie belge ; blé standard belge)** est utilisée en amidonnerie. La qualité Q2 peut également être utilisée pour cette transformation.
- **Q4 (Froment basique belge ; blé standard belge)** est de qualité basique, c'est-à-dire fourragère en raison d'une très faible qualité du gluten de la variété.

Ces catégories de qualité technologique sont évaluées pour l'aptitude à la panification standard en mono-variété pur et sans additifs. Les mélanges meuniers sont réalisés avec environ 10% de froment panifiable améliorant (Q1A), puis 20-30% de froment panifiable premium (Q1) puis plus de 50% de froment panifiable supérieur (Q2). Cela s'explique par l'impact économique du rendement à l'hectare qui est inversement corrélé à la qualité de la protéine à la panification. La culture de variétés de qualité panifiable nécessite donc de s'assurer une récolte contractualisée ainsi qu'une marge brute à l'hectare similaire aux variétés fourragères.

Des variétés de moindres qualités technologiques peuvent être panifiées en appliquant un procédé de transformation plus artisanal et plus long :

- Pétrissage moins énergétique
- Levée plus longue
- Utilisation de levain

Des classements distincts sont réalisés entre agricultures conventionnelle et biologique car la qualité du gluten est parfois différente entre ces deux modes de culture pour une même variété. Les échantillons ayant permis d'établir les classifications sont issus d'essais variétaux wallons de post-inscription des dernières années.

<p>Ces classements sont mis à jour chaque année en septembre à l'issue de la nouvelle moisson et disponible dans le Livre Blanc Céréales de septembre.</p>

Agriculture conventionnelle

Tableau - Classement Livre Blanc Céréales 2025 des variétés de froment de qualité technologique pour la panification en pur et sans additifs en agriculture conventionnelle basé sur les essais variétaux de post-inscription du CRA-W (*, données limitées ; variété biscuitière^B ; h, hybride) (Livre Blanc Céréales).

Q1A Panifiable améliorant belge	Q1 Panifiable premium belge	Q2 Panifiable supérieur belge (et amidonnerie)		Q3 Amidonnerie belge (Blé standard belge)		Q4 Basique belge (Blé standard belge)
Adamus	(Allsome*)	Celebrity	Pondor	Academy	(Olaf*)	(Bamford*)
(Alessio*)	(Ambientus*)	Chevignon	Prestance	(Accomply*)	Positiv	Champion
Arameus	Cubitus	Crossway	(RGT Kreuzer*)	(Broadway)	Revolver	Debian
Arminius	KWS Dag	(Geopolis*)	Shaun	(Fuchur*)	(RGT Farneo*)	Gleam
Christoph	KWS Emerick	Hyacinth ^h	SU Addiction	Geluck	(RGT Majesko*)	Johnson
(Exsal*)	LG Keramik	Irun	(SU Hybiscus ^h *)	(Godzilla*)	(RGT Profusio*)	KWS Keitum
(LG Agriate*)	SY Transition	Intensity	(SU Tammo*)	KWS Erruptium	SU Horizon	LG Niklas ^B
Montalbano		(Karoque*)	SY Revolution	(KWS Globe*)	(SU Hybingo ^h)	LG Skyscraper ^B
Moschus		Kingkong		(KWS Sabrum*)	(SU Hystoric ^h)	SU Ecusson ^B
(SU Correction*)		KWS Etoile		KWS Sverre	SU Hyntact ^h	SY Prestation
		KWS Extase		(LG Aero*)	SU Shamal	
		LG Optimist		LG Audace	WPB Marlin	
		LG Tomjol		LG Farrier		

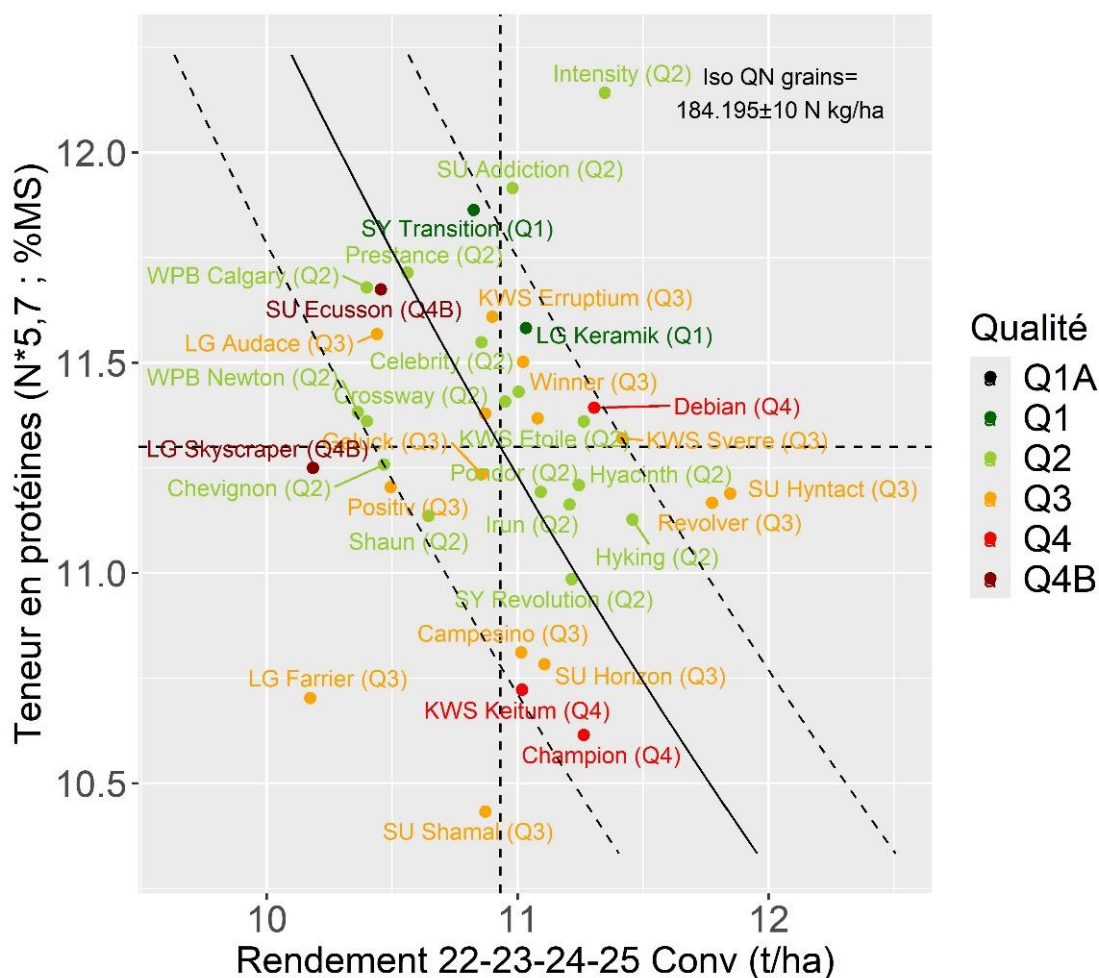


Figure - Compromis entre les protéines et le rendement à l'hectare des froments conventionnels basé sur les essais variétaux de post-inscription du CRA-W de 2022 à 2025 (Livre Blanc Céréales).

Agriculture biologique

Tableau - Classement Livre Blanc Céréales 2025 des variétés de froment BIO de qualité technologique pour la panification en pur et sans additifs en agriculture biologique basé sur les essais variétaux de post-inscription du CARAH, CPL-Végémar et CRA-W (données limitées*, variété biscuitière^B) (Livre Blanc Céréales).

Q1A BIO Panifiable améliorant belge	Q1 BIO Panifiable premium belge	Q2 BIO Panifiable supérieur belge (et amidonnerie)	Q3 BIO Amidonnerie belge	Q4 BIO Basique belge
Adamus	Alessio	(Camillus*)	Emotion	Chevignon
Arameus	(Bodeli*)	Chaussy	Geny	Gergovie
Arminius	(Bonavau*)	Cubitus	Glaz	Gwenn
(Assantus*)	(Caminada*)	KWS Emerick	Glenan	(Intensity*)
(Cian*)	Christoph	(Poésie*)	KWS Eternel	RGT Farneo
Grannosos	Montalbano	Phildor	LD Cape	SU Ecusson ^B
Tillexus	Moschus	(SU Correction*)	LG Keramik	Winner
Togano	Mossette	Wendelin	(RGT Capexo*)	
	(Selvi*)		SU Tarrafal	
	Wital			

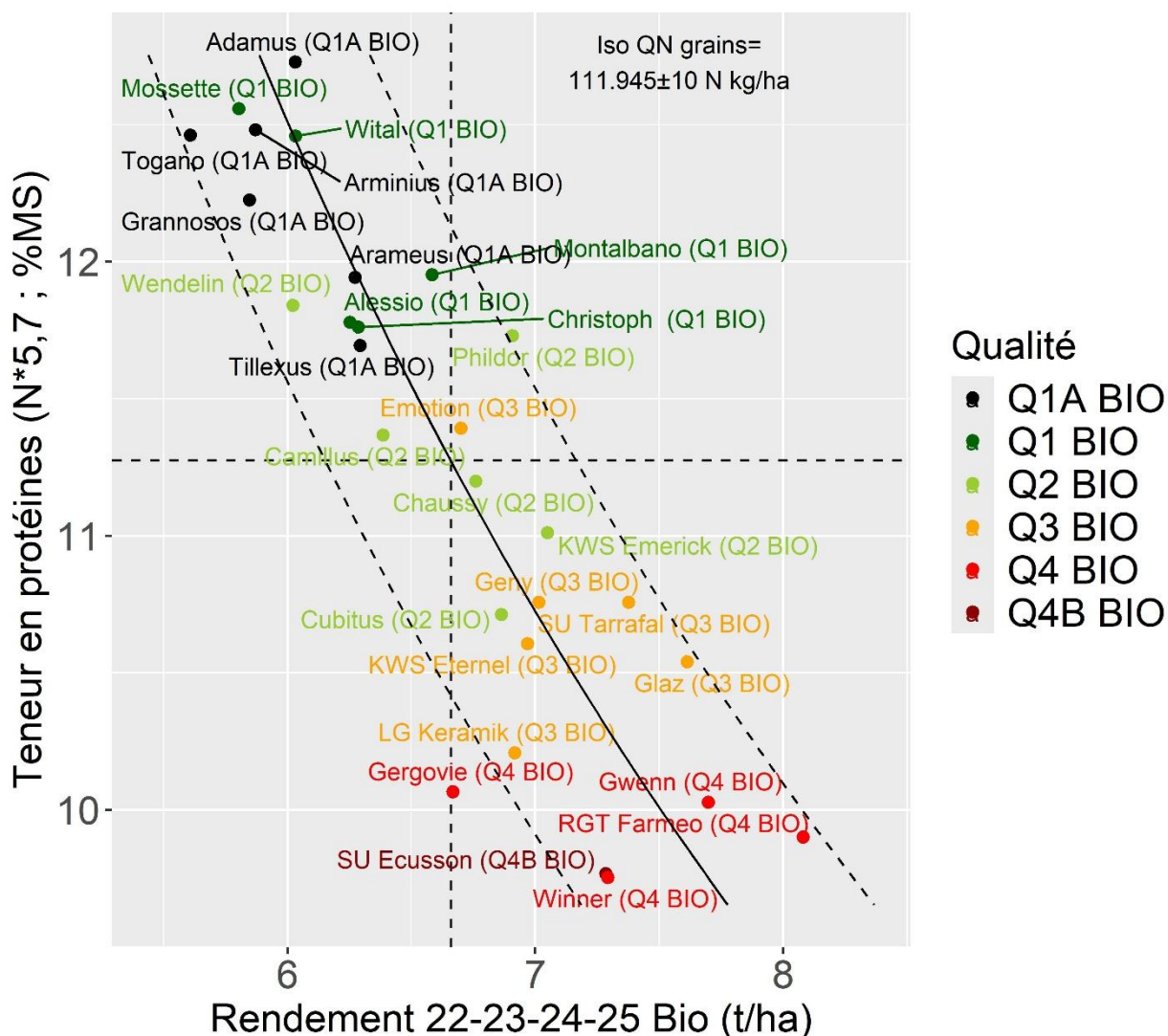


Figure - Compromis entre les protéines et le rendement à l'hectare des froments biologiques basé sur les essais variétaux de post-inscription du CARAH, CPL-Végémar et CRA-W de 2022 à 2025 (Livre Blanc Céréales).

EPEAUTRE

Pour l'épeautre, le même type de classement d'aptitude à la panification est établi de la même manière qu'en froment. Il y a également un classement spécifique à l'agriculture biologique. Les groupes sont de plus panifiable au moins panifiable :

- **Qe1 (Epeautre panifiable en pur)** est une qualité d'épeautre apte à être panifiée de manière standard en pur.
- **Qe2 (Epeautre panifiable avec 30-50% de froment de qualité panifiable Q1)** est une catégorie de qualité d'épeautre dont la panification classique nécessite soit en ajoutant au moins 30 à 50% d'un froment de qualité panifiable Q1, soit une panification artisanale en pur.
- **Qe3 (Epeautre panifiable avec 50-70% de froment de qualité panifiable Q1)** est une catégorie de qualité d'épeautre dont la panification classique nécessite soit en ajoutant au moins 50 à 70% d'un froment de qualité panifiable Q1, soit une panification très artisanale en pur.
- **Qe4 (Epeautre panifiable avec 70-90% de froment de qualité panifiable Q1)**. Il est possible de panifier cette catégorie classiquement soit en ajoutant au moins 70 à 90% d'un froment de qualité panifiable Q1, soit une panification extrêmement artisanale en pur.

Ces catégories de qualité technologique sont évaluées pour l'aptitude à la panification standard en mono-variété pur et sans additifs.

Des variétés de moindres qualités technologiques peuvent être panifiées en appliquant un procédé de transformation plus artisanal et plus long :

- Pétrissage moins énergétique,
- Levée plus longue,
- Utilisation de levain.

Des classements distincts sont réalisés entre agriculture conventionnelle et biologique car la qualité du gluten est parfois différente entre ces deux modes de culture pour une même variété.

<p>Ces classements sont mis à jour chaque année en septembre à l'issue de la nouvelle moisson et disponible dans le Livre Blanc Céréales de septembre.</p>

Agriculture conventionnelle

Tableau - Classement Livre Blanc Céréales 2025 des variétés d'épeautre pour leur qualité technologique pour la panification en pur et sans additifs en agriculture conventionnelle basées sur les essais variétaux de post-inscription du CRA-W (*, données limitées) (Livre Blanc Céréales).

Qe1 Panifiable en pur	Qe2 Panifiable avec 30-50% de froment Q1	Qe3 Panifiable avec 50-70% de froment Q1	Qe4 Panifiable avec 70-90% de froment Q1	
(Copper*)	Alboretto	Lucky	Badensonne	Lignée 24
Franckentop	Beffroi	Zollernperle	Comburger	Oberkulmer
Sérénité	Convoitise	Zollernspelz	(Conforte*)	Steiners Roter Tiroler
Zollernfit	Cosmos		Courtoise	
Zor	Franckenkorn		Ebners Rotkorn	
	Holdlander		Gletscher	

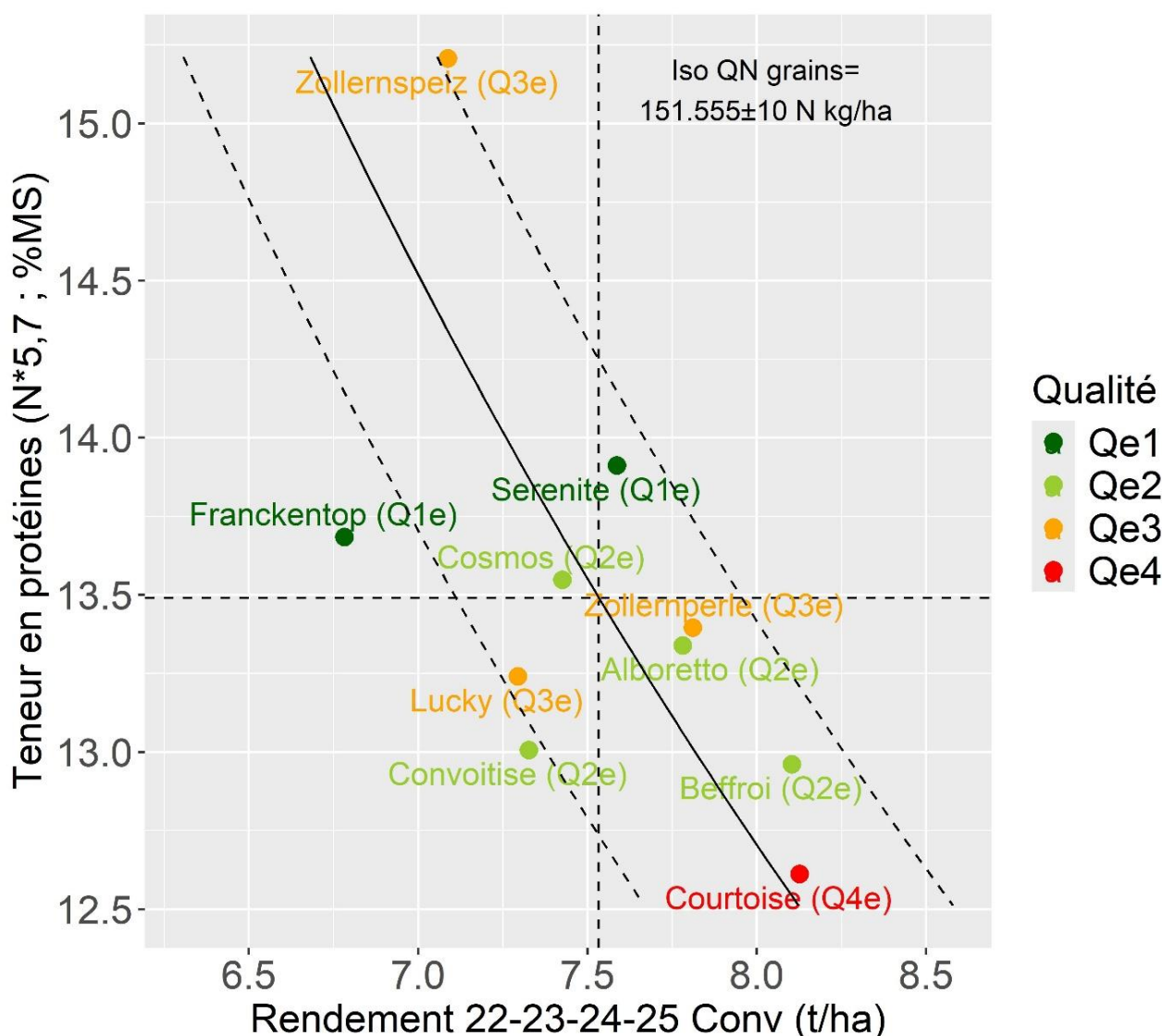


Figure - Compromis entre les protéines et le rendement à l'hectare des épeautres conventionnelles basé sur les essais variétaux de post-inscription du CRA-W de 2022 à 2025 (Livre Blanc Céréales).

Agriculture biologique

Les catégories de qualité technologique pour la panification en pur et sans additifs des variétés d'épeautre biologiques ont été réalisées de la même manière que décrite dans la partie épeautre conventionnelle.

Tableau - Classement Livre Blanc Céréales 2025 des variétés d'épeautre BIO pour leur qualité technologique pour la panification en pur et sans additifs en agriculture biologique basées sur les essais variétaux de post-inscription du CARAH, du CPL-Végémar et du CRA-W (*, données limitées).

Qe1 BIO Panifiable en pur	Qe2 BIO Panifiable avec 30-50% de froment Q1 BIO	Qe3 BIO Panifiable avec 50-70% de froment Q1 BIO	Qe4 BIO Panifiable avec 70-90% de froment Q1 BIO	
Copper	Beffroi	Alboretto	Badensonne	Lignée 24
Franckentop	Convoitise	Cosmos	Comburger	Oberkulmer
Sérénité		Lucky	(Conforte*)	Steiners Roter Tiroler
Zollernfit		(Paracelsus*)	(Courtoise*)	
Zor		Zollernperle	Ebners Rotkorn	
		Zollernspelz	Gletscher	

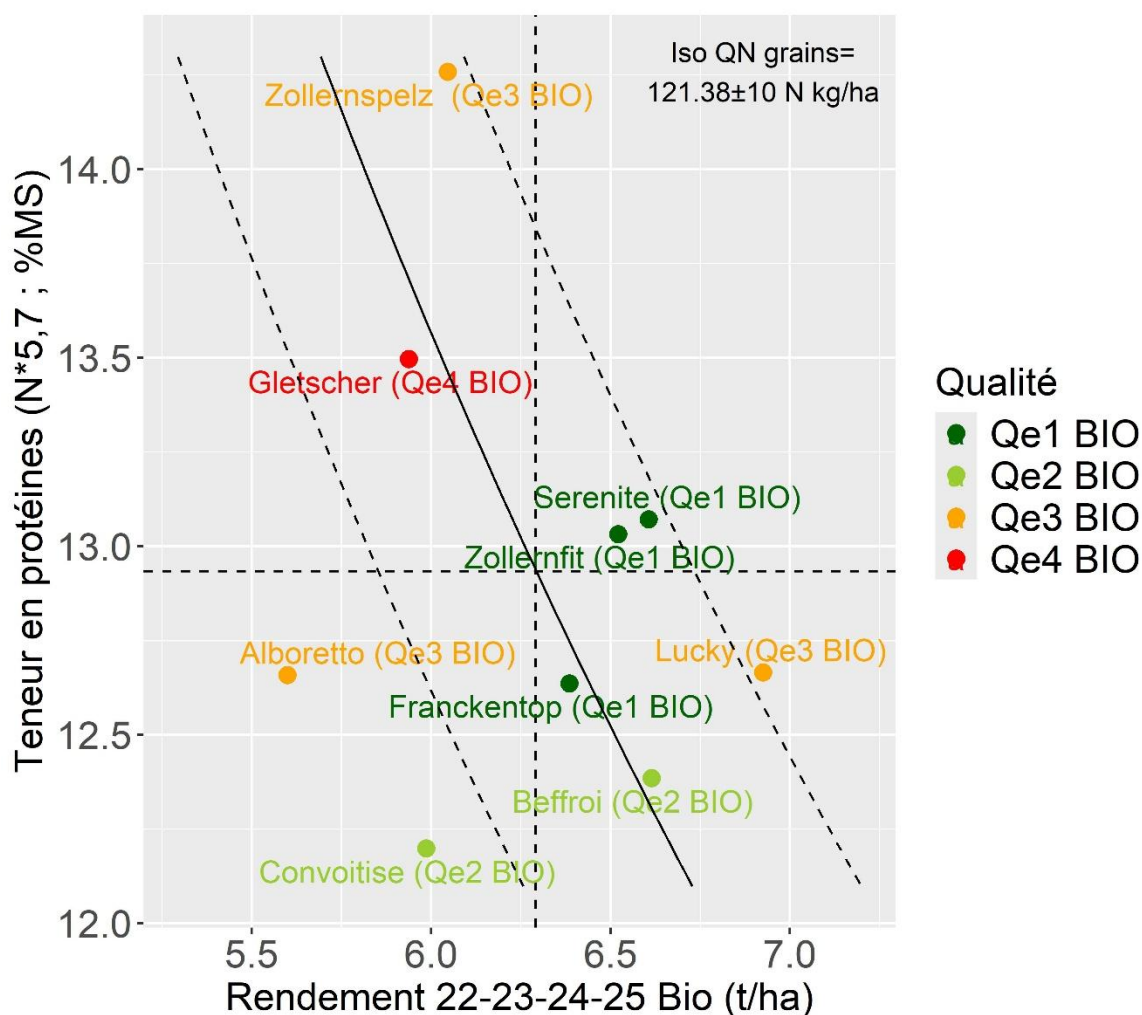


Figure - Compromis entre les protéines et le rendement à l'hectare des épeautres biologiques basé sur les essais variétaux de post-inscription du CARAH, CPL-Végémar et CRA-W de 2022 à 2025 (Livre Blanc Céréales).

Phytotechnie et fumure azotée

La fertilisation azotée est essentielle pour qu'une variété panifiable puisse atteindre sa qualité technologique. Il faut appliquer une fumure favorisant la qualité plutôt que le rendement à l'hectare. Ces 2 stratégies s'opposent. Afin de suivre de manière optimale les besoins azotés des variétés panifiables,

En **agriculture conventionnelle**, il faut **apporter l'azote minéral en 3 fractions : tallage 40 uN, redressement 80 uN, stade 2 nœuds 40 uN (à diminuer si l'apport total d'azote visé est plus faible que 220 uN) et dernière feuille 60 uN.** Il faut **éviter un apport d'azote trop important au début de développement de la plante** (correspondant au tallage) et **favoriser un apport d'azote important avant l'épiaison** (correspondant au stade 2 nœuds et dernière feuille). Cette pratique pour les variétés panifiables est à l'opposé de celle recommandée pour les variétés fourragères.

En **agriculture biologique**, il faut **apporter la moitié de l'azote organique au tallage** (par exemple 45 uN) et **l'autre moitié de l'azote organique au redressement** (par exemple 45 uN).

L'apport en deux fractions pour une même quantité totale d'azote donne des teneurs en protéines plus faible que l'apport en 3 fractions.

L'apport d'azote **sous forme solide (ammonitrate/urée avec inhibiteur) permet d'obtenir une teneur en protéines plus élevée** que celle sous forme liquide (solution azotée) surtout pour les apports après le stade redressement.

Les recommandations pour la fertilisation azotée pour les variétés panifiables sont basées sur des essais agronomiques et analyses technologiques menés en Wallonie et communiqué par le Livre Blanc Céréales de février. Il faut toujours adapter la stratégie de fumure azotée recommandée pour la Livre Blanc Céréales par les facteurs de corrections qui y sont mentionnés.

D'autres précautions à prendre pour obtenir une bonne qualité technologique sont de **privilégier ses parcelles fertiles avec des bonnes structures et bons reliquats azotés dans le sol.** Il faut, par exemple, éviter des précédents comme la chicorée. En agriculture biologique, il faut veiller à un précédent comme la prairie temporaire, la luzerne, le pois et les haricots qui permettent de libérer de l'azote sur l'ensemble du cycle de la céréale.

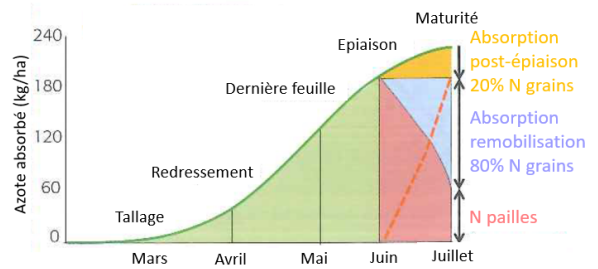
Il faut **modérer la densité de semis** par rapport à la recommandation habituelle qui est celle pour les variétés fourragères.

Pour **prévenir les phénomènes de verse** (ainsi que la prégermination physiologique qui peut en découler), il faut **éviter des variétés trop sensibles à la verse et des parcelles excessivement fertilisées** (avec plus une fertilisation totale de plus de 180 uN) **et fertiles.** Le **précédent maïs, le non-enfouissement de résidus de pailles de céréales et les variétés sensibles à la fusariose de l'épi sont à exclure** pour prévenir la production de mycotoxines par cette moisissure.

