ValCerWal :

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?



Wallonie recherche CRA-W

CePICOP asbl

COLLÈGE des PRODUCTEURS

Wallonie Relance

Wallonie agriculture SPW

Avec le soutien de la Wallonie

Projet 204/2

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Programme du Symposium

8h45-9h : Accueil

9h-9h45 : Introduction et témoignages
Le projet ValCerWal

09h45-10h10 : Evaluation des impuretés et des mycotoxines dans le froment
Impuretés par imagerie hyperspectrale proche infrarouge
Mycotoxines émergentes par chromatographie liquide

10h10-10h50 : Evaluation de la qualité technologique
Qualité technologique par proche infrarouge
Comment la mesure objective du pain aide à mieux définir les paramètres de qualité de la farine par KPM Analytics Chopin Technologies

10h50-11h20 : Pause

11h20-13h : Tri du froment : Point de vue technologique, sanitaire et économique
Pour améliorer la qualité technologique
Pour améliorer la qualité sanitaire
Par transmittance proche infrarouge à l'échelle industrielle par BoMill
Potentiel économique

13h : Lunch, visite du Mobilab et du trieur optique infrarouge Mini InSight de Bomill

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Sommaire du recueil

Généralités

A1 - Synthèse de ValCerWal
A2 - Plateformes post-récoltes : Tri modulable, Mouture et Analyse

Partie Technologique

B1 - Qualité technologique pour une valorisation boulangère : Tri
B2 - Evaluation des revenus générés par les différentes modalités de tri
B3 - Qualité technologique pour une valorisation boulangère : Variété et Fumure
B4 - Qualité technologique pour une valorisation de l'orge brassicole
B5 - Qualité technologique pour une valorisation du blé dur

Partie Méthodes alternatives pour évaluer la qualité technologique

C1 - Evaluation de la qualité technologique par infrarouge
C2 - Détermination du taux mitadinage par infrarouge
C3 - Evaluation de la qualité technologique des protéines par chromatographie
C4 - Méthodes rhéologiques alternatives pour évaluer la qualité technologique

Partie Impuretés et contaminants

D1 - Limiter le risque lié aux impuretés
D2 - Limiter le risque lié aux contaminants produits par la fusariose de l'épi
D3 - Evaluation de la présence de farine de blé tendre dans celle d'épeautre et de semoule de blé tendre dans celle de blé dur

Partie Base de données centralisée

E1 - Gestion des données relatives aux échantillons

Partie MOBILAB

F1 - MOBILAB : Laboratoire mobile pour la démonstration de l'application des capteurs et analyseurs innovants en agriculture et agro-alimentaire
F2 - Démonstration de l'équipement Neospectra pour la spectrométrie rapide sur le terrain
F3 - Démonstration de l'équipement FX17 LabScanner pour l'imagerie hyperspectrale
F4 - Démonstration de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge pour la détection d'impuretés

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Synthèse

Contact : b.godin@cra.wallonie.be

- Production de **céréales pour l'alimentation humaine** → Possible en filières plus intégrées avec un partage équilibré des risques-bénéfices
- **Diversifier les revenus des agriculteurs** avec des céréales alimentaires et se substituer aux besoins en céréales pour le bioéthanol
- **Développer un approvisionnement local et durable** aux transformateurs pour les rendre résilients aux crises mondiales successives

Objectif

- **Faire correspondre la qualité technologique et sanitaire aux attentes des transformateurs locaux afin d'éviter l'impact économique lié au déclassement des lots**

Froment Epeautre



Pain

Orge brassicole



Bière

Blé dur



Pâtes

Optimiser les outils de tri des grains à la valorisation recherchée

- **Tri des grains : Levier post-récolte nécessaire pour atteindre la qualité technologique et sanitaire souhaitée**
- **Eviter l'impact économique du déclassement d'un lot à cause d'une faible proportion de grains problématiques**

Pré-nettoyeur
→ Elimine les déchets, débris végétaux, grains immatures et poussières présents après la moisson



Trieur optique grain à grain
→ Sépare des grains de forme, couleur et/ou spectre infrarouge différent

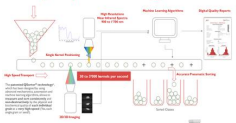
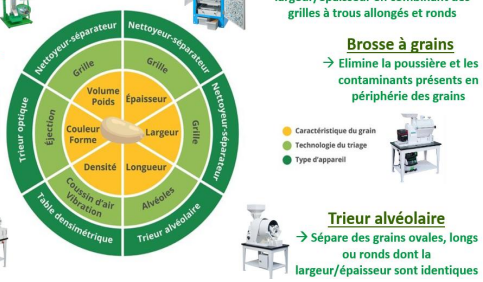


Table densimétrique
→ Sépare des grains de densité différente indépendamment de la forme des grains





Nettoyeur-séparateur-calibreur
→ Sépare des grains sur base de leur largeur/épaisseur en combinant des grilles à trous allongés et ronds



Brosse à grains
→ Elimine la poussière et les contaminants présents en périphérie des grains

Trieur alvéolaire
→ Sépare des grains ovales, longs ou ronds dont la largeur/épaisseur sont identiques

- **Effet trieurs sur la qualité technologique et sanitaire du froment**
- **Tri optique infrarouge grain à grain** → Peu de pertes de bon grains
  → **Atout majeur en agriculture à faible intrant et biologique**
  → **Produire des froments améliorants ou sur mesure** localement et en limitant le déclassement des lots
  → **Caractérisation approfondie des lots** en temps réel envisageable
  → **Phénotypage** à appliquer pour développer des nouvelles variétés
- **Autres leviers récoltes/post-récoltes sur le grain**
  → Traitement physico-chimique ? Qualité juste avant/après moisson ?

- **Tri rentable** et permettrait d'augmenter la part de céréales panifiables

Recherches en termes de qualité technologique pour conseiller les agriculteurs et les transformateurs

- **Evaluer qualité technologique approfondie** des variétés
- **Rechercher une protéine de qualité panifiable élevée**

- **Identifier des variétés robustes en qualité panifiable**
- **Optimiser la fumure azotée et son fractionnement** orienté qualité

Qualité technologique = (1) VARIETE X (2) Fumure azotée X (3) Autres facteurs (année, climat, sol, précédent, semis,…)

- **Evaluation technologique annuelle des variétés à maintenir de manière pérenne** car la durée de vie commerciale est courte ainsi que la disponibilité en semences est faible et variable en Belgique. Développer le **blé biscuitier** et **brassicole** car adapté à notre pédoclimat
- Evaluation technologique à **compléter par des essais de panification** (norme NBN VF12-001)**.** Permettrait aussi d'étudier les gains nutritifs apportés par les farines plus intégrales, l'ajout de protéagineuses, les moutures sur meule et les fermentations au levain
- Suivre les **bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire** des lots panifiables

Classer et évaluer plus efficacement l'aptitude à la transformation

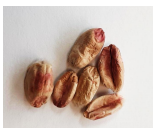
Classes qualité technologique conventionnel ou biologique

Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)		
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥275 (≥250)	≥225 (≥200)	≥175 (≥150)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤1,5 (≤2,0)		
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥10	≥9	≥8
Zélény référence (ml)	≥40	≥35	≥30
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥12,0 BIO : ≥11,5	≥11,5 BIO : ≥11,0	≥11,0 BIO : ≥10,5
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥76,0 nettoyé (≥73,0 non-nettoyé)		

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Mycotoxines émergentes pour le froment en Wallonie

- **Méthode robuste analyse multi-mycotoxines des *Fusarium* par UPLC-MS/MS** appliquée sur plusieurs variétés et lieux 2023 et 2024
  → DON, ZEA, ENN A1, ENN B et ENN B1
  → Emergente, **ENN B1, plus fréquemment détectée**
  → Présence accrue d'ergot → **Screening alcaloïdes ?**
- **Tri permet de diminuer la concentration en DON et en OTA des principales fractions**
  → Trieur optique-infrarouge grain à grain le plus efficace

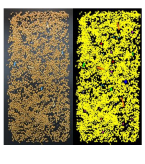




Méthodes alternatives pour évaluer plus efficacement la qualité avec la spectroscopie infrarouge

- **Performante** pour prédire **la teneur en constituants chimiques et le taux de mitadinage**
  Trop médiocre pour prédire **la qualité de gluten** (Zélény, force du gluten, …) mais **exploitable pour orienter l'allotement de lots et de la sélection variétale** quand la variété est inconnue
- **Imagerie hyperspectrale efficiente pour détecter les impuretés et les contaminants**
  Permettrait en milieu industriel un suivi en continue **réduisant les lots non-conformes**





Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be

CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW

Avec le soutien de la Wallonie Relance
Projet N°204/2
Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Synthèse

Contact : b.godin@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Froment panifiable, Epeautre, Orge brassicole, Blé dur, Tri physique, Tri optique, Variété, Fumure, Qualité, Technologique, Gluten, Sanitaire, Mycotoxine, Chromatographie, Infrarouge, Imagerie

Introduction

Le développement conséquent des céréales alimentaires en Wallonie est essentiel pour le maintien et la diversification économique de ce secteur. Le chiffre d'affaires du secteur de production primaire agronomique wallon est de 1,9 milliard € dont 21% (405 millions €) viennent de la production des céréales et génèrent 22 000 emplois directs. La principale céréale produite sur notre territoire est le froment. Les variétés de froment cultivées en Wallonie sont **rarement adaptées à une valorisation alimentaire humaine.** Il en résulte que la production de froment wallon est destinée à 46% pour les animaux et à 44% pour la transformation en bioéthanol de première génération. Cette dernière est vouée à disparaitre vu les objectifs européens en termes de réduction de gaz à effets de serre de 55% d'ici 2030 et neutre d'ici 2050 ainsi que l'interdiction des voitures thermiques d'ici 2035 et du bioéthanol en provenance du MERCOSUR. **La relocalisation de la production de céréales alimentaires en Wallonie est essentielle pour se substituer graduellement à celle destinée à l'amidonnerie-éthanolerie.** Cela permettra aussi **d'apporter la résilience à nos transformateurs alimentaires dont un approvisionnement local est nécessaire vu les crises mondiales successives.** L'industrie alimentaire en Wallonie représente 10,5 milliards € de chiffre d'affaires, 25 000 emplois directs et 6 milliards € d'exportation.

Moins de 10% de lots de froment wallons sont utilisés par nos transformateurs alimentaires. Les variétés de froment cultivées en Wallonie sont choisies avant tout au regard de leur rendement en grains, au détriment des variétés adaptées à la meunerie et aux transformateurs locaux. Ces acteurs ont besoin de variétés adaptées avec des protéines de qualité panifiable et des teneurs en protéines acceptables. **Le froment n'est pas une commodité**. Il y a des variétés avec des qualités technologiques très différentes destinées à des usages diamétralement opposés. Il n'existe pas de bons grains de qualité technologique standard, tout est relatif. La qualité sanitaire pour les contaminants comme les mycotoxines, elle est définie par la loi. **La présence de contaminants et d'impuretés devient un point d'attention de plus en plus critique vu la diminution d'utilisation d'intrants pour répondre à la demande sociétale de produire plus durablement.**

Objectifs

Pour développer l'utilisation des céréales wallonnes en alimentation humaine, il faut **faire correspondre la qualité technologique et sanitaire des lots de céréales aux attentes des transformateurs locaux et en permettre la culture de manière plus durable.** Le projet ValCerWal a développé des solutions pour gérer cette problématique afin de permettre le maintien et l'essor tant de la production que de la transformation des céréales alimentaires en Wallonie. Il s'est focalisé principalement sur la qualité technologique et sanitaire du froment panifiable. Il a également traité de ces qualités pour l'épeautre, l'orge brassicole et le blé dur.



Ce projet a développé 3 approches pour limiter les problèmes technologiques et sanitaires des céréales wallonnes afin d'éviter l'impact économique lié au déclassement des lots :

- Optimiser les outils de tri des grains à la valorisation recherchée
- Recherches en termes de qualité technologique pour conseiller les agriculteurs et les transformateurs au niveau du choix variétal et de la recommandation de fumure azotée pour des utilisations en alimentation humaine
- Classer et évaluer plus efficacement l'aptitude à la transformation

Application : Optimiser les outils de tri des grains à la valorisation

Le **tri est un levier post-récolte nécessaire pour amener un lot de grains aux objectifs de qualité** (normes ou engagement contractuel) visés. Les systèmes de tri se redéploient pour pallier aux problématiques de lutte contre les adventices et les maladies des grains. En agriculture à faible intrant et biologique, les leviers sont limités pour la gestion de ces problématiques. Le tri est **incontournable pour améliorer la qualité technologique et sanitaire afin d'éviter l'impact économique du déclassement d'un lot à cause d'une petite fraction fortement déviante.**

Le trieur parfait n'existe pas. Il faut donc **choisir une combinaison de trieurs et de réglages en fonction des défauts rencontrés dans le lot et de la qualité envisagée.** Le tri est appliqué pour atteindre différents objectifs de qualité qui sont : Qualité sanitaire, Production de semences, Séparer des cultures associées et Améliorer la qualité technologique. La plateforme de trieurs à l'échelle de plusieurs kg de grains mise en place est constituée des équipements suivants :

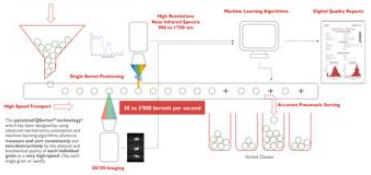
Pré-nettoyeur
→ Elimine les déchets, débris végétaux, grains immatures et poussières présents après la moisson



Nettoyeur-séparateur-calibreur
→ Sépare des grains sur base de leur largeur/épaisseur en combinant des grilles à trous allongés et ronds



Trieur optique grain à grain
→ Sépare des grains de forme, couleur et/ou spectre infrarouge différent





Brosse à grains
→ Elimine la poussière et les contaminants présents en périphérie des grains



Table densimétrique
→ Sépare des grains de densité différente indépendamment de la forme des grains



Trieur alvéolaire
→ Sépare des grains ovales, longs ou ronds dont la largeur/épaisseur sont identiques



Cette plateforme de trieurs nous a permis d'étudier leur impact sur la qualité technologique et sanitaire du froment ainsi que de répondre à des problématiques spécifiques d'agriculteurs.

Les **trieurs physiques sur base de la largeur du grain** (nettoyeur-séparateur) et **de la longueur du grain** (trieur alvéolaire) permettent de retirer une grande partie des impuretés ainsi que d'améliorer la taille du grain (poids de mille grains et poids à l'hectolitre) et de légèrement améliorer la qualité de l'amidon.

Le **trieur physique sur base de densité** (table densimétrique) permet de retirer des impuretés et des grains contaminés de même largeur et longueur que les grains d'intérêts ayant une densité différente. Cette fraction d'impuretés et de grains contaminés est souvent faible et engendre une perte conséquente de bons grains dans les fractions de refus. Au niveau technologique, elle permet d'améliorer le temps de chute de Hagberg (prégermination physiologique).

En plus de retirer efficacement et rapidement une partie conséquente des impuretés, le **pré-nettoyeur aérodynamique** permet de fortement améliorer la taille des grains d'un lot en retirant les plus petits, ainsi que d'apporter une légère amélioration du temps de chute de Hagberg et de l'indice de sédimentation Zélény pour des lots présentant des valeurs médiocres pour ces 2 paramètres.

Le **trieur optique proche infrarouge au grain à grain sépare sur base de critères qualités spécifiques souvent invisibles**. Il permet de retirer de manière spécifique les impuretés ainsi que les contaminants présents en teneur élevées. Au niveau technologique, il est le seul trieur en mesure de séparer les grains sur base d'un paramètre chimique comme la teneur en protéines. Nous avons montré que ce tri basé sur la teneur en protéines est un levier post-récolte permettant **d'améliorer la capacité de panification du froment**. L'extraction de la fraction de grains à teneur en protéines plus élevée permet d'améliorer la fonctionnalité de la farine (augmentation de la teneur en gluten, stabilité de la pâte, affaiblissement des protéines et force boulangère).

L'analyse économique sur le tri du froment a montré que le tri peut être **rentable à l'échelle individuelle** (ferme, coopérative, organisme stockeur) et contribuer significativement à l'augmentation de la part de céréales panifiables à l'échelle de la filière.

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Application : Recherches en termes de qualité technologique pour conseiller les agriculteurs et les transformateurs au niveau du choix variétal et de la recommandation de fumure azotée

Pour faire correspondre les variétés et la fumure azotée de froment, d'épeautre, d'orge brassicole et de blé dur aux besoins de nos transformateurs, il est nécessaire **d'évaluer la qualité technologique des variétés de manière approfondie à l'aide d'essais variétaux existants en Wallonie**. Au niveau agronomique, il est essentiel que les variétés soient adaptées à notre pédoclimat ainsi qu'à une conduite culturale avec moins d'intrants. Pour se faire, l'évaluation technologique élaborée a également été appliquée au réseau variétal du Plan BIO2030 pour **identifier des variétés robustes tant au niveau agronomique que technologique.**

Notre méthodologie d'analyse technologique s'est focalisée sur la **qualité des constituants chimiques (protéines et amidon)** notamment en recherchant, pour le froment, l'épeautre et le blé dur, **une protéine de qualité panifiable élevée plutôt que d'en viser une quantité importante de faible qualité panifiable**. Pour se faire, nous nous sommes basés sur l'analyse à l'alvéographe et au Mixolab+ sur la farine blanche issue des grains.

Rhéologique : Pétrissage
→ Capacité d'hydratation
→ Développement et machinabilité
- Mixolab+ (Dévelop. et stabilité gluten)
- Alvéographe (Force et nature du gluten)

Rhéologique : Fermentation et Cuisson
→ Rétention du CO_2 de fermentation
→ Tenue à la cuisson
- Alvéographe (Force et nature du gluten)
- Mixolab+ (Stabilité gluten / Texture amidon)

Fermentaire
Levée de la pâte
→ Libération de sucres pour la production de CO_2 par les levures
- Hagberg et Mixolab+

Qualité technologique = (1) VARIETE X (2) Fumure azotée X (3) Autres facteurs (année, climat, sol, précédent, semis,...)

L'évaluation technologique approfondie appliquée aux différents essais variétaux a permis **d'identifier des variétés pertinentes de haute qualité panifiable pour le froment et l'épeautre, brassicole pour l'orge et pastière pour le blé dur ainsi que leur profil global de qualité technologique lorsqu'elles sont cultivées en Wallonie**. Le choix de la variété détermine majoritairement la qualité technologique. Pour le froment, l'épeautre et le blé dur, les caractéristiques technologiques les plus robustes à l'effet de l'année, et donc celles qui sont le plus définies par la variété, sont la force du gluten et sa nature suivie par la nature de l'amidon et ses propriétés rhéologiques.

La quantité et le fractionnement de la fumure azotée est optimisée en Wallonie au regard uniquement du rendement en grains. Une analyse approfondie de la qualité technologique a été réalisée pour les essais en fumure azotée existants pour des variétés de froment panifiable afin d'**optimiser la fumure azotée et son fractionnement par rapport à la qualité panifiable de la protéine.** Une fumure azotée de 220uN en 4 fractions (tallage 40uN + redressement 80uN + 2ième nœuds 40uN + dernière feuille 60uN) est recommandée pour obtenir les forces de gluten les plus élevées. La fraction 2ième nœuds est à adapter en fonction de son objectif de fumure azotée totale sans perdre trop de qualité panifiable. L'augmentation de la fumure azotée accroit surtout la teneur en protéines et l'extensibilité du gluten ainsi que la force du gluten. Certaines variétés plafonnent en force de gluten au-delà d'une fumure azotée de 180uN.

Application : Classer et évaluer plus efficacement l'aptitude à la transformation

Le choix de la variété est déterminant pour l'aptitude à la transformation d'un lot. Les analyses technologiques des différents essais variétaux ont permis d'établir des classements **regroupant les variétés par catégories de qualité technologique** (panifiable pour le froment et l'épeautre, brassicole pour l'orge et pastière pour le blé dur) **distincte spécifiques à notre pédoclimat et nos transformateurs en fonction du mode de production (conventionnel et biologique). C'est un point critique** car la qualité technologique d'une variété est spécifique au pédoclimat d'une région donnée et du mode de production ainsi que des attentes en termes de qualité des transformateurs locaux.

Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)		
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥275 (≥250)	≥225 (≥200)	≥175 (≥150)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤1,5 (≤2,0)		
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥10	≥9	≥8
Zélény référence (ml)	≥40	≥35	≥30
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥12,0 BIO : ≥11,5	≥11,5 BIO : ≥11,0	≥11,0 BIO : ≥10,5
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥76,0 nettoyé (≥73,0 non-nettoyé)		

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Qualité panifiable belge de l'épeautre	Panifiable en pur 100% Epeautre	Panifiable en mélange 1/3 Epeautre 2/3 Froment Q1
Variété	Q1e	Q2e et Q3e
Humidité des grains nus (%)	≤14,5 (≤15,5)	
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)	
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥125 (≥100)	≥100 (≥75)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤0,5 (≤1,0)	
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥8	≥7
Zélény référence (ml)	≥25	≥20
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥13,0 BIO : ≥12,5	≥12,5 BIO : ≥12,0

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Des **méthodes rhéologiques alternatives** (GlutoPeak et variantes de l'alvéographe et Mixolab) ont été mises au point et/ou appliquées pour permettre une évaluation plus spécifique et rapide de la qualité technologique d'un lot. Elles offrent une **meilleure discrimination variétale et constituent un complément efficace** aux méthodes classiques, particulièrement utiles dans un contexte de screening de lots industriels et de sélection variétale.