Leviers pour améliorer la teneur en protéines et sa qualité panifiable

- **Choix de la variété**
→ 0,5 à 2,5%MS protéines
- **Fumure azotée**
 - **Dose totale (par 50 uN ; max. 200 uN)** → 0,5 à 1,0%MS protéines
 - **Forme** (ammonitrate/urée inh. vs solution azotée) → 0,2 à 0,5%MS protéines
 - **Fractionnement (3 fractions vs 2)** → 0,2 à 0,5%MS protéines
 - **Eviter trop d'azote au tallage**
 - **Favoriser l'azote en dernière feuille**
- **Autres facteurs** (année, climat, sol, précédent, densité de semis, ...)
→ 0,5 à 2,5%MS protéines

Absorption de l'azote par la plante



Fumure azotée conseillée pour une utilisation en meunerie-boulangerie

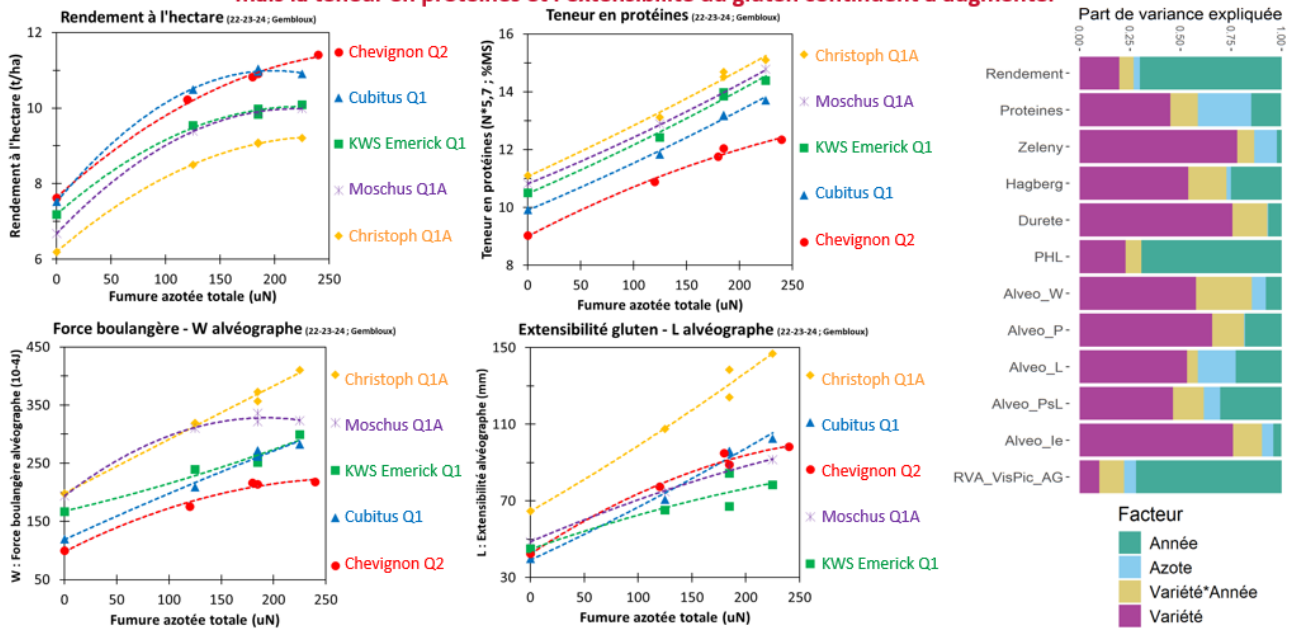
Apport total d'azote : 220 uN - A adapter avec les facteurs de corrections du Livre Blanc Céréales

4 fractions : Fraction tallage : 40 uN / Fraction redressement : 80 uN / Fraction 2^{ème} nœuds : 40 uN / Fraction dernière feuille : 60 uN

→ Eviter trop d'azote au tallage

→ Diminuer 2N selon objectif azote total → Favoriser de l'azote en dernière feuille

Apport total d'azote au-delà de 180 uN pour les variétés les plus panifiables (Q1A et Q1)
→ Pas d'augmentation significative du rendement et de la force boulangère du gluten
mais la teneur en protéines et l'extensibilité du gluten continuent à augmenter



Qualité panifiable de la protéine

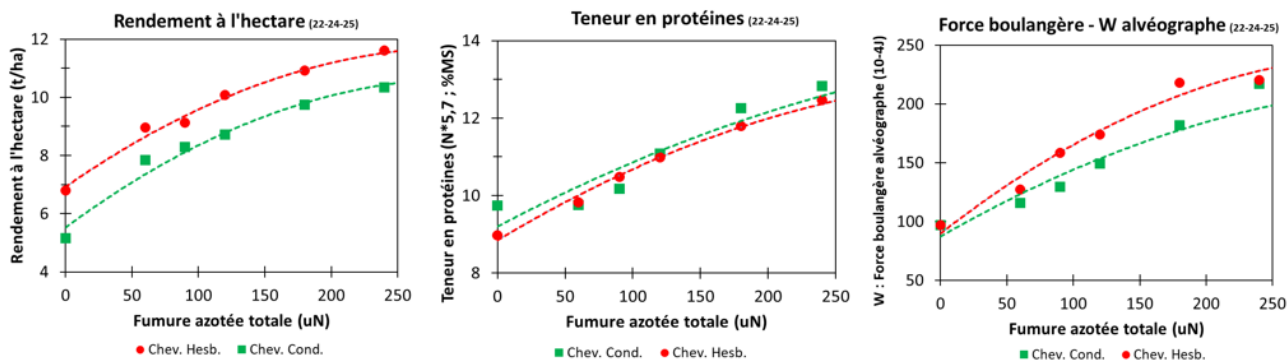
- Dépend avant tout de la catégorie de qualité panifiable
- Augmente moins vite que la teneur en protéines
- Plafonne pour certaines variétés

Quantité de protéines

- Dépend de la variété et la fumure azotée totale
- Augmente plus vite pour les variétés les plus panifiables (Q1A et Q1)
- Permet d'augmenter l'extensibilité du gluten

Catégorie de qualité panifiable du gluten prime sur la teneur en protéines

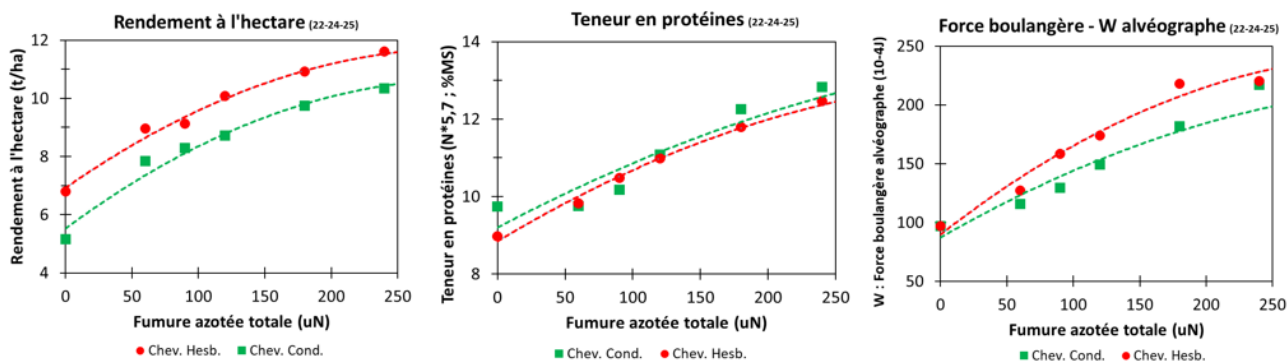
Réponse fumure azotée variété panifiable supérieur Q2 (Chevignon) : Hesbaye vs Condroz



- Moins de rendement à l'hectare en Condroz
- Niveau semblable de teneur en protéines en Condroz et Hesbaye
- Force boulangère légèrement supérieure en Hesbaye

Qualité panifiable semblable en Condroz et Hesbaye et réponse semblable à la fumure azotée

Réponse fumure azotée variété panifiable supérieur Q2 (Chevignon) : Hesbaye vs Condroz



- Moins de rendement à l'hectare en Condroz
- Niveau semblable de teneur en protéines en Condroz et Hesbaye
- Force boulangère légèrement supérieure en Hesbaye

Qualité panifiable semblable en Condroz et Hesbaye et réponse semblable à la fumure azotée

Pré-récolte et récolte

La récolte doit être réalisée à leur maturité optimale. Cela correspond à **80% des derniers nœuds rentrant et jaune** de la paille. Les grains doivent être secs : **humidité inférieure à 15,5% voir mieux inférieure à 14,5%** ; jamais une humidité supérieure à 18,0% voir mieux jamais supérieure à 17,0%. Il ne faut pas non plus que la récolte se fasse plus d'une semaine avant la maturité. Une stratégie de récolte pertinente est de récolter quelques jours avant la maturité lorsqu'il y a un risque important que la moisson soit retardée par de pluies incessantes à partir de la maturité du grain. La récolte en sur-maturité importante peut être contaminée en mycotoxine Zéaralénone (ZEA) des Fusarium. **Lors de pluies après la maturité, les grains sont sujets à la pré-germination physiologique (Hagberg) des grains (même en condition non versée pour certaines variétés). Cette prégermination est très critique.** Il n'y a que des leviers de correction mineurs pour corriger cela au niveau technologique.



Système de mini-batteuse pour constituer les échantillons de pré-récolte (à gauche)
Entouré en jaune un froment à maturité car son dernier nœud est enfoncé et jaune (à droite)

Figure – Mini-batteuse portable pour la pré-récolte et maturité des blés

Pour estimer la tendance de l'arrivée à maturité des blés, l'outil d'aide la décision « Phénoblé » du site « Agromet.be » est disponible. Il estime le stade 89 de maturité. Il faut 1 à 2 semaines après cette date pour obtenir la date de maturité optimale de récolte. **Pour suivre au mieux l'évolution de l'humidité de vos parcelles, il est conseillé de réaliser cela avec une mini-batteuse portable.** Un échantillonnage des épis au champ en 2 diagonales permet de disposer d'un échantillon représentatif. Il faut être vigilant avec les systèmes de mesure d'humidité par conductivité sur des grains trop immatures car ils donnent des valeurs biaisées plus basses que la réalité. **La mesure de l'humidité par infrarouge est à privilégier.** La pré-récolte **permet aussi de contrôler la teneur en protéines de la parcelle afin d'anticiper l'allotement des récoltes sur base de la teneur en protéines, en plus du nom ou groupe de qualité panifiable de la variété.** Lors d'une année critique en termes de prégermination physiologique (Hagberg), cette pré-récolte peut également servir pour contrôler le temps de chute de Hagberg afin d'identifier les parcelles avec des valeurs basses (seuil strict de 220 s et souple de 180 s), voir même de détecter des variétés à les éviter de l'allotement de lots panifiables. En cas d'année à risque en mycotoxines, l'échantillon de pré-récolte peut aussi être utilisé pour contrôler et alloter sur base de la teneur en mycotoxines.

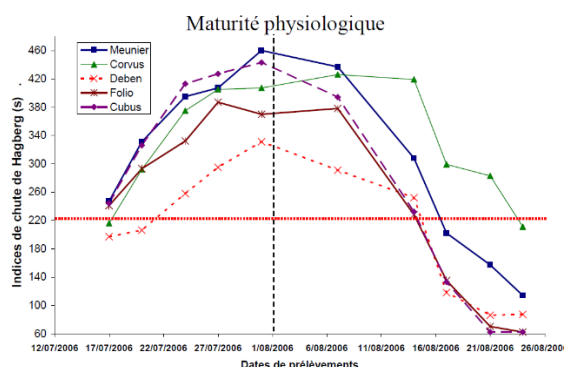


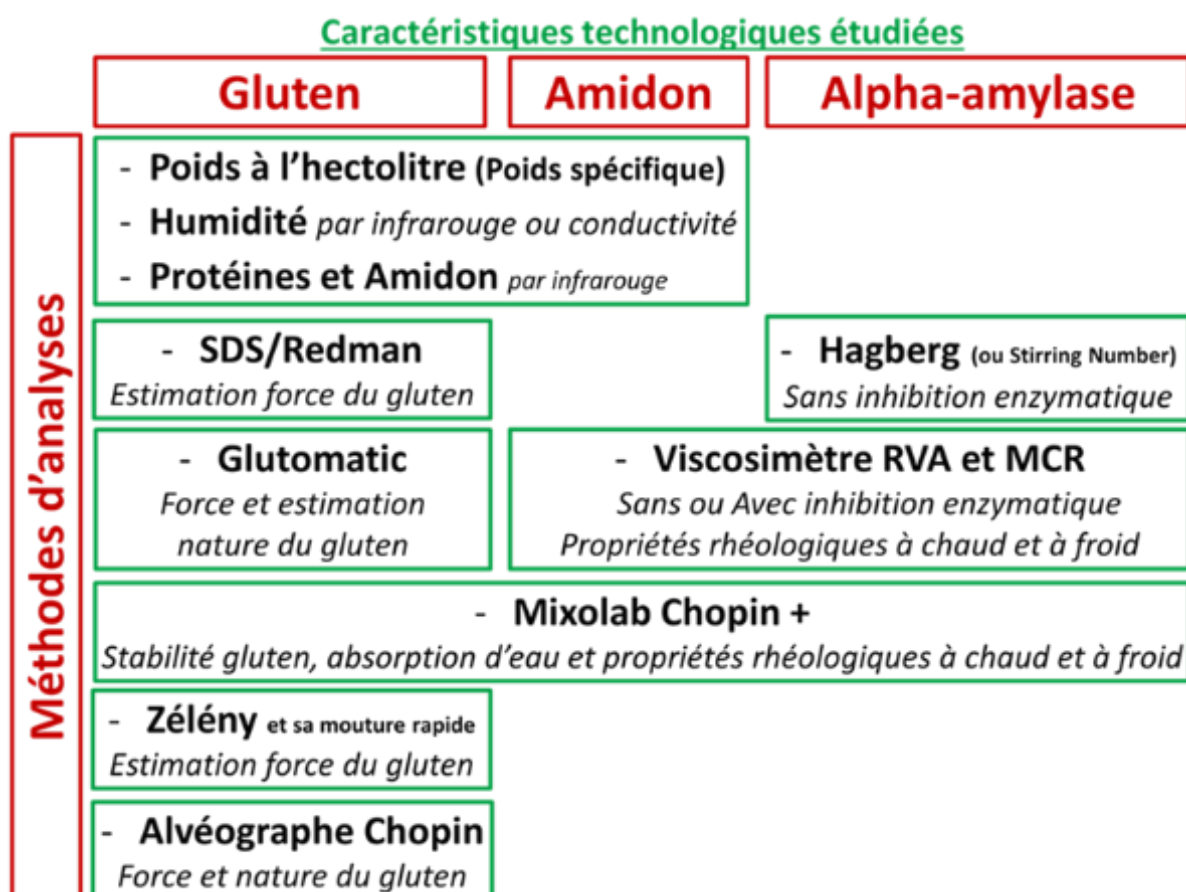
Figure – Evolution du temps de chute de Hagberg avec la maturité de récolte

Allotement, échantillonnage et analyses avant transformation

Pour maintenir les différences entre les qualités technologiques des variétés, il est **essentiel à la réception des lots de les regrouper par groupe de qualité panifiable de la variété**, voir par variété pour celles qui seraient très spécifiques. Il est possible également d'ajouter la teneur en protéines pour distinguer 2 ou plusieurs sous-qualités pour un groupe de qualité panifiable. C'est la pratique habituelle en Allemagne. Cela permet à une filière de ne pas déclasser trop vite des lots et de disposer de ses propres lots lors d'une année critique.

Il faut peu de grains malsains (comme ceux avec de mycotoxines) **ou avec un problème technologique critique** (comme ceux prégermés physiologiquement) **pour être responsable du déclassement de tout un silo**. Des poids à l'hectolitre très bas par rapport à la moyenne de l'année indiquent souvent une anomalie de ce type mais des grains avec des poids à l'hectolitre normaux peuvent aussi être problématiques. Les analyses de pré-récoltes et une visite des parcelles avant la moisson permettent d'anticiper les parcelles qui sont à déclasser.

Pour connaître la qualité d'un silo, il faut disposer d'un échantillon représentatif de celui-ci. Pour cela, il faut prendre un échantillon supplémentaire lors de l'échantillonnage de chaque benne constituant le silo pour regrouper les échantillons au fils de la moisson. Une fois la moisson terminée et le mélange de cet échantillon moyen, environs 1 kg de cet échantillon est nécessaire pour en analyser la qualité. Cette analyse est primordiale avant d'envisager la transformation du lot.



Stockage

Le stockage des grains dans la durée est un métier délicat nécessitant des installations adéquates. **Les grains doivent être secs et ensuite avoir été ventilés en plusieurs étapes pour les refroidir.** Cela afin de pouvoir les conserver dans des bonnes conditions de stockage pour éviter la production de mycotoxines par des moisissures et le développement d'insectes. **Un vide sanitaire et l'application de terre de diatomée de la zone de stockage permet une meilleure lutte contre les insectes.**

Un nettoyage des grains à la récolte et leur tri un peu après la récolte sont également un levier primordial pour éviter le développement d'insectes et de moisissures. Les lots de grains nettoyés permettent une ventilation plus rapide et utilisant moins d'énergie. **Au plus les grains sont propres, au plus leur conservation sera bonne et longue.** La ventilation du lot doit se faire une humidité de l'air inférieure à 65% et une différence de plus de 6°C entre la température de l'air extérieur et celle du grain. Il faut éviter la rosée et les pics de chaleurs.

ITINERAIRE TECHNIQUE DU STOCKAGE DES GRAINS

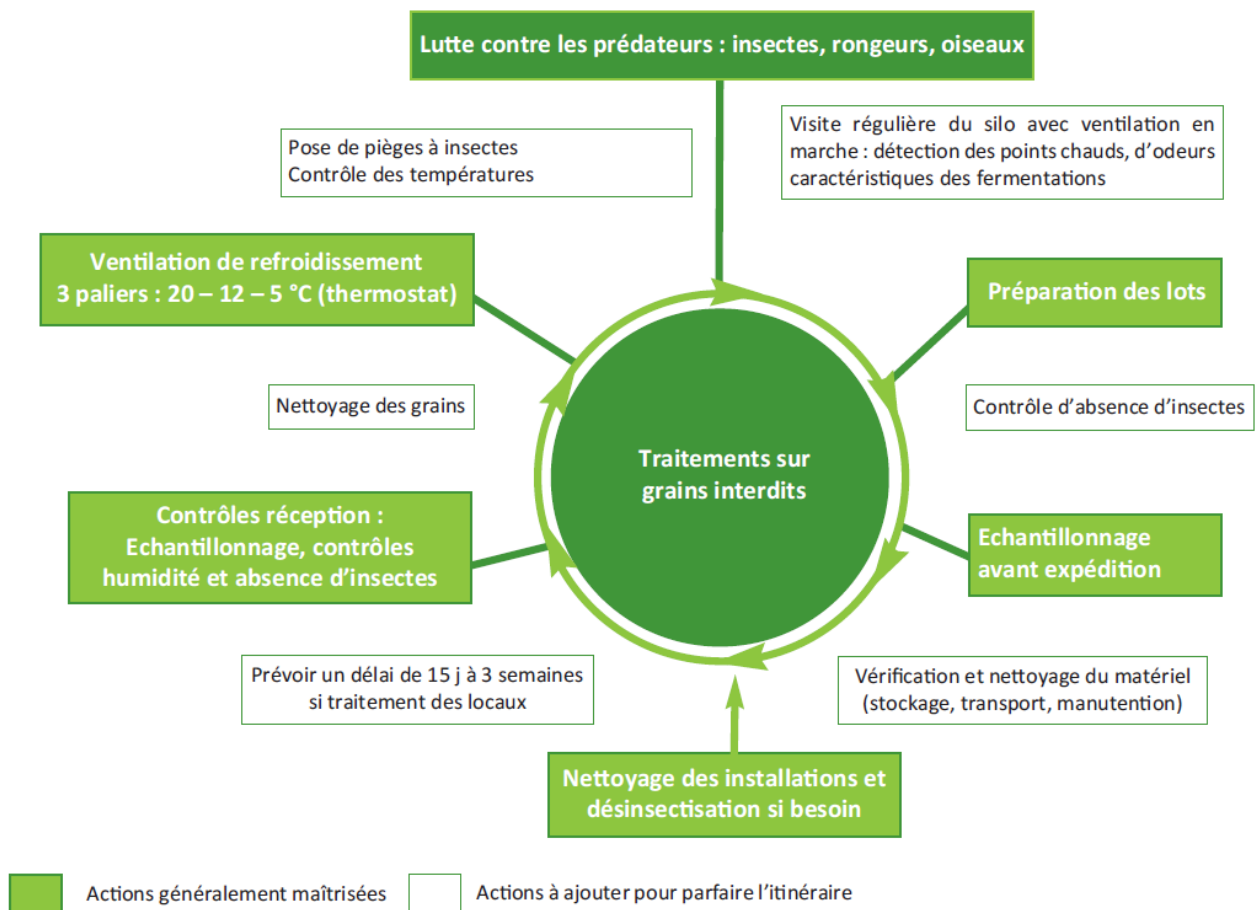


Tableau 1 : conditions de développement des espèces fongiques et de production de mycotoxines (d'après Fleurat-Lessard, 2015)

Espèces fongiques	Mycotoxine produite	a_w limite pour la croissance fongique	Teneur en eau minimale pour la croissance fongique (%)	a_w limite pour la production de mycotoxines	Teneur en eau limite pour la production de mycotoxines (%)
<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxine B1	0,78-0,84	17,6-19,0	0,84	19,2
<i>A. ochraceus</i>	Ochratoxine	0,77	16,5	0,85	19,6
<i>Penicillium aurantiogriseum</i>		0,82-0,85	18,5-19,6	0,87-0,90	20,2-22,0
<i>P. verrucosum</i>		0,80	18,0	0,83-0,86	18,8-19,8

Figure 4 : diagramme des risques de dégradation des grains en fonction de l'humidité et de la température

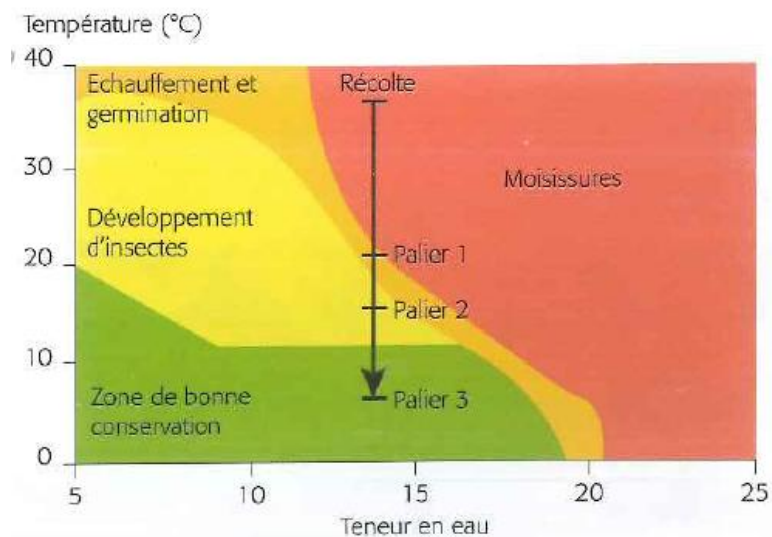


Figure 3 : Succession des flores fongiques au stockage (Fleurat-Lessard, d'après Pelhate 1988)

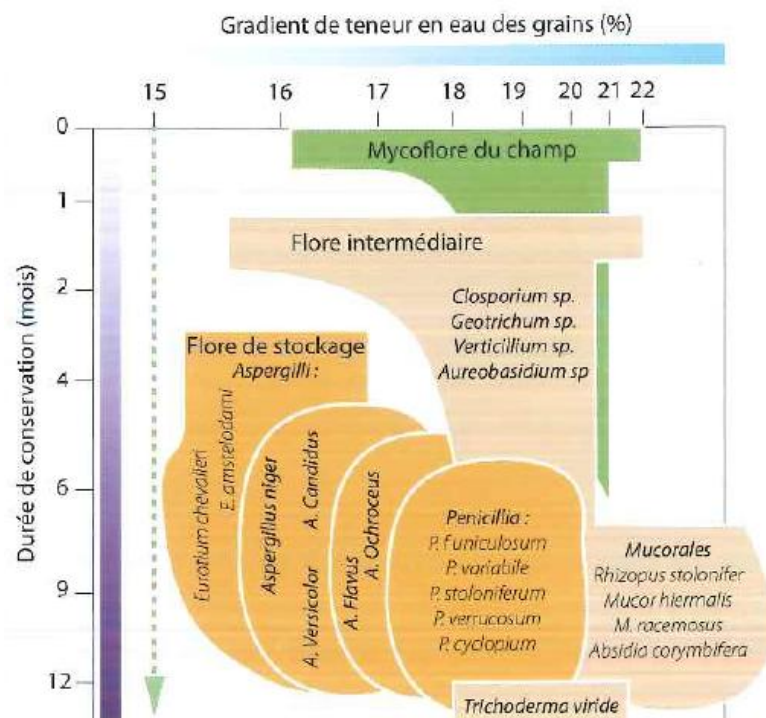


Tableau 2 : Réponse des insectes des grains exposés aux températures optimales, suboptimales et létales (source : Fields, 1992)

Plage	Température (°C)	Effet
Létale	> 62	Mort en moins d'1 min
	50 à 62	Mort en moins d'1 h
	45 à 50	Mort en moins d'1 jour
	35 à 45	Les populations s'éteignent
Suboptimale	32 à 35	Ralentissement du développement des populations
Optimale	25 à 32	Vitesse de développement maximale
Suboptimale	13 à 25	Ralentissement du développement des populations
Léthale	5 à 13	Mort lente
	1 à 5	Les mouvements cessent
	-10 à -5	Mort en quelques semaines ou quelques mois (insectes acclimatés)
	-25 à -10	Mort en moins d'1 h

MODE D'ACTION ET DE DÉVELOPPEMENT DES INSECTES AMATEURS DE GRAINS STOCKÉS

	Température favorable à leur développement	Humidité favorable à leur développement	Stade d'action et de nuisibilité	Famille
CHARANÇONS	15 à 30°	10 à 16 %	Œuf dans grain	Coléoptère
ALUCITES	18 à 30°		Larve dans grain	Lépidoptère
SILVAIN	18 à 30°		Larve sur grain brisé	Coléoptère
CAPUCINS	25 à 28 °		Adulte attaque grains	Coléoptère
TRIBOLIONS	28 à 30°		Larve sur grain brisé	Coléoptère
TEIGNE DES GRAINS	12 à 25 °		Ponte sur grain	Lépidoptère

Source : Manuel de la défense des cultures (ACTA)

Figure – Insectes au stockage en fonction de la température

Tri

Le tri des grains se déroule en plusieurs étapes. Il est essentiel pour l'efficacité du tri de disposer de grains secs et propres. Ces points sont également primordiaux pour assurer une bonne conservation des grains. Le tri est décrit en détail à la partie « Les outils de tri des grains pour obtenir la qualité recherchée ».

Les différentes étapes de tri : Du plus simple au plus élaboré

1. Moissonneuse-batteuse

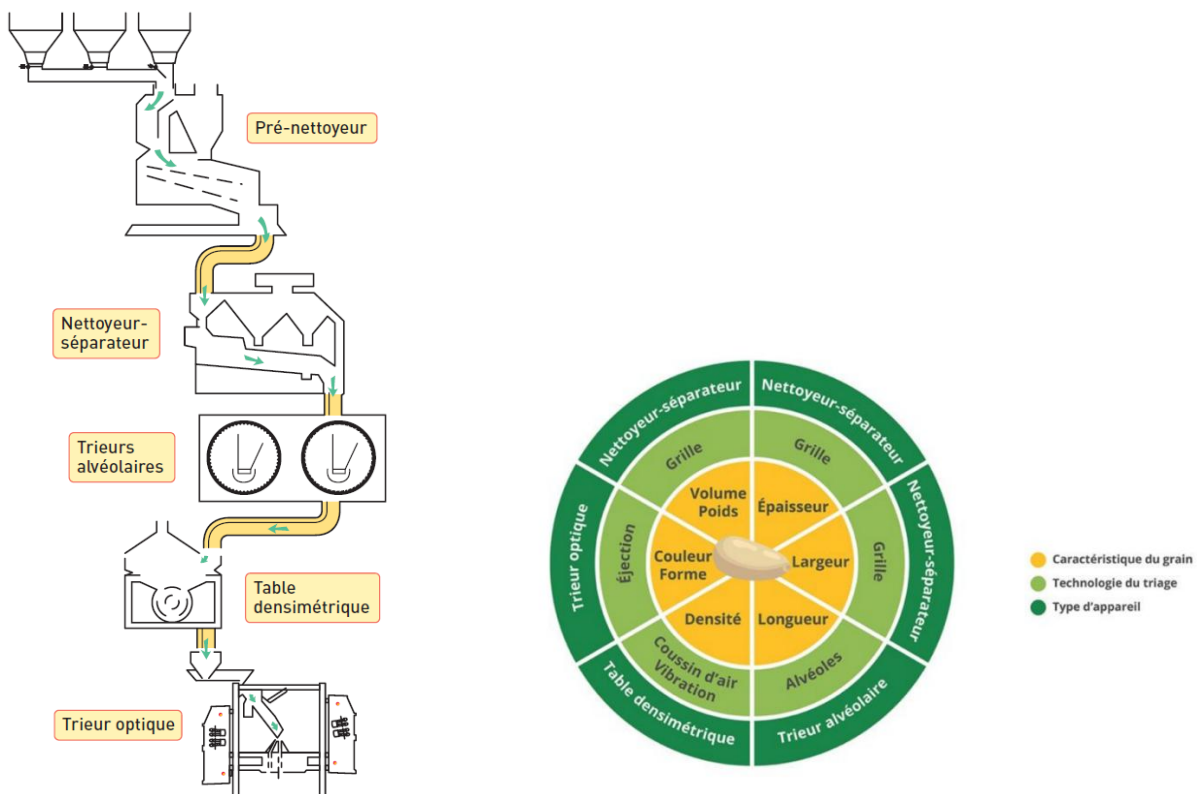
Le tri des grains se déroule en plusieurs étapes. Le premier tri a lieu dans la moissonneuse-batteuse où il faut **éviter de perdre trop de grains et de les casser**. Les fragments de grains sont propices au développement d'insectes et de moisissures. Ils sont très difficiles à retirer au tri.

2. Nettoyage

Le nettoyage est une étape préliminaire à celle de tri pour en assurer le bon déroulement ainsi que de **diminuer l'humidité d'un lot, de limiter l'échauffement des grains, de faciliter leur ventilation et de diminuer le développement de contamination**. Ce nettoyage est réalisé par un système de flux d'air afin de retirer une partie importante des impuretés et de contaminants. Il permet d'améliorer les caractéristiques physiques du lot comme son poids de mille grains et poids à l'hectolitre. Il peut traiter des débits très importants (35-400 tonnes/h). Le pré-nettoyeur est souvent combiné à un nettoyeur-séparateur.

3. Trieurs

Les grains doivent être secs et nettoyés pour leur tri. Le tri est basé sur des caractéristiques physiques (forme, densité, vitesse aérodynamique, texture du tégument et/ou perméabilité du tégument) ou/et optiques (forme, couleur, réflectivité du tégument et/ou propriétés biochimiques).



6. Outils de tri des grains pour obtenir la qualité recherchée

Le tri des grains est nécessaire pour amener un lot aux objectifs de qualité (normes ou engagement contractuel) sanitaire et technologique visés. Les systèmes de tri se redéplient pour pallier aux problématiques de lots déclassés pour des défauts technologique ainsi que lutte contre les adventices et les maladies des grains. En agriculture biologique, les leviers sont limités pour la gestion de ces problématiques.

Le trieur parfait n'existe pas. Il faut donc choisir une combinaison de trieur et des réglages en fonction des défauts rencontrés dans le lot. Le déclassé d'un lot peut être dû à de très petites quantités de grains fortement déviants au niveau de leur qualité.

Le tri des grains est appliqué pour atteindre différents objectifs de qualité qui sont du plus basique au plus élaboré repris ci-dessous.

- Obtenir une qualité sanitaire** en éliminant avec un pré-nettoyeur et un trieur basique (nettoyeur-séparateur) les grains contaminés et les impuretés, notamment les particules indésirables et toxiques, les grains cassés et malsains, les débris végétaux, les cailloux, les graines d'adventices et les insectes.

La législation européenne 67/476/CEE indique que les limites en termes d'impuretés pour la commercialisation d'un lot de céréales sont les suivants :

- Impuretés diverses → maximum 0,5% en poids c'est-à-dire grains malsains et déformés, paille, débris végétaux, poussière, pierres, insectes, ...
- Impuretés spécifiques → maximum 1,5% en poids c'est-à-dire graines d'adventices et autres graines
- Grains cassés → maximum 2,0% en poids
- Grains germés → maximum 1,0% en poids
- (- Grains pré-germés → maximum 2,0% en poids mais non-inclus dans la législation)

La norme à suivre en France pour les impuretés de lot de blé tendre commercialisé est la NF 15587 Addendum II blé tendre dont les critères sont les suivants :

Addendum n°II – Blé tendre – NF 15587

« Standard : PS 76 ; Humidité 15% ; grains cassés 4% ; grains germés 2% ; Impuretés 2 %

1. Grains cassés/brisés :

Dans le cas où le pourcentage des grains cassés/brisés de blé dépasse celui garanti par le contrat, il sera alloué une réfaction en pourcentage du prix facturé hors taxes évaluée selon le barème suivant :

- Dépassement de 0,1 à 0,5 point : pas de réfaction ;
- Dépassement de 0,6 à 3,0 points : réfaction de 0,25% du prix par point de dépassement au-delà de 0,5 point, fraction au prorata ;
- **Dépassement au-delà de 3,0 points : marchandise refusable.**

7% max

2. Grains germés

Dans le cas où le pourcentage des grains germés dépasse celui garanti par le contrat, il sera alloué une réfaction en pourcentage du prix facturé hors taxes évaluée selon le barème suivant :

- Dépassement de 0,1 à 2,0 points : réfaction de 0,50% du prix par point de dépassement, fraction au prorata ;
- **Dépassement au-delà de 2,0 points : marchandise refusable.**

4% max

3. Impuretés

Les impuretés sont constituées par :

- a) les Impuretés Grains
- b) les Impuretés Diverses

Le taux d'impuretés totales = 50% impuretés grains + 100% impuretés totales

Dans le cas où le pourcentage des impuretés totales dépasse celui garanti par le contrat, il sera alloué une réfaction évaluée en pourcentage du prix facturé hors taxes selon le barème suivant

- Dépassement de 0,1 à 1,0 point : pas de réfaction ;
- Dépassement de 1,1 à 3,0 points : réfaction de 1,0 % du prix par point de dépassement au-delà de 1,0 point, fraction au prorata ;
- **Dépassement au-delà de 3,0 points : marchandise refusable.**

En tout état de cause, **si le taux d'Impuretés Diverses est supérieur à 2.0%, la marchandise est refusable.**

5% max

NORMES DE COMMERCIALISATION DES ADDENDA INCOGRAIN

(source : Syndicat de Paris)

Normes par défaut qui s'appliquent si les spécifications ne sont pas indiquées dans le contrat, si conclu sous Incograin.

Spécifications	PS Kg/Hl	Humidité (%)	Grains Cassés (%)	Grains Germés (%)	Impuretés Grains + diverses (%)	Impuretés Grains (%)	Impuretés diverses (%)	Protéines (%)	Force Boulangère (W)	Hagberg (s)	Huile (%)	Germination (%)	Calibrage (%)	Acidité Oléique	Acidité Erucique
Ad 1 / Toutes Céréales		15%			2%		3% max								
Ad 2 / Blé Tendre Meunier							3% max								
Premium A 1	77							≥ 11,5	≥ 170	≥ 240					
Supérieur A 2*	76							≥ 11	non spécifié	≥ 220					
Médium A 3	non spécifié							≥ 10,5							
Acces A 4	non spécifié							spécifié dans le contrat	non spécifié	non spécifié					
Ad 4 / Orge Brassicole		14,5										95 %	90% > 2,5 mm 3% < 2,2 mm		
Ad 5 / Mals		15	5		3,5		2% max								
Ad 6 / Colza		9			2						40			2	2 max
Ad 6 / Tournesol		9			2						44			2	
Ad 7 / Protéagineux		14													
Ad 12 / Sorgho Alim. humaine		14,5	2	1		2	1%								
Ad 12 bis / Sorgho Alim. animale		14,5	3	2		2	1%								

* Les spécifications du Supérieur A2 correspondent aux spécifications du nouveau contrat Euronext N°3.

NORMES DE COMMERCIALISATION MATIF (source: Euronext)

Spécifications	PS Kg/Hl	Humidité (%)	Grains Cassés (%)	Grains Germés (%)	Impuretés Grains + diverses (%)	Impuretés Grains (%)	Impuretés diverses (%)	Protéines (%)	Force Boulangère (W)	Hagberg (s)	Huile (%)	Germination (%)	Calibrage (%)	Acidité Oléique	Acidité Erucique
Blé Tendre Meunier N°3	76 mini	15	4	2				11 mini		220 mini					
Blé Tendre Meunier N°2	76	15	4	2	2			non spécifié		non spécifié					
Mals		15 base - 15,5 max	4 base - 10 max	2,5 base - 4 max		4 base - 5 max	1 base - 3 max								
Colza (contrat)		9			2						40			2 max	2 max
Colza (livraison)		10 max			2 max						40				

RÉFRACTIONS DE PRIX I (source : Syndicat de Paris)

Contrats conclus sous Incograin sauf dispositions contraires.

	ADDENDUM I		ADDENDUM II		ADDENDUM III	
Spécifications	Toutes Céréales	Réfaction (% du Prix)	Blé Tendre Meunier	Réfaction (% du Prix)	Blé dur	Réfaction (% du Prix)
Poids spécifiques Kg/ Hl	Insuffisance < 0.5	0.5% au prorata	Insuffisance < 0.5	0.5% au prorata	Insuffisance < 0.5	0.5% au prorata
	Insuffisance de 0.5 à 3	1% au prorata	Insuffisance de 0.5 à 2	1% au prorata	Insuffisance de 0.5 à 2	1% au prorata
	Insuffisance > 3	Refusable	Insuffisance > 2	Refusable	Insuffisance > 2	Refusable
Humidité	Dépassement de 0.1 à 1%	1% au prorata	Dépassement de 0.1 à 1%	1% au prorata	Dépassement de 0.1 à 2%	1% au prorata
	Dépassement de 1.1 à 2%	1.5% au prorata	Dépassement > 1	Refusable	Dépassement > 2	Refusable
	Dépassement > 2%	Refusable				
Grains Cassés / Brisés(%)	Dépassement ≤ 2%	Pas de réfaction	Dépassement ≤ 0.5%	Pas de réfaction	Dépassement 0.1 à 3%	0.2% au prorata
	Dépassement de 2.1 à 5%	0.25% au prorata	Dépassement de 0.5 à 3%	0.25% au prorata	Dépassement > 3%	Refusable
	Dépassement > 5%	Refusable	Dépassement > 3%	Refusable		
Grains Germés (%)	Dépassement de 0 à 3%	0.5% au prorata	Dépassement de 0 à 2%	0.5% au prorata	Dépassement de 0.1 à 3%	0.3% au prorata
	Dépassement > 3%	Refusable	Dépassement > 2%	Refusable	Dépassement > 3%	Refusable
Impuretés	Dépassement ≤ 1%	Pas de réfaction	Dépassement ≤ 1%	Pas de réfaction	Dépassement de 0.1 à 2%	1% au prorata
	Dépassement de 1.1 à 8%	1% au prorata	Dépassement de 1.1 à 4%	1% au prorata	Dépassement de 2.1 à 4%	2% au prorata
	Dépassement > 8%	Refusable	Dépassement > 4%	Refusable	Dépassement > 4%	Refusable
Impuretés diverses	Impuretés diverses > 3%	Refusable	Dépassement > 3%	Refusable		
Ergots	Ergots > 0.05%	Refusable si destination humaine	Ergots > 0.05%	Refusable		
	Ergots > 0.1%	Refusable si destination animale				
Teneur en Protéines (%)	Insuffisance de 0.1	Pas de réfaction	Insuffisance de 0.1	Pas de réfaction	Insuffisance < 0.2	Pas de réfaction
	Insuffisance de 0.2	Pas de réfaction	Insuffisance de 0.2	Pas de réfaction	Insuffisance de 0.21 à 0.5	0.5%
	Insuffisance de 0.3	Pas de réfaction	Insuffisance de 0.3	1.2%	Insuffisance de 0.51 à 0.8	0.8%
	Insuffisance de 0.4	0.80%	Insuffisance de 0.4	1.8%	Insuffisance de 0.81 à 1	1.2%
	Insuffisance de 0.5	1%	Insuffisance de 0.5	2%	Insuffisance > 1%	Refusable
	Insuffisance de 0.6	1.20%	Insuffisance ≥ 0.6%	Refusable		
	Insuffisance de 0.7	1.50%				
	Insuffisance de 0.8	2%				
	Insuffisance de 0.9	2.50%				
	Insuffisance de 1	3%				
Insuffisance ≥ 1,1%	Arbitrage					
Force Boulangère (W)			Insuffisance ≤ 8%	Pas de réfaction		
			Insuffisance de 8.1 à 9	0.5%		
			Insuffisance de 9.1 à 10	1%		
			Insuffisance de 10.1 à 11	1.5%		
			Insuffisance de 11.1 à 12	2%		
			Insuffisance de 12.1 à 13	3%		
			Insuffisance de 13.1 à 14	4%		
			Insuffisance de 14.1 à 15	5%		
		Insuffisance > 15 %	Refusable			
Temps de chute de Hagberg (s)			Insuffisance ≤ 25 s	Pas de réfaction	Insuffisance ≤ 25 s	Pas de réfaction
			Insuffisance de 26 à 50 s	1/1000 par s.	Insuffisance de 26 à 50 s	1/1000 par s.
			Insuffisance > 50 s	Refusable	Insuffisance > 50 s	Refusable
Grains mouchetés					Dépassement de 0.1 à 3%	0.3% au prorata
					Dépassement de 3.1 à 4%	0.5% au prorata
					Dépassement > 4%	Refusable
Grains fusariés					Dépassement de 0.1 à 3%	0.3% au prorata
					Dépassement > 3%	Refusable
Grains mitadinés					Dépassement de 0.1 à 5%	0.1% au prorata
					Dépassement de 5 à 15%	0.2% au prorata
					Dépassement > 15%	Refusable

REFRACTIONS DE PRIX II (source : Syndicat de Paris)

Contrats conclus sous Incograin sauf dispositions contraires.

Spécifications	ADDENDUM IV		
	Orge de Brasserie	Réfaction (% du Prix)	
Humidité 14,5%	Dépassement de 0.1 à 5%	1% au prorata	
	Dépassement > 0.5%	Refusable	
Germination Résultat sur 120h 95%	Insuffisance entre 0.1 et 1%	0,5%	
	Insuffisance entre 1.1 et 2%	1%	
	Insuffisance entre 2.1 et 3%	2%	
	Insuffisance > 3%	Refusable	
Calibrage Calibrage élevé 2.5 mm 90% au dessus Calibrage faible 2.2 mm 3% au dessous	Insuffisance de 0.1 à 1%	0,25%	
	Insuffisance de 1.1 à 2%	0,5%	
	Insuffisance de 2.1 à 3%	0,75%	
	Insuffisance de 3.1 à 4%	1%	
	Insuffisance > 4%	Refusable	
	Dépassement de 0.1 à 1%	0,25%	
	Dépassement de 1,1 à 2%	0,50%	
	Dépassement > 2%	Refusable	
	Impuretés étrangères Grains autres céréales (F) G : Grains autres (GA) + avoines (GI) Grains autres (GH)	Dépassement de 0.1 à 2%	Pas de réfaction
		Dépassement > 2%	Refusable
Dépassement de 0 à 1%		Pas de réfaction	
Dépassement > 1%		Refusable	
Dépassement de 0.1 à 0.5%		Pas de réfaction	
Dépassement > 0.5%	Refusable		
Ergots	Ergots > 0.05%	Refusable	
Impuretés spécifiques 1) Orge à 4 épis et dans les orges à 2 r 2) Orge d'hiver à 2 r dans les orges de Printemps à 2 r 3) Orge de Printemps à 2 r dans les orges d'hiver à 2 r Orge à 2 r dans les orges à 4 épis à rangs Ensemble des Impuretés Étrangères et Spécifiques F0 + 1 + 2 + 3	Dépassement de 0.1% à 1%	Pas de réfaction	
	Dépassement 3.1 à 4%	1% au prorata	
	Dépassement > 4%		
	Dépassement de 0.1 à 5%	Pas de réfaction	
	Dépassement de 5.1 à 7%	0,5% au prorata	
	Dépassement > 7%	Refusable	
	Dépassement de 0.1 à 10%	Pas de réfaction	
	Dépassement > 10%	Refusable	
	Dépassement de 0.1 à 10%	Pas de réfaction	
	Dépassement > 10%	Refusable	
Pureté variétale 83%	PV de 92 à 92,9%	0,5%	
	PV de 91 à 91,9%	1%	
	PV de 90 à 90,9%	1,5%	
	PV de 89 à 89,9%	2%	
	PV de 88 à 88,9%	2,5%	
	PV de 87 à 87,9%	3%	
	PV 86 à 86,9%	3,5%	
PV < 86 %	Refusable		
Teneur en Protéines (%)	Insuffisance ou Dépassement de 0, 1 à 1 %	de 0.1 à 1%	
	Insuffisance ou Dépassement > ou < 1%	Refusable	

Spécifications	ADDENDUM V	
	Maïs	Réfaction (% du Prix)
Humidité 15%	Dépassement de 0,1 à 0,5%	1% au prorata
	Dépassement > 0,5%	Refusable
Grains Cassés 5%	Dépassement de 0,1 à 10%	0,25% au prorata
	Dépassement > 10%	Refusable
Impuretés 3,5%	Dépassement de 0,1 à 7%	1% au prorata
	Dépassement > 7 %	Refusable
Impuretés diverses	Dépassement > 2%	Refusable
Grains avariés	Dépassement > 1,25%	Refusable

Spécifications	ADDENDUM VI	
	Colza et Tournesol	Réfaction (% du Prix)
Humidité 9%	Si Dépassement	Refusable
Impuretés Colza	Dépassement > 3%	Refusable
Impuretés Tournesol 2%	Dépassement > 5%	Refusable
Teneur en Huile 40% Colza 44% Tournesol	Teneur en Huile < 40 %	Refusable
	Teneur en Huile < 44 %	Refusable
Acide Oléique 2%	Dépassement de 0.1 à 2%	Pas de réfaction
	Dépassement de 2.1 à 3%	2% au prorata
	Dépassement de 3.1 à 5%	2,5% au prorata
	Dépassement > 5%	Refusable
Acide Erucique 2% pour le Colza	Acide Erucique > 2%	Refusable

Spécifications	ADDENDUM VII	
	Pois, Fèves et Féverolles	Réfaction (% du Prix)
Humidité 14%	Dépassement de 0,1 à 1%	Pas de réfaction
	Dépassement de 1.1 à 2%	1% au prorata
	Dépassement > 2%	Refusable
Grains Cassés / Brisés	Dépassement ≤ 5%	Pas de réfaction
	Dépassement de 5,1 à 10%	0.25% au prorata
	Dépassement > 10 %	Refusable
Impuretés totales	Dépassement ≤ 2%	Pas de réfaction
	Dépassement de 2.1 à 4%	1% au prorata
	Dépassement > 4%	Refusable
Matières inertes	Matières inertes > 1%	Refusable

Le nettoyage et tri sont les seules techniques autorisées pour pallier un problème d'un lot ayant des mycotoxines DON dont la teneur est au-dessus du seuil maximal légal européen de 1000 µg/kg.

Tableau - Méthode disponible pour réduire la teneur en mycotoxine DON des Fusarium d'un lot de froment destiné à l'alimentation humaine (Arvalis)

	Blé tendre avec une teneur en mycotoxine DON des <i>Fusarium</i> < 1000 µg/kg	Blé tendre avec une teneur en mycotoxine DON des <i>Fusarium</i> > 1000 µg/kg
Producteur/Stockeur	Nettoyage Assemblage	Nettoyage Tri
Première transformation	Nettoyage Tri Décorticage Process de transformation	/

2. **Produire de la semence** en utilisant des trieurs plus élaborés (comme un trieur alvéolaire, densimétrique et/ou optique) pour obtenir une très grande pureté spécifique afin d'éviter la présence d'adventices et le développement de moisissures. Cela permet aussi de disposer de grains d'un calibre élevé pour s'assurer un bon pouvoir germinatif. Le brossage des grains est intéressant pour améliorer leur qualité sanitaire par rapport à la présence de moisissures comme la carie. Ce brossage ne doit pas être trop intense afin de ne pas affecter le pouvoir germinatif des grains.

La législation européenne 66/402/CEE indique que les limites en termes d'impuretés pour la commercialisation de semences de céréales sont les suivants :

- Pouvoir germinatif → minimum 85,0 %
- Pureté spécifique → minimum 98,0 % en poids
- Pureté variétale → minimum 99,0 % pour la semence commerciale de seconde génération

Cette législation est aujourd'hui peu ambitieuse et n'est plus adaptée au regard notamment des grains d'adventices vu la disponibilité du tri optique visible qui est mature et disponible à un prix raisonnable. Cette technique peut remplacer le tri alvéolaire et la table densimétrique dans le rôle de retrait des graines d'adventices. Le tri optique visible permet de réduire la présence de graines d'adventice à un seuil au moins inférieur à 0,2% en poids. Une telle qualité est nécessaire pour de la semence en agriculture biologique afin de lutter contre le développement des adventices. Il faut également l'envisager en agriculture conventionnelle avec la quasi-disparition d'herbicides efficaces contre les adventices.

3. **Séparer avec des trieurs élaborés les grains de cultures associés** pour leur valorisation en alimentation humaine. Il faudra souvent utiliser du tri optique pour réussir à atteindre une très grande pureté finale car la séparation sur base de caractéristiques morphologiques par les trieurs physiques ne sera pas suffisante.

4. **Améliorer la qualité technologique** de la teneur d'un constituant chimique et/ou de sa qualité (comme la protéine et sa force boulangère) nécessitera, en plus du tri physique, un tri optique infrarouge permettant de séparer sur cette base. Les caractéristiques physiques d'un lot de grains (poids de mille grains et/ou poids à l'hectolitre) peuvent être améliorées plus simplement avec des trieurs physiques comme pour la production de semence. La qualité technologique à viser dépend du procédé de transformation, du produit final et du consommateur. Pour le blé panifiable en mélange Euronext/Matif, la qualité à respecter est de 76/220/11. Cela signifie au moins 76 kg/hl de poids à l'hectolitre, au moins 220 s de temps de chute de Hagberg et au moins 11,0 % de teneur en protéines.

L'objectif du tri optique infrarouge est de permettre d'éviter les déclassements de lots de variétés panifiables en utilisation fourragère à cause d'un manque de protéines. Grâce à cela, il est possible de générer plus de revenu par tonne de céréale pour l'amont de la filière. Cette technique de tri permet aussi de ne pas avoir des lots déclassés à cause de quelques grains avec un problème de temps de chute de Hagberg.

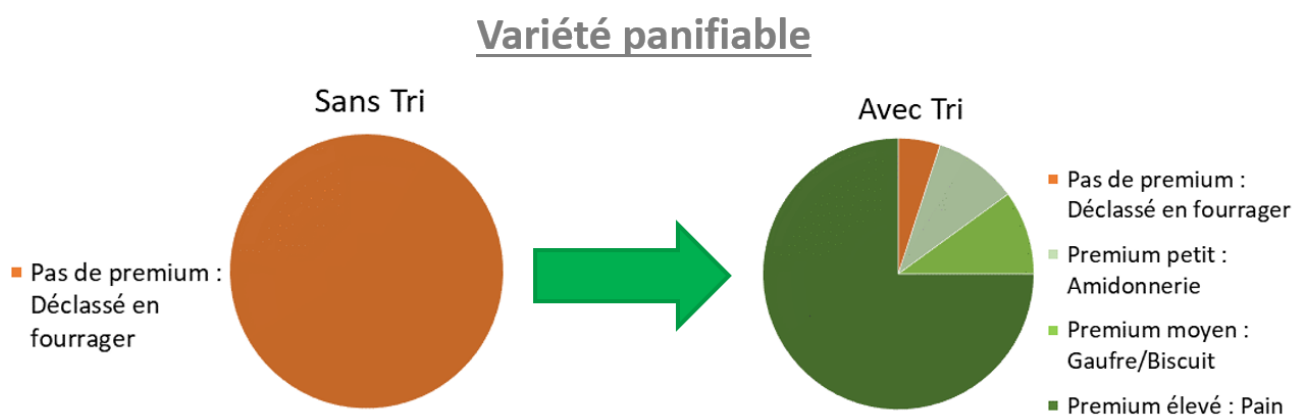


Figure - Générer plus de revenu avec la même quantité de grains grâce au tri

Les différentes étapes de tri des grains : Du plus simple au plus élaboré

Le tri des grains se déroule en plusieurs étapes. Il est essentiel pour l'efficacité du tri de disposer de grains secs et propres. Ces points sont également primordiaux pour assurer une bonne conservation des grains.

Moissonneuse-batteuse

Le premier tri des grains a lieu dans la moissonneuse-batteuse. Les proportions pour les différentes impuretés présentes à la moisson en France sont présentées à la Figure ci-dessous. Il faut éviter de perdre trop de grains et de les casser. Les fragments de grains sont propices au développement d'insectes et de moisissures. Ils sont très difficiles à retirer au tri et pourtant bien présents. Un objectif en le tiers nord de la France est de ne pas excéder 2% d'impuretés et 3% de grains cassés à la moisson. Ces seuils sont en réalité souvent dépassés à cause d'un mauvais réglage de la moissonneuse.

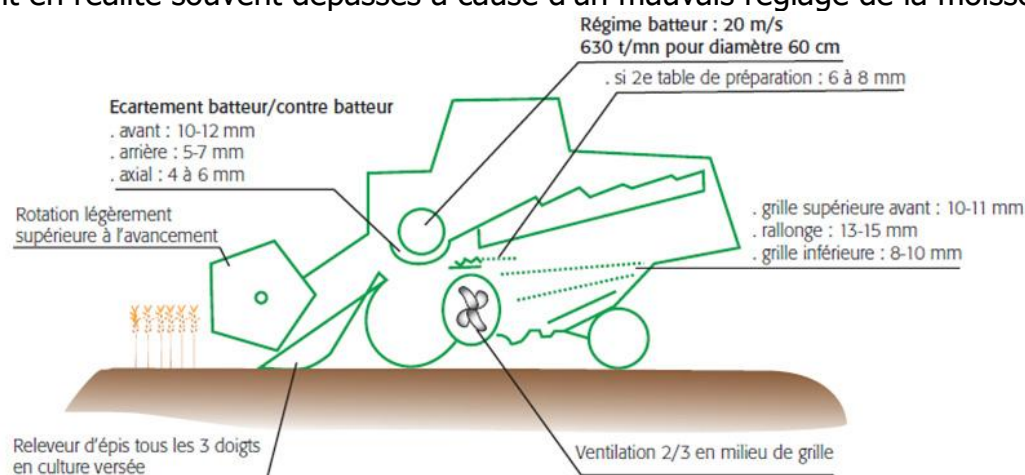


Figure - Premier tri par la moissonneuse-batteuse (Arvalis)

Tableau 3 : impact des réglages de la moissonneuse-batteuse sur les impuretés présentes dans le blé

	Grains brisés	Impuretés constituées par des grains	Grains germés	Impuretés diverses	Poussières
Vitesse de rotation du batteur	+++	-	-	++	++
Ecartement batteur/contre-batteur	+++	+	-	++	++
Vents	++	+++	+	+++	+++
Ouverture de la grille supérieure	++	+	+	++	-
Ouverture de la grille inférieure	++	+++	++	+++	-
Vitesse d'avancement	+	++	-	+++	+

+++ : Très forte corrélation entre l'organe et la catégorie d'impuretés.

++ : Forte corrélation entre l'organe et la catégorie d'impuretés.

+ : Faible corrélation entre l'organe et la catégorie d'impuretés.

- : Pas de corrélation connue entre l'organe et la catégorie d'impuretés.

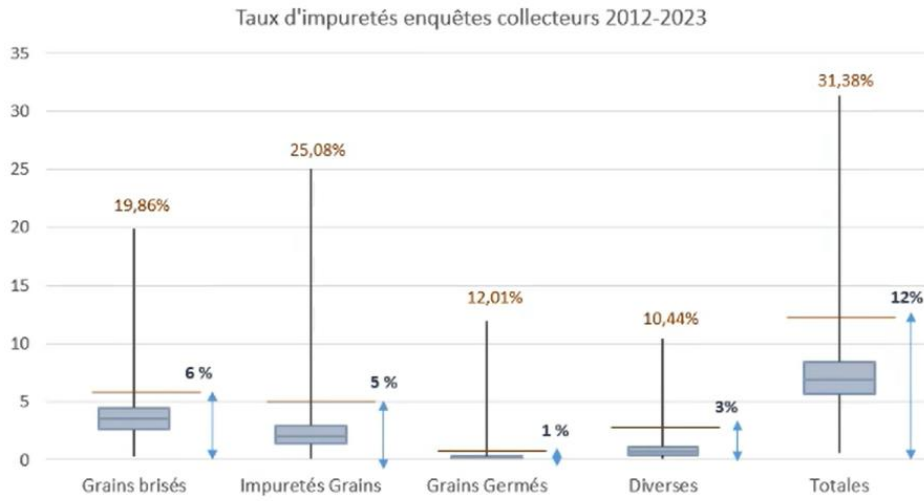


Figure - Les différentes impuretés à la moisson en France (Arvalis)

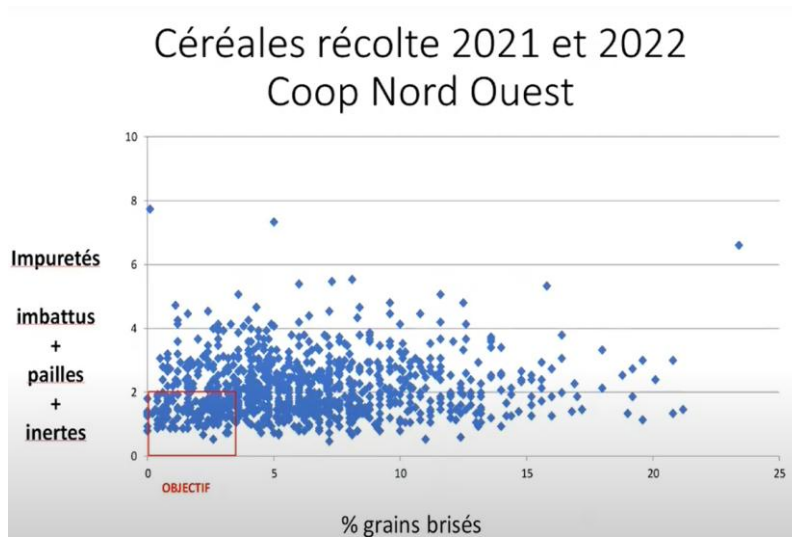


Figure - Impuretés et grains brisés à la moisson dans le tier nord de la France (Arvalis)

Pré-Nettoyage

Le pré-nettoyage des grains est une étape préliminaire à celle de tri pour en assurer le bon déroulement. Cette étape à réaliser juste après la moisson. Il est incontournable en récoltes issues de l'agriculture biologique.