La **qualité du gluten est essentielle** pour déterminer l'aptitude à la panification d'une variété ou lot de froment et d'épeautre. Les méthodes rhéologiques nécessitent une quantité conséquente de temps, de main d'œuvre et de quantité d'échantillon. Nous avons exploré **la chromatographie comme alternative plus efficiente** pour le froment. Une méthode **d'extraction et analyse par chromatographie basé sur l'exclusion de taille a été développée**. Elle permet d'obtenir 6 fractions : F1-gluténines de haut poids moléculaire, F2-gluténines de bas poids moléculaire, F3-ω-gliadines, F4-α, β et γ-gliadines, F5-globulines et albumines et F6-petites protéines solubles. Cette méthode a permis de distinguer les variétés par leur profil protéique. Des matrices de corrélation ont été établies entre les fractions protéiques et les paramètres technologiques, pour trois types de mouture : farine blanche, mouture intégrale et mouture intégrale tamisée. Peu de corrélations significatives ont été observées, quel que soit le type de mouture. Une méthode **d'extraction et analyse par chromatographie basée sur la phase inverse a été développée**. Elle permet une séparation très fine des 3 extraits protéiques : 1-Albumines et globulines, 2-Gliadines et 3-Gluténines. Les chromatogrammes ont nécessité des prétraitements de données élaborés pour les comparer aux données technologiques. Elle n'a pas permis de distinguer les échantillons en fonction de leur qualité technologique.

Le changement climatique et l'augmentation des pratiques phytotechniques moins intensives favoriseront le développement d'une flore fongique produisant des mycotoxines dans les céréales de notre région. Il s'agit d'un point de vigilance accru tant sur la quantité que sur la nature des mycotoxines présentes. Les plus critiques en céréales au champ sont les mycotoxines venant des agents de la fusariose des épis et ceux de l'ergot. **Nous avons développé et validé une méthode robuste d'analyse multi-mycotoxines des *Fusarium* par UPLC-MS/MS**. Elle a été appliquée sur plusieurs variétés et lieux en 2023 et 2024 pour évaluer la présence en froment de ces mycotoxines en Wallonie. Les mycotoxines détectées ont été le DON, la ZEA, l'ENN A1, l'ENN B et l'ENN B1. **L'ENN B a été la mycotoxine la plus fréquemment détectée**. Cette méthode d'analyse a été appliquée à une expérience de tri pour 3 niveaux différents de mycotoxines DON et OTA sur des échantillons distincts. La capacité à **éliminer les grains les plus contaminés a été évaluée sur 3 systèmes de tri** : nettoyeur-séparateur, table densimétrique et trieur visible-infrarouge au grain à grain. Le tri a permis de **diminuer la concentration en mycotoxine DON et OTA de certaines fractions**. Le trieur visible-infrarouge a été le plus efficace.

La **spectrométrie proche infrarouge (SPIR) est une méthode indirecte efficiente** pour prédire sur base de calibration les teneurs en constituants chimiques comme la teneur en protéines. Nous avons construit des calibrations SPIR sur base d'une grande diversité d'échantillons. Les données spectrales et les valeurs de référence ont été implémentées dans l'outil **CRAWLSPEC** qui a été développé par le CRA-W pour permettre la centralisation et l'intégration des données ainsi que l'extraction et l'exploitation des données. Des calibrations SPIR ont été construites pour les paramètres rhéologiques du froment et de l'épeautre sur base des spectres de leur grains, mouture intégrale ou farine blanche. Les 3 modes de présentations donnent les mêmes niveaux de performances de prédiction. Les performances de **prédiction pour les paramètres de qualité de gluten** (Zélény, force du gluten…) **sont trop médiocres pour être utilisées de manière contractuelle**. Ces prédictions peuvent être **très utiles pour de l'allotement de lots et de la sélection variétale quand la variété est inconnue.** Les performances de prédiction pour les paramètres de qualité de l'amidon (Rapid Visco Analyzer) sont inexploitables. Les faibles niveaux de performance de prédiction pour les paramètres rhéologiques s'expliquent par le fait que, dans le grain et la farine, le gluten n'est pas encore formé et l'amidon n'est pas sous forme empesée. La **SPIR a démontré sur plusieurs spectromètres** (XDS FOSS, Infratec NOVA FOSS, QSorter Qualysense, FX17 SPECIM) son potentiel pour **évaluer le taux de mitadinage du blé dur de manière plus objective et moins laborieuse que la méthode de référence.**

L'imagerie hyperspectrale proche infrarouge constitue une méthode efficiente pour détecter les impuretés et contaminants dans les grains ou farines sur base de la signature spectrale. Elle peut servir d'étape de présélection pour orienter le nettoyage ou les analyses permettant de consolider la confiance dans les circuits courts. Nous l'avons développé pour **détecter de manière ciblée et performante 8 catégories d'impuretés et contaminants présents dans grains de céréales** : sol et graviers, déchets plastiques, insectes, résidus de récoltes et boutons floraux, grains cariés entiers, sclérotes d'ergot, graines de datura, graines étrangères d'adventices. Cette application est en mesure d'évaluer la pureté générale d'un lot de céréale. Ce type d'imagerie a également été appliquée pour **mesurer la composition et suivre l'homogénéité des formulations de semoules et de farines au sein de la filière céréalière.** Les résultats obtenus sur le couple froment-blé dur montrent que l'intégration en routine est possible. Pour le froment-épeautre, les résultats sont à améliorer pour être applicable.

Plateforme de mouture sur cylindre et sur meule

Les propriétés technologiques des farines dépendent du type de mouture et du type de moulin. Il est nécessaire de disposer de différents types de moulins pilotes pour répondre aux besoins expérimentaux des acteurs céréaliers wallons. La **plateforme de mouture sur cylindre et meule a donc été conçue pour produire des lots de farine ou de semoule de plusieurs kg** adaptés aux essais pilotes de transformation ainsi que l'évaluation technologique d'essais de variétés et de fumures. Cette plateforme est notamment constituée de :

- **Moulin à 6 cylindres (Buhler MLU-202)** - 3 passages sur cylindres cannelés et 3 sur cylindres lisses pour la production de lots pilotes et brosse à son pour l'estimation du rendement en farine
- **Moulin à meule en granit** pour la production de lots pilotes

Le moulin Buhler MLU-202 permet d'obtenir une farine blanche avec des propriétés technologiques semblables à celles des meuneries belges. Elle a donc été utilisée pour produire de la farine blanche en quantité pour les essais de panification (norme NBN VF12-001). Des variétés plus adaptées à la mouture sur meule ont été identifiées.

Plateformes d'analyse de semoule de blé dur et de malt d'orge brassicole

Pour le développement de filières de céréales pastières ou brassicoles, il est incontournable de disposer d'un **laboratoire d'accompagnement neutre pour évaluer la qualité technologique de sa matière première et recommander des variétés adaptées à notre pédoclimat, nos modes de production et nos transformateurs**. Il est également essentiel de prévenir les pertes économiques liées aux déclassements inutiles de lots acceptables.

Pour le **blé dur**, une **méthodologie intégrant la production de semoule a été mise en place** afin d'être en mesure d'évaluer plus finement l'aptitude à la transformation du blé dur. Elle a pu être établie **grâce à notre moulin CD2 et son sasseur,** équipements indispensables pour déterminer la qualité technologique du blé dur mais ils sont pourtant rares, notamment en Europe. C'est une **opportunité inédite pour la Wallonie**. Elle a été appliquée dans le cadre du Projet Relocalisation alimentaire N°89 Blé dur et ses essais variétaux. Elle a permis **d'identifier des variétés permettant d'obtenir du blé dur de qualité élevée en Wallonie au nord du sillon Sambre-Meuse.**

Pour l'**orge brassicole**, les méthodes d'analyse standard ont été mises en place sur le malt issu des micro-maltages des essais variétaux wallons. Cette évaluation technologique est basée sur le **brassin conventionnel et la friabilité du malt.**

Communications

Le projet ValCerWal a communiqué de manière proactive sur ses recherches à de nombreuses reprises. Il a produit **plus de 78 communications sur 4 ans** à destination de différents types de publiques (**scientifique, technique, grand public**) tant sous forme écrite dans des journaux, des livres et une thèse qu'orale par des présentations à des rencontres, visites, démonstrations et formations destinées à la filière. Une grande partie des communications ont été réalisée à destination des acteurs de la filière céréalière wallonne. Elles ont été effectuées **en association avec les partenaires du projet, à savoir le Centre Pilote wallon des Céréales et des Oléo-Protéagineux (CePiCop), le Collège des Producteurs, ainsi qu'avec Biowallonie.** Le projet ValCerWal a également diffusé les résultats de ses recherches à l'occasion de son **Symposium ValCerWal**.

Des bonnes pratiques pour assurer la qualité technologique et sanitaire des lots panifiables en termes de choix variétal, fumure azotée, phytotechnie, pré-récolte, récolte, allotement, échantillonnage, analyses avant transformation, stockage et tri ont été établies dans le cadre du projet ValCerWal. Ces bonnes pratiques ont notamment fait l'objet de nombreuses reprises par des :

- **Articles écrits techniques destinés à la filière céréalière wallonne** comme le Livre blanc Céréales, Itinéraire BIO, BioCérès, Avertissements CePiCOP et Vademecum Création d'une filière céréalière (en association avec le Projet FarWal)
- **Présentations aux évènements techniques céréaliers wallons** comme le Livre blanc Céréales, Journées filières panifiables wallonnes, Journée Interprofessionnel BIO, Visites des champs d'essai, FEGRA et Séances d'information de filières spécifiques

Ces bonnes pratiques ont notamment été diffusées auprès **d'agriculteurs, stockeurs et transformateurs (environs 30 chaque année) qui ont été accompagnés** par l'analyse technologique et l'évaluation de l'aptitude à la transformation de lots de matière première.

Le **Collège des Producteurs a mis à jour et diffusé le Plan de développement stratégique 2030 en céréales alimentaires** pour la Wallonie en association avec le projet ValCerWal.

Conclusion et perspectives

La production de céréales pour l'alimentation humaine est possible en Wallonie. La relocalisation de cette production est nécessaire pour nous rendre plus résilient face aux crises mondiales successives et pour se substituer graduellement à la production de bioéthanol de première génération. Cette relocalisation permettra de garantir un approvisionnement local et plus durable pour nos transformateurs ainsi que plus de valeur ajoutée pour nos agriculteurs. Les céréales alimentaires doivent en fonction de leur utilisation répondre à des critères spécifiques en termes technologiques (qualité des protéines et de l'amidon) et sanitaires (teneur en mycotoxines et impuretés). Ces freins liés à la qualité sont critiques car ils impactent la possibilité de commercialiser les céréales sur des marchés exigeants réduisant les marges des producteurs et limitant leur compétitivité. **Le projet ValCerWal a pu mettre en évidence le potentiel des outils post-récoltes comme le tri des grains et les méthodes alternatives (chromatographie, rhéologie rapide, spectrométrie et imagerie proche infrarouge) d'évaluation de la qualité pour permettre la constitution de lot homogène et de qualité ainsi que la nécessité de variétés et fumures azotés adaptées aux objectifs de qualité.** Des informations au sujet desquels le projet ValCerWal a largement communiqué. Pour mettre en œuvre ces solutions de manière viable, il paraît crucial de construire des filières plus intégrées avec une vision à moyen et long terme garantissant un partage équilibré des risques et bénéfices entre les différents maillons de la filière. C'est essentiel pour une transition vers une Wallonie plus durable et résiliente.

La technologie de **tri optique infrarouge au grain à grain permet un tri très spécifique**. La perte de grains de bonne qualité au tri est nettement moindre par rapport aux trieurs physiques. Il permet la **production de froments améliorants ou sur mesure** localement et en limitant le déclassement des lots. Cette technologie est d'autant plus **critique en agriculture à faible intrant et biologique** où la fréquence de déclassement de lots est plus importante en raison des conditions environnementales moins favorables. Elle pourrait aussi apporter une nouvelle plus-value pour la **caractérisation approfondie des lots en temps réel à haut débit pour en évaluer la qualité**. En plus, de donner une valeur moyenne pour les paramètres mesurés, elle **donne 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. Ce type de tri est également un **outil de phénotypage permettant de développer des nouvelles variétés de manière efficiente**.
D'autres leviers pré- et post-récoltes que le tri devraient également être explorés pour diversifier les outils disponibles et garantir la qualité des céréales alimentaires. Des **traitements physico-chimiques en post-récolte** du grain ainsi que le suivi de la **qualité du grain juste avant et après la récolte à la ferme** pourraient être envisagés**.**

Pour faire correspondre les variétés aux besoins des transformateurs, une **évaluation technologique annuelle approfondie des variétés de froment panifiable, épeautre, orge brassicole et blé dur** cultivées en Wallonie spécifique à l'agriculture conventionnelle et biologique doit être maintenue de manière pérenne car la **durée de vie commerciale des variétés est courte et la disponibilité en semences est faible et variable en Belgique.**
Pour évaluer l'aptitude à la panification, il serait essentiel de la **compléter par des essais de panification pour des pains de type belge** (norme NBN VF12-001). Ce type d'essais permettrait d'étudier les gains nutritifs apportés par les farines plus intégrales, l'ajout de protéagineuses, les moutures sur meule et les fermentations au levain.
Le **développement de filières de blé biscuitier et brassicole adaptées à notre pédoclimat et nos transformateurs** permettrait d'accroitre la production de céréales alimentaires en Wallonie tout en prenant moins de risque de déclassement. Il serait nécessaire **d'identifier des variétés adaptées à notre pédoclimat.**

La méthode validée pour l'analyse **multi-mycotoxines des *Fusarium* par chromatographie** en froment a permis de confirmer la présence des mycotoxines de ce pathogène en Wallonie dont **les mycotoxines émergentes ENN.** Elles ne sont pas réglementées et leur toxicité est à l'étude. La **présence accrue en Wallonie de l'ergot pour le froment nécessiterait aussi un screening pour ses alcaloïdes** à l'échelle de notre territoire pour s'assurer le respect des nouveaux seuils réglementaires. L'étude du tri pour la gestion des contaminants devrait être élargie à des concentrations initiales plus élevées en mycotoxines et en étudier d'autres comme celles qui sont émergentes.

Les méthodes alternatives de mesure de la qualité sont essentielles pour rendre son évaluation efficiente. La **chromatographie d'exclusion de taille ou de phase inverse** ont permis d'obtenir des profils protéiques précis et reproductibles en froment. Une modélisation plus avancée serait nécessaire pour les relier à la qualité technologique.

La **spectrométrie proche infrarouge** est **performante** pour prédire la teneur en **constituants chimiques et le taux de mitadinage**. Elle est trop **médiocre** pour la prédiction de **la qualité de gluten** (Zélény, force du gluten, …). Elle est **exploitable pour orienter l'allotement de lots et de la sélection variétale** quand la variété est inconnue. L'**intégration de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge en routine en milieu industriel** permettrait des mesures en continu, non destructives et sans préparation d'échantillon, autorisant un suivi intense des lots et une **réduction de lots non-conformes en termes d'impuretés et de contaminants.**

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Plateformes post-récoltes : Tri modulable, Mouture et Analyse

Contact : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

Objectifs

- **Plateformes techniques post-récoltes pour répondre aux besoins expérimentaux de nos agriculteurs et nos transformateurs**
- Jusqu'à présent outils pas disponibles à tous en Wallonie
- Accompagner et mettre en œuvre des essais expérimentaux → **Neutre et indépendant**

Plateforme de tri modulable

- **Tri des grains : Levier post-récolte nécessaire pour atteindre la qualité technologique et sanitaire souhaitée**
  → Indispensable en agriculture à faible intrant et biologique
- **Eviter l'impact économique du déclassement d'un lot à cause d'une faible proportion de grains problématiques**

Pré-nettoyeur

→ Elimine les déchets, débris végétaux, grains immatures et poussières présents après la moisson



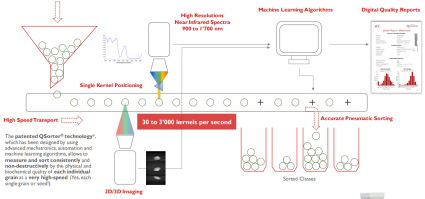
Nettoyeur-séparateur-calibreur

→ Sépare des grains sur base de leur largeur/épaisseur en combinant des grilles à trous allongés et ronds



Trieur optique grain à grain

→ Sépare des grains de forme, couleur et/ou spectre infrarouge différent





Brosse à grains

→ Elimine la poussière et les contaminants présents en périphérie des grains



Caractéristique du grain
Technologie du triage
Type d'appareil

Table densimétrique

→ Sépare des grains de densité différente indépendamment de la forme des grains



Trieur alvéolaire

→ Sépare des grains ovales, longs ou ronds dont la largeur/épaisseur sont identiques



- **Effet des trieurs sur la qualité technologique et sanitaire du froment**
- **Tri optique infrarouge au grain à grain permet tri très spécifique** avec peu de pertes de bon grains
  → **Atout majeur en agriculture à faible intrant et biologique**
  → **Produire des froments améliorants ou sur mesure** localement et en limitant le déclassement des lots
  → **Caractérisation approfondie des lots** en temps réel envisageable
  → **Phénotypage** à appliquer pour développer des nouvelles variétés
- **Autres leviers récoltes/post-récoltes sur le grain** → Traitement physico-chimique ? Qualité juste avant/après la moisson à la ferme ?

Plateforme de mouture sur cylindre et meule

- **Produire des lots de farine ou de semoule de plusieurs kg**
  → Essais pilotes de transformation
- **Moulin Buhler MLU-202 pour essai de panification** (norme NBN VF12-001)
  → Essentiel pour compléter l'évaluation de l'aptitude à la panification des essais variétaux/fumures
- **Moulin à meule en granit**
  → Farine blanche à haute teneur nutritionnelle mais moins productive et plus d'amidon endommagé
  → **Identification de variétés de froment plus adaptées** avec un grain plus tendre mais avec une haute aptitude à la panification
- **Moulin cylindres Chopin CD2 et son sasseur** → Semoule

Moulin 6 cylindres Buhler MLU202



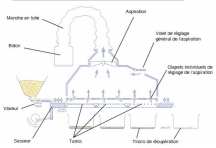


Moulin à meule en granit





Moulin cylindres Chopin CD2 et son sasseur





Analyse de malt d'orge brassicole

- **Méthodes d'analyse standard** malt venant du micro-maltage
  → Brassin conventionnel et Friabilimètre
- **Viscosité dynamique de son amidon** au RVA
  → Problème d'empesage de l'amidon
- **Identification et classement de variétés brassicoles** adaptées au pédoclimat wallon
- **Recherche sur le maltage nécessite micro-maltage**
  → Problématique de déclassement lié au gushing



Analyse de semoule de blé dur

- **Méthodologie intégrant la production de semoule**
  → Qualité protéine et amidon : Alvéographe et Mixolab+ Durum
- **Opportunité inédite pour la Wallonie**
- **Nécessaire pour identifier des variétés** permettant en Wallonie d'obtenir du **blé dur de qualité technologique élevée**



Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Plateformes post-récoltes : Tri modulable, Mouture et Analyse

Contact : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Tri physique, Tri optique, Mouture cylindre, Mouture meule, Analyse blé dur, Analyse orge brassicole

Objectifs

Pour permettre le développement de filières céréalières alimentaires avec une qualité technologique et sanitaire acceptable, il **est essentiel de développer des plateformes techniques post-récoltes disponibles pour répondre aux besoins expérimentaux de nos agriculteurs et nos transformateurs**. Pour ce faire, nous avons développé des plateformes de :

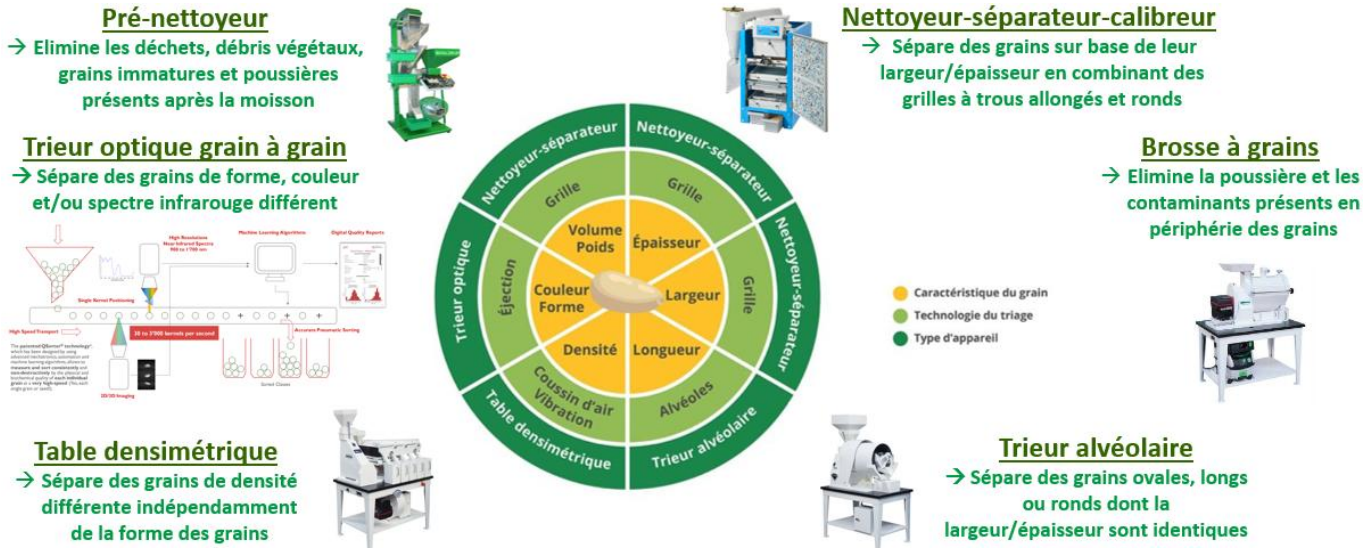
- **Trieurs physiques et optiques** (visible et infrarouge)
- **Mouture sur cylindre ou sur meule** pour la production de farine et semoule
- **Analyses de semoule** pour le blé dur
- **Analyses de malt** pour l'orge brassicole

Jusqu'à présent, ces outils n'étaient pas disponibles pour tous en Wallonie. Il est pourtant indispensable de disposer d'un **centre objectif et indépendant** permettant d'accompagner et de mettre en œuvre des essais expérimentaux pour et avec nos agriculteurs et nos transformateurs.