Le pré-nettoyage des grains diminue l'humidité d'un lot et de limite l'échauffement des grains spécialement, un point très critique en présence d'adventices. Il permet plus généralement de diminuer fortement la présence de toutes les impuretés diverses ce qui contient le développement des contaminations (moisissures sources de mycotoxines) et d'insectes. Un pré-nettoyage facilite et rend moins énergivore la ventilation et le refroidissement des grains au stockage. Sa réalisation avec une colonne d'air aérodynamique permet aussi une certaine amélioration de la qualité technologique notamment en augmentant les lots avec des bas poids à l'hectolitre et/ou temps de chute de Hagberg. Ce type colonne s'apparente aux améliorations de qualité technologique apportées par une table densimétrique mais de manière bien plus approximative tout en étant bien plus efficient à l'usage.

Le pré-nettoyage est réalisé par un système de flux d'air afin de retirer une partie importante des impuretés et de contaminants ainsi que d'améliorer les caractéristiques physiques du lot comme le poids à l'hectolitre. Il peut traiter des débits très importants (35 à plus de 100 tonnes/h). Le pré-nettoyeur est souvent combiné à un nettoyeur-séparateur.

Figure 10 : Principe de fonctionnement de pré-nettoyeurs par aspiration (source : Denis)

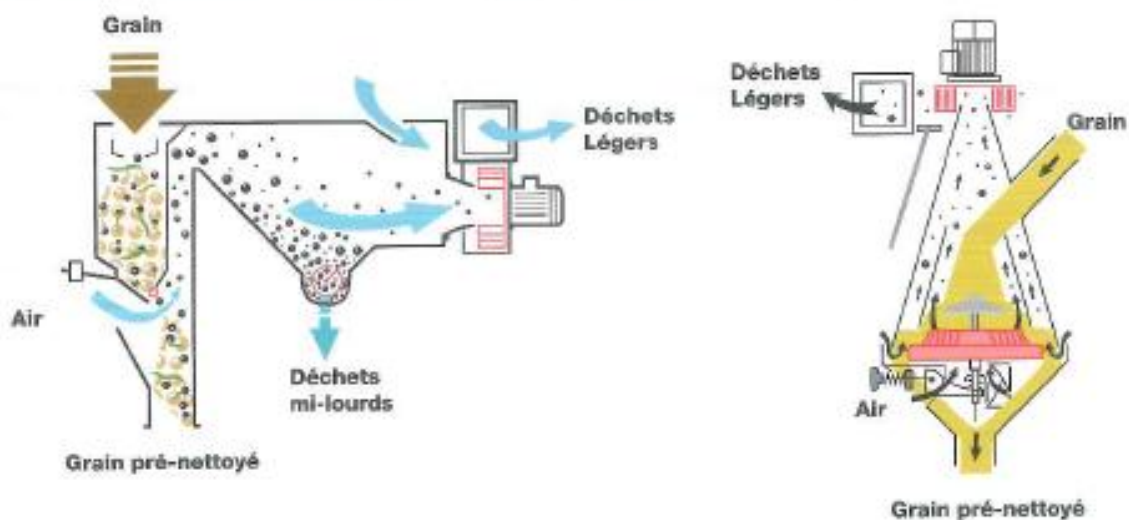
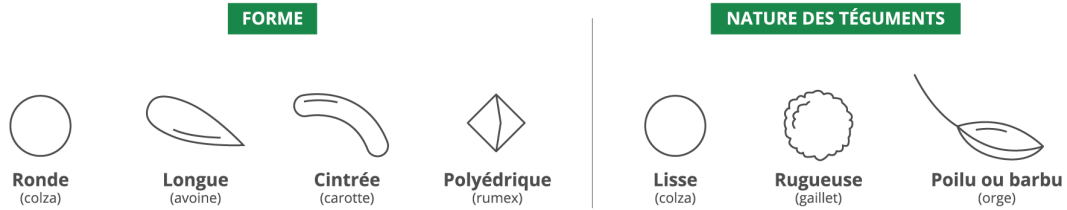


Figure - Pré-nettoyeur de type cyclone

Trieurs

Les grains doivent être secs et nettoyés pour leur tri. Le tri est basé sur des caractéristiques physiques (forme, densité, vitesse aérodynamique, texture du tégument et/ou perméabilité du tégument) ou/et optiques (forme, couleur, réflectivité du tégument et/ou propriétés biochimiques). Au plus les caractéristiques sont différentes entre les grains et les impuretés, au plus le tri est efficace.

LES DIFFÉRENCES PHYSIQUES DES GRAINES



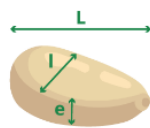
LONGUEUR - LARGEUR - ÉPAISSEUR - POIDS

Espèce	Longueur (L) en mm		Largeur (l) en mm		Épaisseur (e) en mm		Poids 1000 grains en grammes
	MINI	MAXI	MINI	MAXI	MINI	MAXI	
Blé	5	8,5	1,6	4,7	1,5	3,5	45 - 55
Orge	8	12	2,7	5	1,8	4,5	35 - 45
Avoine	10	17	2,8	3,5	1,5	2,8	35 - 37
Colza	1,7	2,8	1,6	2,7	1,2	2,5	3,5 - 7
Gaillet	2,3	4,2	2	4	1,6	3	≈ 3,7
RGI	4,5	6,5	0,9	1	0,5	1,1	≈ 2

© SEMAE

Figure - Les différences physiques des grains (Semae)

TRIAGE SELON LA FORME DES GRAINS



L : longueur des grains
l : largeur des grains
e : épaisseur des grains

GRILLES

Perforation allongée



Les grilles laissent passer les grains dont l'épaisseur est inférieure à e'

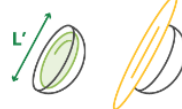
Perforation ronde



Les grilles laissent passer les grains dont la largeur est inférieure à l'

ALVÉOLES

Cylindre « long »



Les alvéoles laissent passer les grains de blé ($L' > L$) et retiennent les autres grains plus longs.

Cylindre « rond »



Les alvéoles laissent passer les grains courts et retiennent les grains de blé ($L'' < L$).

© SEMAE

Figure - Tri selon la forme des grains (Semae)

Chaque trieur a une spécificité différente au regard du grain permettant d'être complémentaire quand ils sont mis à la chaîne. Ils sont généralement utilisés dans l'ordre suivant le : (pré-)nettoyeur, nettoyeur-séparateur, trieur alvéolaire, table densimétrique et trieur optique. Le débit des trieurs diminue tout au long de la chaîne de tri vu que la séparation des grains des impuretés devient de moins en moins évidente.

Les freintes et abattements en impuretés par chaque trieur tout au long de la chaîne de tri des grains pour la production de semence de céréale sont présentés aux Figures ci-dessous.

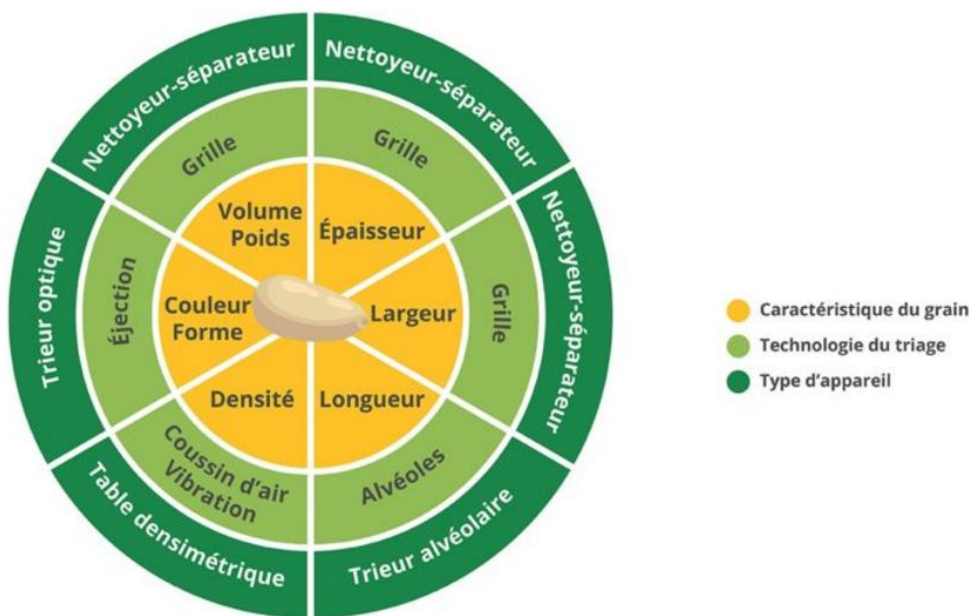


Figure - Chaîne de tri et spécificité de chaque trieur (Semae)

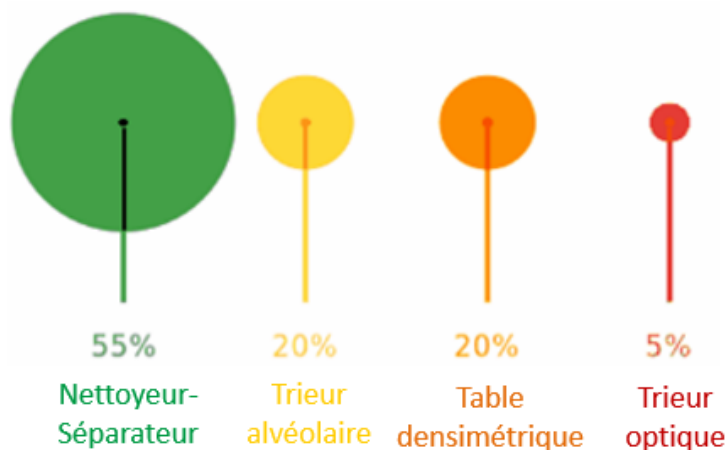


Figure - Abattements en impuretés par chaque trieur pour la production de semence (Semae)

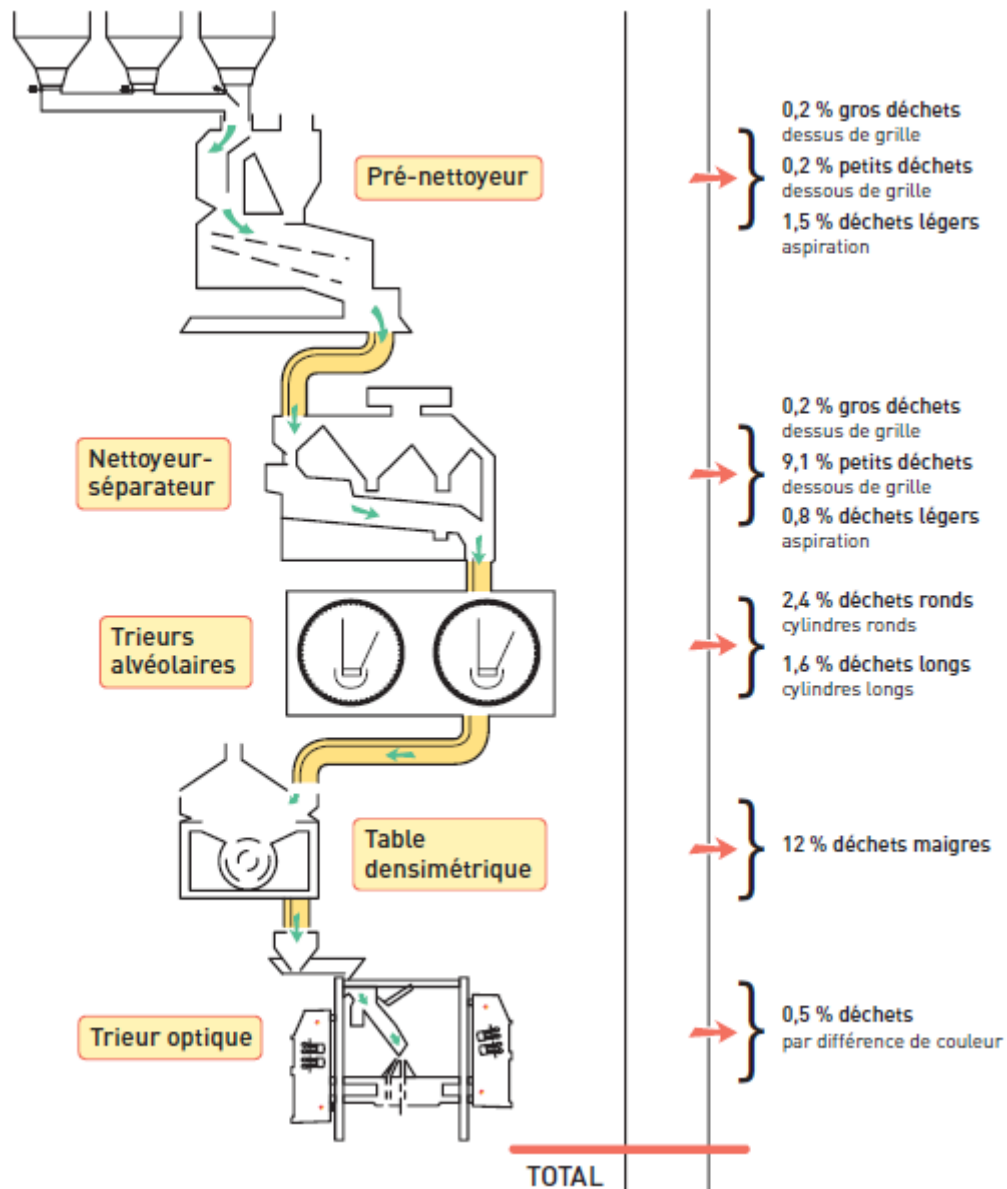


Figure - Freintes en impuretés par chaque trieur pour la production de semence (Semae)

1. Nettoyeur-séparateur qui sépare les grains sur base de leur largeur/épaisseur en combinant des grilles à trous allongés et ronds.

Le choix de grilles pour un nettoyeur-séparateur planaire peut se définir selon la méthodologie de dimensionnement présentée à la Figure ci-dessous. L'efficacité du nettoyeur-séparateur est nettement mieux améliorée par une diminution du débit d'alimentation que par l'adaptation des ouvertures des grilles de tri.

Il affine l'élimination des déchets légers et graines d'adventice (comme la vesce, le gaillet et la folle avoine). Il améliore les caractéristiques physiques des grains (comme leur taille et le poids à l'hectolitre). Des grains de grands calibres sont recherchés pour l'utilisation en semences, en malterie-brasserie et en meunerie. Un nettoyage facilite et rend moins énergivore la ventilation et le refroidissement des grains au stockage.

Le nettoyeur-séparateur sert aussi pour la séparation de grains de cultures associées comme le froment-pois et féverole-orge.

Nettoyeur-séparateur

Le nettoyeur-séparateur élimine de nombreux déchets mais laisse cependant passer des graines de mauvaises herbes difficiles à éliminer et des grains maigres ou malades.

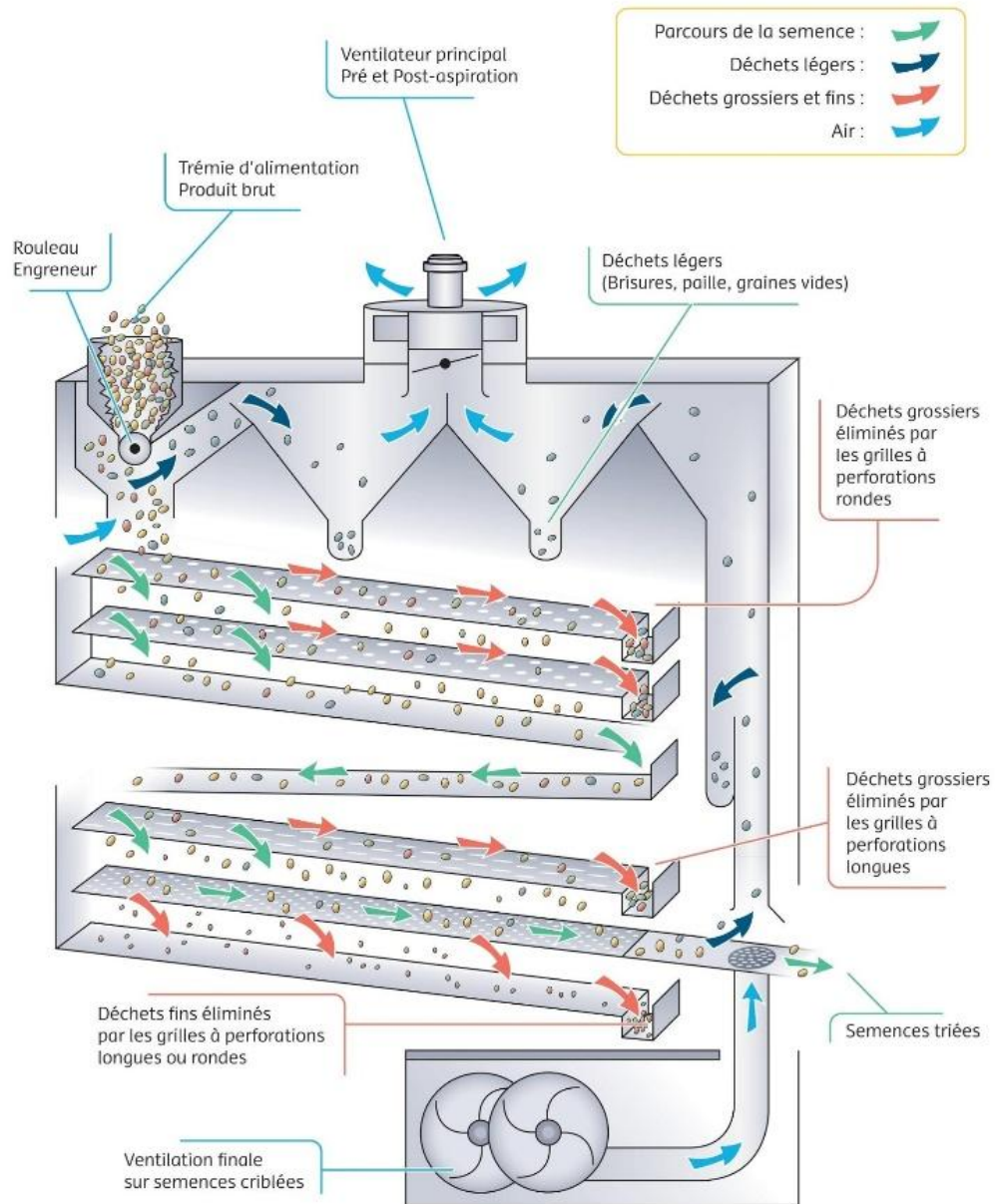


Figure - Nettoyeur-séparateur (Semae)

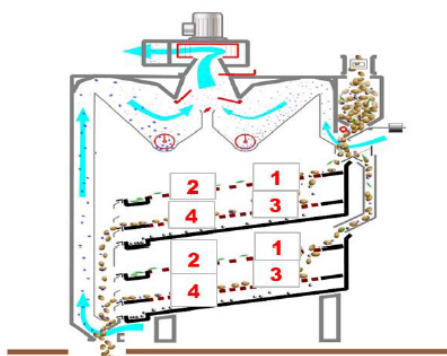
► Graines longues

- 1ere grille d'émottage perforations rondes
 - $\frac{\text{Longueur} + \text{largeur}}{2}$ = largeur des perforations rondes
- 2ème grille d'émottage perforations oblongues
 - Epaisseur + 0,1 à 0,2 mm = largeur des perforations longues
- Grille de criblage perforations rondes , longues ou panachées
 - $\frac{\text{Epaisseur}}{2}$ (+0,5mm sur céréales) = largeur des perforations longues

● Graines rondes

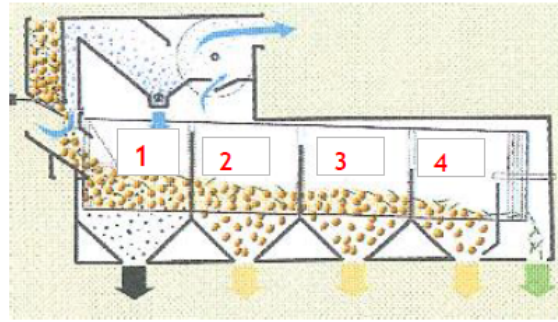
- 1ere grille d'émottage perforations rondes
 - Largeur x 1,25 = largeur des perforations rondes
- 2ème grille d'émottage perforations oblongues/rondes
 - Epaisseur + 0,1 à 0,2 mm = largeur des perforations longues
- Grille de criblage perforations rondes , longues ou panachées
 - $\frac{\text{Epaisseur}}{2}$ = largeur des perforations longues

Figure - Choix pour les dimensions des perforations des grilles pour le nettoyeur-séparateur (All Seed Training)



ESPECES	GRILLES EMOTTAGE		GRILLES CRIBLAGE	
	1	2	3	4
Avoine	7,00R	6,50R	3,00R	1,80L
Blé	5,50R	5,00R	2,10L	3,25R
Cameline	2,00R	1,80R	0,80R	0,50L
Colza	3,25R	3,00R	1,20L	1,70R
Grand Epautre	14,0R	12,0R	5,00R	2,30L
Féverole	14,0R	12,0R	4,50L	6,50R
Lentille verte	5,50R	5,25R	3,75R	1,8L
lentille corail	5,25R	5,00R	3,50R	1,8L
Lin	3,50R	3,20R	2,50R	0,90L
Maïs	14,0R	12,0R	6,50R	3,75L
Millet	2,80R	2,50R	0,70L	1,50R
Orge	6,00R	5,50R	2,10L	3,00R
Pois	11,0R	10,0R	4,00L	6,00R
Pois Chiche	12,0R	11,0R	4,25R	6,00R
Soja	10,0R	9,00R	3,75L	5,00R
Sarrasin	6,00R	5,50R	2,30L	4,25R
Tournesol	8,50R	7,50R	2,80L	4,25R
Triticale	6,00R	5,50R	2,20L	3,20R

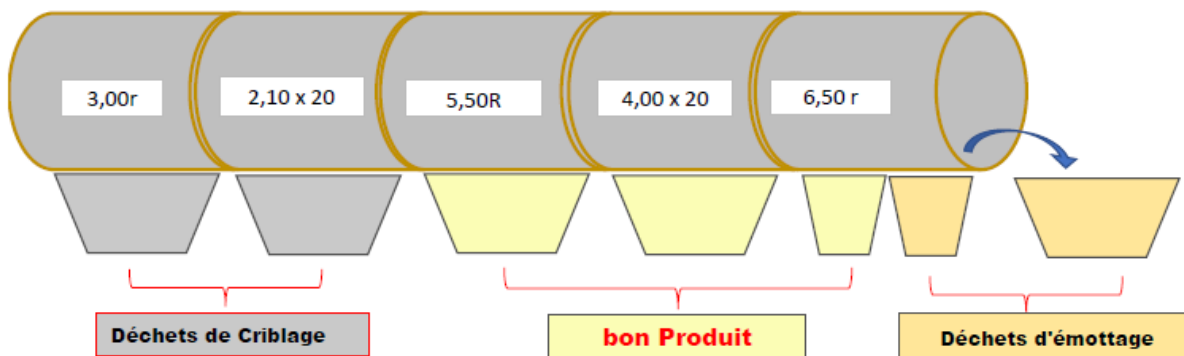
Figure -Diagrammes de tri habituel pour le nettoyeur-séparateur planaire (All Seed Training)



Espèces	Grilles			
	1	2	3	4
Blé	2,10L - 2,20 L	3,00R - 3,20R	5,50R - 6,00R	6,50R
Orge	2,00L - 2,10L	3,00R - 3,20R	6,50R - 7,00R	7,00R
Tourneol	2,20L - 2,30L	4,20R - 4,50R	7,00R - 7,50R	5,50L
Colza	1,20L - 1,30L	1,70R - 1,80R	3,00R - 3,20R	3,50R
Maïs	3,50L - 3,75L	7,00R - 7,50R	12,0R	1,50R
Sorgho Bicolor	1,20L - 1,30L	2,80R - 3,00R	4,25R 4,50	5,00R
Lin	0,90L	2,50R	1,60L	3,50R
Blé Pois	2,10L - 2,20L	3,00R - 3,20R	3,50L - 3,50L	5,50R

Figure - Diagrammes de tri habituel pour le nettoyeur-séparateur rotatif à 4 grilles (All Seed Training)

Diagramme de grilles pour Trieur rotatif



Espèces	Grilles				
	1 Criblage	2 Criblage	3 Emottage	4 Emottage	5 Emottage
Blé	2,10L -2,20 L	3,00R	5,50R	4,20L	6,50R
Avoine	1,90L -2,00L	3,00R	6,50R	7,00R	7,50R
Orge	2,00L -2,10L	3,00R	6,50R	4,20L	7,00R
Triticale	2,00L -2,10L	3,00R	6,50R	4,20L	7,00R
Tournesol	2,20L - 2,30L	4,20R	7,00R	7,50R	5,50L
Colza	1,20L - 1,30L	1,70R	3,00R	3,20R	3,50R
Moutarde	1,20L - 1,30L	1,80R	3,50R	3,80R	4,20R
Maïs	3,50L -3,75L	7,00R	12,0R	15,00R	6,50L
Sorgho Bicolor	1,20L -1,30L	2,80R	4,25R	4,50R	5,00R
Lin	0,90L	2,50R	1,60L	3,50R	1,60L
Luzerne	0,70L	1,20R	1,30L	2,00R	2,50R
Trèfle Violet 2N	0,70L	1,20R	1,30L	2,00R	2,50R
Sarrasin	2,50L	4,25R	6,50R	7,50R	8,00R
Cameline	0,60L	1,10R	1,20L	1,80R	2,00R
Feverole	4,75L	7,50R	14,0R	15,00R	7,50L
Soja	3,50L -3,75L	5,50R	8,00R	10,00R	5,50L
Pois	3,75L	6,00R	10,00R	12,00R	5,75L
Blé Féverole	2,10L -2,20L	3,00R	3,75L	6,50L	7,50R
Blé Pois	2,10L -2,20L	3,00R	3,75L	5,75L	10,00R

Figure - Diagrammes de tri habituel pour le nettoyeur-séparateur rotatif à 4 grilles (All Seed Training)



Figure - Grains avant et après tri par un nettoyeur-séparateur sans (pré-)nettoyage (Isla de pan)

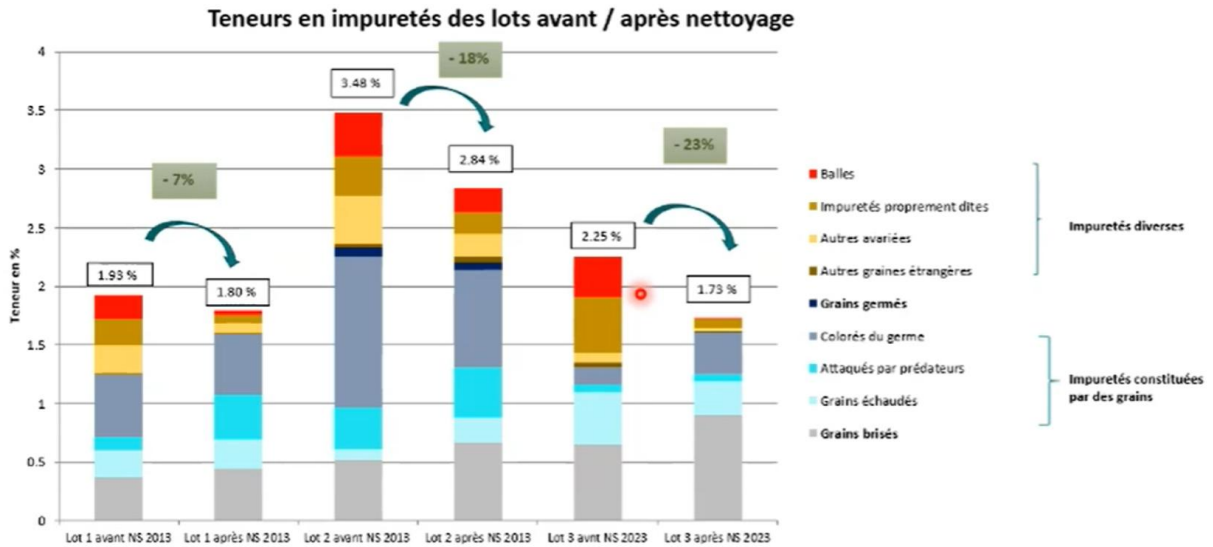
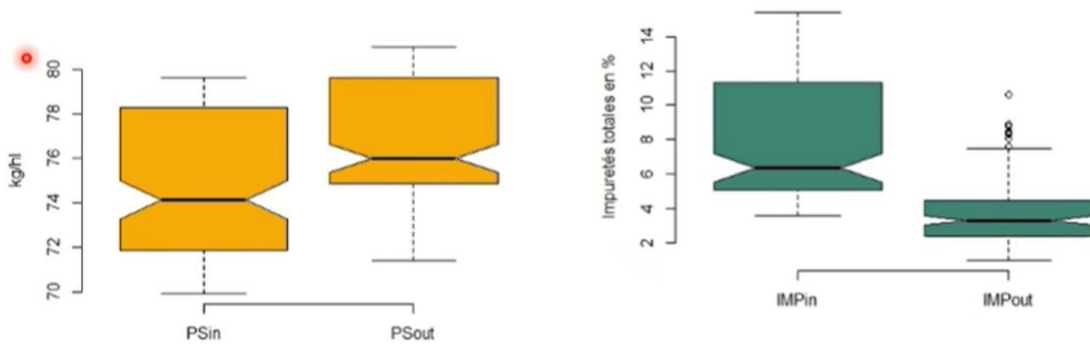


Figure - Effet du nettoyeur-séparateur en France sur les différents types d'impuretés (Arvalis)



Amélioration moyenne du PS : **+2,1 kg/hl**
(p-value<0,001)

Diminution moyenne du taux d'impuretés totales : **-3,9%**
(p-value<0.001)

Figure - Effet du nettoyeur-séparateur en France sur le PS (poids à l'hectolitre) et les impuretés totales (Arvalis)

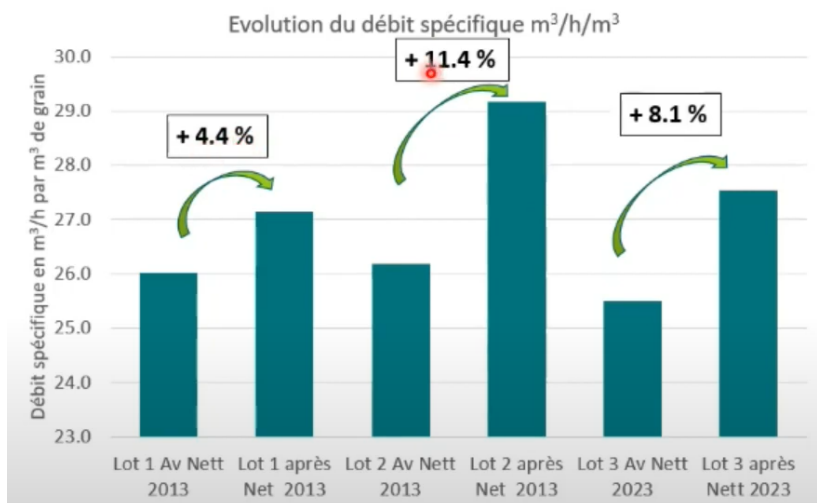


Figure - Effet du nettoyeur-séparateur sur la ventilation des grains au stockage (Arvalis)

2. Trieur alvéolaire qui sépare, sur base de la longueur, les grains ovales, longs ou ronds dont la largeur/épaisseur sont identiques.

Les paramètres à régler sur ce trieur en plus du débit d'alimentation sont : la forme des alvéoles (rondes ou longues), la position de l'auget ainsi que la vitesse de rotation et l'inclinaison longitudinale du cylindre.

Ce trieur affine encore plus l'élimination d'impuretés comme la vesce, le gaillet et la folle avoine. Il permet de retirer les grains cassés et améliore les caractéristiques physiques des grains (comme leur taille). Il est à utiliser pour la production de semence de qualité ainsi que des lots alimentaires biologiques trop riches en impuretés après passage au nettoyeur-séparateur. Il sépare des grains de cultures associées comme l'orge-lentille.

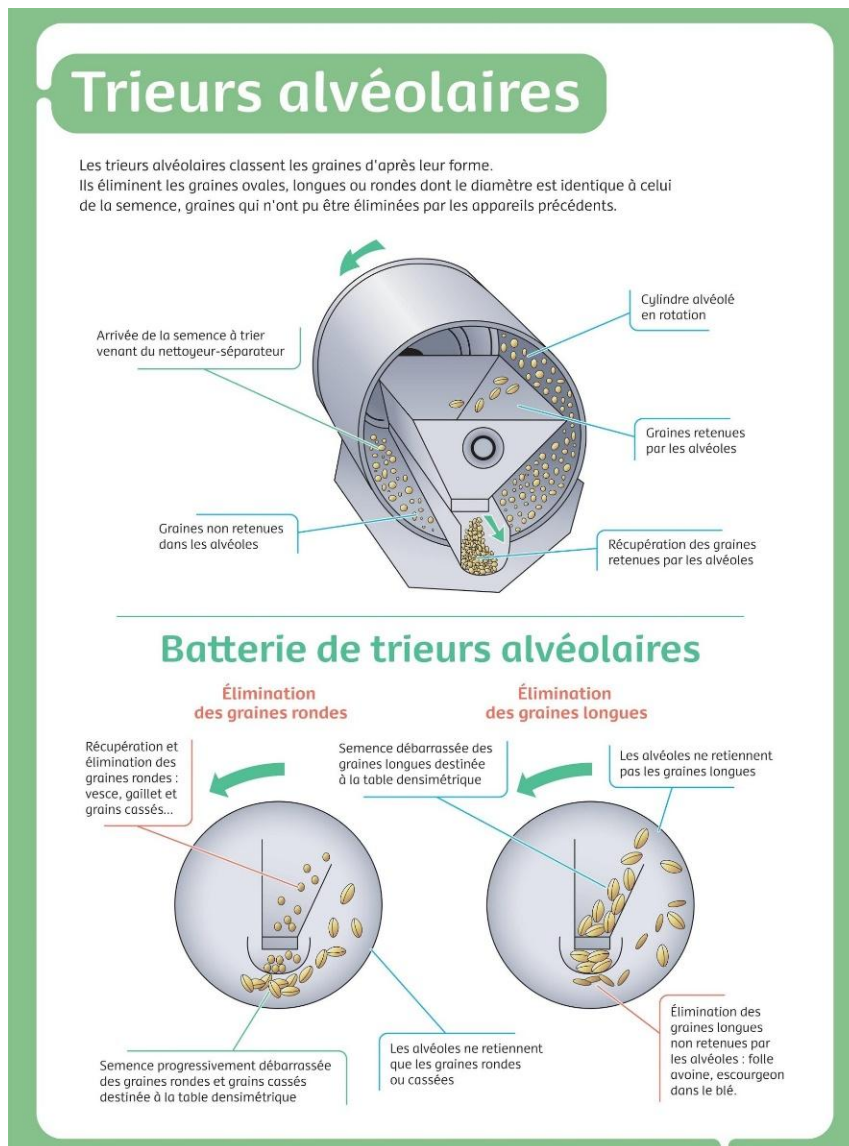


Figure - Trieur alvéolaire (Semae)

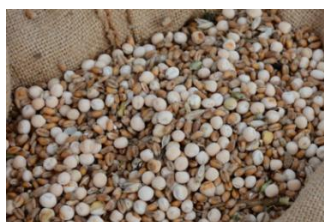


Figure - Association de pois et froment (Sillon belge)

3. Table densimétrique qui sépare les grains de densité différente indépendamment de la forme des grains.

Les paramètres à régler sur ce trieur en plus du débit d'alimentation sont : la vitesse de vibration, l'inclinaison longitudinale, l'inclinaison latérale de la table et la puissance de la soufflerie.

Il élimine les éléments moins denses comme les grains vêtus, malsains (dont ergot), fusariés et (pré-)germés (avec un temps de chute de Hagberg trop bas) ainsi que les plus denses comme la terre. Son réglage et utilisation ne sont pas faciles et exigent du personnel qualifié à cet effet. Il est à utiliser pour la production de semence de qualité ainsi que des lots alimentaires biologiques trop riches en impuretés après passage au nettoyeur-séparateur et au trieur alvéolaire.

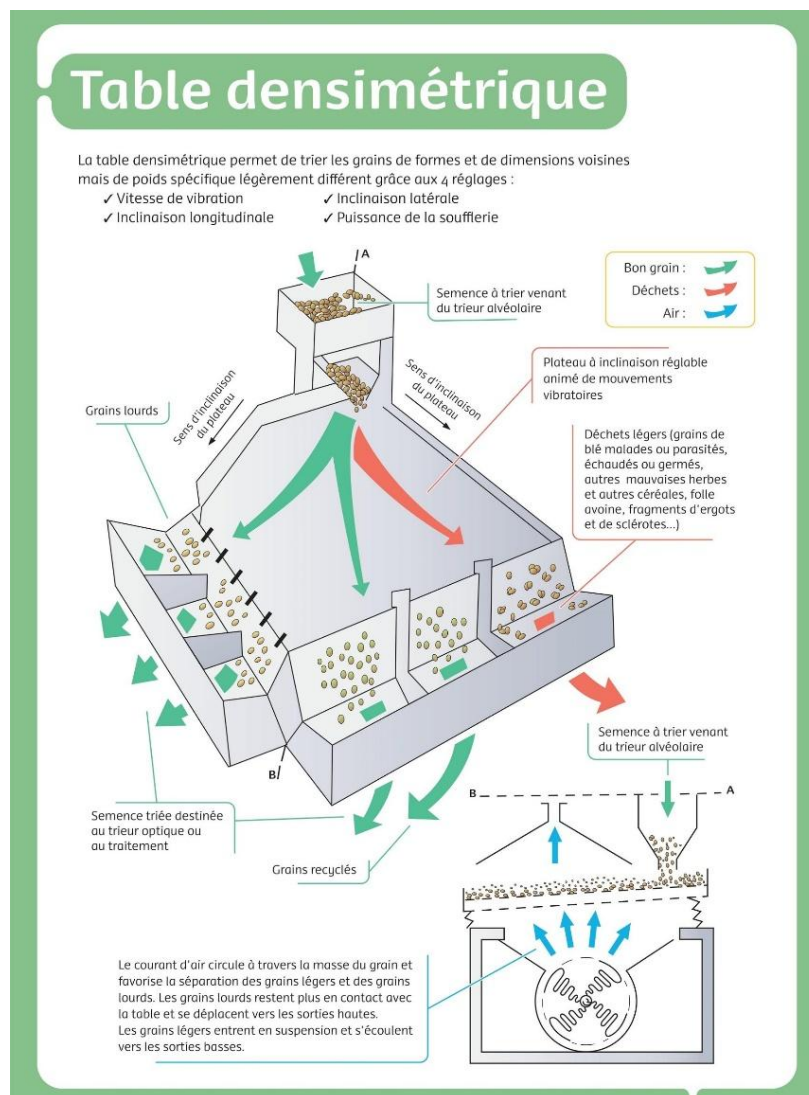


Figure - Table densimétrique (Semaes)



Figure - Grains d'orge fusariés (Réussir)

4. Optique visible qui sépare finement sur base de critères qualités spécifiques visibles comme l'apparence et ce même pour des grains de même dimension.

Cela permet un tri très spécifique des grains malsains tout en limitant les freintes (comme avec l'ergot). Le tri optique visible est envisageable pour remplacer le tri alvéolaire et densimétrique pour retirer les impuretés pour la production de semence de qualité. Cependant, il ne distingue pas les grains de densités différentes (comme les pré-germés avec temps de chute de Hagberg trop bas) et problématiques qui ont la même apparence visible.

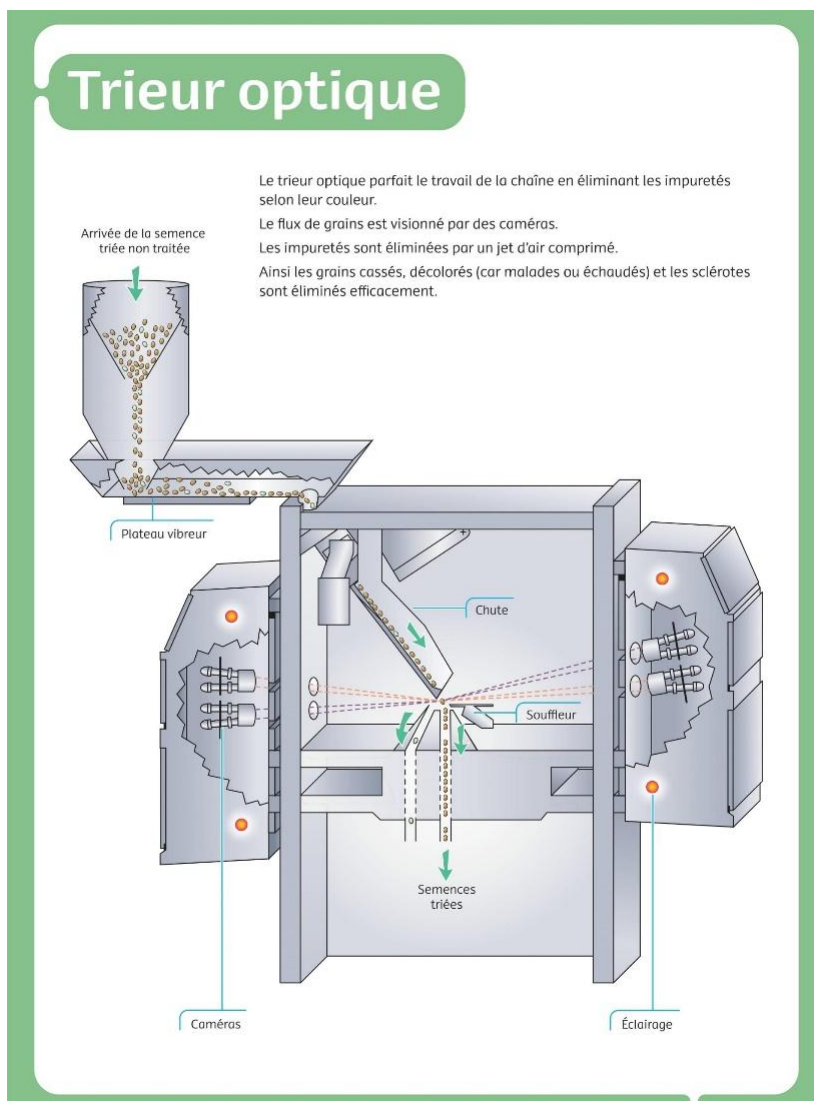


Figure - Trieur optique au grain à grain (Semae)



Figure - Ergot dans du froment (Observatoire des aliments)

5. Optique infrarouge qui sépare très finement sur base de critères qualités spécifiques souvent invisibles comme les constituants chimiques et ce même pour des grains de même dimension.

Il permet, par exemple, de distinguer les grains sur base de leur contenu en quantité et qualité de protéines.

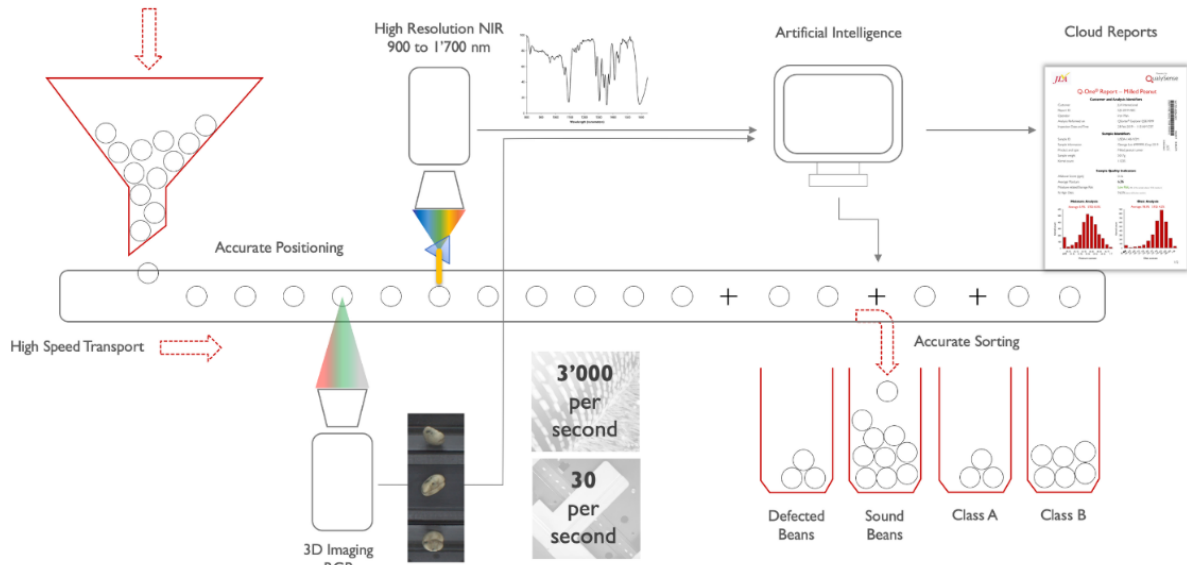


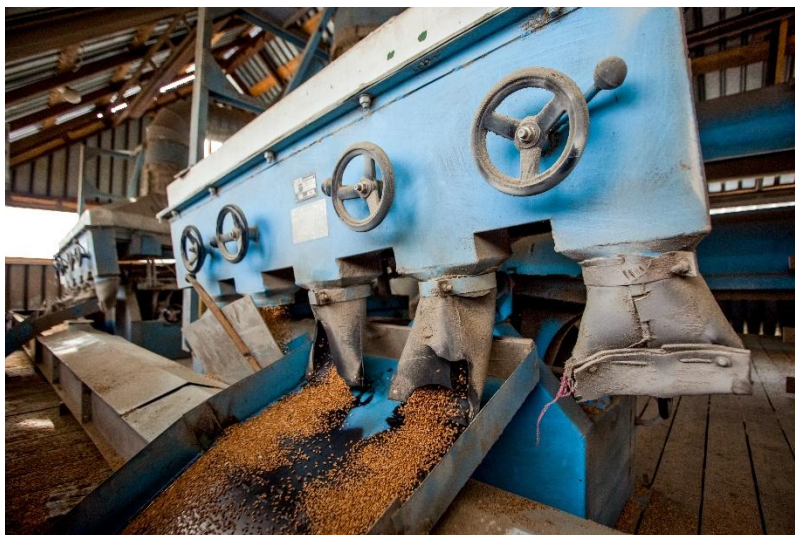
Figure - Trieur optique visible et infrarouge au grain à grain (QvalySense)

La technologie de tri optique apporte également une plus-value pour la caractérisation approfondie des lots pour en évaluer la qualité. En plus, de donner une valeur moyenne pour les paramètres mesurés, il en donne également toute la distribution. Cela permet de décider de l'intérêt de trier un lot et de la stratégie de tri à mettre en place pour atteindre la qualité visée.

Application du tri au regard de la qualité technologique

Chaque technique de tri a un apport différent sur les paramètres de qualité technologique. Dans le cadre projet ValCerWal, la modification de la qualité technologique a été étudiée au regard du :

- pré-nettoyeur
- trieur planaire
- trieur alvéolaire
- table densimétrique
- tri optique infrarouge au grain à grain



Dispositif expérimental

Les essais de tri ont été menés sur **12 variétés** cultivées en agriculture conventionnelle de la récolte 2021 avec différentes qualités technologiques (Q1, Q2, Q3 et Q4) :

- Q1 (Blé Panifiable premium belge)
- Q2 (Blé Panifiable supérieur belge)
- Q3 (Blé Amidonnerie belge ; blé standard belge)
- Q4 (Blé Basique belge ; blé standard belge)

L'impact individuel de chacun des trieurs a été mesuré sur les paramètres de qualité technologique basiques :

- Le poids de mille grains (PMG) a parfois un lien avec le rendement meunier
- La teneur en protéines en lien avec la qualité technologique
- L'indice de sédimentation de Zélény (ml) en lien avec l'aptitude à la panification
- Le temps de chute de Hagberg en lien avec le contenu alpha-amylasique et la prégermination physiologique

L'impact des trieurs les plus performants en termes de gain de qualité technologique a été mesuré sur les paramètres de qualité technologique élaborés :

- Rapid Visco Analyzer (RVA) en lien avec la qualité de l'amidon
- Mixolab + en lien avec la force boulangère et la qualité de l'amidon
- Alvéographe Chopin en lien avec la force boulangère et la nature du gluten

Evolution de la qualité technologique en fonction du type de tri

Les résultats sont présentés par paramètre technologique non triés (NT) et les deux fractions de tri obtenues (F1 et F2) pour chacun des trieurs. Les trieurs sont résumés par les abréviations suivantes (pré-nettoyeur T1, trieur planaire TP, trieur alvéolaire TA, table densimétrique TD, trieur optique TO).

Bilan de masse du tri

Le bilan de masse de ces expériences de tri est présenté à la figure ci-dessous. On peut constater que les rendements de tri sont compris entre 50 et 60% pour le trieur planaire, alvéolaire et optique. Pour les trieurs ayant plus d'une fraction (pré-nettoyeur et densimétrique) seules les fractions de plus faible et plus forte densité ont été conservés expliquant un bilan inférieur à 100%. Les fractions de qualité supérieure sont numérotées F1 pour les 3 premiers trieurs (T1, TP, TA) et F2 pour les deux derniers (TD et TO).

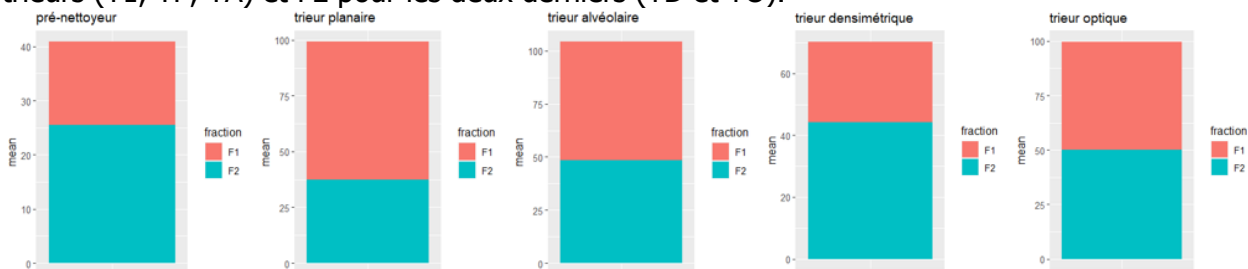


Figure - Bilan de masse des fractions de tri

Poids de mille grains (PMG)

Le poids de mille grains (PMG) est très significativement augmenté pour les trois trieurs physique pré-nettoyeur (T1), trieur planaire (TP) et trieur alvéolaire (TA). Ce paramètre influence également le poids à l'hectolitre (qui influence la valeur commerciale d'un lot) et a parfois un lien avec le rendement meunier. De plus, le PMG est un bon paramètre pour l'évaluation des grains utilisés comme semences au regard du pouvoir germinatif (Dziki & Laskowski, 2005).

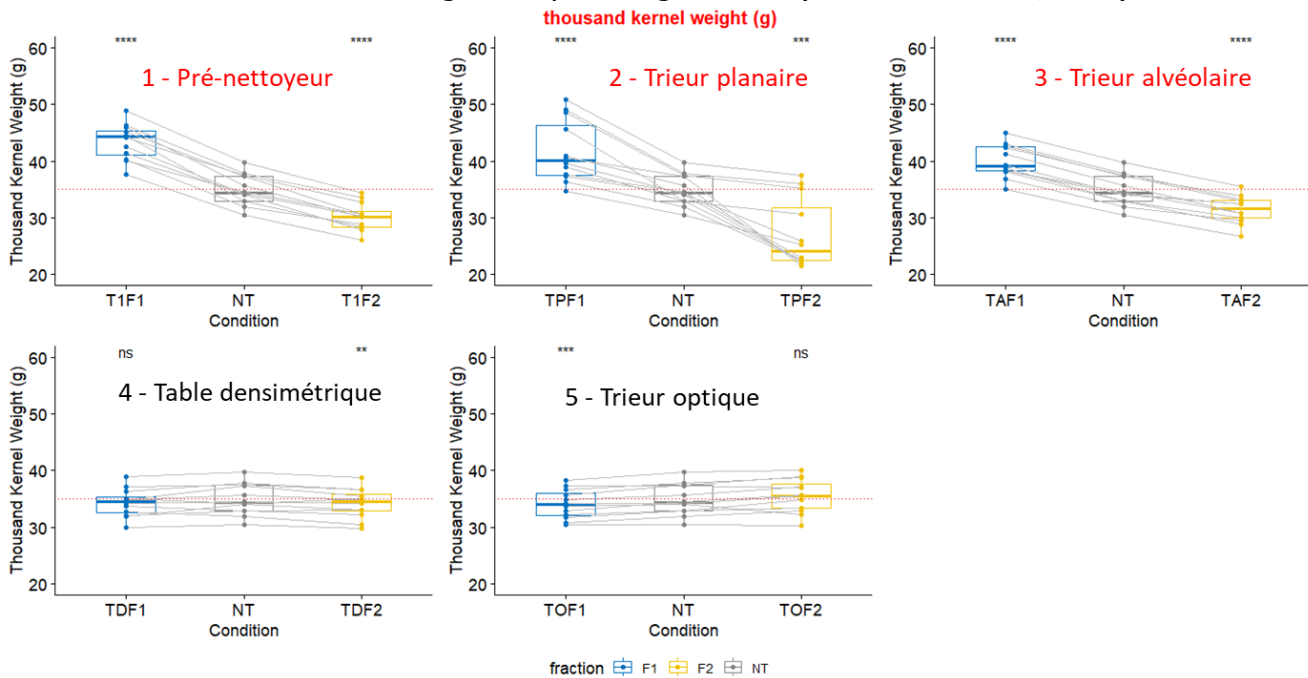


Figure - Evolution du poids de mille grains pour chacun des trieurs et fractions obtenues

Teneur en protéines

Seul le trieur planaire (TP) et le trieur optique (TO) augmentent la teneur en protéines. Néanmoins, l'augmentation du TP bien que significative est légère et probablement obtenue en retirant les grains non-développés. Seul, le TO est réellement capable de trier les grains présentant un contenu supérieur ou inférieur en protéines. Un écart moyen de 2 points de protéines est constaté en triant l'échantillons en deux fractions à 50/50 pour le TO.