Plateforme de tri modulable

Le **tri est un levier post-récolte nécessaire pour amener un lot de grains aux objectifs de qualité** (normes ou engagement contractuel) visés. Les systèmes de tri se redéploient pour pallier aux problématiques de lutte contre les adventices et les maladies des grains. En agriculture à faible intrant et biologique, les leviers sont limités pour la gestion de ces problématiques. Le tri est **incontournable pour améliorer la qualité technologique et sanitaire afin d'éviter l'impact économique du déclassement d'un lot à cause d'une très petite quantité de grains fortement déviants.**

Le trieur parfait n'existe pas. Il faut donc **choisir une combinaison de trieurs et de réglages en fonction des défauts rencontrés dans le lot et de la qualité envisagée.** Le tri est appliqué pour atteindre différents objectifs de qualité qui sont : Qualité sanitaire, Production de semences, Séparer des cultures associées et Améliorer la qualité technologique. La plateforme de trieurs à l'échelle de plusieurs kg de grains mise en place est constituée des équipements suivants :



Cette plateforme de trieurs nous a permis d'étudier leur impact sur la qualité technologique et sanitaire du froment ainsi que de répondre à des problématiques spécifiques d'agriculteurs.

La technologie de **tri optique infrarouge au grain à grain permet un tri très spécifique**. Les freintes ou perte de grains de bonne qualité au tri est nettement moindre par rapport aux trieurs physiques. Il permet la **production de froments améliorants ou sur mesure** localement et en limitant le déclassement des lots. Cette technologie est d'autant plus **critique en agriculture à faible intrant et biologique** où la fréquence de déclassement de lots est

plus importante en raison des conditions environnementales moins favorables. Elle pourrait aussi apporter une nouvelle plus-value pour la **caractérisation approfondie de la qualité des lots en temps réel à haut débit**. Elle permet de fournir, au-delà de la valeur moyenne pour les paramètres mesurés, **la distribution de ces paramètres au sein d'un lot**. 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. Ce type de tri au grain à grain est également un **outil de phénotypage permettant de développer des nouvelles variétés de manière efficiente** car il est non-destructif, rapide, peu coûteux et se base sur le spectre proche infrarouge du grain.

D'autres leviers pré- et post-récolte que le tri devraient également être explorés pour diversifier les outils disponibles et garantir la qualité des céréales alimentaires. Des **traitements physico-chimiques en post-récolte** du grain ainsi que le suivi de la **qualité du grain juste avant et après la récolte à la ferme** pourraient être envisagés.

Plateforme de mouture sur cylindre et sur meule

Les propriétés technologiques des farines dépendent du type de mouture et du type de moulin. Il est nécessaire de disposer de différents types de moulins pilotes pour répondre aux besoins expérimentaux des acteurs céréaliers wallons. La **plateforme de mouture sur cylindre et meule a donc été conçue pour produire des lots de farine ou de semoule de plusieurs kg** adaptés aux essais pilotes de transformation ainsi que l'évaluation technologique d'essais de variétés et de fumures. Cette plateforme est notamment constituée de :

- **Moulin à cylindres Buhler MLU-202** - 3 passages sur cylindres cannelés et 3 sur cylindres lisses pour la production de lots pilotes et brosse à son pour l'estimation du rendement en farine.
- **Moulin à meule en granit** pour la production de lots pilotes
- **Moulin cylindres Chopin CD2 et son sasseur** pour la production de semoule

La mouture à meule de pierre permet de produire une farine blanche à haute teneur nutritionnelle mais elle est moins productive et endommage davantage l'amidon. La mouture sur cylindre, qui déroule le grain, est plus productive, génère moins de chaleur et produit une farine blanche aux meilleures propriétés rhéologiques mais de moindre qualité nutritionnelle et organoleptique. La **comparaison entre ces deux types de moutures** pour une grande diversité de variété de froment a permis **d'identifier des variétés** avec un grain plus tendre mais avec une haute aptitude à la panification qui sont **plus adaptées à la mouture sur meule**.

Le moulin Buhler MLU-202 permet d'obtenir une farine blanche avec des propriétés technologiques semblables à celles des meuneries belges. Elle a donc été utilisée pour produire de la farine blanche en quantité pour les essais de panification. Il serait d'ailleurs **essentiel de compléter l'évaluation de l'aptitude à la panification des essais variétaux et fumures par des essais de panification** pour des pains de type belge (norme NBN VF12-001). C'est désormais envisageable grâce à ce moulin. Ce type d'essais permettrait d'étudier les gains nutritifs apportés par les farines plus intégrales, l'ajout de protéagineuses, les moutures sur meule et les fermentations au levain.

Plateformes d'analyse de semoule de blé dur et de malt d'orge brassicole

Pour le développement de filières de céréales pastières ou brassicoles, il est incontournable de disposer d'un **laboratoire d'accompagnement neutre pour évaluer la qualité technologique de sa matière première et recommander des variétés adaptées à notre pédoclimat, nos modes de production et nos transformateurs**. Il est également essentiel de prévenir les pertes économiques liées aux déclassements inutiles de lots acceptables.

Pour le **blé dur**, une **méthodologie intégrant la production de semoule a été mise en place** afin d'être en mesure d'évaluer plus finement l'aptitude à la transformation du blé dur. Elle a pu être établie **grâce à notre moulin CD2 et son sasseur,** équipements indispensables pour déterminer la qualité technologique du blé dur mais ils sont pourtant rares, notamment en Europe. C'est une **opportunité inédite pour la Wallonie**. Elle a été appliquée dans le cadre du Projet Relocalisation alimentaire N°89 Blé dur et ses essais variétaux. Elle a permis **d'identifier des variétés permettant d'obtenir du blé dur de qualité élevée en Wallonie au nord du sillon Sambre-Meuse.**

Pour l'**orge brassicole**, les méthodes d'analyse standard ont été mises en place sur le malt issu des micro-maltages des essais variétaux wallons. Cette évaluation technologique est basée sur le **brassin conventionnel et la friabilité du malt.** Elle a permis **d'identifier des variétés brassicoles adaptées au pédoclimat wallon** et **de les classer en 3 catégories de qualité brassicole. L'analyse de la viscosité dynamique de son amidon au Rapid Visco Analyzer** (RVA) a été développée en plus afin de mieux appréhender les problèmes d'empesage de l'amidon du malt liés au changement climatique. Cette analyse permet aux brasseurs d'adapter leur palier de brassage pour atteindre les taux d'extraction de sucres attendus. Le **développement de la recherche sur le maltage** vise à adapter la qualité du malt aux attentes des transformateurs, notamment pour la **problématique très critique du gushing**.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

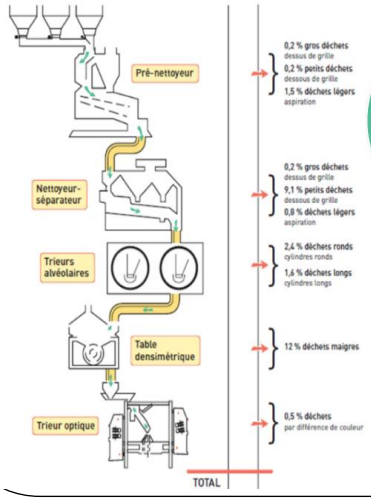
Le tri des grains : un levier technologique pour la valorisation boulangère des céréales wallonnes

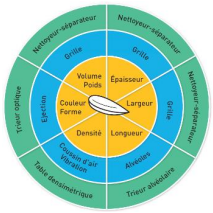
Contact : p.werrie@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

Le tri des grains, souvent considéré comme une simple étape de nettoyage, apparaît en réalité comme un véritable **outil de sélection fonctionnelle des grains**. Par ses différentes approches – mécaniques ou optiques ou combinées – il permet non seulement d'éliminer les impuretés et les grains non conformes, mais aussi **d'influencer directement des paramètres technologiques majeurs.** Ces derniers concernent aussi bien des critères basiques, tels que le poids spécifique, que des critères plus élaborés, comme le temps de chute de Hagberg ou la qualité panifiable. Évaluer l'impact des techniques de tri sur ces paramètres représente donc un enjeu scientifique et industriel essentiel.

➡️ **L'objectif : Identifier dans quelle mesure le tri peut être développé comme un levier stratégique pour améliorer la valeur technologique des lots.**

Campagne et modalités de tri





Trois campagne de tri :

1) Impact tri sur les paramètres de qualité basique et élaborée (lots récolte 2022)

2) Combinaison des leviers de post-récolte pour améliorer le temps de chute de Hagberg (prégermination physiologique lots récolte 2023)

3) Impact tri optique infrarouge grain à grain sur la qualité panifiable (lots récolte 2024)

Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)		
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥275 (≥250)	≥225 (≥200)	≥175 (≥150)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤1,5 (≤2,0)		
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥10	≥9	≥8
Zélény référence (ml)	≥40	≥35	≥30
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥12,0 BIO : ≥11,5	≥11,5 BIO : ≥11,0	≥11,0 BIO : ≥10,5
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥76,0 nettoyé (≥73,0 non-nettoyé)		

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.



Critère de qualité

Basique

Pré-nettoyeur (T1), **Trieur planaire** (TP), **Trieur alvéolaire** (TA) améliorent **poids de mille grains** et **poids à l'hectolitre**

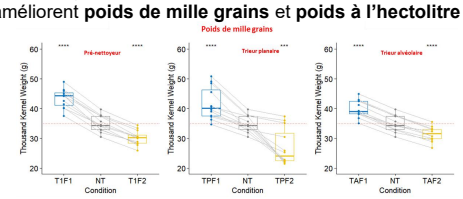
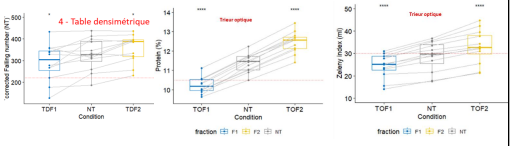
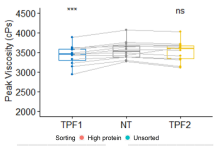


Table densimétrique (TD) améliore **Hagberg**
Tri optique (TO) améliore **teneur en protéines** et **Zélény**

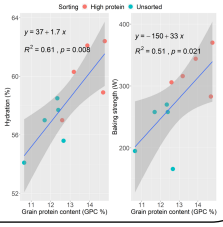


Elaboré

Trieur planaire
→ Impact les propriétés de **viscosité de l'amidon**

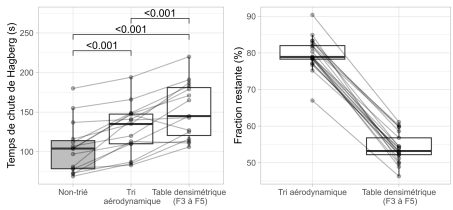


Tri optique infrarouge pour teneur en protéines
→Augmente **l'absorption d'eau** et la **force boulangère**

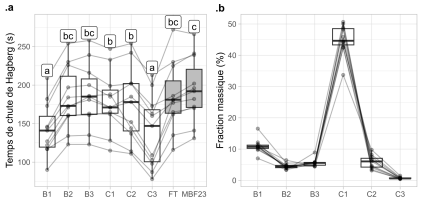


Prégermination

- **Tri aérodynamique + Tri Densimétrique** : Très utiles les années aux conditions de récolte défavorables



- Sélection des **flux de moutures**

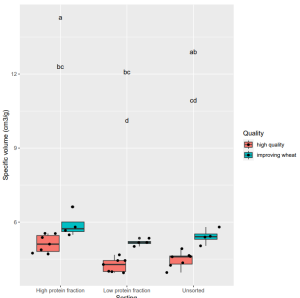


Bilan levier post-récolte pour améliorer le **Hagberg** :
- **Tri aérodynamique** (+/- 50 pts) freintes 20-25%
- **Tri densimétrique** (+/-25 pts) freintes 15-20%
- **Sélection flux de mouture** (+/-10 pts) freintes 10-15%

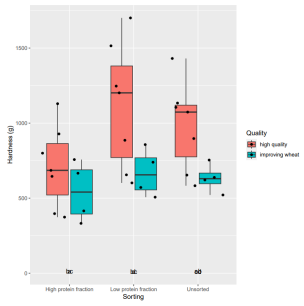
Freintes totales 38.5-48.25%

Panification

Tri optique infrarouge sur base de la **teneur en protéines** de variété panifiable et standard (33-66%).



Le tri augmente le **volume spécifique** et améliore la **texture (dureté).**



Le **tri optique infrarouge** sur base de la **teneur en protéines** est à recommander **uniquement** sur les **variétés panifiables** pour valoriser la fraction restante.

→ Les effets individuels distincts de chacun de ces **trieurs justifient leur intégration au sein de chaine de tri en fonction de la problématique** technologique rencontrées → Quel est son impact par rapport au choix variétal et la fumure azotée appliquée ?
→ Le tri est un outil stratégique pour la valorisation des céréales wallonnes **permettant d'optimiser les revenus agricoles**, de **sécuriser l'approvisionnement local** et de **répondre aux exigences croissantes des transformateurs**.
→L'intégration de technologies comme le **tri optique infrarouge grain à grain** ouvre la voie à une **meunerie plus durable, plus précise et plus résiliente**.
→Le **développement de modèles pour la prégermination physiologique** des grains devrait permettre le tri de ceux-ci sur base du trieur infrarouge afin de réduire les écarts de tri important afin de permettre la **valorisation même de lots de moissons difficiles**.

Gluten | Amidon | α-amylase



Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Le tri des grains : un levier technologique pour la valorisation boulangère des céréales wallonnes

Contact : p.werrie@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Trieur physique, Trieur optique infrarouge, Froment, Qualité technologique

Introduction

Le projet ValCerWal vise à améliorer la valorisation des céréales wallonnes, notamment le froment et l'épeautre, en **optimisant leur qualité technologique via le tri post-récolte**. Ce tri, loin d'être un simple nettoyage, constitue un levier stratégique influençant des paramètres clés pour la meunerie et la boulangerie.

En pratique

Trois campagnes de tri (2022, 2023, 2024) ont permis d'évaluer l'impact de différentes techniques sur des problématiques de qualité technologique :

- Lors de la première campagne de tri les différents trieurs de la chaine de tri – pré-nettoyeur, trieur planaire, trieur alvéolaire, table densimétrique et trieur optique infrarouge – ont été évalués pour **l'amélioration de critères de qualité technologique basiques** (poids de mille grains, poids à l'hectolitre, temps de chute de Hagberg, teneur en protéine et indice de sédimentation de Zélény) et **élaborés** (RVA, Mixolab+ et alvéographe de Chopin).
- Dû aux conditions de la campagne 2023, l'effet combiné du tri aérodynamique, densimétrique et de la sélection des flux de mouture a été évalué pour permettre la valorisation de lots à différent degrés de **prégermination physiologique**.
- Lors de la dernière campagne de tri l'impact du tri optique infrarouge grain à grain sur la **teneur en protéines** a été évalué sur les performances de panification de différents lots de qualité standard et panifiable.

Performances

Pré-nettoyeur, Trieur planaire, Trieur alvéolaire : Améliorent poids de mille grains et poids à l'hectolitre (Figure 1).
Table densimétrique : Efficace pour retirer les grains prégermés, améliorant le temps de chute de Hagberg.
Trieur optique infrarouge grain à grain (SK-NIR) : Permet une sélection fine selon l'apparence et la teneur en

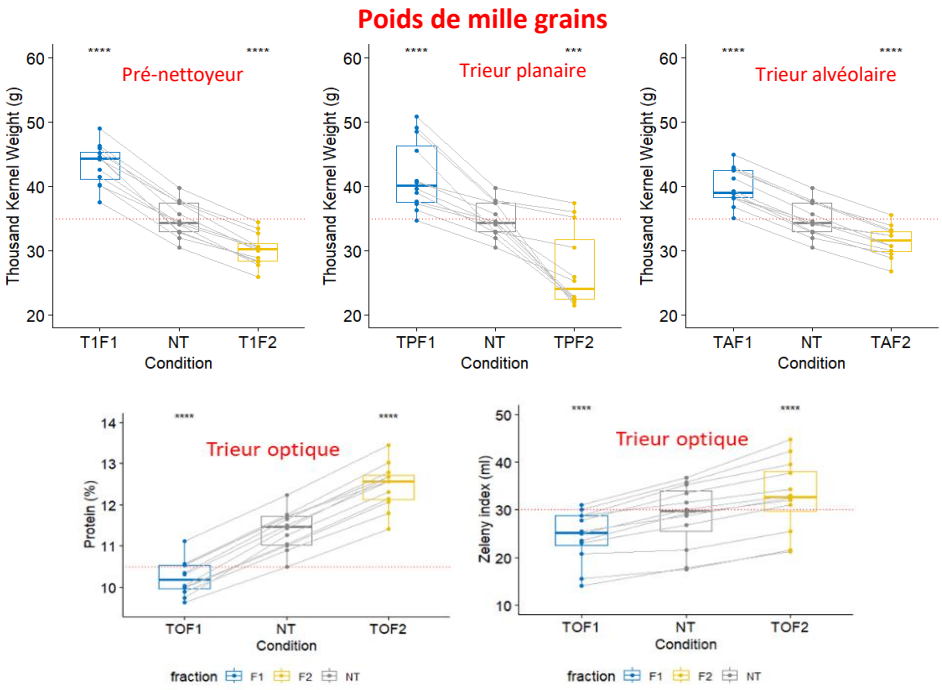


Figure 1 - Impact des techniques de tri sur le PMG, la teneur en protéines et le Zélény

protéines, influençant directement les critères de qualité basiques (Zélény) et élaborés (hydratation et force boulangère).

La **combinaison de trieurs** (aérodynamique + densimétrique + sélection des flux de mouture) permet **d'augmenter le temps de chute de Hagberg de manière notable**. Cette stratégie permet d'augmenter le Hagberg de 48 secondes en moyenne, tout en conservant 54 à 80 % de la masse initiale (Figure 2). Enfin une sélection des fractions de mouture a montré qu'il était possible de monter encore le temps de chute (+/- 12s) en retirant les fractions de têtes (broyage 1) et fin de moulin (convertissage 3) qui présente des fragments du germe (Figure 3). **La fraction B1 présentant le plus faible temps de chute de Hagberg**.

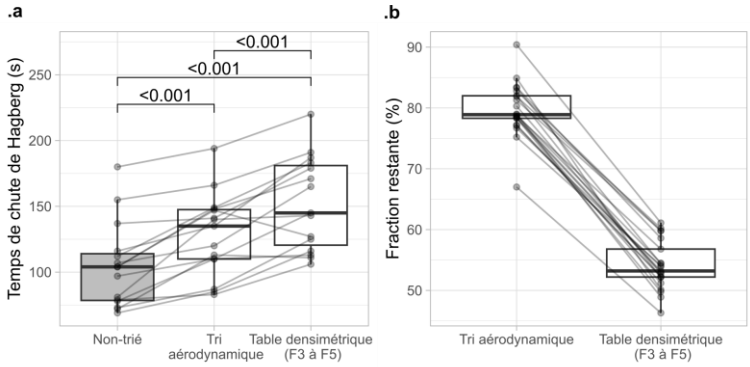


Figure 2 - Impact des techniques de tri aérodynamique et densimétrique sur le temps de chute de Hagberg.

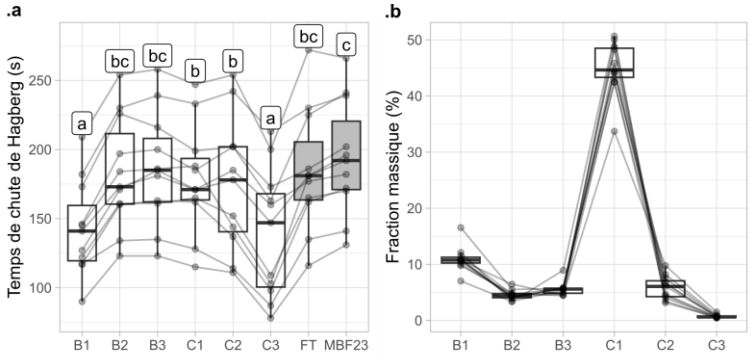


Figure 3 - Impact de la sélection des flux de moutures sur le temps de chute de Hagberg.

Le tri optique infrarouge améliore significativement la force boulangère, la texture du pain, et la résilience de la pâte, sans recours à des additifs.

Conclusion et perspectives

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 liées au gluten et au contenu en α-amylase seuls les trieurs aérodynamique, densimétrique et optique infrarouge** sont efficaces. En particulier, la table densimétrique semble la 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 α-amylase 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.