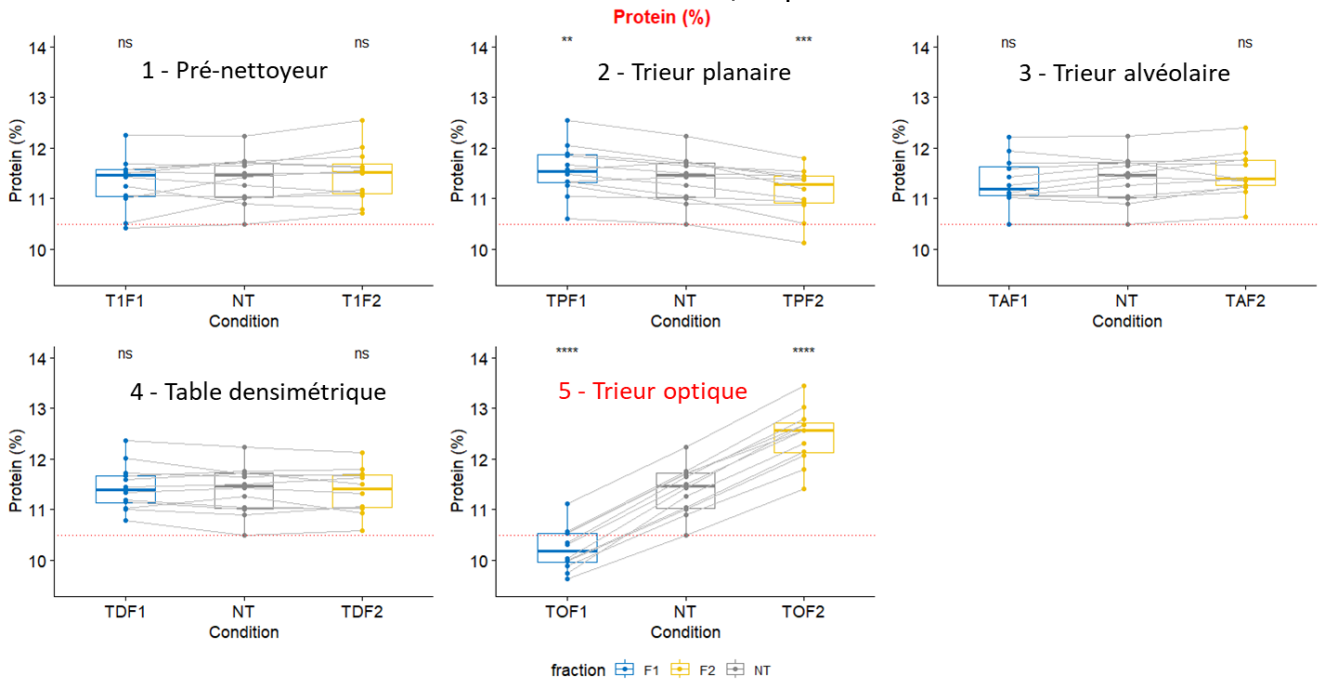


Figure - Evolution de la teneur en protéines pour chacun des trieurs et fractions obtenues

Indice de sédimentation de Zélény

L'indice de sédimentation de Zélény représente une estimation rapide de la force boulangère d'un échantillon. Celui-ci est significativement augmenté après tri optique ce qui est corrélé avec l'augmentation de la teneur en protéines. Nous constatons l'augmentation de la teneur en protéines de 1 point mène à une augmentation de 5 ml de Zélény.

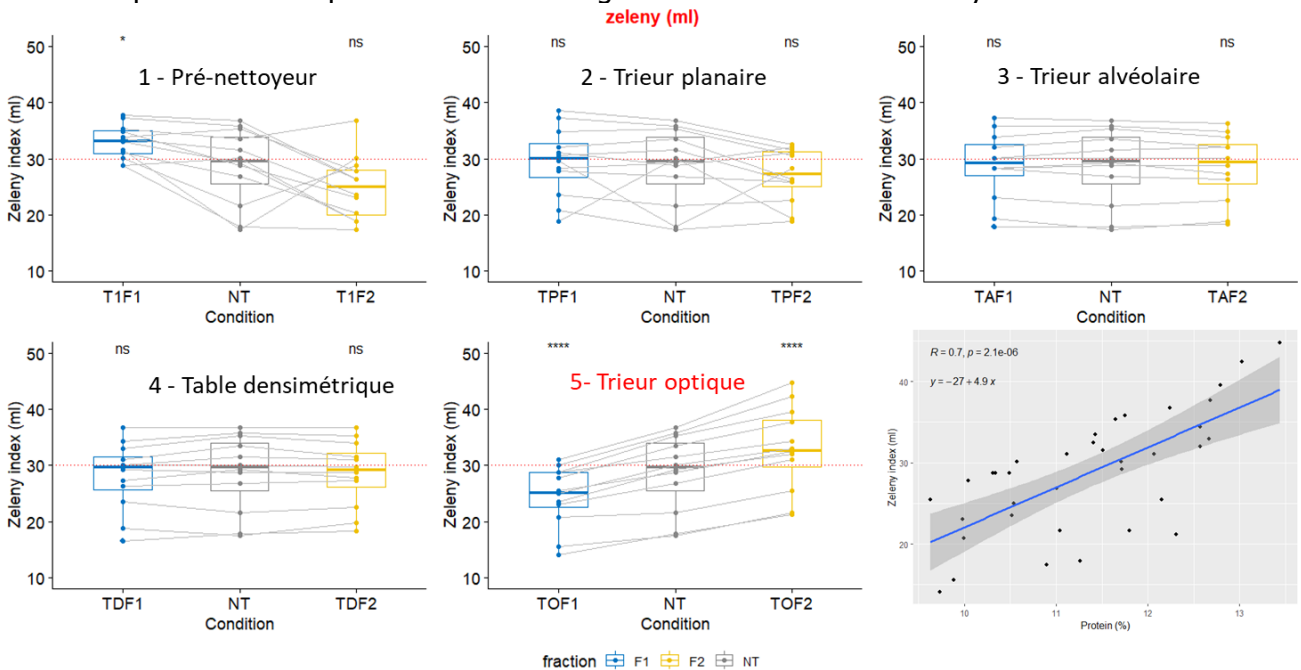


Figure - Evolution de l'indice de sédimentation de Zélény pour chacun des trieurs et fractions obtenues ainsi que leur corrélation avec la teneur en protéines

Temps de chute de Hagberg

Le temps de chute de Hagberg est corrélé à la teneur en α -amylase au sein du grain. Cette activité enzymatique devient critique lorsque la prégermination physiologique débute. Ce contenu enzymatique peut s'avérer problématique lors de la transformation aussi un seuil strict de 220 s est couramment retenu pour déclasser les lots (seuil souple 180s). Nous remarquons que seule la table densimétrique comme publiés précédemment (Olaerts et al., 2018 ; Tkachuk et al., 1990) et le trieur optique permettent d'augmenter le temps de chute de Hagberg.

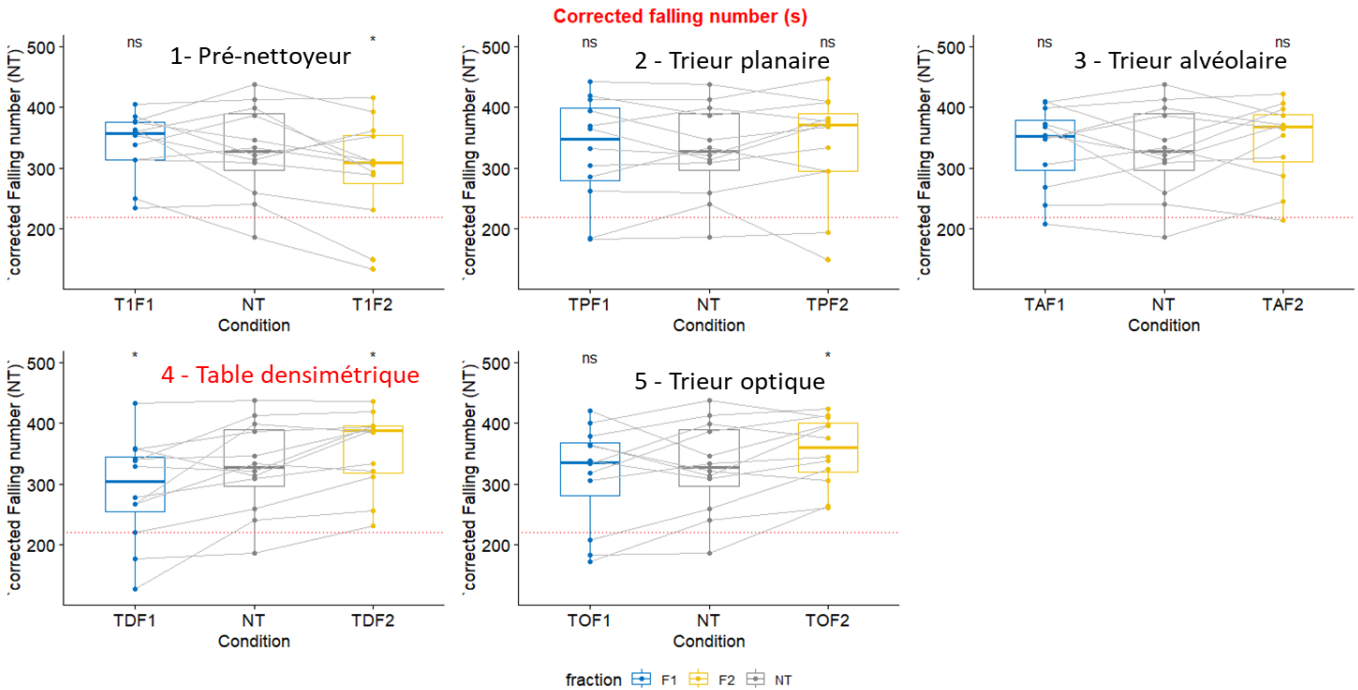


Figure - Evolution du temps de chute de Hagberg pour chacun des trieurs et fractions obtenues

La combinaison de trieurs (aérodynamique + densimétrique + sélection des flux de mouture) ainsi qu'une sélection des fractions de mouture permet d'augmenter le temps de chute de Hagberg de manière notable :

- Tri aérodynamique (+/- 50 pts) freintes 20-25%
- Tri densimétrique (+/-25 pts) freintes 15-20%
- Sélection flux de fractions de mouture (+/-10 pts) freintes 10-15%

Freintes totales 38.5-48.25%

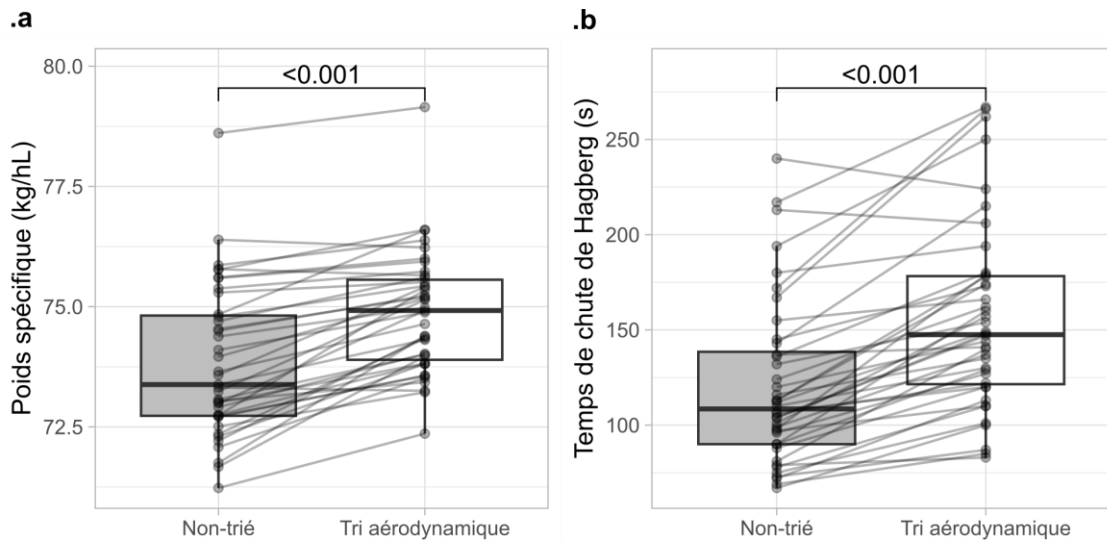


Figure - Effet du tri aérodynamique sur a. le poids spécifique et b. le temps de chute de Hagberg : comparaison entre lot non trié et lot trié

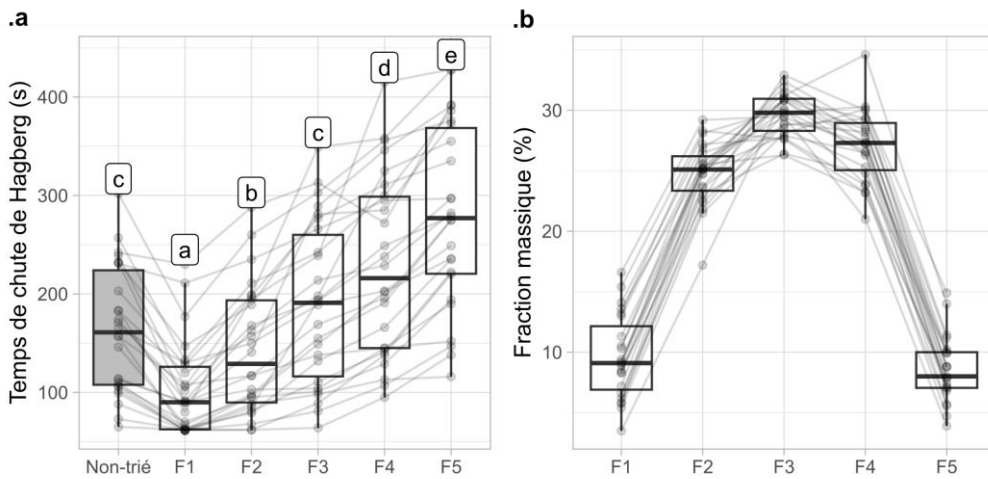


Figure - a. Effet du tri densimétrique sur le temps de chute de Hagberg (comparaison entre lot non trié et les 5 fractions) et b. Répartition de la masse initiale entre les 5 fractions de tri densimétrique

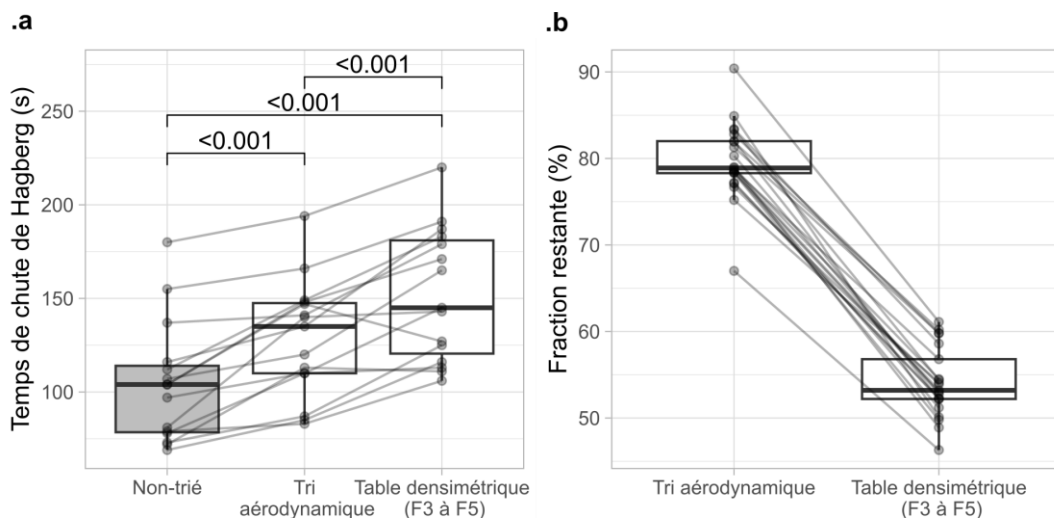


Figure - Effet du tri aérodynamique et du tri aérodynamique suivi d'un tri densimétrique sur le temps de chute de Hagberg (comparaison entre lot non trié et fractions triées) et b. Fraction de la masse initiale restant dans la fraction haute du tri.

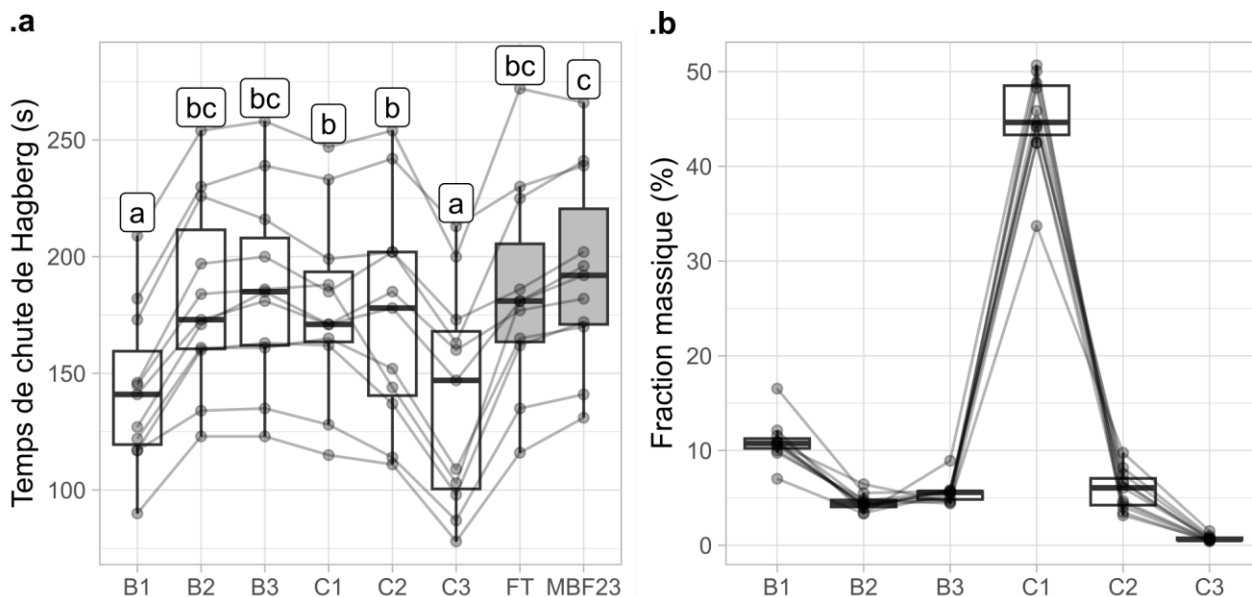


Figure - a. Temps de chute de Hagberg et b. fraction massique pour les différentes fractions issues des étapes successives de broyage (B) et de convertissage (C) sur un moulin de laboratoire Buhler MLU-202. FT : farine complète, MBF23 : farine issue des fractions B2 et B3.)

Rapid Visco Analyzer (RVA)

Les données viscosimétrique de l'impact du tri sur la qualité de l'amidon au RVA sont illustrés à la figure ci-dessous. Nous constatons que la viscosité au pic, la rupture de viscosité et la viscosité finale et le recul de viscosité diminuent indiquant des capacités texturantes inférieures et potentiellement un temps de cuisson plus court. Nous pouvons supposer que cela impacte la stabilité à la cuisson de l'amidon. Le recul de viscosité semble indiquer une potentielle réduction du rassissement causée par la cristallisation de l'amidon (Balet et al., 2019).

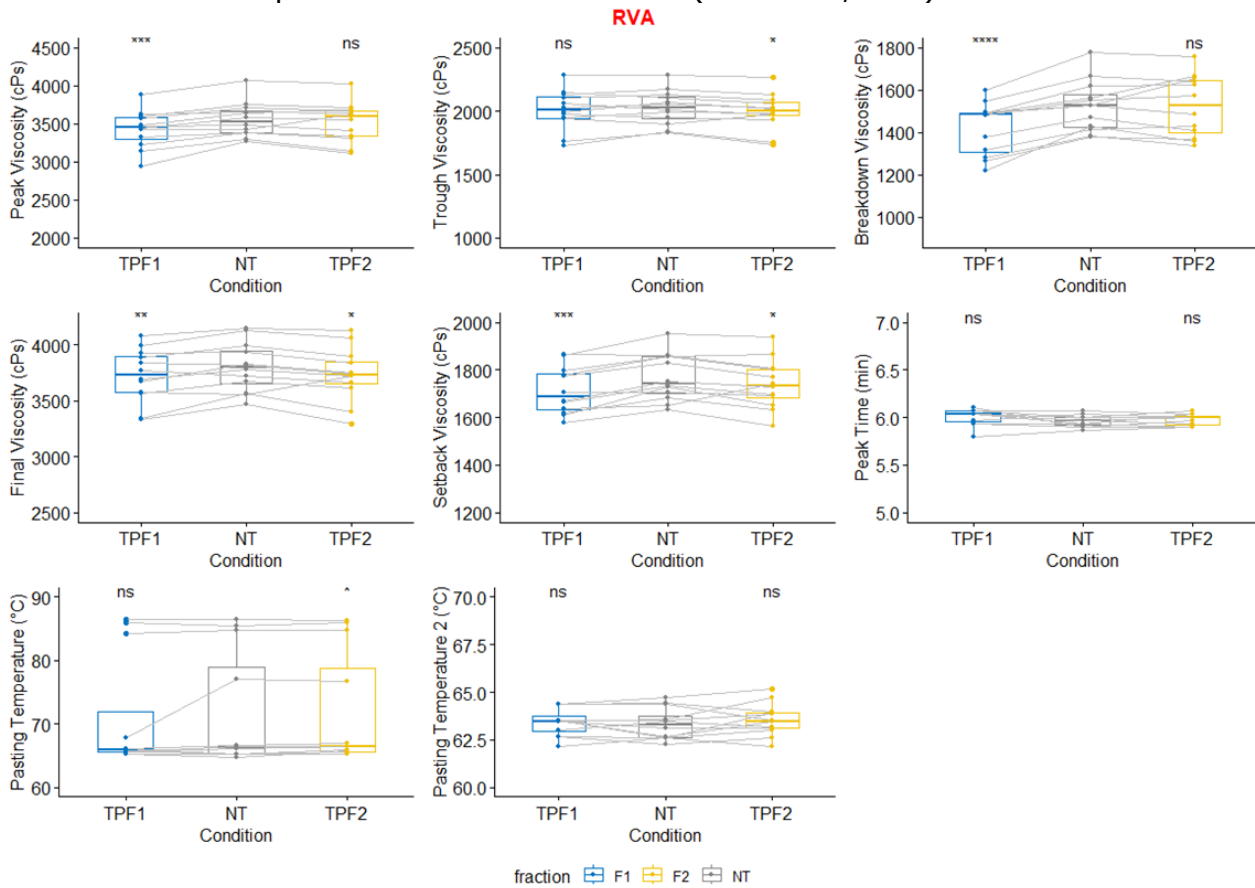


Figure - Rapid Visco Analyzer (RVA) avant et après tri optique infrarouge au grain à grain

Mixolab+

Nous observons que les paramètres au Mixolab+ sont influencés par le tri optique infrarouge au grain à grain. La stabilité C1 et au réseau de gluten (couple Cs et C2) sont fortement améliorés par l'augmentation de la teneur en protéines. L'hydratation est également diminuée pour teneur plus faible mais n'augmente pas significativement pour les échantillons à plus haute teneur en protéines (Dubat et al., 2016).

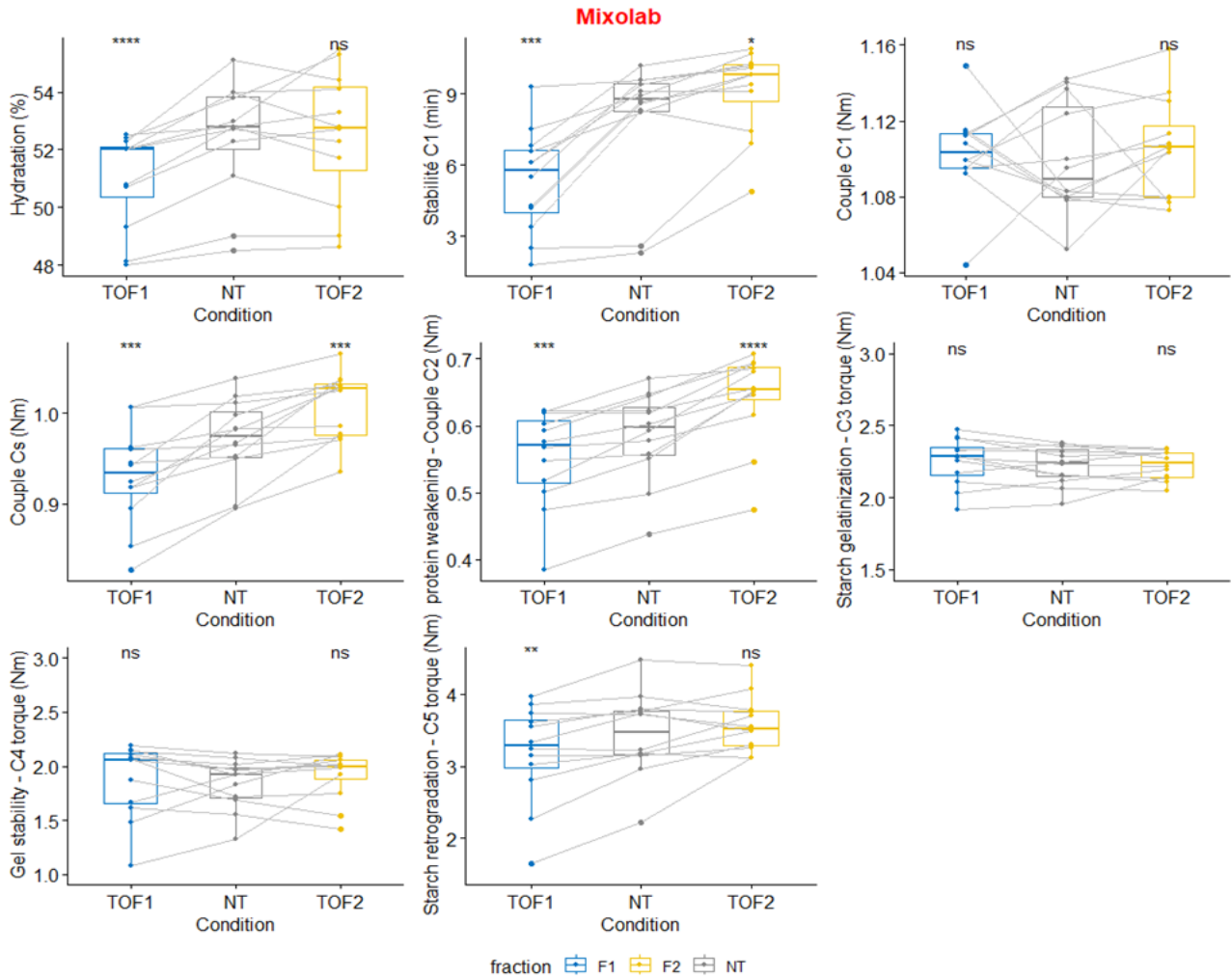


Figure - Mixolab+ avant et après tri optique infrarouge au grain à grain

Alvéographe Chopin

Les résultats de l'alvéographe Chopin avec le tri optique infrarouge au grain à grain mettent en évidence une baisse de la force boulangère des farines pour les mauvaises fractions (TOF1 et TPF2). Cette baisse semble majoritairement être occasionnée par une diminution de la ténacité. Néanmoins en moyenne, les bonnes fractions ne sont pas significativement augmentées. Ce résultat peut être expliqué par l'absence de protéine de qualité technologique pour les catégories Q2, Q3 et Q4. En effet, il semblerait que l'augmentation de la force boulangère avec l'augmentation de teneur en protéines n'ait lieu que pour des variétés avec une bonne qualité panifiable type Q1. Des recherches ont montré que la corrélation entre les performances boulangères et la teneur en protéines diminuent drastiquement au-delà de 12% et dépend de la génétique de la variété (Gabriel et al., 2017).

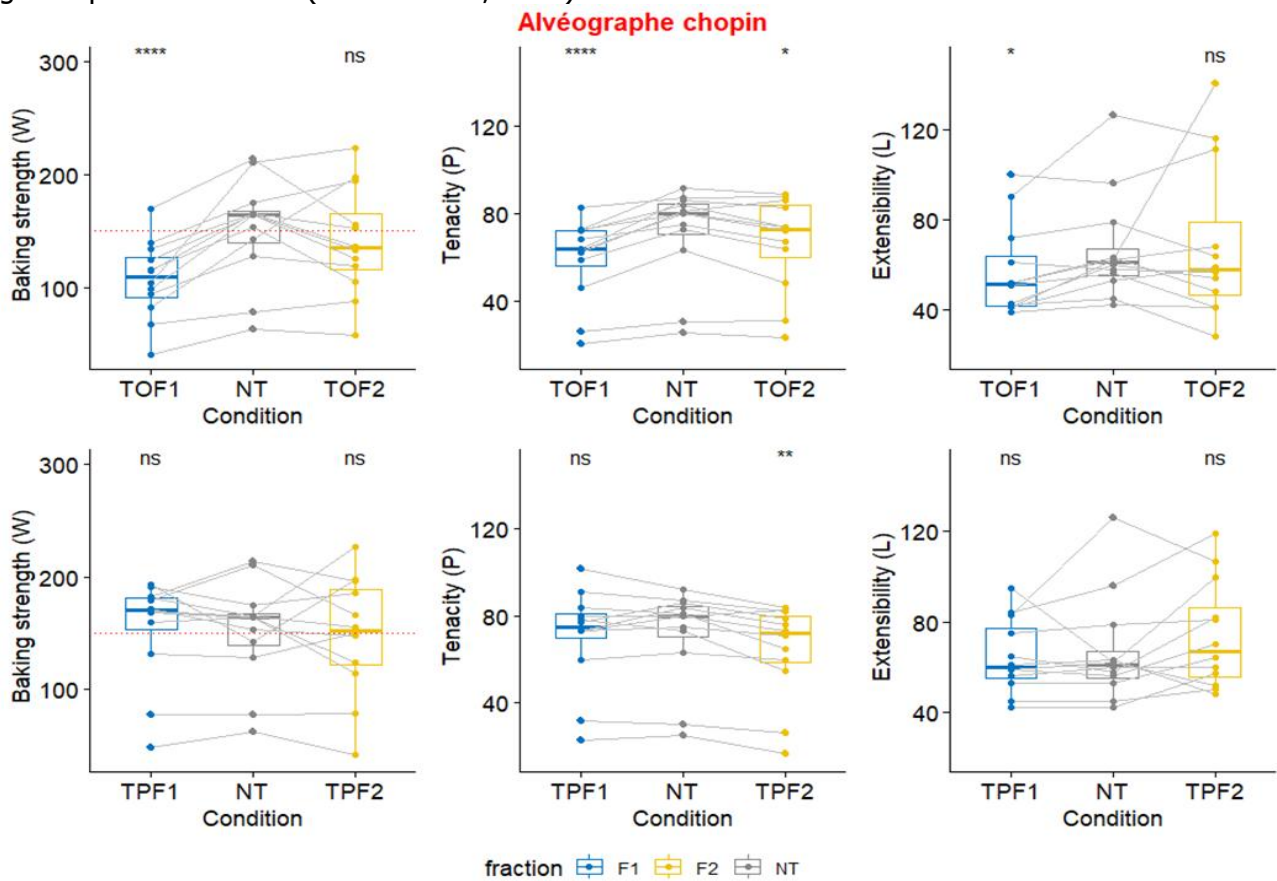


Figure - Alvéographe Chopin avant et après tri optique infrarouge au grain à grain

Panification

Une autre expérimentation de tri spécifique au tri optique infrarouge au grain à grain sur base de la teneur en protéines (67% partie fraction supérieure et 33% partie fraction inférieure) a été menée pour évaluer l'impact de celui-ci sur la panification. Ce tri a permis d'améliorer significativement la teneur en protéines, l'absorption d'eau, la force boulangère, la texture du pain, et la résilience de la pâte, sans recours à des additifs.