En perspective, le **développement de modèles pour le tri optique infrarouge sur la prégermination physiologique** des grains devrait de réduire les écarts de tri important afin de permettre la valorisation de lots issus de moissons difficiles.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Analyse économique – le tri, une activité rentable ?

Contact : a.beaugendre@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

En Wallonie, où les déclassements sont fréquents, le tri représente un levier stratégique potentiel pour améliorer la valorisation des céréales wallonnes en permettant de sauver des lots déclassés ou d'extraire des fractions premium à partir de lots panifiables. Mais pour envisager de développer cette nouvelle activité à grande échelle, elle doit être rentable.

🔍 Cette étude vise à évaluer la **viabilité économique** du tri en analysant : les **coûts** (machines, énergie, main-d'œuvre), les **gains** potentiels (valorisation des lots, extraction de fractions premium) et la **demande réelle** (basée sur la qualité des récoltes passées).

➡️ **L'objectif : déterminer si le tri peut devenir une activité économiquement durable, capable de renforcer la filière céréalière wallonne.**

Comparatif de rentabilité entre modalités de tri

Quatre modalités ont été évaluées :

TA (tri aérodynamique) :

✚ Faible coût, haut débit, améliore ~80% du lot → très rentable.

TA+TD (tri aérodynamique + table densimétrique) :

✚ Sauve des lots plus dégradés

▬ N'améliore que ~60% du lot et à un coût supérieur→ rentabilité modérée.

TO1 & TO2 (tri optique infrarouge grain à grain sur teneur en protéines, seuil de tri à 50% ou à 30%) :

✚ Permettent d'extraire des fractions à haute teneur en protéines. Gains inférieurs à TA/TA+TD

▬ Coûts élevés, rentables uniquement à grande échelle (organisme stockeur).

• TO2 plus avantageux que TO1 : meilleure valorisation de la fraction basse.

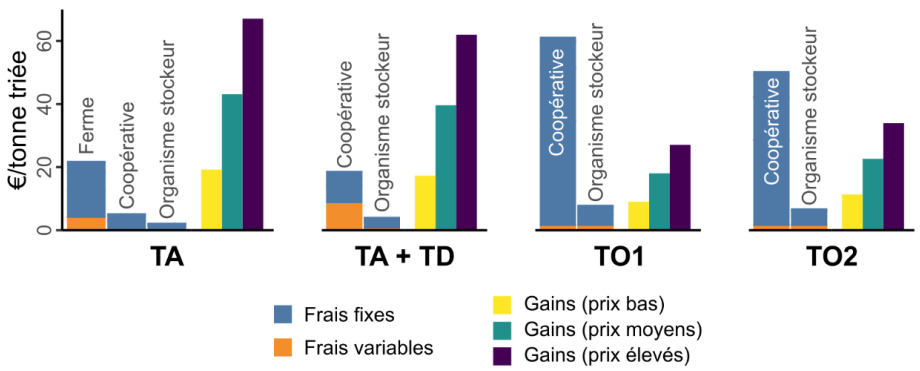


Figure 1 – Comparatif des coûts et gains estimés par tonne triée pour chacune des modalités de tri technologique étudiées. Les coûts sont déclinés par échelle (ferme, coopérative, organisme stockeur) et les gains sont déclinés selon plusieurs hypothèses de prix des céréales.

Quels effets de la variabilité annuelle de la qualité de la récolte ?

La **variabilité** annuelle de la qualité des récoltes influence directement le **besoin en tri technologique**, et donc la **rentabilité des équipements**.

- **TA / TA+TD** : très utiles les années aux conditions de récolte défavorables (≈ 1 année sur 2).
- **TO1 / TO2** : demandés les années à faible teneur en protéines, souvent opposées aux années à fort besoin en TA/TA+TD.
- Ces deux familles de tri sont **complémentaires** : à grande échelle (TO rentabilisable), leur combinaison permet à l'activité d'être rentable chaque année.

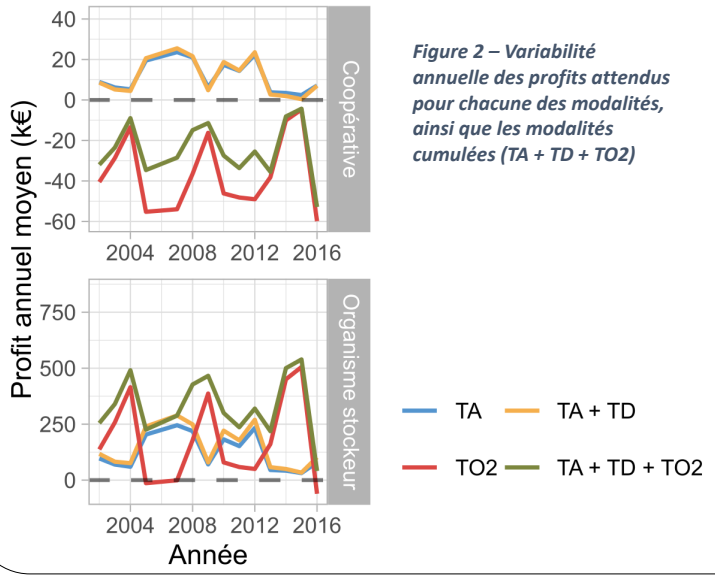


Figure 2 – Variabilité annuelle des profits attendus pour chacune des modalités, ainsi que les modalités cumulées (TA + TD + TO2)

Quel impact potentiel à l'échelle de la filière ?

Si le tri technologique était généralisé :

- Il pourrait concerner **27% des volumes récoltés**.
- La **part de céréales panifiables augmenterait de 15 points** (soit +35%).
- Le secteur de la transformation deviendrait **moins dépendant des importations**. Rapportée à la production wallonne, les **économies en frais de transports** liées à la réduction des importations sont estimées à **2€/tonne produite**.

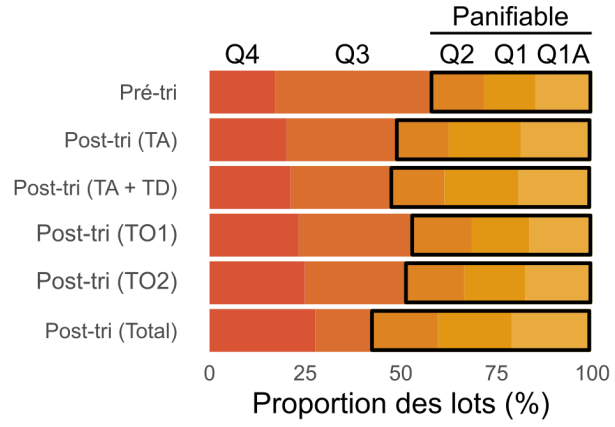


Figure 3 – Estimation de l'augmentation de la part de céréales panifiables dans un scénario de tri technologique généralisé

Le tri technologique présente un potentiel réel pour améliorer la valorisation des céréales en Wallonie. Il semble pouvoir être **rentable à l'échelle individuelle** (ferme, coopérative, organisme stockeur) et contribuer **significativement à l'augmentation de la part de céréales panifiables à l'échelle de la filière**. Toutefois, cette analyse reste prospective : elle ne prend pas en compte certains frais annexes ni les défis logistiques. Pour être pertinent, le tri doit probablement se développer dans une **logique de filière intégrée**. En particulier, un **partage des bénéfices issus de la valorisation des lots déclassés** grâce au tri paraît indispensable pour **encourager des choix variétaux adaptés aux besoins de transformation**, qui constituent une prise de risques pour les agriculteurs dans le contexte wallon.

La mise en place **d'expériences pilotes** nous semble être la voie privilégiée pour explorer ces aspects et valider nos résultats en conditions réelles.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Analyse économique – le tri technologique, une activité rentable ?

Contact : a.beaugendre@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Analyse économique, Analyse prospective, Rentabilité, Tri technologique

Introduction

De nombreux leviers sont à notre disposition pour améliorer la valorisation des céréales : le choix variétal, l'itinéraire technique, les conditions de récolte et de stockage sont autant d'éléments cruciaux à maîtriser. Le projet ValCerWal nous a permis **d'explorer le tri** – traditionnellement utilisé pour l'élimination d'impuretés ou la production de semences – **comme levier supplémentaire d'amélioration de la qualité technologique** ou sanitaire d'un lot. D'une part, le tri pourrait permettre de « sauver » des lots du déclassement lors d'années où les autres leviers n'auraient pas suffi à assurer une qualité satisfaisante. D'autre part, le tri optique infrarouge offre également l'opportunité d'extraire des lots premiums à partir de lots déjà panifiables, et ainsi d'augmenter la valeur totale d'un lot de départ. En Wallonie, où les déclassements fréquents sont l'un des facteurs responsables de la faible part de céréales panifiables dans la production céréalière, le tri « technologique » pourrait bien jouer un rôle majeur.

Cependant, le tri induit également des coûts : investissements, énergie, main d'œuvre… Or, pour être déployé à grande échelle, le tri technologique doit être rentable. Pour **évaluer le potentiel de déploiement de ces techniques innovantes, nous avons donc réalisé une analyse économique prospective** en estimant (i) les coûts du tri en nous appuyant sur les informations accessibles auprès des fournisseurs d'équipements; (ii) les gains attendus en nous appuyant sur l'évaluation en laboratoire des performances de 4 modalités de tri technologique ; (iii) la demande en tri technologique en nous appuyant sur des bases de données historiques de la qualité des récoltes wallonnes.

Comparatif de rentabilité entre modalités de tri

Quatre modalités de tri technologique ont été évaluées. Les deux premières visent à sauver des lots déclassés pour cause de faible poids spécifique et/ou temps de chute de Hagberg en éliminant les grains (pré)germés : il s'agit du **tri aérodynamique (TA)** ou du **tri aérodynamique suivi d'un tri à la table densimétrique (TA+TD)**. Les deux autres modalités visent à extraire une fraction « premium » depuis un lot panifiable en réalisant un tri sur la teneur en protéines à l'aide d'une technologie de **tri optique infrarouge grain à grain, l'une selon une répartition à 50% - 50% (TO1)** entre la fraction à haute et basse teneur en protéines, l'autre selon une **répartition à 30% - 70% (TO2)**.

La **modalité TA est de loin la plus rentable du point de vue des profits unitaires** (par tonne triée) : la part « améliorée » d'un lot y est élevée (+- 80%), ce qui génère des gains de valeur importants à moindre coût car les trieurs aérodynamiques sont relativement peu coûteux et opèrent à haut débit. La **modalité TA+TD est moins rentable du point de vue unitaire** – part améliorée plus faible (+- 60%), coûts supérieurs – **mais permet de sauver des lots plus sévèrement affectés** et peut ainsi s'appliquer à plus de lot, ce qui la rend plus rentable au total si les volumes récoltés sont élevés. Les modalités **TO1 et TO2, enfin, ne semblent rentables qu'à très grande échelle** : les prix des trieurs optiques infrarouges industriels sont actuellement très élevés et ne peuvent être rentabilisés que pour des volumes importants. A moins peut-être d'élargir leur utilisation à d'autres céréales ou graines, ce type d'équipement semble actuellement inaccessible à l'échelle « coopérative ». Dans ces conditions, la rentabilité unitaire est inférieure aux modalité TA et TA+TD, mais la rentabilité totale peut être bien supérieure car ce tri peut s'appliquer à une part importante des lots récoltés. La **modalité TO2 est plus rentable que TO1** car la fraction basse y est moins fréquemment déclassée, ce qui mène à des gains nets supérieurs en moyenne.

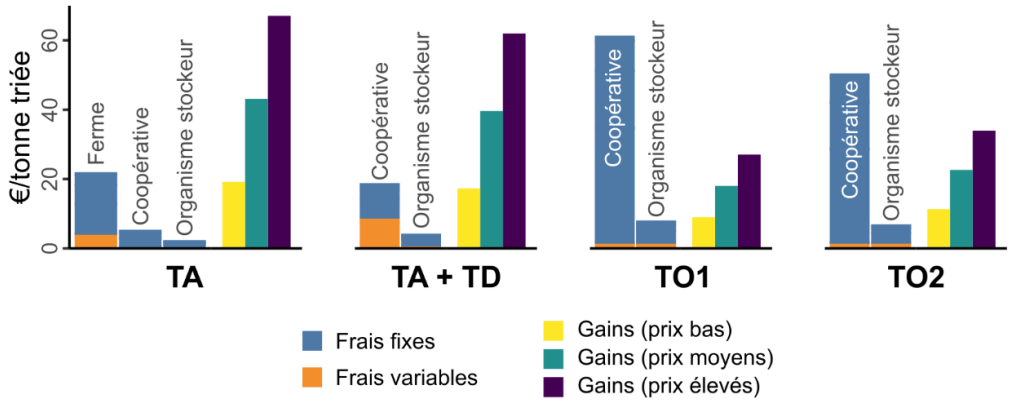


Figure 1 – Comparatif des coûts et gains estimés par tonne triée pour chacune des modalités de tri technologique étudiées. Les coûts sont déclinés par échelle (ferme, coopérative, organisme stockeur) et les gains sont déclinés selon plusieurs hypothèses de prix des céréales.

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

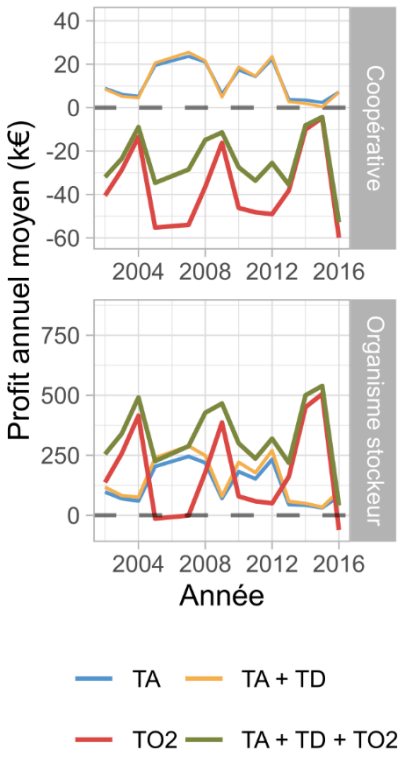


Figure 2 – Variabilité annuelle des profits attendus pour chacune des modalités, ainsi que les modalités cumulées (TA + TD + TO2)

Quels effets de la variabilité annuelle de la qualité de la récolte ?

La rentabilité du tri technologique dépend fortement du besoin en tri : l'acquisition de machines dédiées induit des frais fixes qu'il convient de rentabiliser. Selon les conditions annuelles, **la qualité des lots récoltés – et donc la part de lots « améliorables » par le tri – peut varier substantiellement d'une année à l'autre**. C'est particulièrement le cas pour les modalités TA et TA+TD : la demande pour ce type de tri n'est présente que lors d'années aux conditions de récoltes particulièrement défavorables. Pour la période 2002-2016 (pour laquelle nous disposons de données représentatives), cela représentait tout de même de l'ordre d'une année sur deux. La variabilité annuelle de la rentabilité estimée pour les modalités TO1 et TO2 s'inscrit en opposé à celle des modalités TA et TA+TD. En effet, le tri optique sur la teneur en protéines est inutile sur des lots déclassés pour cause de faible Hagberg, et est le plus demandé pour les années à moindre teneur en protéines – ce qui correspond aux années à faible besoin en TA et TA+TD. Ainsi, **les deux « familles » de tri technologique sont fortement complémentaires** et leur combinaison dans une même structure pourrait garantir une rentabilité de l'activité de tri technologique chaque année – à condition de se situer à une échelle où le tri optique peut être rentabilisé.

Quel impact potentiel à l'échelle de la filière ?

Nos résultats semblent indiquer, en première analyse, que le tri technologique pourrait être une activité rentable – et donc viable – à l'échelle de structures individuelles (ferme, coopérative, organisme stockeur…). Puisque notre travail s'inscrit dans une optique meilleure valorisation de la production wallonne et de relocalisation des filières alimentaires, il est pertinent d'évaluer l'impact potentiel de ces pratiques à l'échelle de la filière. (Attention : la base de données sur laquelle nous basons les estimations suivantes est représentative des lots réceptionnés en dépôts, ce qui exclut par exemple la production fourragère pour l'autoconsommation). S'il venait à être généralisé, nos estimations indiquent que **le tri technologique pourrait s'appliquer à 27% des volumes récoltés en moyenne** et **augmenter la part de lots panifiables de 15 points** (soit une augmentation de 35%), ce qui est très significatif. Cette augmentation du volume de froments panifiables locaux pourrait induire une retombée économique supplémentaire pour la filière : les **économies de transports**. En effet, les industries de transformation (meunerie et boulangerie notamment) importent la majeure partie de leur matière première. Nous estimons que les économies engendrées (de l'ordre de 14€/tonne dont l'importation est évitée), **rapportée à la production de froment Wallonne, pourraient être équivalentes à 2€ par tonne**.

Conclusions et perspectives

Nos résultats indiquent qu'il existe un réel potentiel derrière les techniques innovantes de tri technologique étudiées et développées dans le cadre du projet ValCerWal : le tri technologique pourrait être une activité rentable en Wallonie, et impacter très significativement la valorisation de la production céréalière Wallonne. Ces constats doivent cependant être nuancés et abordés avec un **recul critique.** D'une part, il s'agit à ce stade d'une **analyse prospective qui ne tient pas compte de certains frais annexes ou des défis logistiques sous-jacents**. D'autre part, il paraît crucial d'aborder l'éventuel développement du tri technologique dans une logique de filière intégrée : le **choix de variétés adaptées** à la transformation est l'une des conditions du succès du tri technologique. Or, ce choix **constitue une prise de risque pour les agriculteurs, qui ne sera pas encouragée si les profits issus du « sauvetage » de lots déclassés ne leurs reviennent pas en partie**. La mise en place d'expériences pilotes semble une voie appropriée d'explorer ces aspects et de valider nos résultats en conditions réelles.

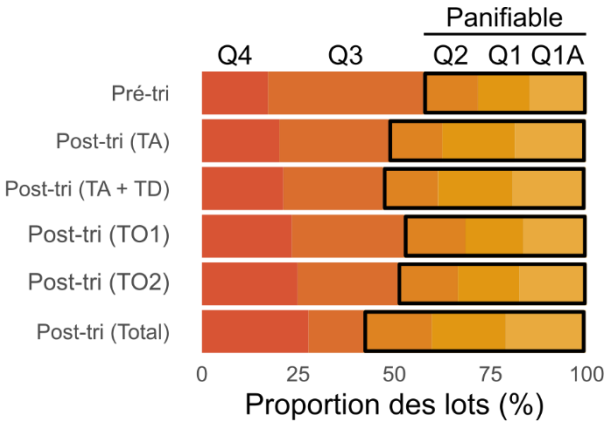


Figure 3 – Estimation de l'augmentation de la part de céréales panifiables dans un scénario de tri technologique généralisé

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation boulangère : Variété et Fumure

Contact : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

- **Froment n'est pas une commodité → Choix variétal conditionne principalement la qualité technologique**
- Faire correspondre variétés et fumures azotées aux attentes des transformateurs locaux

Evaluation de la qualité technologique sur farine blanche

- **Evaluer qualité technologique approfondie** des variétés de froment et d'épeautre des **d'essais variétaux** en Wallonie
- **Rechercher une protéine de qualité panifiable élevée** plutôt que d'en viser une quantité importante de faible qualité panifiable
- **Identifier des variétés robustes** tant au niveau agronomique que technologique du réseau variétal du Plan BIO2030
- **Etablir classements** de qualité technologiques de variétés **spécifiques à notre pédoclimat**, nos transformateurs et mode de production
- **Optimiser la fumure azotée et son fractionnement** par rapport à la qualité panifiable de la protéine

Rhéologique : Pétrissage
→ **Capacité d'hydratation**
→ **Développement et machinabilité**
- Mixolab+ (Dévelop. et stabilité gluten)
- Alvéographe (Force et nature du gluten)

Rhéologique : Fermentation et Cuisson
→ **Rétention du CO_2 de fermentation**
→ **Tenue à la cuisson**
- Alvéographe (Force et nature du gluten)
- Mixolab+ (Stabilité gluten / Texture amidon)

Fermentaire
Levée de la pâte
→ **Libération de sucres pour la production de CO_2 par les levures**
- Hagberg et Mixolab+

Qualité technologique = (1) VARIETE X (2) Fumure azotée X (3) Autres facteurs (année, climat, sol, précédent, semis,…)

Classements d'aptitude à la panification spécifiques

- Froment et Epeautre
- Conventionnel et Biologique

Q1A BIO Panifiable belge améliorant	Q1 BIO Panifiable belge premium	Q2 BIO Panifiable belge supérieur	Q3 BIO Autres usages Amidonnerie	Q4 BIO Basique
Adamus[A]	Alessio	Camillus*	Emotion	Chevignon
Arameus[A]	Christoph	Chaussy	Geny	Gergovie*
Arminius[A]	Montalbano	Cubitus	Glaz	Gwenn
Grannosos[A]	Moschus	KWS Emerick	KWS Eternel	RGT Farmeo
Tillexus[A]	Renan	SU Correction*	LD Cape	SU Ecusson[B]
Togano[A]	Wital	Wendelin	LG Keramik	Winner

* : données limitées / [A] : variété améliorante / [B] : variété biscuitière

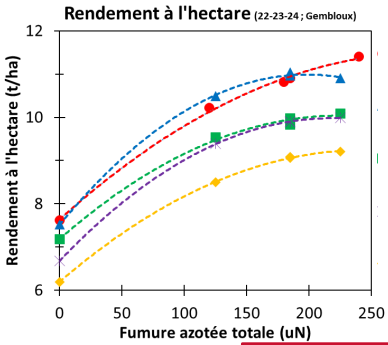
Valeurs pour les classes de qualité technologique

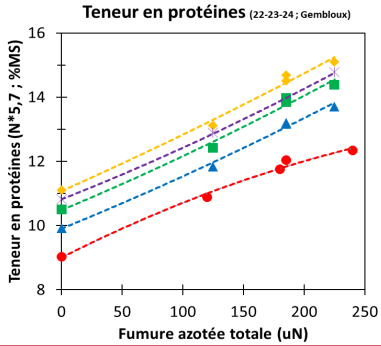
Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)		
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥275 (≥250)	≥225 (≥200)	≥175 (≥150)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤1,5 (≤2,0)		
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥10	≥9	≥8
Zélény référence (ml)	≥40	≥35	≥30
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥12,0 BIO : ≥11,5	≥11,5 BIO : ≥11,0	≥11,0 BIO : ≥10,5
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥76,0 nettoyé (≥73,0 non-nettoyé)		

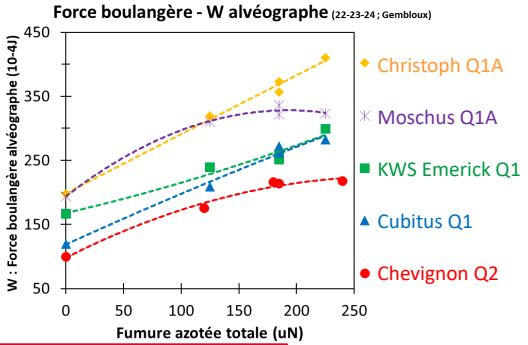
Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Fumure azotée et son fractionnement 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 2ième nœuds : 40 uN / Fraction dernière feuille : 60 uN
  Eviter trop azote tallage **Diminuer 2N selon objectif azote total** **Favoriser azote dernière feuille**







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

Perspectives

- **Evaluation technologique annuelle approfondie des variétés à maintenir de manière pérenne** car la durée de vie commerciale est courte ainsi que la disponibilité en semences est faible et variable en Belgique
- Evaluation technologique à **compléter par des essais de panification** (norme NBN VF12-001). Permettrait aussi d'étudier les gains nutritifs apportés par les farines plus intégrales, l'ajout de protéagineuses, les moutures sur meule et les fermentations au levain
- **Développer blé biscuitier et brassicole** en identifiant des variétés pertinentes car adaptées à notre pédoclimat et nos transformateurs

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation boulangère : Variété et Fumure

Contacts : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Froment, Epeautre, Variété, Fumure azotée, Qualité technologique, Panifiable

Introduction

Les variétés cultivées sont choisies en Wallonie avant tout au regard de leur rendement en grains, au détriment des variétés adaptées à la meunerie et aux transformateurs locaux ayant des protéines de qualité panifiable et des teneurs en protéines acceptables. Le froment n'est pas une commodité. Il y a des variétés avec des qualités technologiques très différentes destinées à des usages diamétralement opposés. Il n'existe pas de bons grains de qualité technologique standard, tout est relatif. Pour améliorer la valorisation des céréales wallonnes, il faut **faire correspondre les variétés et fumures azotées aux attentes en qualité technologique des transformateurs locaux tout en permettant leur culture de manière plus durable**.

Objectifs

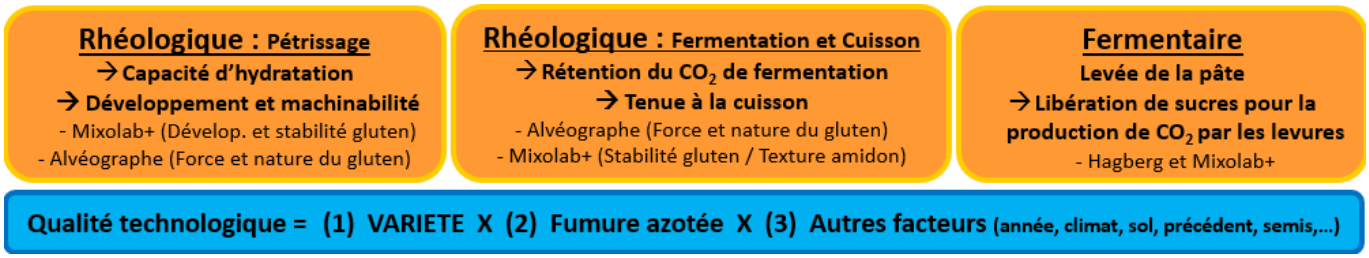
Pour faire correspondre les variétés de froment et d'épeautre aux besoins de nos transformateurs, il est nécessaire **d'évaluer la qualité technologique des variétés de manière approfondie à l'aide d'essais variétaux existants en Wallonie et d'établir des classements de celles-ci**.

Au niveau agronomique, il est essentiel que les variétés soient adaptées à notre pédoclimat ainsi qu'à une culture avec moins d'intrants. Pour ce faire, l'évaluation technologique élaborée a également été appliquée au réseau variétal du Plan BIO2030 pour **identifier des variétés robustes tant au niveau agronomique que technologique.**

La quantité et le fractionnement de la fumure azotée est optimisée en Wallonie au regard uniquement du rendement en grains. Une analyse approfondie de la qualité technologique a été réalisée pour les essais en fumure azotée existants pour des variétés de froment panifiable afin d'**optimiser la fumure azotée et son fractionnement par rapport à la qualité panifiable de la protéine.**

Evaluation de la qualité technologique sur farine blanche

Nous avons approfondi **une méthodologie intégrant la production de farine blanche afin d'évaluer plus finement l'aptitude à la panification du froment et de l'épeautre** focalisée sur la qualité panifiable de la protéine et de l'amidon.



Cette approche permet de **se focaliser sur la qualité des constituants chimiques notamment en recherchant une protéine de qualité panifiable élevée plutôt que d'en viser une quantité importante de faible qualité panifiable.** Elle a été appliquée aux récoltes de 2021 à 2024.

L'évaluation technologique approfondie appliquée aux différents essais variétaux en froment et en épeautre a permis **d'identifier des variétés pertinentes de haute qualité panifiable et d'établir leur profil global de qualité technologique lorsqu'elles sont cultivées en Wallonie** malgré les conditions climatiques difficiles de 2021, 2023 et 2024. **Le choix de la variété détermine majoritairement la qualité technologique.** Les caractéristiques technologiques les plus robustes à l'effet de l'année et donc celles qui sont le plus définies par la variété sont la force du gluten et sa nature suivie par la nature de l'amidon et ses propriétés rhéologiques.

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Classes et valeurs de qualité technologique pour la panification

Les analyses technologiques ont permis de **regrouper les variétés par catégories de qualité panifiable distincte spécifiques à notre pédoclimat et nos transformateurs en fonction du mode de production (conventionnel et biologique). C'est un point critique** car la qualité technologique d'une variété est spécifique au pédoclimat d'une région donnée et du mode de production ainsi que des attentes en termes de qualité des transformateurs locaux.

Les **catégories établies d'aptitude à la panification belge du froment** en mono-variété pur et sans additifs sont : Q1A, Froment panifiable premium améliorant belge ; Q1, Froment panifiable premium belge ; Q2, Froment panifiable supérieur belge (et amidonnerie exigeante) ; Q3, Froment amidonnerie belge (blé standard belge) ; Q4, Froment basique belge (blé standard belge).

Les **catégories pour l'aptitude à la panification standard de l'épeautre** distinguent les variétés panifiables en pur Q1e de celles panifiables avec des proportions grandissantes de froment panifiable Q1 : Q2e avec 30-50% de froment Q1 ; Q3e avec 50-70% de froment Q1 ; Q4e avec 70-90% de froment Q1. Une alternative à l'ajout de froment Q1 pour la panification de ces 3 qualités est une panification très artisanale (pétrissage moins énergétique, levée plus longue et/ou utilisation de levain).

Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)		
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥275 (≥250)	≥225 (≥200)	≥175 (≥150)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤1,5 (≤2,0)		
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥10	≥9	≥8
Zélény référence (ml)	≥40	≥35	≥30
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥12,0 BIO : ≥11,5	≥11,5 BIO : ≥11,0	≥11,0 BIO : ≥10,5
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥76,0 nettoyé (≥73,0 non-nettoyé)		

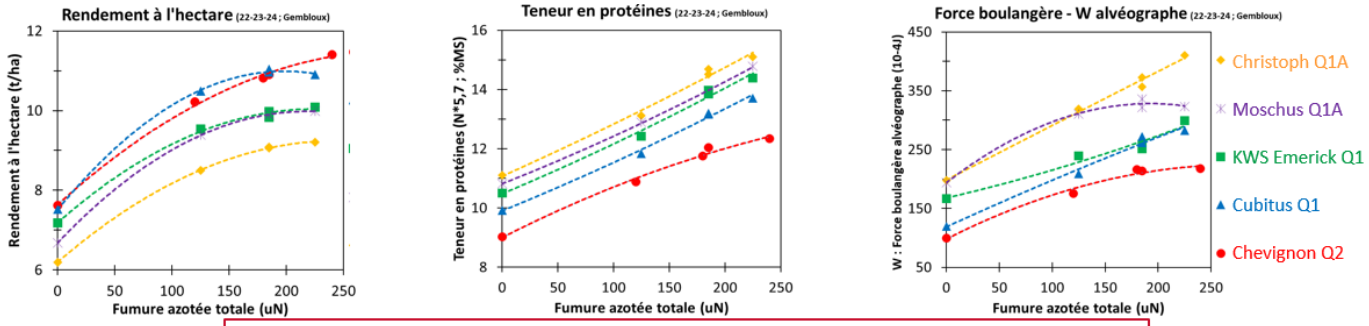
Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Qualité panifiable belge de l'épeautre	Panifiable en pur 100% Epeautre	Panifiable en mélange 1/3 Epeautre 2/3 Froment Q1
Variété	Q1e	Q2e et Q3e
Humidité des grains nus (%)	≤14,5 (≤15,5)	
Hagberg mouture intégrale (s)	≥220 (≥180)	
Alvéographe Chopin : W Force boulangère (10-4 J)	≥125 (≥100)	≥100 (≥75)
Alvéographe Chopin : P/L Rapport Ténacité/Extensibilité	≤0,5 (≤1,0)	
Stabilité du gluten au Mixolab+ (min)	≥8	≥7
Zélény référence (ml)	≥25	≥20
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥13,0 BIO : ≥12,5	≥12,5 BIO : ≥12,0

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Fumure azotée et son fractionnement pour une utilisation en meunerie-boulangerie

La **fumure azotée et son fractionnement pour les froments panifiables est à optimiser différemment pour une utilisation en meunerie-boulangerie**. Une fumure azotée de 220uN en 4 fractions (tallage 40uN + redressement 80uN + 2ième nœuds 40uN + dernière feuille 60uN) est recommandée pour d'obtenir les forces de gluten les plus élevées. La fraction 2ième nœuds est à adapter en fonction de son objectif de fumure azotée totale sans perdre trop de qualité panifiable. L'augmentation de la fumure azotée accroit la teneur en protéines et l'extensibilité du gluten ainsi que la force du gluten. Certaines variétés plafonnent en force de gluten au-delà d'une fumure azotée de 180uN.



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

Conclusion et perspectives

Pour faire correspondre les variétés aux besoins des transformateurs, une **évaluation technologique annuelle approfondie des variétés de froment panifiable et épeautre** cultivées en Wallonie spécifique à l'agriculture conventionnelle et biologique doit être maintenue de manière pérenne car la **durée de vie commerciale des variétés est courte et la disponibilité en semences est faible et variable en Belgique.**

Pour évaluer l'aptitude à la panification, il serait essentiel de la **compléter par des essais de panification pour des pains de type belge** (norme NBN VF12-001). Ce type d'essais permettrait également d'étudier les gains nutritifs apportés par les farines plus intégrales, l'ajout de protéagineuses, les moutures sur meule et les fermentations au levain.

Le **développement de filières de blé biscuitier et brassicole en cherchant des variétés adaptées à notre pédoclimat et nos transformateurs** permettrait d'accroitre la production de céréales alimentaires en Wallonie tout en prenant moins de risques de déclassement.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation brassicole de l'orge

Contact : p.werrie@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

- **Orge n'est pas une commodité → Choix variétal conditionne principalement la qualité technologique**
- Faire correspondre variétés et fumures azotées aux attentes des transformateurs locaux

Evaluation de la qualité technologique

- **Evaluer qualité technologique approfondie** des variétés d'orge brassicole de printemps et d'hiver **d'essais variétaux** en Wallonie
- **Rechercher une orge de qualité brassicole élevée** plutôt que d'en viser une quantité importante de faible qualité brassicole
- **Identifier des variétés robustes** tant au niveau agronomique que technologique
- **Etablir classements** de qualité technologiques de variétés **spécifiques à notre pédoclimat**, nos transformateurs et mode de production

Orge

Fonction Germination
→ **Production d'enzymes**
→ **Désagrégation homogène et rapide**
Evaluée par :
- Pouvoir germinatif
- Calibre
- Teneur en protéines
- Pureté variétale



Malt

Fonction Extrait
→ **Sucres disponibles à la transformation en alcool**
Evaluée par :
- Extrait sec
- Teneur en protéines et Calibre

Fonction Fermentabilité
→ **Sucres fermentescibles**
Evaluée par :
- Atténuation limite

Fonction Amylolyse
→ **Vitesse pour libérer les sucres de l'amidon**
Evaluée par :
- Activité α- et β-amylases, Pouvoir diastasique

Fonction Protéolyse
→ **Nutrition de la levure**
→ **Tenue de la mousse**
Evaluée par :
- Azote aminé libre, Protéines solubles et KI

Fonction Filtrabilité
→ **Vitesse de filtration du mout**
Evaluée par :
- Viscosité et β-glucane
- Friabilité

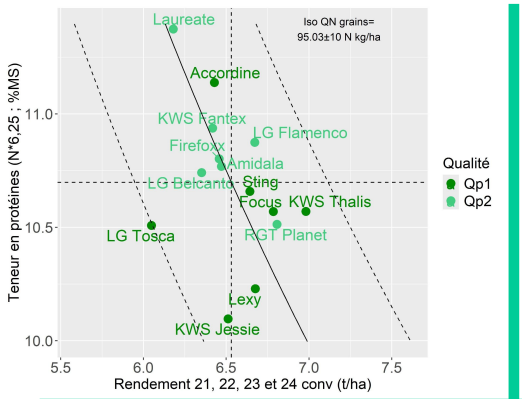
Qualité technologique = (1) VARIETE X (2) Fumure azotée X (3) Autres facteurs (année, climat, sol, précédent, semis,...)

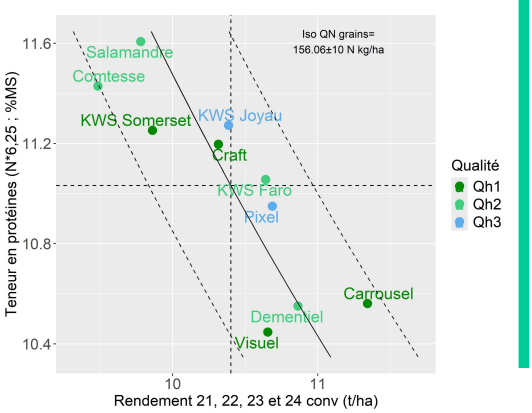
Qualité technologique des orges

Paramètres à respecter	Seuil strict (Industriel)	Seuil souple (Artisanal)
Humidité (g/100g)	≤ 14.0	≤ 14.5
Calibre ≥ 2,5 mm (g/100g)	≥ 90	≥ 85
Calibre ≤ 2,2 mm et grains d'orge cassés (g/100g)	≤ 3	≤ 3
Grains germés, endommagés, verts et d'autres céréales (g/100g)	≤ 2	≤ 2
Matières étrangères, grains malsains, graines non-céréales comme les oléagineuses (g/100g)	≤ 0.5	≤ 0.5
Pureté variétale (%)	≥ 93	≥ 90
Germination à 3 jours sur grains entiers ≥ 2.2 mm (%)	≥ 97	≥ 92
Protéines sur grains ≥ 2.2 mm (g/100g) * Gamme pour les appareils de mesure infrarouge de dépôt	9.5-11.5 *(9.0-12.0)	9.0-12.0 *(8.5-12.5)
Mycotoxine DON sur grains ≥ 2.2 mm (µg/kg)	< 1000	< 1000
Hagberg sur grains ≥ 2.2 mm (s)	≥ 150	≥ 120

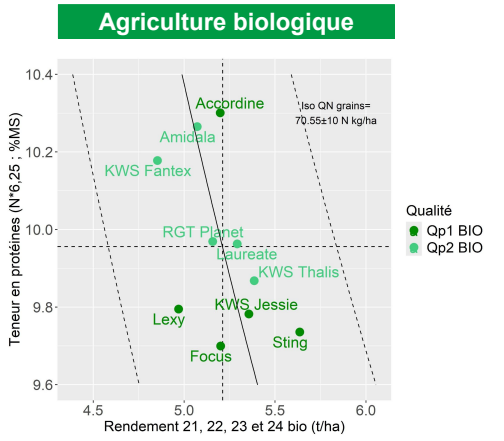
Classements d'aptitude brassicole spécifiques

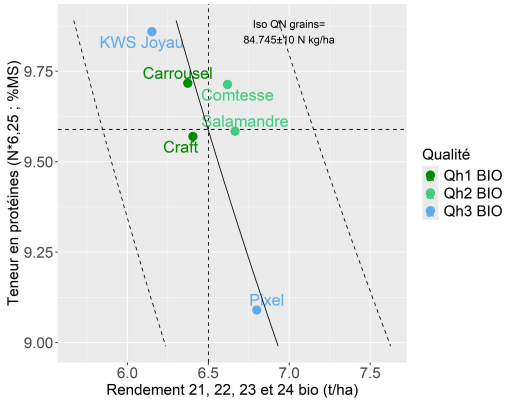
Agriculture conventionnelle





Agriculture biologique





Perspectives

- **Evaluation technologique annuelle approfondie des variétés à maintenir de manière pérenne** car la durée de vie commerciale est courte ainsi que la disponibilité en semences est faible et variable en Belgique
- Evaluation technologique à **compléter par des essais de maltage et de brassage pilote**
- **Recherche sur le maltage nécessite micro-maltage** → Problématique de déclassement lié au gushing
- **Développement de filières** en identifiant des variétés pertinentes car adaptées à notre pédoclimat et nos transformateurs

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePiCOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Avec le soutien de la Wallonie Relance
Projet N°204/2
Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation de l'orge brassicole

Contacts : p.werrie@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

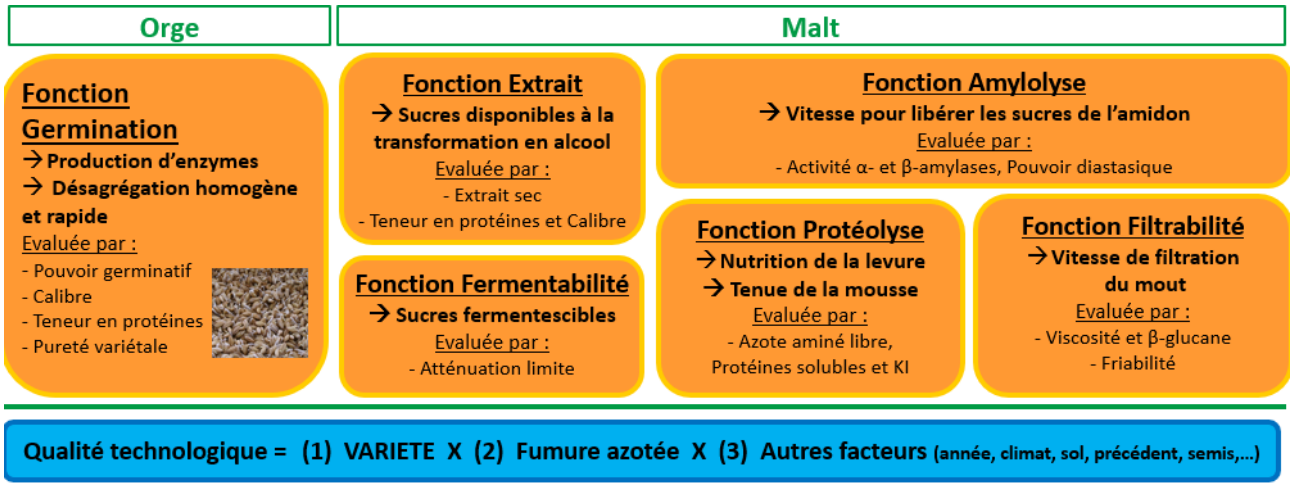
Mots-clefs : Orge brassicole, Malt, Qualité technologique

Introduction

L'orge brassicole, céréale de base dans la filière de la bière, présente aujourd'hui un potentiel accru d'implantation dans notre région et pour la diversification des cultures. En redéveloppant cette culture localement, il est possible non seulement de répondre à la demande croissante en matières premières de qualité pour la brasserie, mais aussi de recréer une filière à forte valeur ajoutée. Cette opportunité représente un levier intéressant pour renforcer l'autonomie de la production, soutenir le revenu des agriculteurs et valoriser un savoir-faire régional reconnu à l'échelle internationale.