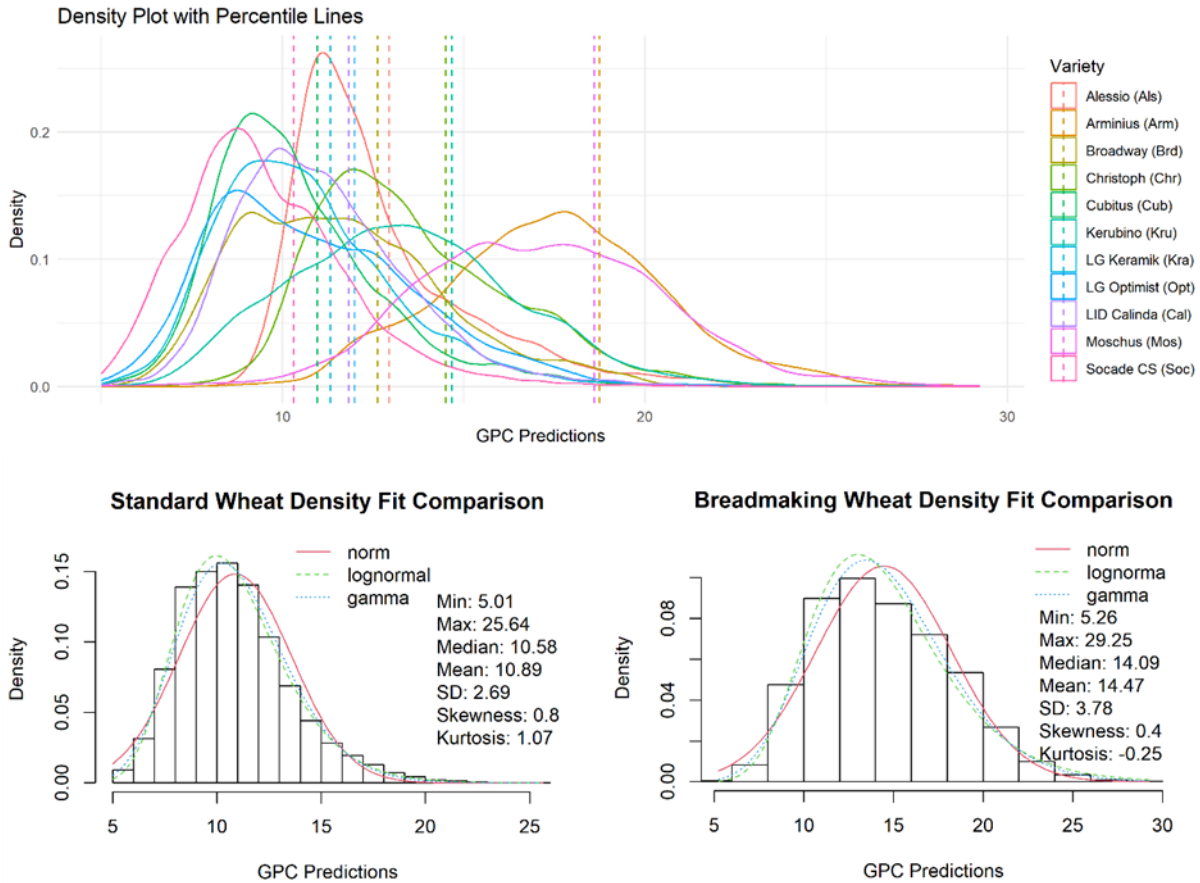


Figure - Distribution de la densité des variétés de blé et regroupement par classes (standard/panifiable)

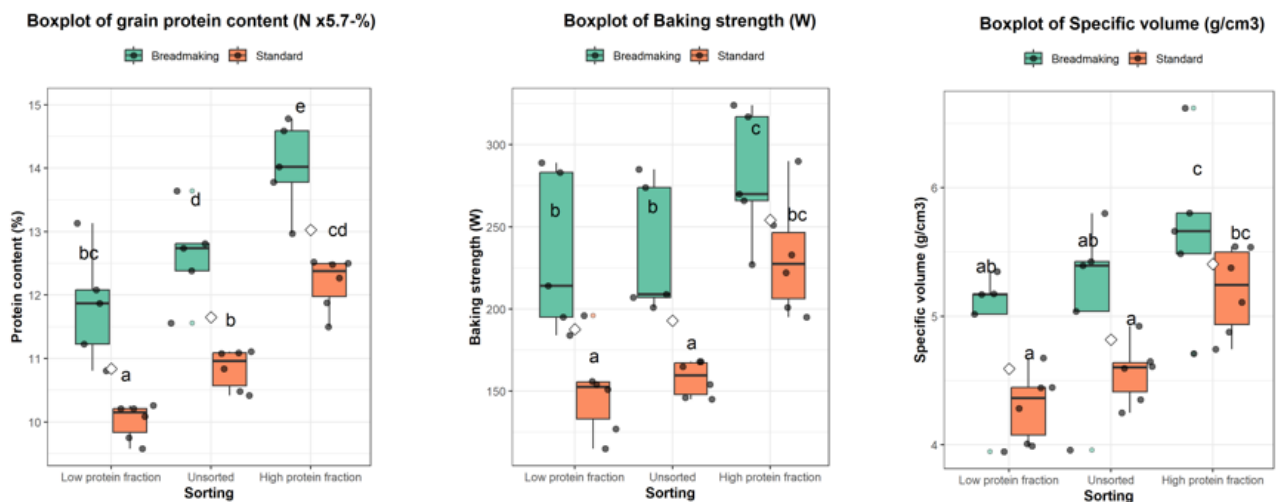


Figure - Teneur en protéine, Force boulangère et Volume panification avant et après tri optique infrarouge au grain à grain (67% partie fraction supérieure et 33% partie fraction inférieure)

Conclusion

Les effets des différents trieurs sur la qualité meunière et boulangère ont pu être démontrés par ces expériences de tri.

Gluten

Amidon

α -amylase

Méthode d'analyse



Figure - Impact des trieurs sur les composants fonctionnels des céréales

Nous constatons que les nettoyages physiques constituent une bonne pratique indispensable à la valorisation alimentaire des céréales en améliorant la qualité meunière et en impactant positivement les propriétés liées à l'amidon.

Concernant les problématiques technologiques liés au gluten et au contenu en alpha-amylases seul la table densimétrique et le trieur optique infrarouge au grain à grain sont efficaces. En effet, la table densimétrique semble plus à même de retirer finement les grains physiologiquement prégermés présentant un poids spécifique plus faible et permettant donc de mieux contrôler le contenu en alpha-amylases des farines (augmentation du temps de chute de Hagberg).

Le tri optique infrarouge au grain par grain sur base de la teneur en protéines permet une amélioration drastique de la qualité technologique d'un lot. Elle améliore fortement les critères basiques de composition et d'aptitude à la panification. Cependant, le gain est moindre pour les critères technologiques élaborés (alvéographe Chopin et Mixolab+).

Les effets individuels distincts de chacun de ces trieurs justifient leur intégration au sein de chaîne de tri en fonction de la problématique technologique rencontrées. Néanmoins, le levier du tri ne permet pas de compenser pour un choix variétal et/ou fumure azotée non adaptée à la valorisation visée.

Application du tri au regard de la qualité sanitaire

Insectes

Une étude menée par Armitage et al 1996 en froment a montré que le nettoyeur-séparateur est une méthode curative immédiate pour la régulation des insectes secondaires (comme les mites) même à des forts niveaux d'infestation au stockage. Ils se retrouvent dans les déchets d'aspiration.

Le nettoyage est également une technique en froment curative efficace contre les insectes primaires au stockage (comme les charançons). Des chutes de 11m 2 fois par mois pendant 2 mois peuvent réduire de 76% l'infestation d'infestation en formes cachées (Joffe and Claker 1963). Une étude d'Arvalis a montré qu'un 1 nettoyage 1 fois par semaine est déjà très efficace pour lutter contre les insectes primaires. Cette méthode va de pair avec le refroidissement des grains pour leur stockage.

Fréquence de nettoyage	Semaine de détection	Nombre moyen de charançons adultes / kg de blé au tamis	Ecart-type
Pas de nettoyage	S8	16,9	2,5
Nettoyage mensuel	S8	17,4	4,7
Nettoyage chaque quinzaine	S13	8,1	1,4
Nettoyage chaque semaine	S15	6,8	2,1

Gain de 7 semaines de stockage avant reprise des populations et détection par échantillonnage/tamissage, au printemps.

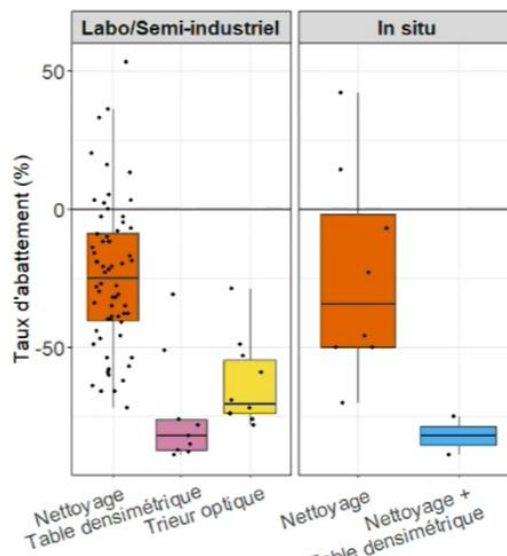
Figure - Nettoyeur-séparateur comme moyen de lutte curatif contre les insectes primaires en froment (Arvalis)

Mycotoxine DON de la fusariose

Une méta-analyse d'Arvalis sur l'abattement en mycotoxine DON de la fusariose en froment a montré que l'abattement médian au nettoyeur-séparateur est de 25% à l'échelle labo et 35% à l'échelle industrielle.

- **Echelle labo ou semi-industrielle : échantillons de 300 g à 1 tonne**
 - 12 études (dont 2 Arvalis)
 - Niveaux de contamination entre 139 et 10 529 µg/kg
 - Taux d'abattement médian nettoyage : -25 %

- **Echelle industrielle : silos ou moulins, lots > 1 tonne**
 - 5 études (dont 3 Arvalis)
 - Teneur en DON entre 600 et 4000 µg/kg
 - Taux d'abattement médian -35%



La table densimétrique et le trieur optique semblent être plus efficaces mais les données sont moindres.

Figure - Abattement en DON au tri en froment (Arvalis)

Ergot

Une expérience menée par Arvalis sur le tri de l'ergot en froment a montré que le nettoyeur-séparateur ne permet que de retirer 40 à 45% des sclérotés d'ergot avec 5,5% de freintes. En appliquant du tri densimétrique après le trieur-séparateur, le taux de sclérote diminue plus mais pas assez pour respecter le seuil légal pour l'usage. En plus, cela engendre 8,5% de freintes de plus. Le tri optique visible permet à lui seul en 2 passages de retirer 83 à 94% des sclérotés d'ergot avec moins de 0,2% de freintes.

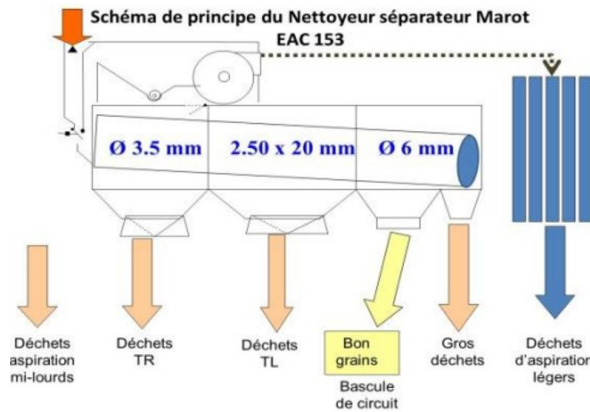


Figure - Nettoyeur séparateur et ses grilles pour retirer l'ergot en froment (Arvalis)

	Modalité 1g/kg	Modalité 2g/kg
Blé contaminé	0,94 g/kg	1,90 g/kg
Blé nettoyé	0,52 g/kg	1,11 g/kg
Gros déchets	11,9 g/kg	29,3 g/kg
Extraction Ø 3,5	4,8 g/kg	8,7 g/kg
Extraction grille 2,5*20	9,9 g/kg	11,8 g/kg
Déchets légers (poussières)	8,8 g/kg	19,1 g/kg
Déchet mi-lourds (chambre détente)	21,6 g/kg	24,3 g/kg
Freintes (écarts de nettoyage en % de masse du lot initial)	3.84 %	4.88 %

Les trous oblongs semblent plus performants que les trous ronds pour retirer les sclérotés

Importance de l'aspiration : les concentrations en sclérotés sont élevées le ratio efficacité/freintes est élevé

Figure - Abattement au nettoyeur séparateur pour l'ergot en froment (Arvalis)

Essai	1	2
contamination	0.5g/kg	1.0g/kg
Masse lot kg	540	550
Masse ergot dans le lot g	270	550
Masse ergot impuretés Sortex 1 ^{er} passage g	174	376
Masse totale impuretés Sortex 1 ^{er} passage g	777	639
Masse ergot impuretés Sortex 2 nd passage g	50	143
Masse totale impuretés Sortex 2 nd passage g	255	361
Somme masse ergot impuretés Sortex g	223	519
Somme masse totale impuretés Sortex g	1032	1001
% impuretés	0.19%	0.18%
Efficacité nettoyage ergot	83%	94%

Figure - Abattement au trieur optique pour l'ergot en froment (Arvalis)

7. Evolution de la qualité technologique des variétés de froment

Les froments cultivés au cours des 150 ans dernières années ont été sélectionnés d'abord, sur le plan agronomique, pour gagner en productivité afin de nourrir la population puis, au niveau technologique, pour répondre aux attentes des transformateurs résultants des bouleversements technologiques en meunerie et en boulangerie. Un essai spécifique a été mené en conditions d'agriculture biologique au CRA-W sur des variétés de froment de cette période pour en suivre l'évolution des propriétés technologiques afin d'identifier à quel type de meuneries et de boulangeries spécifiques elles sont adaptées.



Le processus de sélection et d'amélioration du froment a progressivement pris de l'ampleur en Europe à la fin du XIXe siècle. Il a débuté par la sélection d'individus au sein de populations locales en se basant essentiellement sur des caractéristiques agronomiques (comme la verse et la sensibilité aux maladies). L'objectif de cette sélection a été d'augmenter les rendements en grains afin de nourrir une population en pleine croissance démographique. En parallèle, la meunerie a connu une révolution technologique : **le passage des meules de pierre aux moulins à cylindres** a permis d'augmenter considérablement la productivité en farine blanche des meuneries. Celles-ci se sont mises à rechercher des grains plus grands plus riches en amidon pour obtenir des rendements meuniers plus élevés. Les individus sélectionnés dans les populations locales ont ensuite été massivement croisés au début du XXe siècle afin de poursuivre l'objectif d'augmentation du rendement en grains. Entre les années 1950 et 1970, **les processus de boulangerie ont connu une forte augmentation de leur mécanisation** (notamment le pétrissage et façonnage) et une diminution drastique du temps de fermentation. Cela a nécessité du froment avec une force boulangère du gluten plus élevée et une nature de gluten différente. Dans ce contexte, **le choix variétal est devenu un levier central pour garantir la qualité technologique des grains transformés.**

Dispositif expérimental

Les variétés en essai ont été cultivées en micro-parcelles (4 répétitions) selon les conditions de l'agriculture biologique à Gembloux durant la saison 2019-20. Quarante-six variétés ont été testées, réparties sur quatre grandes périodes historiques (< 1900, 1900-1939, 1940-1979, > 1980), et classées en deux grands types d'utilisation : fourragère et panifiable. Les variétés ont été réparties en 8 groupes :

- < 1900 Panifiable : Blé de Crépi, Bon fermier, Chiddam d'automne à épi blanc, Noé, Rouge de Bordeaux, Shireff Square Head
- < 1900 Fourrager : Blanc de Flandre, Blé de Browick, Bordier, Dattel, Saumur de mars, Teverson, Victoria d'automne
- 1900-1939 Panifiable : Alliés, Bon moulin, Hybride de la paix, Innovation Bataille 30, Providence, Vilmorin 27, Vilmorin 29
- 1900-1939 Fourrager : Chanteclair, Hybride 40, Picardie Desprez, Précoce de Gembloux, Professeur Delos
- 1940-1979 Panifiable : Cappelle Desprez, Cama, Hardi, Yga Blondeau
- 1940-1979 Fourrager : Fidel, Hesbignon, Leda, Maris Huntsman, Ministre, Professeur Marchal
- > 1980 Panifiable : Camp Remy, Edgar, Hussar, Julius, Ritmo, Soissons
- > 1980 Fourrager : Asketis, Capitaine, Centenaire, Limabel, Rustic

La qualité technologique des grains a été évaluée par différentes méthodes. La teneur en protéines, le poids de mille grains, le poids à l'hectolitre, la dureté infrarouge et le temps de chute de Hagberg ont été déterminés sur les grains. La production la farine blanche type T55 a été réalisée avec un moulin sur cylindres (Chopin CD1). Il s'agit d'un moulin sur cylindres courts (peu de passages sur les cylindres) mais standardisé et adapté pour analyses de laboratoire. Le rendement en farine blanche type T55 avec ce moulin est typiquement de 60-65% alors qu'il est 75-80% pour les moulins sur cylindres industriels (nombreux passages sur les cylindres). Les analyses suivantes ont été réalisées sur cette farine blanche : Alvéographe Chopin, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer avec ajout d'AGNO3 (comme inhibiteur enzymatique), couleur CIELAB et teneur en cendres.

Evolution des variétés

La sélection a considérablement fait évoluer les caractéristiques agronomiques, meunières et boulangères du froment en fonction des besoins de l'époque à laquelle elles les variétés ont été cultivées.

Tableau - Evolution de la qualité agronomique, meunière et boulangère pour des variétés de froment de 4 époques (< 1900, 1900-39, 1940-79, > 1980) cultivées à Gembloux en 2019-20 en conditions d'agriculture biologique.

Critère de qualité	Evolution sur 150 ans
Agronomique	
Rendement en grains par hectare	+ 67 %
Meunier	
Rendement en farine blanche par hectare	+95%
Rendement mouture en farine blanche totale	+17%
Rendement mouture en farine blanche broyage	-16%
Dureté du grain	+68%
Rendement mouture en sons	-12%
Teneur en cendres - Farine blanche	-10%
Poids de mille grains	+7%
Poids à l'hectolitre	+2%
Boulangier	
Force boulangère du gluten - W de l'alvéographe	+90%
Ténacité du gluten - P de l'alvéographe	+119%
Extensibilité du gluten - L de l'alvéographe	- 42%
Elasticité du gluten - Ie de l'alvéographe	+31%
Teneur en protéines - Grain	-16%
Absorption d'eau - Farine blanche	+2%
Pouvoir texturant (viscosité au pic) - Farine blanche	-5%
Rétrogradation de l'amidon - Farine blanche	+10%
Temps de chute de Hagberg - Grain	0%
Degré de couleur jaune (b*) - Farine blanche	+23%

Sur le plan agronomique, sur une période de 150 ans, le rendement en grains a augmenté de 67 % en conditions d'agriculture biologique. C'est le résultat de l'amélioration de la génétique des variétés devenant moins sensibles aux maladies et à la verse. L'augmentation du rendement est moins grande pour la dernière époque « > 1980 ». A chaque époque, les variétés fourragères présentent systématiquement un rendement légèrement supérieur de quelques quintaux en plus par rapport aux variétés boulangères. Cependant, cette performance se fait souvent au détriment de la qualité technologique. Sur la plan métabolique, la production de protéines est moins efficace que celle d'amidon. Cela pénalise donc le rendement à l'hectare des variétés produisant plus de protéines.

En ce qui concerne la qualité meunière, le rendement mouture en farine blanche totale venant du grain a augmenté de 17%. Il s'est stabilisé lors de la dernière époque « > 1980 ». Ces valeurs de rendement sont systématiquement plus élevées pour les variétés panifiables. Cette différence est devenue plus grande depuis l'époque « 1940-79 ». Depuis cette période, les variétés ont également connu une importante diminution du rendement mouture en farine de broyage. Cette diminution pour la période « 1900-39 » à « > 1980 » est de 20%. Le grain est passé d'une dureté very soft avant 1900 à dureté medium-hard après 1980 pour les variétés panifiables et à une dureté medium-soft pour les variétés fourragères. Le rendement en sons et la teneur en cendres (c'est-à-dire en minéraux) ont diminué de, respectivement, 8% et 13% de la période « < 1900 » à la période « 1900-39 ». Les valeurs de rendement mouture en farine de broyage et en sons ont toujours été en faveur des variétés panifiables. Sur 150 ans, le

poids de mille grains a augmenté de 7%. Cette augmentation a surtout eu lieu de la période « < 1900 » à « 1900-39 ». Le poids à l'hectolitre sur cette période a sensiblement diminué de 2%. Le poids à l'hectolitre est systématiquement un peu plus élevé pour les variétés panifiables.

Les progrès des grains, en termes meuniers, ont d'abord été d'améliorer le rendement mouture en farine blanche totale par l'augmentation de la taille du grain permettant à la fois d'augmenter la proportion d'amidon et de diminuer celle en sons. Ensuite, après la période « 1900-39 » avec le remplacement des moulins sur cylindres par les moulins sur meule, **un grand grain plus dur a été recherché pour augmenter le rendement mouture en farine blanche totale pour la technique de mouture sur cylindres**. Cela se traduit par une diminution en farine de broyage (obtenue par la tête du moulin par les cylindres cannelés) mais une importante augmentation en farine de réduction (obtenue par la queue du moulin par les cylindres lisses). Malgré un rendement en grains à l'hectare plus faible, **le gain plus important en rendement mouture en farine blanche des variétés panifiables au cours du temps a permis à ces variétés de combler et dépasser les variétés fourragères en termes de rendement en farine blanche par hectare**. Le rendement mouture en farine blanche par hectare a augmenté de 95% sur la période de 150 ans.

Les variétés à partir de période « 1940-79 » sont destinées à la mouture sur cylindres. Avant cette période, les variétés se comportent mieux en mouture sur meule.

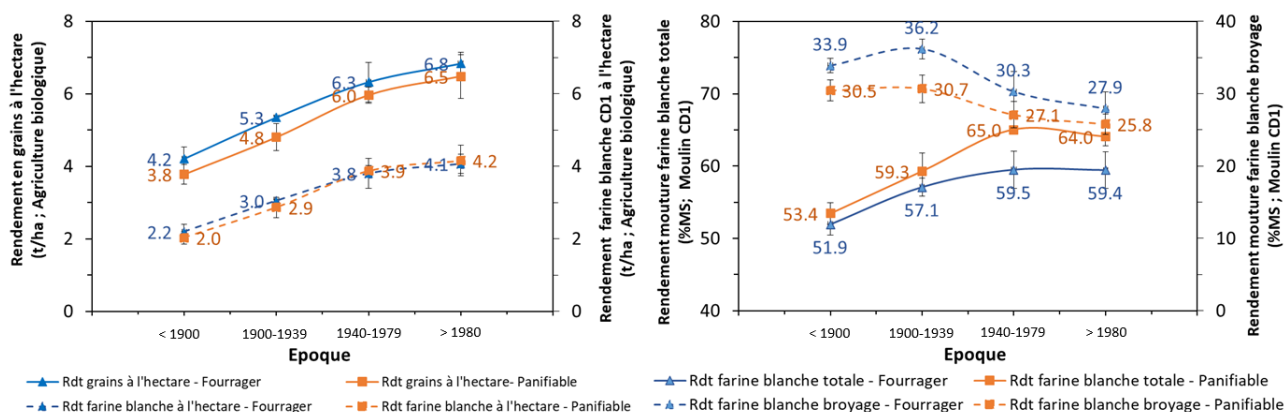


Figure - Evolution du rendement en grains à l'hectare, du rendement en farine blanche T55 moulin CD1, du rendement mouture en farine blanche totale et en farine de blanche de broyage pour des variétés de froment de 4 époques (< 1900, 1900-39, 1940-79, > 1980) cultivées à Gembloux en 2019-20 en conditions d'agriculture biologique.

En ce qui concerne la qualité boulangère, sur une période de 150 ans, la teneur en protéines a diminué de 16% mais la force boulangère du gluten (W de l'alvéographe) a augmenté de 90%. Cela illustre bien que la qualité panifiable des protéines prime sur la quantité de protéines. Certaines protéines n'ayant pas de plus-value pour améliorer les performances de panification. Pour toutes les époques, la teneur en protéines et la force boulangère du gluten des variétés panifiables sont systématiquement plus élevées que celles des variétés fourragères. Pour la teneur en protéines, la différence est relativement constante au cours du temps. Elle est de 0,5-0,6% en teneur de protéines. Pour la force boulangère du gluten, la différence est devenue plus grande depuis la période « 1940-79 ». Les variables liées à la tenue du gluten au Mixolab+ suivent la même tendance que celle de la force boulangère du gluten. **Depuis l'époque « 1940-79 », la nature du gluten des variétés a également fortement évolué.** Sur la période « 1900-39 » à « > 1980 », la ténacité et l'élasticité du gluten ont augmenté de, respectivement, 119% et 31% et l'extensibilité du gluten a diminué de 42%. Au cours du temps, le gluten des variétés a évolué de « trop extensible » et « pas assez tenace » à « trop peu extensible » et « trop tenace ». L'augmentation de la ténacité du gluten est aussi liée à l'importante augmentation de la dureté du grain. Ces évolutions sont en lien avec la volonté d'augmenter à tout prix la force boulangère du gluten grâce à une plus grande ténacité au détriment d'une nature de gluten équilibrée entre ténacité et extensibilité. L'absorption

d'eau par la farine blanche a légèrement augmenté en 150 ans (2% en relatif). La perte d'absorption liée à la diminution de la teneur en protéines a été compensée par le gain d'absorption venant de l'importante augmentation de l'amidon endommagé (venant de l'augmentation de la dureté des grains). Le pouvoir texturant (viscosité) de l'amidon au Mixolab+ et Rapid Visco Analyzer (avec ajout d'AGNO3 comme inhibiteur enzymatique) présentent une légère baisse sur une période de 150 ans. Sur ce laps de temps, la viscosité au pic du Rapid Visco Analyzer a diminué de 5% et la rétrogradation a augmenté de 10%. La rétrogradation est plus faible pour les variétés panifiables. Une faible rétrogradation permet une meilleure conservation du pain. Pour le temps de Hagberg, il ressort surtout qu'il est meilleur pour les variétés panifiables. La couleur de la farine blanche a évolué vers une farine plus jaune. Le degré de jaune (b^*) a augmenté de 23% sur une période de 150 ans. Cette couleur jaune peut venir d'une teneur plus importante en polyphénol. Cela permet de donner une coloration un peu plus jaune à la mie. C'est un aspect recherché par la boulangerie.