Méthodologie d'évaluation technologique mise en place

Le redéploiement local d'une telle filière nécessite de disposer pour son encadrement d'un **laboratoire objectif et indépendant pour évaluer la qualité technologique des variétés d'orge brassicole et du malt qui en est issu.** Nous avons **mis en place une méthodologie intégrant la production de malt afin d'évaluer plus finement l'aptitude à la transformation brassicole des variétés d'orge brassicole mises en essais.** Elle a permis **d'identifier des variétés brassicoles adaptées au pédoclimat wallon** et **de les classer en 3 catégories de qualité brassicole**



Il ressort que le micro-maltage et l'analyse par brassin conventionnel de l'extrait, la viscosité, l'indice de Kolbach, la friabilité et la teneur en β-glucane du mout peuvent être utilisés comme variables de screening lors de l'évaluation de variétés. Les conditions de micro-maltage sont sous-optimale pour faire ressortir les différences variétales. **L'analyse de la viscosité dynamique de son amidon au Rapid Visco Analyzer** (RVA) a été développée en plus afin de mieux appréhender les problèmes d'empesage de l'amidon du malt liés au changement climatique. Cette analyse permet aux brasseurs d'adapter leur palier de brassage pour atteindre les taux d'extraction de sucres attendus. Pour une évaluation technologique plus complète de l'orge brassicole, il serait essentiel de la **compléter par l'analyse de la qualité de brassins pilotes.** Le **développement de la recherche sur le maltage** serait également nécessaire pour mieux gérer la **problématique très critique du gushing**, responsable de déclassement de nombreux lots.

Identification de variétés à recommander

L'utilisation de cette méthodologie permet de distinguer plus finement la qualité technologique des variétés d'orge brassicole d'hiver et de printemps en agriculture conventionnelle et biologique. Elle a permis **d'identifier des variétés permettant, en Wallonie au nord du sillon Sambre-Meuse, d'obtenir une qualité technologique élevée en agriculture conventionnelle et acceptable en agriculture biologique** malgré des conditions climatiques très variables de l'année 2021 à 2024.

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Pour faire correspondre les variétés aux besoins des transformateurs, une **évaluation technologique annuelle des variétés d'orge brassicole** cultivées en Wallonie spécifique à l'agriculture conventionnelle et biologique doit être maintenue de manière pérenne car la **durée de vie commerciale des variétés est courte et la disponibilité en semences est faible et variable.**

Classes et valeurs pour la qualité technologique pour l'orge

Des critères et valeurs objectives de qualité technologique adaptées au pédoclimat belge pour la transformation de l'orge brassicole ont été définis sur base de la littérature scientifique et des analyses technologiques des orges brassicoles d'hiver et de printemps des récoltes 2021 à 2024. Ces critères permettent de **prévenir les pertes économiques liées aux déclassements inutiles de lots acceptables**.

Paramètres à respecter pour l'orge brassicole	Seuil strict (Industriel)	Seuil souple (Artisanal)
Humidité (g/100g)	≤ 14.0	≤ 14.5
Calibre ≥ 2,5 mm (g/100g)	≥ 90	≥ 85
Calibre ≤ 2,2 mm et grains d'orge cassés (g/100g)	≤ 3	≤ 3
Grains germés, endommagés, verts et d'autres céréales (g/100g)	≤ 2	≤ 2
Matières étrangères, grains malsains, graines non-céréales comme les oléagineuses **(g/100g)**	≤ 0.5	≤ 0.5
Pureté variétale (%)	≥ 93	≥ 90
Germination à 3 jours sur grains entiers ≥ 2.2 mm **(%)**	≥ 97	≥ 92
Protéines sur grains ≥ 2.2 mm **(g/100g)**	9.5-11.5	9.0-12.0
*** Gamme pour les appareils de mesure infrarouge de dépôt**	*(9.0-12.0)	*(8.5-12.5)
Mycotoxine DON sur grains ≥ 2.2 mm **(µg/kg)**	< 1000	< 1000
Hagberg sur grains ≥ 2.2 mm **(s)**	≥ 150	≥ 120

Les exigences élevées des malteries en termes de qualité technologique peuvent aussi résider dans le fait d'intégrer l'incertitude de mesure à leur avantage sans prise de risques analytiques. Par exemple, avec une incertitude de mesure de l'analyse de la teneur en protéines par infrarouge de 0,25%MS pour une valeur de teneur en protéines de 12,0%MS, cela donne une incertitude de mesure élargie (à 95%) de 12,0%±0,5%MS. Les malteries fixent donc le critère pour la teneur en protéines à un maximum de 11,5%MS sans prendre de risques.

Application : Etude inter-laboratoire

La participation à l'étude inter-laboratoire menée par l'institut français de brasserie et de malterie (IFBM) a permis d'évaluer la justesse de la mise en place des analyses suivantes (n=11) :

Humidité (EBC 4.2, %), Extrait fine mouture (EBC 4.5.1,% AS IS), Couleur spectrophotométrique (EBC 4.7.1, EBC UNITS), pH du Moût (EBC 4.18/8.17), Protéines totales (EBC 4.3.2, %), Protéines solubles (EBC 4.9.3, %), Viscosité du moût (EBC 4.8, mPa.s), Friabilité (EBC 4.15, %), Grains incomplètement désagrégés (EBC 4.15, %), Grains entiers (EBC 4.15, %), Fermentabilité (EBC 4.11.1, %).

Les Z-scores moyens pour chacun des 36 échantillons de la récolte 2022, 2023 et 2024 sont situés entre -2 et 2 hormis pour l'extrait. Cela garantit que nos résultats sont comparables aux autres laboratoires pour ces méthodes.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation du blé dur

Contacts : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

- Changement climatique est une opportunité pour étudier le développement de nouvelles cultures en Wallonie
- Blé dur est un marché conséquent
- **Disposer d'une évaluation objective et indépendante de la qualité technologique du blé dur et de sa semoule locale**

Méthodologie d'évaluation technologique mise en place



Teneur en protéines

Semoulier - Technologie
Rendement semoulier :
Evalué par :
- Dureté du grain
- Vitrosité/Mitadinage
- Taille du grain / Poids à l'hectolitre
- Granulométrie semoule
- Teneur en cendres

Pastier - Technologie
Tenue à la cuisson et Machinabilité
Evaluée par :
- Ténacité du gluten
→ P alvéographe Durum
(Indice de sédimentation SDS)
- Texturation amidon → Mixolab Chopin+
- Granulométrie semoule

Aspect
Couleur Semoule et Pâtes
Evalué par :
- Indice de jaune (b*)
- Indice de brun (a*)
- Granulométrie semoule
- Grains germés (Hagberg)

Qualité technologique = (1) VARIETE X (2) Fumure azotée X (3) Autres facteurs (année, climat, sol, précédent, semis, moisson)

- **Evaluation technologique à compléter par l'analyse de la qualité des pâtes après extrusion**

Valeurs pour les classes de qualité technologique

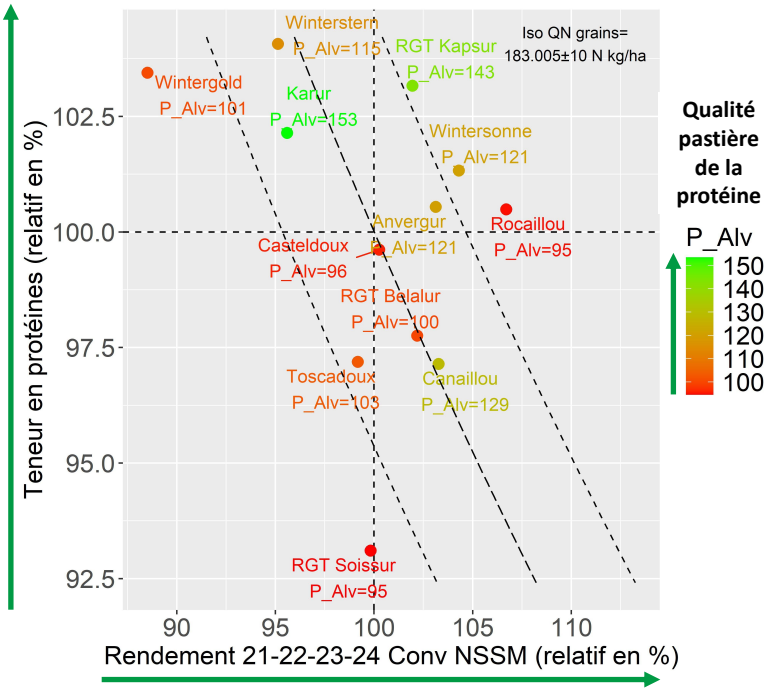
Qualité pastière belge du blé dur	Elite	Premium	Supérieure
Variété	« Pastière élite »	« Pastière premium »	« Semoulerie supérieure »
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥150 (≥120)		
Alvéographe Durum : P Ténacité du gluten (mm H2O)	≥105 BIO : ≥95	≥85 BIO : ≥75	/
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥13,0 BIO : ≥12,0	≥13,0 BIO : ≥12,0	≥11,5 BIO : ≥11,0
Couleur jaune (b*) sur semoule	≥22 (≥17 en mouture intégrale)		
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥77,0 nettoyé (≥74,0 non-nettoyé) ou poids de mille grains (g) ≥45,0		
Mitadinage par infrarouge (%)	≤40% BIO : ≤60%		

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

- Si taux de mitadinage >40% alors seulement lien entre mitadinage et rendement en semoule totale
- Si poids à l'hectolitre <77 kg/hl alors seulement lien entre poids à l'hectolitre et rendement en semoule totale
- **Prévenir les pertes économiques liées aux déclassements inutiles de lots acceptables**

Identification de variétés à recommander

Compromis entre rendement à l'hectare-protéines-qualité



- **Variétés cultivées en Wallonie nord sillon Sambre-Meuse (NSSM) adaptées en qualité technologique** tant en agriculture conventionnelle que biologique
- **Eviter certaines variétés trop précoces** présentent de la prégermination physiologique inhabituelle «pre-maturity sprouting»
- **Evaluation technologique annuelle des variétés à maintenir** de manière pérenne car la durée de vie commerciale courte ainsi que la disponibilité en semences est faible et variable

Mesure de la vitrosité par le taux de mitadinage

- **Critère que d'importance secondaire**
- **Mesure non-reproductible d'un acteur à l'autre** car méthode visuelle réalisée par un humain et sur très peu de grains
- **A remplacer** par sa mesure sur plus de grains, par infrarouge et en utilisant une équation commune

Tri optique infrarouge au grain à grain

- **Outil de phénotypage** pour le développement de nouvelles variétés en sélectionnant de manière non-destructive, rapide et peu couteuse les grains

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Qualité technologique pour une valorisation du blé dur

Contacts : b.godin@cra.wallonie.be, p.werrie@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Blé dur, Qualité technologique, Semoule, Pâtes, Mitadinage, Infrarouge, Phénotypage

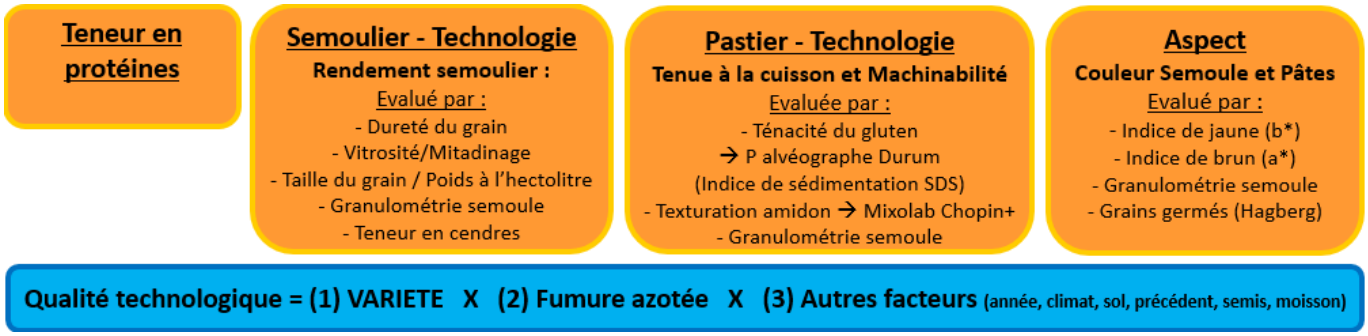
Introduction

Le changement climatique est une opportunité pour le développement de nouvelles cultures en Wallonie inadaptées auparavant à nos conditions climatiques. Le blé dur est une céréale largement utilisée qui pourrait désormais avoir le potentiel de s'implanter chez nous permettant de diversifier les revenus des agriculteurs et d'augmenter notre production de céréales alimentaires à plus haute valeur ajoutée.

Méthodologie d'évaluation technologique mise en place

L'implantation locale d'une telle filière nécessite de disposer pour son encadrement d'un **laboratoire objectif et indépendant pour évaluer la qualité technologique du blé dur produit et de la semoule qui en est issue**. Ce point est d'autant plus critique pour le blé dur vu qu'il n'existe pas d'autres valorisations que sa consommation en alimentation humaine, rendant le déclassement d'un lot particulièrement critique, et que le nombre de laboratoires objectifs et indépendants en mesure de produire de la semoule de blé dur et de réaliser cette évaluation en Europe est extrêmement faible.

Nous avons **mis en place une méthodologie intégrant la production de semoule afin d'évaluer plus finement l'aptitude à la transformation du blé dur en pâte.**



Il ressort que l'indice de sédimentation SDS (Redman) pour évaluer la qualité du gluten ne semble pas intéressant pour le blé dur sauf pour le développement de nouvelles variétés par un sélectionneur. L'indice de couleur jaune (b*) de la mouture intégrale est suffisamment corrélé à celui de sa semoule correspondante pour pouvoir être utilisé comme variable de screening lors du développement de variétés.

Pour l'évaluation technologique du blé dur, il serait essentiel de la **compléter par l'analyse de la qualité des pâtes après extrusion**.

Identification de variétés à recommander

L'utilisation de cette méthodologie permet de distinguer plus finement la qualité technologique des variétés de blé dur. Elle a été appliquée dans le cadre du Projet Relocalisation alimentaire N°89 Blé dur et lui a permis **d'identifier des variétés permettant, en Wallonie au nord du sillon Sambre-Meuse, d'obtenir du blé dur de qualité technologique élevée en agriculture conventionnelle et acceptable en agriculture biologique** malgré les conditions climatiques très variables des années 2021 à 2024. Il faut éviter certaines variétés trop précoces venant de la méditerranée pouvant présenter de la prégermination physiologique de type « pre-maturity sprouting ».

Pour faire correspondre les variétés aux besoins des transformateurs, une **évaluation technologique annuelle des variétés de blé dur** cultivées en Wallonie spécifique à l'agriculture conventionnelle et biologique doit être maintenue de manière pérenne car la **durée de vie commerciale des variétés est courte et la disponibilité en semences est faible et varie d'une année à l'autre.**

Classes et valeurs pour la qualité technologique

Des critères et valeurs objectives de qualité technologique adaptées au pédoclimat belge pour la transformation du blé dur ont été définis sur base de la littérature scientifique (Arvalis et INRAE) et des analyses technologiques des blés durs des récoltes 2021 à 2024. Ces critères permettent de **prévenir les pertes économiques liées aux déclassements inutiles de lots acceptables**.

Qualité pastière belge du blé dur	Elite	Premium	Supérieure
Variété	« Pastière élite »	« Pastière premium »	« Semoulerie supérieure »
Humidité (%)	≤14,5 (≤15,5)		
Hagberg mouture intégrale (s)	≥150 (≥120)		
Alvéographe Durum : P Ténacité du gluten (mm H2O)	≥105 BIO : ≥95	≥85 BIO : ≥75	/
Protéines grains (N*5,7 ; %MS)	≥13,0 BIO : ≥12,0	≥13,0 BIO : ≥12,0	≥11,5 BIO : ≥11,0
Couleur jaune (b*) sur semoule	≥22 (≥17 en mouture intégrale)		
Poids à l'hectolitre C15 (kg/hl)	≥77,0 nettoyé (≥74,0 non-nettoyé) ou poids de mille grains (g) ≥45,0		
Mitadinage par infrarouge (%)	≤40% BIO : ≤60%		

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Nous avons observé un lien entre le poids à l'hectolitre et le rendement en semoule totale uniquement pour des valeurs de poids à l'hectolitre inférieures à 77 kg/hl.
Nous avons observé un lien entre le taux de mitadinage et le rendement en semoule totale uniquement pour des valeurs de taux de mitadinage supérieures à 40%.

Les valeurs supérieures exigées pour les critères technologiques par les semouleries sont souvent excessives afin d'obtenir des gains marginaux de rendement de mouture tout en augmentant significativement le risque de déclassement pour l'agriculteur. Cela s'explique par le fait que la semoulerie est une activité avec peu de valeur ajoutée et donc de marge. Les exigences élevées des semouleries en termes de qualité technologique peuvent aussi résider dans le fait d'intégrer l'incertitude de mesure à leur avantage sans prise de risques analytiques.

Application : Mesure de la vitrosité par le taux de mitadinage

Le taux de mitadinage du blé dur en lien avec la vitrosité du grain et le rendement en semoule totale est un critère d'importance secondaire auquel trop d'importance est donnée vu la facilité avec laquelle il semble pouvoir être mesuré. Malheureusement, **la mesure du taux de mitadinage n'est pas reproductible d'un acteur à l'autre.**

La mesure du taux de mitadinage par un humain et sur trop peu de grains est à remplacer par sa mesure par infrarouge et en utilisant une équation commune pour la rendre reproductible. Cela permet aussi de réaliser la mesure sur une quantité bien plus importante de grains.

Application : Tri optique infrarouge au grain à grain

Le tri optique infrarouge au grain à grain du blé dur permet d'augmenter fortement sa teneur en protéines mais l'impact est plus modéré sur le taux de mitadinage et la ténacité du gluten à l'alvéographe.

Cette technique permet également **de développer des nouvelles variétés de blé dur en l'utilisant comme outil de phénotypage sélectionnant de manière non-destructive, rapide et peu coûteuse les grains sur base de leur teneur en protéines**, un critère technologique essentiel. Cette approche permet de cibler rapidement les lignées les plus prometteuses 3 années seulement après le croisement. La combinaison de ces méthodes avec des approches génomiques et phénomiques ouvre la voie à une sélection plus efficace et adaptée aux besoins de la transformation et à sa culture avec moins d'intrants dans son pédoclimat local de sélection.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la qualité technologique par spectroscopie proche infrarouge

Contacts : a.pissard@cra.wallonie.be

Objectifs

Dans cadre de ValCerWal, développement de modèles de calibration de diverses espèces céréalières (**froment, épeautre, blé dur, orge**) mais aussi évaluation du potentiel de la **SPIR** pour la prédiction de **paramètres technologiques** de céréales (Hagberg, Alvéographe Chopin, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer)



XDS NIR Rapid Content Analyzer, FOSS

La SPIR : une méthode rapide

La **spectroscopie proche infrarouge (SPIR)**

- Méthode analytique reposant sur l'absorption du rayonnement électromagnétique à des longueurs d'onde comprises entre 780 et 2500 nm
- **Méthode indirecte** efficiente pour prédire les teneurs en constituants chimiques à partir de **modèles de calibration**
- Avantages par rapport aux techniques analytiques classiques :
  - Peu/pas préparation d'échantillon
  - Analyse très simple et rapide (entre 15 et 90 s)
  - Non destructive
  - Plusieurs constituantssimultanément
  - Analyse en ligne possible

Application : Froment

Prédiction du Zélény par groupe

- 3 groupes selon le rapport Zélény/Protéines
- Réduction de l'erreur de calibration (entre de 2.2 et 4.1 au lieu de 7 ml)

Constituent	Type	N	Mean	SD	Est. Min	Est. Max	SEC	RSQ	SECV	1-VR
GRP1	1	261	38.7739	13.0976	0.0000	78.0669	3.8696	0.9127	4.1003	0.9016
GRP2	1	384	33.8390	7.8256	10.3621	57.3159	3.5877	0.7898	3.7356	0.7715
GRP3	1	91	14.9143	3.7588	3.6380	26.1906	2.1787	0.6640	2.2487	0.6381

Modèles de calibration du Zélény par groupe (Groupes définis selon le rapport Zel/prot)

Prédiction des paramètres technologiques (Zélény, Hagberg, Alvéographe, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer)

- Performances médiocres

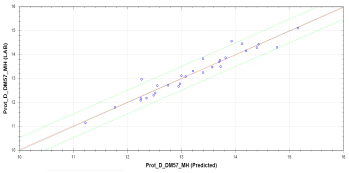
Constituent	Type	N	Mean	SD	Est. Min	Est. Max	SEC	RSQ	SECV	1-VR
ALWW_C15_MA	1	114	160.6053	66.3395	0.0000	359.6238	24.3511	0.8653	35.5122	0.7237
MHYD_C14_MA	1	206	54.3646	2.4133	47.1246	61.6045	1.0119	0.8242	1.1621	0.7687
RPEV_C14_AG_MA	1	175	3375.3486	229.1861	2687.7903	4062.9070	187.9934	0.3272	200.3284	0.2377
Hag_C15_MH	1	287	295.0174	56.3467	125.9772	464.0576	39.0474	0.5198	42.1657	0.4443
Hag_C15_MA	1	73	291.5616	51.9933	135.5817	447.5416	26.9769	0.7308	34.8357	0.5449

Modèles de calibration PLS du froment (grains)

Application : Epeautre

Prédiction de la teneur en protéines (grains, mouture intégrale et farine blanche

- Meilleurs résultats obtenus pour la mouture intégrale, suivie de la farine blanche, puis des grains



Validation de la teneur en protéines de l'épeautre (mouture intégrale)

Prédiction des paramètres technologiques (Zélény, Hagberg, Alvéographe, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer)

- Performances médiocres

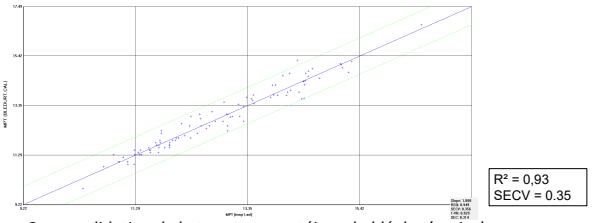
Constituent	N	Mean	SD	Est. Min	Est. Max	SEC	RSQ	SECV	1-VR
Zel_Sed_C15	329	22.6657	6.5828	2.9173	42.4140	2.9725	0.7961	3.6764	0.6871
Hag_C15_MH	322	311.4814	60.5656	129.7846	493.1781	35.5759	0.6550	39.9376	0.5815
RPEV_C14_AG_MA	210	2988.4856	330.7605	1996.2042	3980.7671	158.0119	0.7718	194.5686	0.6523
ALWW_C15_MA	258	99.4147	36.4084	0.0000	208.6400	24.3270	0.5535	29.9178	0.3216
MHYD_C14_MA	206	53.7165	2.9879	44.7528	62.6802	0.9674	0.8952	1.2459	0.8257

Modèles de calibration PLS de l'épeautre (mouture intégrale)

Application : Blé dur

Prédiction de la teneur en protéines et du mitadinage (grains)

- Bonnes performances pour la protéine (SECV=0.35%)
- Résultats plus mitigés pour le mitadinage (SECV=8.22%)
- Premiers résultats encourageants mais nécessité d'ajouter des données pour valider et améliorer les modèles



Cross–validation de la teneur en protéines du blé dur (grains)

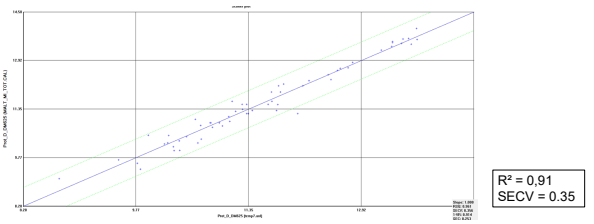
Application : Orge

Prédiction de la teneur en protéines (grains et mouture intégrale)

- Performances meilleures sur mouture intégrale (SECV = 0.28 %) que sur grains (SECV = 0.40 %)

Prédiction de la teneur en protéines du malt d'orge (grains et mouture intégrale)

- Performances meilleures sur mouture intégrale (SECV = 0.35 %) que sur grains (SECV = 0.65 %)
- Premiers résultats prometteurs mais nécessité d'enrichir les bases de données et réaliser une validation indépendante



Cross-validation de la teneur en protéines du malt d'orge (mouture intégrale)

Conclusions

La **SPIR** est une méthode analytique indirecte présentant de nombreux avantages par rapport aux méthodes analytiques classiques. Elle est une technique fiable et précise pour estimer l'humidité et la teneur en protéines des céréales, mais semble **moins adaptée à certains paramètres technologiques (Zélény, Alvéographe, Mixolab+, RVA).** Certains modèles **manquent de précision pour un usage contractuel**, mais restent **utiles pour faire de l'allotement et du screening d'échantillons.** Par ailleurs, pour garantir des calibrations robustes et précises, il est essentiel d'enrichir régulièrement les bases de données avec des récoltes issues de lieux et saisons variés.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la qualité technologique par infrarouge

Contact : a.pissard@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Froment, Epeautre, Orge, Blé dur, Qualité technologique, Proche infrarouge, XDS (Foss), Modèles de calibration PLS

Introduction

Dans le cadre du développement de la filière des céréales alimentaires avec une qualité technologique et sanitaire acceptable, en plus du développement des plateformes techniques (comme les plateformes de tri et de mouture)**, il est essentiel de développer des techniques d'analyse rapides, fiables et non-destructives de la qualité des différentes céréales et produits associés (farine blanche, mouture intégrale, semoule).**

Depuis plusieurs décennies, le CRA-W œuvre au développement de méthodes analytiques basées sur la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pour l'évaluation de la qualité de produits agricoles. Cette technique analytique est basée sur l'absorption de la lumière infrarouge par la matière organique. Il s'agit d'une méthode indirecte efficiente pour prédire les teneurs en constituants chimiques à partir de modèles de calibration.

Initialement, la SPIR a été utilisée au CRA−W pour l'analyse de la qualité des fourrages et des céréales (froment et orge), ce qui explique les larges bases de données existantes pour ces deux types de produits agricoles. Ensuite, au fur et à mesure, les études se sont élargies à d'autres types de production. Actuellement, le CRA−W possède de nombreuses calibrations pour l'analyse de paramètres physico-chimiques d'un grand nombre de matrices : céréales (grains ou farines), fourrages et ensilages (herbe et maïs), sols (culture, jardin, prairie), effluents d'élevage, plats préparés, etc. Nous avons ainsi construit des calibrations SPIR à partir d'une grande diversité d'échantillons. Les données spectrales et les valeurs de référence ont été implémentées dans l'outil CRAWLSPEC (développé par le CRA-W) pour permettre la centralisation et l'intégration des données ainsi que l'extraction et l'exploitation de celles-ci.

Ainsi, parmi les principaux produits analysés en routine par méthode SPIR, se trouvent les céréales et en particulier le froment et l'orge. Sur ces céréales (en grains), la SPIR permet d'évaluer la teneur en humidité et en protéines, et, en plus, l'indice de sédimentation Zélény pour le froment. Cet indice permet d'apprécier de manière simple et rapide la force boulangère des blés tendres et de leurs farines, et dépend de la qualité du gluten. Il existe également des modèles prédictifs utilisés en routine afin de déterminer la teneur en humidité et en protéines de la farine intégrale et farine blanche, ainsi que la teneur en cendres de cette dernière. Afin de maintenir la qualité de leurs performances, ces équations sont mises à jour et validées régulièrement avec de nouveaux échantillons sur base d'analyses de référence effectuées en laboratoire.

Objectifs

Dans cadre du projet ValCerWal, nous avons initié le **développement de modèles de calibration de divers produits céréaliers moins courants** (épeautre, blé dur, semoule de blé dur, malt d'orge) mais aussi testé le potentiel de la SPIR pour la prédiction de paramètres technologiques de céréales (Hagberg, Alvéographe Chopin, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer). Le développement de calibrations basées sur la **SPIR permettrait d'avoir un outil rapide d'évaluation de la qualité technologique pour la filière des céréales.**

Application : Froment

Les modèles de calibration existants au CRA-W pour le froment sous forme de grains montrent une très bonne précision pour l'humidité et les protéines, et une précision moyenne pour le Zélény. Une approche innovante par regroupement variétal (3 groupes selon le rapport Zélény/Protéines) a permis d'améliorer la prédiction du Zélény, avec des erreurs réduites (SECV compris entre 2.2 et 4.1 ml) par rapport au modèle global (SECV = 7 ml).
Pour la farine intégrale et farine blanche de froment, les modèles existants au CRA-W montrent une très bonne précision de prédiction de la teneur en protéines et ont été validés dans le cadre de ce projet sur un jeu de données indépendant. Les faibles erreurs de prédiction confirment la précision et robustesse des modèles.

Des essais ont également été menés pour prédire des paramètres technologiques (Hagberg, Alvéographe, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer) par SPIR. **La précision de prédiction de ces paramètres reste limitée**, surtout pour le Rapid Visco Analyzer, quel que soit le mode de présentation (grains, mouture intégrale, farine blanche), ce qui suggère que la technique n'est pas appropriée pour prédire ces paramètres.

Application : Epeautre

Des calibrations spécifiques à l'épeautre ont été développées pour prédire la teneur en protéines à partir de trois présentations d'échantillons : grains, mouture intégrale et farine blanche. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la mouture intégrale, suivie de la farine blanche, puis des grains. La validation sur un jeu indépendant de 29 échantillons confirme la robustesse des modèles (SEP = 0.25%), malgré quelques échantillons moins bien prédits. Des essais ont également été menés pour prédire des paramètres technologiques (Zélény, Hagberg, Alvéographe, Mixolab+, Rapid Visco Analyzer) par SPIR, mais les performances restent médiocres, surtout sur farine blanche. Ces résultats montrent que la SPIR est adaptée pour la prédiction de la teneur en protéines de l'épeautre, mais peu pertinent pour ces paramètres technologiques spécifiques.

Application : Orge

Les calibrations existantes au CRA−W sur l'orge (grains et mouture intégrale) ont été mises à jour avec de nouveaux échantillons dans le cadre du projet. Les modèles de calibration pour la teneur en protéines montrent de meilleures performances sur mouture intégrale (SECV = 0.28 %) que sur grains entiers (SECV = 0.40 %). Un travail similaire a été réalisé pour le malt d'orge, avec deux bases de données distinctes (grains et mouture intégrale) construites à partir d'un nombre limité d'échantillons. Comme observé pour l'orge, les performances sont meilleures sur mouture intégrale (SECV = 0.35%) que sur grains entiers (SECV = 0.65%). Ces premiers résultats sont prometteurs, mais nécessitent d'enrichir les bases de données et de réaliser une validation indépendante pour confirmer la fiabilité des modèles.

Application : Blé dur

Une base de données ainsi que des modèles de calibration ont été développés pour le blé dur, culture pour laquelle aucune base de données infrarouge n'existait au CRA-W. Les modèles prédictifs développés concernent la teneur en protéines et le taux de mitadinage. Ils montrent de bonnes performances pour la protéine (SECV = 0.35%) et des résultats plus mitigés pour le mitadinage (SECV = 8.2%), ce dernier étant probablement plus difficile à calibrer en raison de la méthode de référence visuelle. Ces premiers résultats sont encourageants, mais nécessitent plus d'échantillons et de données pour valider et améliorer les modèles.

Conclusion et perspectives

Dans le cadre de ce projet, des calibrations SPIR ont été développées pour différents paramètres de diverses espèces céréalières. Les résultats montrent que la **SPIR est une technique fiable pour estimer l'humidité et les protéines dans divers grains et farines, mais moins adaptée à certains paramètres technologiques** (Zélény, Alvéographe, etc.). Son efficacité dépend de modèles de calibration robustes, nécessitant de larges bases de données variées. Bien que certaines prédictions restent **trop imprécises pour un usage contractuel, elles sont utiles pour faire de l'allotement et du screening d'échantillons. Les avancées technologiques** (spectromètres portables, systèmes embarqués, big data et machine learning) ouvrent de nouvelles perspectives d'application terrain et d'optimisation de la filière agricole.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

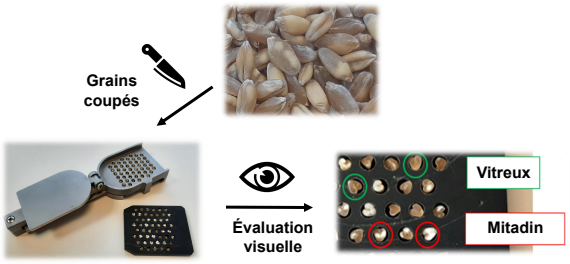
Détermination du taux de mitadinage du blé dur par spectroscopie proche infrarouge

Contacts : c.demoitie@cra.wallonie.be, p.vermeulen@cra.wallonie.be

Le **mitadinage** est un problème récurrent rencontré dans les lots de blé dur. Il est évalué par la découpe et l'observation visuelle des grains. Cette méthode est longue, fastidieuse et présente une erreur (SEL) non négligeable de 5%.
La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) offre de nombreux avantages en tant que méthode alternative. En effet, elle est :

- **Rapide**
- **Indépendante de l'opérateur**
- **Respectueuse de l'environnement**
- **Facile d'utilisation**
- **Non-destructive**
- **…**

Méthode de référence (Farinotome de Pohl)



Le spectromètre PIR : une prédiction rapide

Prédiction du mitadinage
Quantité : 250g de grains
Gamme : 400-2500 nm
Erreur (RMSEP) : 10,15%

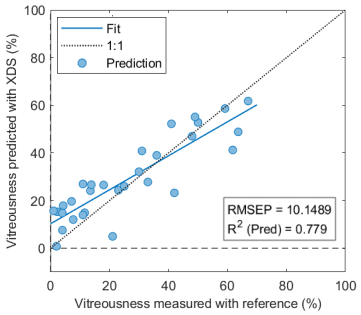


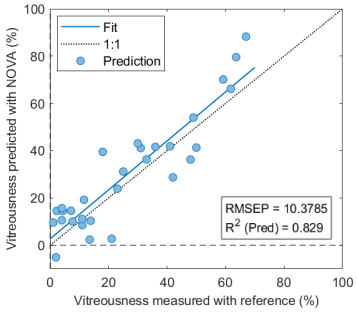
XDS NIR Rapid Content Analyzer, FOSS, DK

Prédiction du mitadinage
Quantité : 10x100g de grains
Gamme : 400-1100 nm
Erreur (RMSEP) : 10,38%

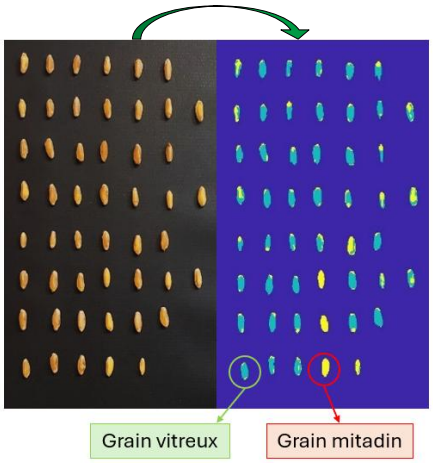


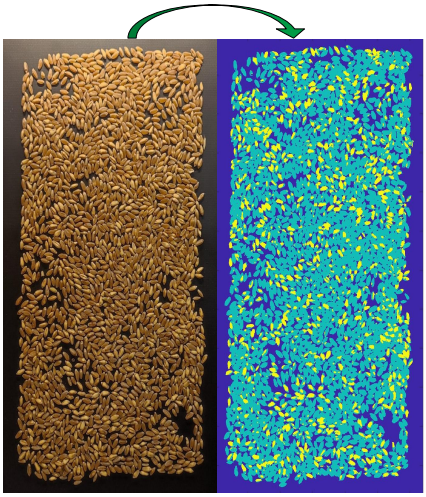
Infratec NOVA, FOSS, DK





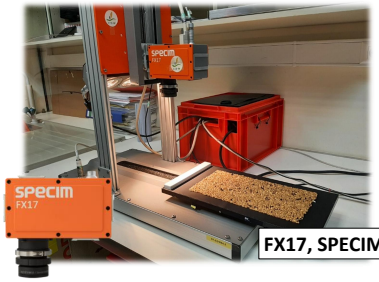
L'imagerie hyperspectrale PIR : une détection ciblée





Détection des grains mitadins
Quantité : 50 grains
Gamme : 900-1700 nm
Sensibilité : 73,5%
Spécificité : 92,4%

Détection des pixels mitadins
Quantité : 100g de grains
Gamme : 900-1700 nm
Sensibilité : 70,6%
Spécificité : 97,0%



FX17, SPECIM, FI

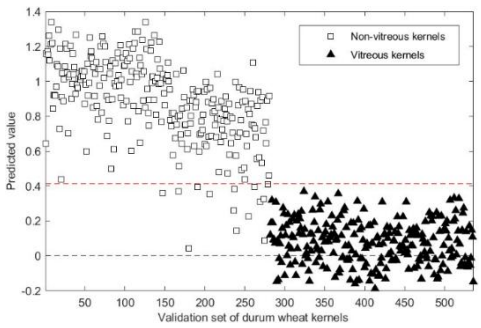
Le tri optique PIR : un ajout de valeur efficace

Prédiction sur le spectre moyen
Quantité : ≥50g de grains
Gamme : 900-1700 nm
Erreur (RMSEP) : 6,26%

Tri des grains mitadins/vitreux
Quantité : ≥50g de grains
Gamme : 900-1700 nm
Erreur (RMSEP) : 2,6%



QSorter EXPLORER 2.0, QualySense AG, CH

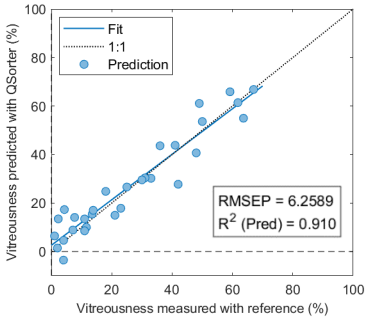




Grains mitadins



Grains vitreux



La SPIR est une méthode prometteuse pour évaluer le mitadinage du blé dur de manière plus objective et moins laborieuse que la méthode de référence.
Chaque instrument présenté offre des atouts spécifiques :

- **Spectromètre de paillasse** → évaluation rapide après récolte
- **Imagerie hyperspectrale** → contrôle qualité en ligne
- **Tri optique infrarouge** → amélioration des lots problématiques

Elle permet aussi de prédire d'autres paramètres en parallèle (humidité, teneur en protéines).

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePiCOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Détermination du taux de mitadinage du blé dur par spectroscopie proche infrarouge

Contact : c.demoitie@cra.wallonie.be, p.vermeulen@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Blé dur, Mitadinage, Proche infrarouge, Spectrométrie, Trieur optique, Imagerie hyperspectrale

Introduction

Le **mitadinage** est un **critère** commercial important pour évaluer la **qualité** technologique du **blé dur** (*Triticum turgidum ssp. durum*) destiné à l'industrie alimentaire, car il a un impact direct sur le rendement en semoule et la transformation en pâtes. La **méthode standard** utilisée pour mesurer ce phénomène repose sur l'inspection **visuelle fastidieuse** de grains tranchés. Pour favoriser l'implantation de la culture du blé dur en Wallonie, **il est nécessaire d'être muni d'outils objectifs et efficaces** pour en évaluer la qualité.

En pratique

Quatre **appareils** basés sur la **spectroscopie proche infrarouge** (SPIR) ont été testés pour une **évaluation plus rapide du mitadinage** des grains : deux spectromètres de paillasse conventionnels, un analyseur/trieur grain à grain et un système d'imagerie hyperspectrale.

XDS NIR Rapid Content Analyzer (FOSS)	*Infratec NOVA (FOSS)*	*QSorter EXPLORER 2.0 (QualySense)*	*FX17 (SPECIM)*
			
Gamme : 400-2500 nm Mesure sur 250g	Gamme : 400-1100 nm Mesure sur 10x100g	Gamme : 900-1700 nm Mesure sur ≥50g	Gamme : 900-1700 nm Mesure sur 100g ou 50 grains
→ **1 spectre/échantillon**		→ **1 spectre/grain**	→ **Plusieurs spectres/grain**

Performances

Les **modèles de prédiction** développés fournissent des taux de mitadinage avec une erreur (RMSEP) de 10,1% pour le XDS, de 10,4% pour l'Infratec NOVA et de 6,3% pour le QSorter.

De plus, un **modèle de tri des grains** a été développé sur l'analyseur grain à grain ; ce dernier présente une erreur de classification de 2,6%.

Le système d'**imagerie** permet de **détecter les grains mitadins** (analyse sur 50 grains) avec une sensibilité de 73,5% et une spécificité de 92,4%, et de **détecter les pixels mitadins** (analyse sur 100g) avec une sensibilité de 70,6% et une spécificité de 97,0% indiquant une bonne identification des grains véritablement vitreux avec des erreurs occasionnelles principalement causées par les grains partiellement mitadins.

*Les modèles développés permettent d'obtenir une **estimation du taux de mitadinage** d'un lot avec une **erreur proche** de la **méthode de référence**.*

Conclusion et perspectives

La **SPIR** a démontré son potentiel pour **évaluer le mitadinage du blé dur de manière plus objective et moins laborieuse** que la méthode de référence. Chaque type d'instrument testé présente **des avantages** selon le contexte d'utilisation : les spectromètres de paillasse pour **l'évaluation rapide après récolte**, le tri optique pour **l'amélioration des lots problématiques**, et l'imagerie hyperspectrale pour **le contrôle qualité en ligne**. De plus, le mitadinage peut être **prédit simultanément à d'autres paramètres** comme l'humidité ou la teneur en protéines des grains.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP · COLLÈGE des PRODUCTEURS · Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance Projet N°204/2 · Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la qualité technologique des protéines par chromatographie

Contact : c.jonard@cra.wallonie.be, s.gofflot@cra.wallonie.be

- La qualité technologique des protéines présentes dans la farine joue un rôle déterminant dans sa capacité boulangère, influençant directement la structure de la pâte, sa tenue et le volume final du pain.
- Les **méthodes de référence** traditionnellement utilisées pour évaluer cette qualité, telles que l'alvéographe Chopin et le Mixolab+, requièrent non seulement une **quantité importante d'échantillon**, mais également l'obtention préalable d'une **farine spécifique**
- **La corrélation entre les résultats de méthodes chromatographiques et les résultats des méthodes technologiques**, pourraient être une alternative permettant d'obtenir des informations fiables plus rapidement, tout en nécessitant des quantités réduites de matière première.