La qualité boulangère des variétés a surtout changé depuis la période « 1940-79 » en termes de force boulangère du gluten plus grande, de ténacité plus grande et d'extensibilité moins grande du gluten pour répondre à la forte augmentation de la mécanisation (notamment le pétrissage et façonnage) et une diminution drastique du temps de fermentation des nouveaux processus de boulangerie.

Les variétés à partir de période « 1940-79 » sont destinées à une panification mécanisée et plus rapide. Avant cette période, les variétés se comportent mieux en panification à un procédé lent, incluant des fermentations longues, une hydratation progressive, un pétrissage doux rencontré en milieu artisanal.

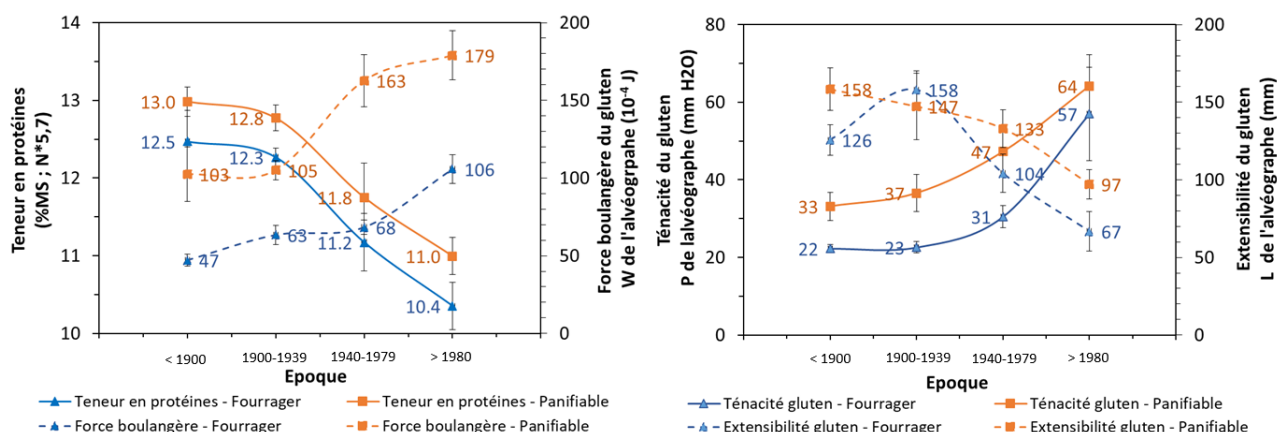


Figure - Evolution de la teneur en protéines, de la force boulangère, de la ténacité et extensibilité du gluten pour des variétés de froment de 4 époques (< 1900, 1900-39, 1940-79, > 1980) cultivées à Gembloux en 2019-20 en conditions d'agriculture biologique.

Conclusion

La priorité a été avant tout d'augmenter considérablement le rendement en grains par hectare des variétés au cours de ces 150 dernières années. Cela en combinaison avec le progrès en rendement mouture des variétés a permis de doubler le rendement en farine blanche à l'hectare. Les progrès de qualité technologique des variétés ont d'abord été de s'adapter aux évolutions de la meunerie puis à celles de la boulangerie. La qualité technologique des variétés a complètement changé, passant d'un grain « very soft » à « medium-hard » pour les panifiables et en devant s'adapter aux besoins de la meunerie sur cylindres et de la boulangerie intensive. Les variétés ont à chaque fois été adaptées au type de meunerie et de boulangerie de leur époque. Les critères de qualité technologique évoluent et sont donc relatifs à une époque donnée. **A chaque époque, il y a des variétés panifiables bien plus adaptées à la meunerie-boulangerie que les fourragères. Le froment n'est pas une commodité.** Les variétés panifiables ont un plus faible rendement en grains à l'hectare mais **elles dépassent les variétés fourragères en termes de rendement farine blanche à l'hectare.** Les variétés avant 1940 sont adaptées à la mouture sur meule et à des conditions de panification moins intensives

(manuelles et lentes) alors que celles après 1940 ont été développées pour de la mouture sur cylindres et à une panification accélérée (mécanisée et rapide). Le gain de productivité des variétés a fait diminuer un peu la teneur en protéines mais il a fait fortement augmenter leur efficacité à produire de la protéine d'intérêt pour la panification. Cela montre que **l'accent doit être mis plus sur la qualité boulangère des protéines et moins sur leur teneur totale**. Toutefois, il ne faudra pas descendre sous un certain seuil de teneur en protéines pour le bon déroulement d'une panification minimisant les additifs. La nature du gluten a également complètement évolué pour s'adapter à la panification intensive et permettre le gain en force boulangère du gluten en devenant bien plus tenace et bien moins extensible. Il faudra être vigilant sur le fait que le gain en force boulangère du gluten grâce au gain en ténacité (et en dureté du grain) ne devienne pas trop critique pour l'extensibilité du gluten. Bien qu'il ne soit qu'un critère parmi d'autres du choix variétal.

Les qualités gustatives et nutritionnelles du pain ont été des critères omis dans le processus de sélection variétal jusqu'à présent, faute de système de rémunération pour ces critères. Ces qualités sont pourtant essentielles pour le consommateur et sa santé. **Les qualités gustatives et nutritionnelles devraient désormais aussi être prises en compte dans de la sélection variétale** vu que les améliorations variétales agronomiques, meunières et boulangères du froment ont déjà connu d'immenses progrès et commencent à stagner ou à devenir excessives. Aujourd'hui, pour influencer le goût et l'aspect du pain, les leviers sont le type de procédé de fermentation et de ferment. La qualité nutritionnelle du pain peut être améliorée en utilisant des farines moins blanches contenant plus de fibres et de minéraux.

8. Réactions adverses au froment

Les réactions adverses au froment regroupent un ensemble hétérogène de troubles déclenchés par la consommation de blé ou de ses composants spécifiques. Elles incluent principalement les allergies au blé, les maladies auto-immunes et les intolérances au gluten non cœliaques. Bien que ces conditions partagent certains signes cliniques, elles diffèrent par leurs mécanismes, leurs outils diagnostiques et leurs approches thérapeutiques, ce qui rend essentielle une évaluation médicale précise.

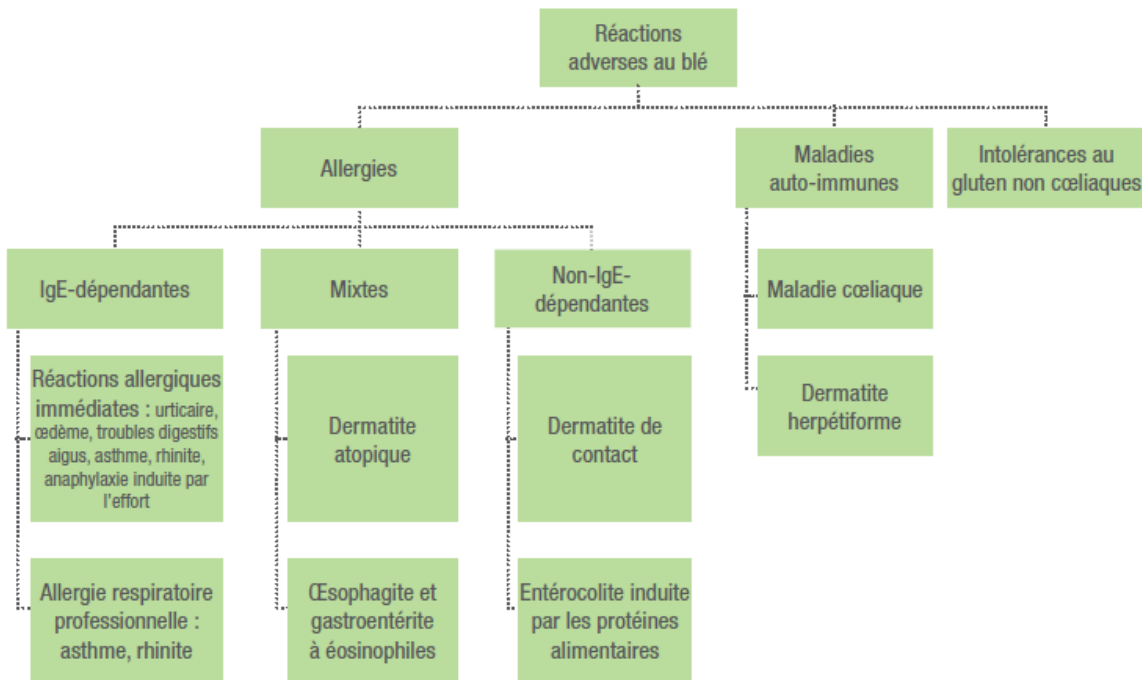


Figure - Typologie des réactions adverses au froment

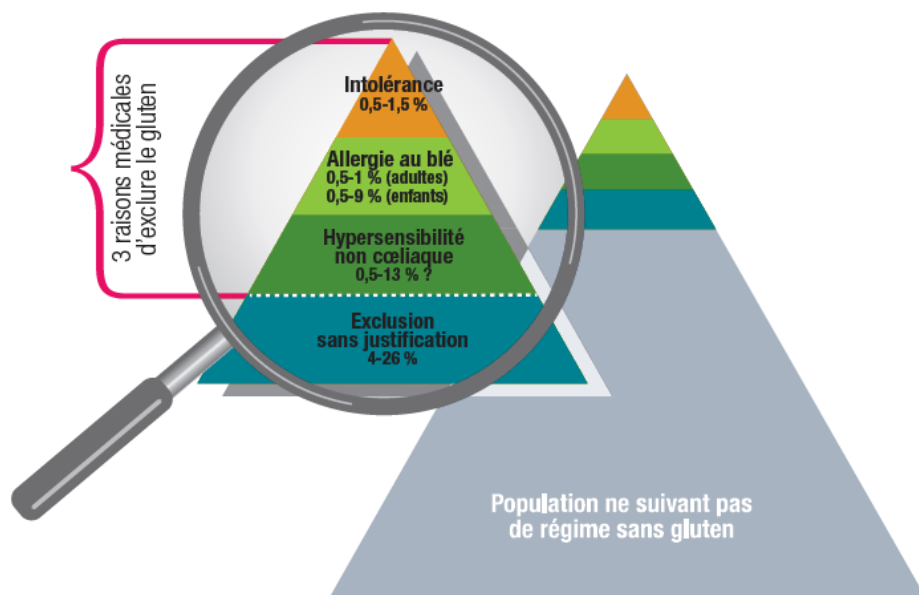


Figure - Prévalence des différentes dans la population des réactions adverses au froment

L'augmentation de la prévalence des réactions adverses au froment est souvent associée à l'évolution de son gluten dont la nature a évolué vers une force boulangère plus importante grâce à l'augmentation des gluténines de haut poids moléculaire (HMW). Les dernières recherches montrent que ces dernières ne jouent qu'un rôle mineur dans cette problématique par rapport aux oligo-, di- et mono-saccharides et polyols fermentescibles (FODMAPS), inhibiteur amylase/trypsine, protéines de transfert de lipides (LTP) ainsi que alpha- et gamma-gliadines.

Les FODMAPS sont des glucides à chaîne courte, mal absorbés dans l'intestin grêle, et capables d'être rapidement fermentés par le microbiote. Ils peuvent provoquer ballonnements, douleurs abdominales, gaz, diarrhée ou syndrome de l'intestin irritable chez les personnes sensibles. Cela correspond à la plus grande prévalence de cause d'intolérance digestive au froment. Vu les faibles teneurs en FODMAPS dans le froment, il participe probablement peu à ce phénomène contrairement à d'autres sources riches en FODMAPS comme les protéagineuses.

Tableau - Réactions adverses au froment : prévalence et molécules impliquées

Table 1 –Wheat-related sensitivities, prevalence, and wheat components responsible for the disease pathologies.

Disorder	Prevalence in various populations	Commonly potent reactive components in wheat	Less commonly reactive components in wheat	References
Celiac disease	0.5%–2%	α - and ω -gliadins, CM3 and 0.19 ATIs	γ -gliadins, HMW and LMW-glutenins	Rewers 2005; Tye-Din and others 2010b
Wheat allergy	0.2%–0.5%	–	–	Zuidmeer and others 2008; Vu and others 2014
<i>Baker's asthma</i>	–	ATIs, LTPs, and serpins, α - and ω -gliadins	γ -gliadins, peroxidase, LMW and HMW glutenins	Sanchez-Monge and others 1997; Sandiford and others 1997
<i>Atopic dermatitis</i>	–	LTPs, CM3 ATIs, gliadins and glutenins	–	Kusaba-Nakayama and others 2000; Battais and others 2005b
<i>Urticaria</i>	–	ω -5 gliadin	ω -1,2 gliadin, LMW glutenins, ATIs	Battais and others 2005b
<i>Anaphylaxis</i>	–	ω -5 gliadin, LMW glutenin	ATIs, α -, γ -, and ω -gliadins	Battais and others 2005a; 2005b; Morita and others 2009
Fructose malabsorption	11%–38% ^a	Fructans → FODMAPS	–	Truswell and others; Born and others 1995; Ladas and others 2000; Barrett and others 2009
Nonceliac wheat sensitivity	0.55% ^a	ATIs, Fructans (more research is needed to confirm the impact of fructans) → FODMAPS	–	Biesiekierski and others 2013; Digiacomo and others 2013; Junker and others 2012
Irritable bowel syndrome	11.5%–14.1%	Fructans with low degrees of polymerization → FODMAPS	Fructans with high degrees of polymerization	Roberfroid 1993; Brighenti and others 1995; Rumessen and Gudmand-Hoyer 1998; Hungin and others 2005

^aA large-scale epidemiological study has not been conducted. LTPs, lipid transfer proteins; ATIs, amylase-trypsin inhibitors.

Notre alimentation et la transformation du froment ont été affectées par différentes évolutions supposées à l'origine de cette augmentation d'intolérance digestive au froment :

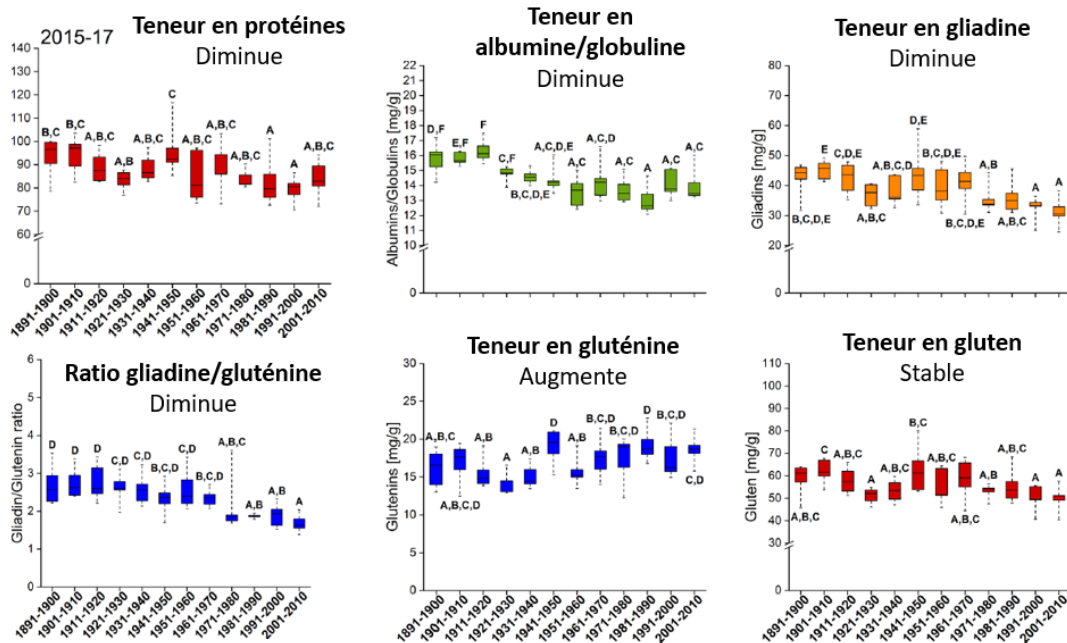
- Anciennes vers nouvelles variétés
- Mouture meule vers cylindre
- Levain-fermentation longue vers Levure-fermentation courte
- Degré de transformation plus important et formulation des produits avec plus d'additifs
- Autre piste d'évolution

Anciennes vers nouvelles variétés

L'étude de Pronin et al. 2021 montre que les variétés ont évoluées vers des teneurs plus faibles en protéines mais dont la qualité panifiable est accrue grâce l'augmentation de la teneur en gluténine ainsi que la diminution de la teneur en gliadines notamment ces les alpha- et gamma-gliadines qui sont les plus problématiques dans les réactions adverses au froment.

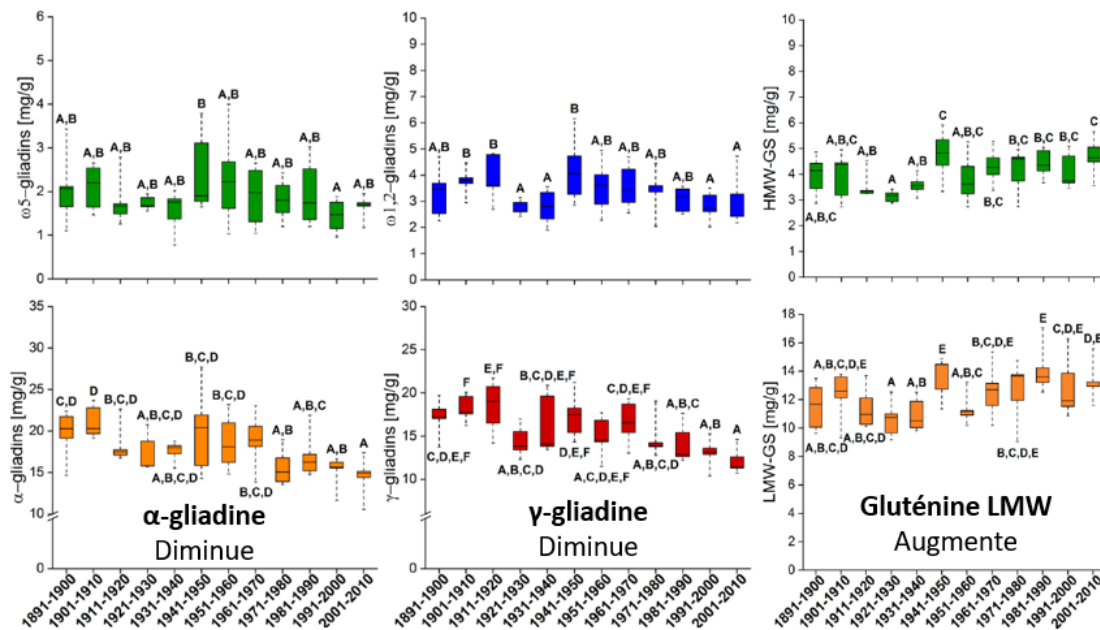
Les nouvelles variétés présentent donc un gluten qui est moins la source de réactions d'intolérance digestif au froment.

Evolution des variétés – Etude en Allemagne de Pronin et al. 2021



Grande variabilité entre les années et les décennies

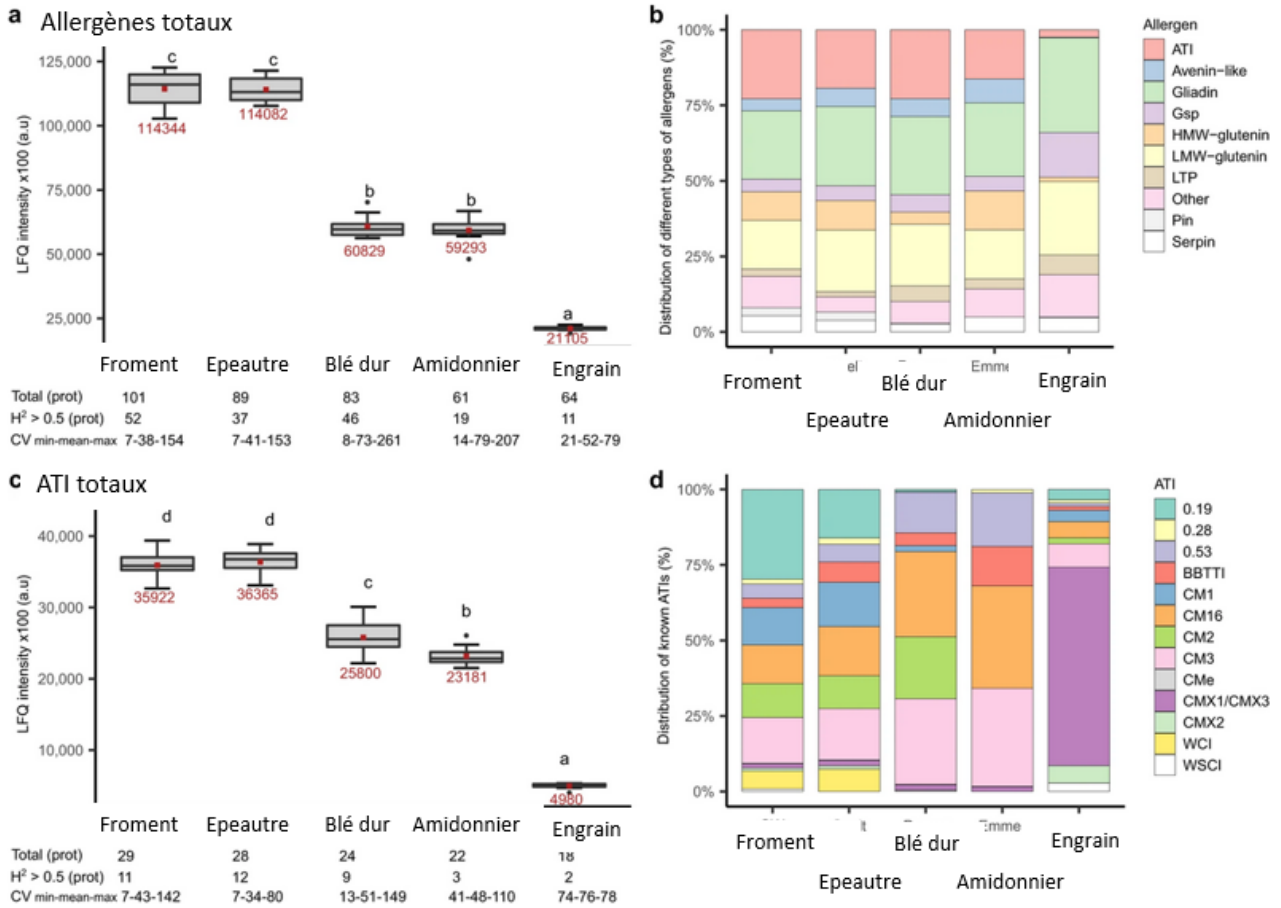
Evolution des variétés – Etude en Allemagne de Pronin et al. 2021



Grande variabilité entre les années et les décennies

La même équipe de recherche a montré que le taux d'allergène totaux dans la famille des blés (*Triticum*) est croissant avec la taille du génome, à savoir du moins allergène au plus allergène : engrain (diploïde), amidonnier-blé dur (tetraploïde) et froment-épeautre (hexaploïde).

Des différences entre blés en fonction du type de génome



Engrain (petit épeautre) moins allergène

Mouture meule vers cylindre

Le type de mouture meule par rapport au cylindre pour une farine avec une même teneur en minéraux/fibres ne se différencie pas par la fraction protéinique. Certes la teneur en matière grasse et le taux d'amidon endommagé est plus importante dans les farines réalisées sur meule.

Farine sur minoterie cylindre

Etapes de mouture cylindre succession de :

- Broyages (B1, B2,...) sur rouleaux cannelés
- Claquages (CL1, CL2,...) sur rouleaux lisses
- Convertissages (C1, C2,...) sur rouleaux lisses



Farine sur meule en granite

Méthode d'écrasement traditionnel:

le grain est écrasé dans sa totalité (germe et son dans la farine)



Produit de mouture	Sur cylindre Farine blanche et bise	Sur meule Farine bise et intégrale
Composition farine	Albumen (amande)	Albumen, fins sons (enveloppes) et embryon
Qualité technologique	Bonnes propriétés rhéologiques	Amidon endommagé à maîtriser
Qualité nutritionnelle	Réduction des contaminants	Fibres et minéraux
Qualité transformation	Débit rapide Farine blanche T45 et T55 possible	Débit lent (risque d'échauffement) Rendement faible Investissement faible

Levain-fermentation longue vers Levure-fermentation courte

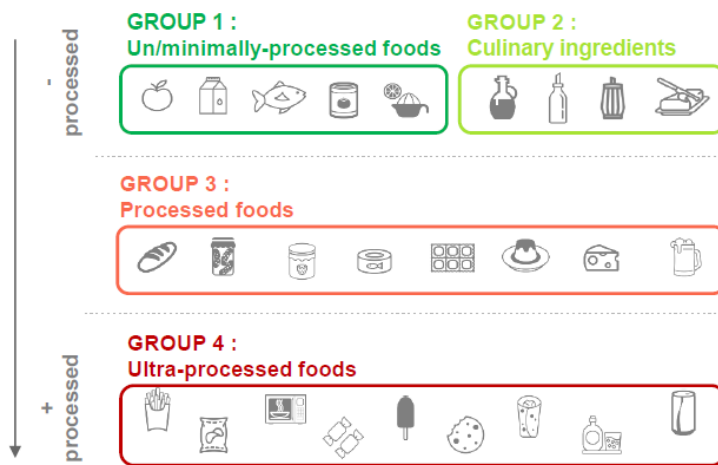
La panification a évolué d'une fermentation longue et au levain à une fermentation rapide et à la levure. Cela rend le pain plus problématique pour les personnes sensibles à l'intolérance digestif au froment car le levain et une longue fermentation rendent la protéine plus digeste et réduit fortement les FODMAPS. De plus, ces 2 facteurs sont des leviers majeurs pour influencer le gout du pain.

Évolution des diagrammes de panification au cours du XX ^e siècle En comparant les deux opérations d'oxydation : la fermentation et le pétrissage						
Périodes	1900-1925	1925-1970	1960-1970	1965-1975	1970-2000	1990-2015
Opérations de panification	Fermentation au levain sur 2 rafraichis Pétrissage manuel	Fermentation sur poolish Pétrissage mécanique à deux vitesses	Fermentation lente, à la levure en direct Pétrissage à vitesse lente	Fermentation à la levure en direct Pétrissage intensif	Fermentation rapide à la levure Pétrissage hermétique à hélices	Fermentation en indirect, faible ensemencement Méthode dite à faible ensemencement
Pré-fermentation			généralement absente	généralement absente	généralement absente	
Pétrissage	manuel avec repos					
Pointage						
Pesage et façonnage						
Apprêt						
Rapport heures de fermentation / nombre de tours	± 11 h Lent et manuel	± 8 h ± 600 tours	± 4-5 h ± 300 tours	± 3 h ± 1 300 tours	± 2 h ± 1 300 tours	± 15 h Frasage + rabats
: le pétrissage : la fermentation						

Degré de transformation plus important et formulation des produits avec plus d'additifs

Notre société a évolué vers une consommation importante en produits ultra-transformés notamment avec les substituts à la viande. Les produits ultra-transformés sont riches en additifs qui sont souvent les mêmes (gluten, poudre de lait, huile de palme, ...). L'évolution de la gamme du secteur de la boulangerie évolue vers des produits qui ont besoin de quantités très importantes de gluten ajouté comme avec les pains à hamburger, les viennoiseries, les brioches, les pains surgelés et précuits.

Tout cela nous expose bien plus que ce qu'il faudrait aux mêmes molécules. Tout devient nocif en trop grande quantité.



Weaknesses:

« Minimally-processed » foods

"Matrix" effect not sufficiently taken into account (important for fruit products)

« Processed » foods

Quantities of added sugars, salt and fat not taken into account (important for salt in breads, sugars in some cereal-based foods...)

« Ultra-processed » foods

Degree of processing of cosmetic ingredients, potential toxicity, redundancy and number of additives not taken into account, quantities of added sugars, salt and fat not taken into account

Autre piste d'évolution

Une autre source majeure d'intolérance digestif au froment présentée par le reportage Arte « Gluten, l'ennemi public » est le résidu de glyphosate (Round Up). Ce produit est notamment utilisé pour la dessiccation planifiée de la récolte de grandes cultures comme le froment. Cette pratique est interdite de longue date en Wallonie mais uniquement 10% de nos froments sont utilisés en alimentation humaine. Le résidu de glyphosate interférerait avec le processus de digestion des protéines.

Conclusion

L'évolution du froment a permis d'obtenir des variétés ayant un gluten qui est moins la source de réactions d'intolérance digestif au froment : moins de protéines dont les alpha- et gamma-gliadines.

Pour éviter une exposition trop importante aux sources d'intolérance digestif au froment, il faut s'assurer d'avoir une alimentation saine, variée, peu transformée et avec des fermentations longues. Il faut minimiser la consommation de produits ultra-transformés et trop riches en additifs.