Profil en protéines par chromatographie d'exclusion de taille (SEC)

Extraction

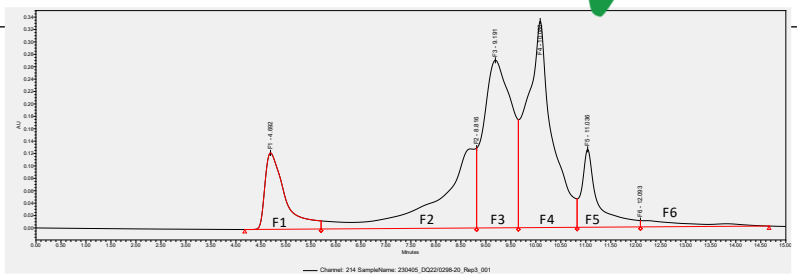
Extraction avec une solution tampon de phosphate de sodium contenant 1 % de SDS (pH 6,9)

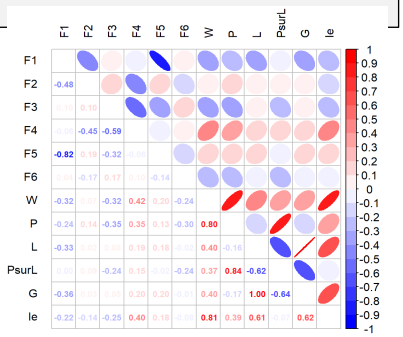
Sonication et centrifugation

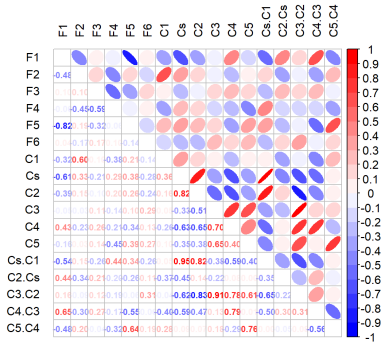
Injection sur un système UPLC-DAD

Obtention **d'un profil en protéines** qui peut être divisé en **6 fractions** :

- F1 : gluténines de haut poids moléculaire
- F2 : gluténines de bas poids moléculaire
- F3 : ω-gliadines
- F4 : α, β et γ-gliadines
- F5 : globulines et albumines
- F6 : petites protéines solubles





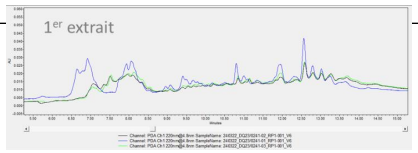


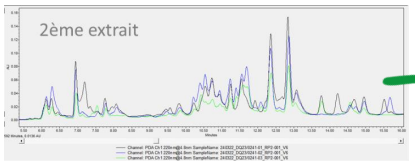
- **Profil en protéines variant selon la variété**
- **Peu de corrélations significatives** entre les valeurs relatives des différentes fractions et les paramètres technologiques ont été observées, quel que soit le type de mouture.

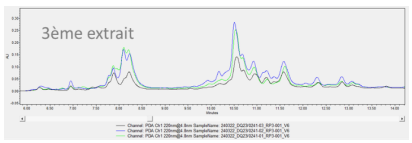
Profil en protéines par phase inverse (RP – colonne C18)

Trois extractions successives

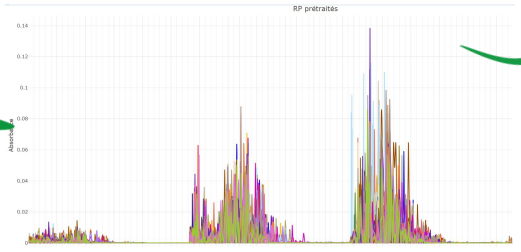
- Extraction 1 : Solution aqueuse contenant 0,4 M de NaCl pour récupérer les albumines et globulines
- Extraction 2 : Solution d'éthanol à 70% (v/v) pour récupérer les gliadines
- Extraction 3 : Deux solutions, du propan-1-ol (50% v/v) et un tampon d'extraction (50% v/v propan-1-ol, 2M urée, 0,2 M Tris + 1% dithiothreitol, pH = 6,6) pour récupérer les gluténines

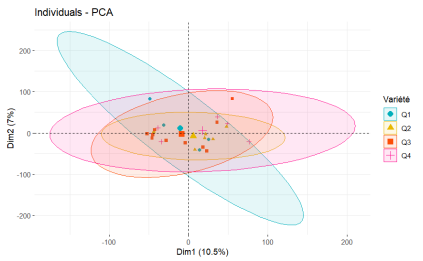






Prétraitement et compilation des chromatogrammes





- **Aucune séparation nette des échantillons** en fonction de leur qualité panifiable n'a été observée pour les fractions d'extraction individuelles et combinées.
- **Pas de liens significatifs entre paramètres technologiques et chromatogrammes**.

- Les approches chromatographiques SEC et RP permettent, à partir d'une **faible quantité de matière**, d'obtenir des **profils protéiques précis et reproductibles.**
- Elles mettent en évidence **des différences entre variétés** mais ne permettent pas, à ce stade, d'être mises en relation avec les paramètres technologiques utilisés en sélection variétale et industrielle.
- Les données générées pourraient être **exploitées différemment via des approches statistiques ou de modélisation plus avancées.**

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Avec le soutien de la Wallonie Relance
Projet N°204/2
Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la qualité technologique des protéines par chromatographie

Contact : c.jonard@cra.wallonie.be ; s.gofflot@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Froment, Protéines, Chromatographie, Exclusion de taille (SEC), Phase inverse (RP)

Introduction

La **qualité technologique des protéines** présentes dans la farine joue un rôle déterminant **dans sa capacité boulangère**, influençant directement la structure de la pâte, sa tenue et le volume final du pain. Les méthodes de référence traditionnellement utilisées pour évaluer cette qualité, telles que l'indice de sédimentation Zélény, l'alvéographe Chopin ou le Mixolab, requièrent non seulement une quantité importante d'échantillon, mais également l'obtention préalable d'une farine adaptée à l'analyse, ce qui limite leur applicabilité dans certains contextes analytiques ou industriels.

Dans cette optique, la mise en **corrélation des méthodes chromatographiques et des méthodes classiques**, pourraient être une alternative. Ces techniques ouvrent la voie à une **caractérisation du profil protéique même à un stade précoce de la sélection**, où peu de matériel végétal est disponible.

Détermination du profil en protéines par chromatographie d'exclusion de taille

La chromatographie d'exclusion de taille (SEC) permet l'obtention d'un profil en protéines qui peut être divisé en 6 fractions (Figure 1) :

- **F1** : gluténines de haut poids moléculaire
- **F2** : gluténines de bas poids moléculaire
- **F3** : ω-gliadines
- **F4** : α, β et γ-gliadines
- **F5** : globulines et albumines
- **F6** : petites protéines solubles

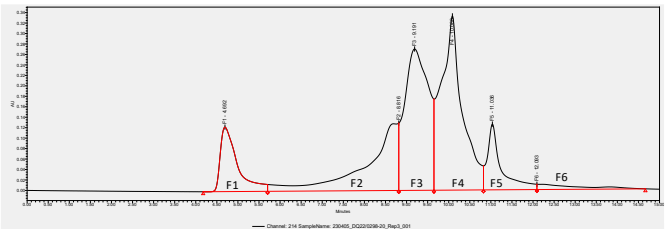


Figure 1 : Chromatogramme du profil en protéines obtenu par SEC

Vingt et un échantillons de variétés différentes ont été analysés. Les résultats montrent que **le profil en protéines varie selon la variété**, confirmant l'intérêt de la SEC pour observer les différences de composition.

Des matrices de corrélation ont été établies entre les fractions protéiques et les paramètres technologiques, pour trois types de mouture : farine blanche, mouture intégrale et mouture intégrale tamisée. **Peu de corrélations significatives ont été observées, quel que soit le type de mouture**. Quelques corrélations internes entre fractions apparaissent toutefois pour la mouture intégrale.

En dépit de la **faible quantité d'échantillon nécessaire** (1 g), **aucune relation directe** avec les paramètres du Mixolab ou de l'alvéographe Chopin n'a pu être mise en évidence (Figure 2). Ce type d'analyse ne nous permet donc pas clairement d'avoir des informations sur la qualité panifiable de la protéine, à ce stade. **Les données obtenues de type « profil » ne sont pas suffisamment précises pour conclure la qualité panifiable de l'échantillon.**

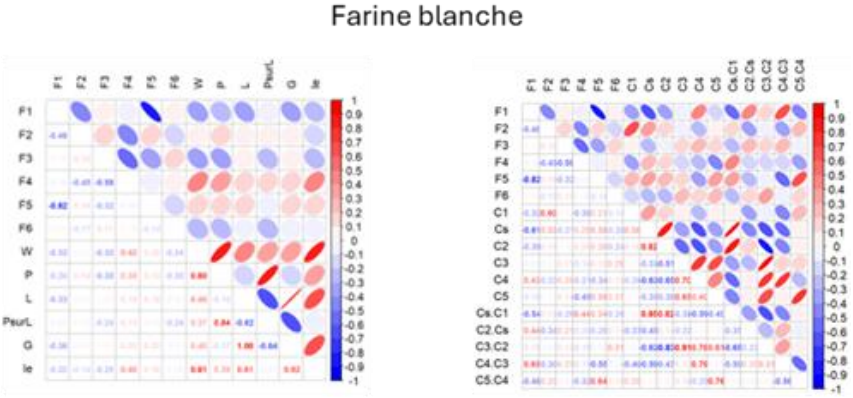


Figure 2 : Matrice de corrélation entre les valeurs des fractions protéiques de l'essai variété provenant de trois matériaux de base distincts et les paramètres technologiques pour la farine blanche.

Détermination du profil en protéines par chromatographie en phase inverse

La chromatographie en phase inverse (RP) permet une séparation plus fine des protéines. La méthode développée comprend trois extractions successives d'un même échantillon.

- Extraction 1 : Albumines et globulines
- Extraction 2 : Gliadines
- Extraction 3 : Gluténines

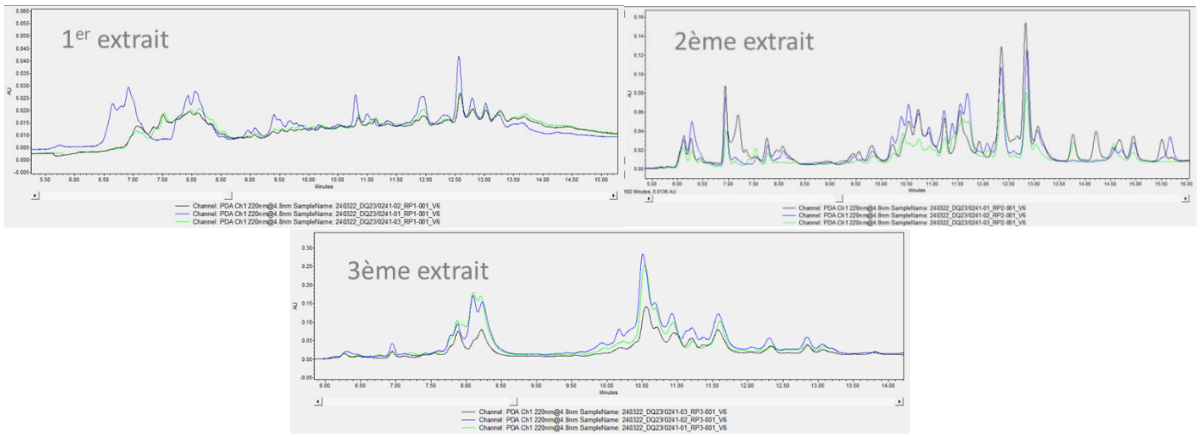


Figure 2 : Chromatogrammes pour les 3 extractions successives de 3 échantillons de qualité panifiable différente.

Les chromatogrammes obtenus (Figure 3) ont été prétraités, compilés et comparés avec les valeurs technologiques afin d'établir un lien entre les deux. De plus, les données ont été analysées par analyse en composantes principales (ACP) pour chaque fraction et pour les fractions combinées.

Aucune séparation nette des échantillons en fonction de leur qualité panifiable n'a été observée, contrairement à certaines données de la littérature**. Les matrices de corrélation n'ont pas révélé de liens significatifs entre paramètres technologiques et signaux chromatographiques.**

Conclusion

Les **approches chromatographiques** SEC et RP permettent, à partir **d'une faible quantité de matière**, d'obtenir des **profils protéiques précis et reproductibles**. Elles mettent en évidence des **différences entre variétés** mais **ne permettent pas, à ce stade, de prédire ou tout du moins d'estimer la qualité panifiable à partir des seuls profils protéiques.** Cela peut s'expliquer par le fait que le gluten n'est pas formé dans le grain et la farine contrairement aux méthodes d'analyses rhéologiques utilisée pour déterminer la qualité panifiable de la protéine.

Les données générées pourraient être exploitées différemment, notamment via des **approches statistiques ou de modélisation plus avancées, pour relier les données chromatographiques avec la qualité technologique de la protéine.**

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Méthodes rhéologiques alternatives pour évaluer la qualité technologique

Contact : p.werrie@cra.wallonie.be, b.godin@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Qualité technologique, Froment, Epeautre, Alvéographe, Mouture meule, Mixolab, Glutopeak, Hagberg

Introduction

Les méthodes classiques de rhéologie ne permettent pas toujours une évaluation fine de la qualité technologique des farines issues de mouture sur meule de pierre, de farines plus complètes ou de variétés spécifiques comme l'épeautre. Ce document présente **plusieurs adaptations méthodologiques visant à améliorer la discrimination variétale et la prédiction des propriétés technologiques des farines**.

Méthodes alternatives

1. **Adaptation de l'alvéographe de Chopin à la mouture sur meule de pierre** dont l'amidon endommagé et la présence de fins sons est élevée : augmentation de l'hydratation (55 %), réduction du débit d'air (40 L/h) et augmentation de la vitesse de pétrissage (80 rpm).

2. **Comparaison pour la mouture sur meule de pierre entre farines blanches (180 µm) et bises (350 µm)** : utilisation du protocole meule ci-dessus pour les deux types.

3. **Adaptation de l'alvéographe de Chopin à l'épeautre** dont le gluten est très peu tenace et très extensible : réduction de l'hydratation (45 %) et de la vitesse de pétrissage (40 rpm).

4. **Utilisation du GlutoPeak avec la méthode Rapid Flour Check** pour évaluer rapidement la qualité du gluten : mesure du couple pendant la formation du gluten à haute vitesse.

5. **Évaluation spécifique de l'activité α-amylasique avec le Mixolab** : pétrissage intensif (120 rpm), hydratation élevée (75 %), démarrage à haute température (49 °C).

Résultats

Les adaptations du protocole standard de l'alvéographe Chopin permettent une meilleure discrimination des variétés, notamment en augmentant l'extensibilité (L) et l'élasticité (Ie), tout en réduisant la force boulangère (W), la ténacité (P), et le rapport P/L.

Les farines bises présentent une teneur en fins sons (et donc en fibres et en minéraux) plus élevée mais son gluten est moins extensible et élastique que les farines blanches. Le protocole meule permet de prédire les résultats sur farines bises et en protocole standard.

Pour l'épeautre, le protocole adapté améliore la discrimination variétale et présente une forte corrélation avec le protocole standard.

Le GlutoPeak montre une forte corrélation avec le gluten humide et le volume du pain, bien que moins précis pour la teneur en protéines comparé à la spectrométrie proche infrarouge.

Le protocole Mixolab spécifique à l'activité α-amylasique présente une bonne corrélation avec le temps de chute de Hagberg offrant une analyse fine et rapide de cette activité enzymatique.

Conclusion et perspectives

Ces méthodes alternatives rhéologiques permettent une évaluation plus spécifique et rapide de la qualité technologique d'un lot. **Elles offrent une meilleure discrimination variétale et constituent un complément efficace aux méthodes classiques**, particulièrement utiles dans un contexte de screening de lots industriels ou de sélection variétale.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

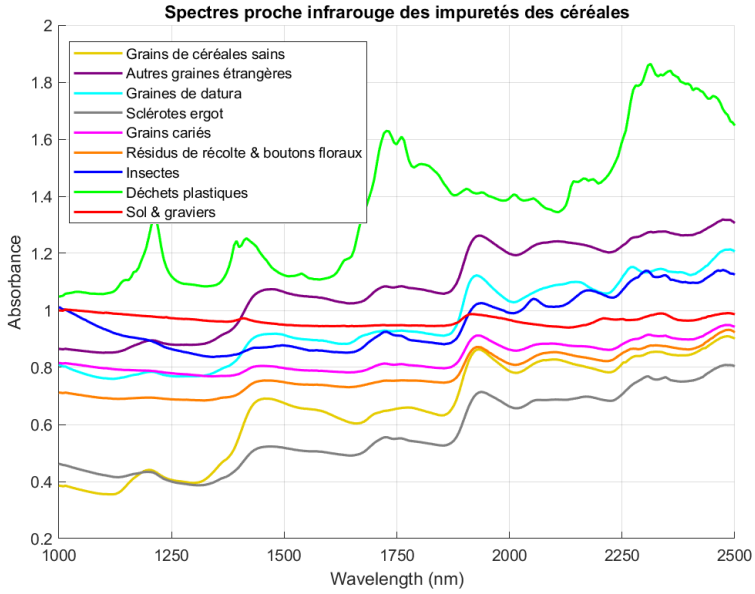
ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Évaluation de la présence d'impuretés dans les céréales par imagerie hyperspectrale proche infrarouge

Contacts : c.demoitie@cra.wallonie.be, p.vermeulen@cra.wallonie.be

L'imagerie hyperspectrale proche infrarouge est une technique alternative prometteuse pour **évaluer la pureté et l'état sanitaire d'un lot de céréales**.
La méthode permet de **détecter de manière ciblée** différentes catégories d'impuretés et fournit une **estimation de la pureté** du lot ainsi que la prévalence spécifique des différentes impuretés exprimée en pourcentage de pixels détectés.

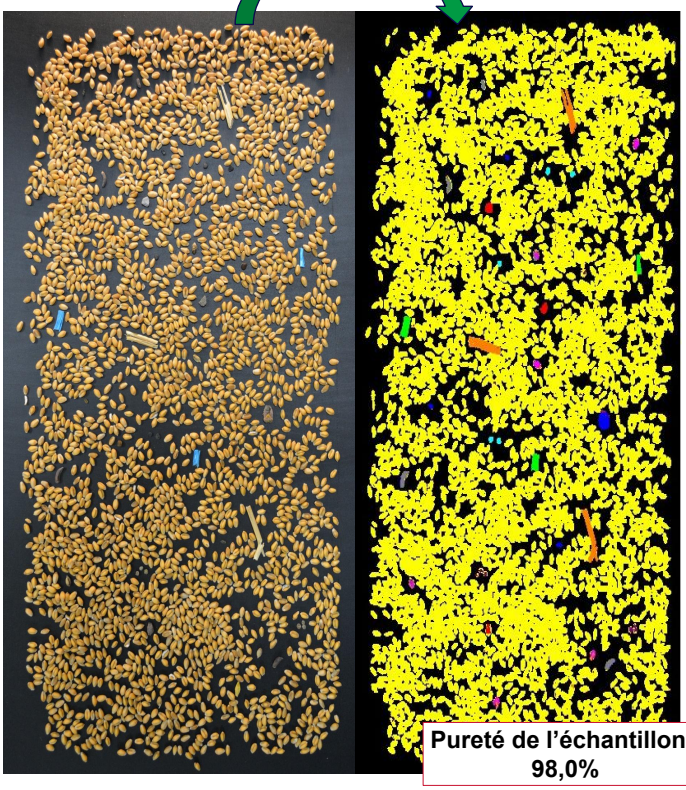
Spectres proche infrarouge des impuretés des céréales



Mesure sur une bande transporteuse avec une camera hyperspectrale proche infrarouge



Algorithmes de classification



Pureté de l'échantillon : 98,0%

Performances des modèles

Modèle	Catégorie d'impuretés	1000-1700 nm		1000-2500 nm	
		Sensibilité [%]	Spécificité [%]	Sensibilité [%]	Spécificité [%]
1	Sol & graviers	90,9	91,4	99,3	97,0
2	Déchets plastiques	99,2	100,0	99,2	100
3	Insectes	87,2	96,5	96,3	98,2
4	Résidus de récolte & boutons floraux	80,6	77,8	85,3	85,4
5	Grains cariés	71,6	89,0	77,2	89,8
6	Sclérotes d'ergot	87,6	95,8	92,9	97,4
7	Graines de datura	94,5	89,8	95,4	95,8
8	Autres graines étrangères	90,5	89,9	94,1	94,8

Légende
Grains de céréales sains
Autres graines étrangères
Graine de datura
Sclérotes d'ergot
Grains cariés
Résidus de récolte & boutons floraux
Insectes
Déchets plastiques
Sol & graviers
Arrière-plan

Huit modèles de classification dichotomique élaborés à partir du **spectre proche infrarouge** (1000 - 1700 nm et 1000 - 2500 nm) sont appliqués en cascade aux images hyperspectrales pour permettre **une détection ciblée des impuretés.**

Avantages

- Méthode **automatisée**, **rapide** et **non-destructive.**
- Utilisation d'une **caméra PIR** permettant de mesurer les grains sur une **bande transporteuse**.
- 2 gammes spectrales envisagées : **1000-1700 nm** et **1000-2500 nm**.
- **Plusieurs catégories d'impuretés** détectées (datura, sclérotes d'ergot, graines étrangères, plastiques, graviers …).
- **Différentes espèces de céréales** prises en compte (froment, seigle, triticale et blé dur).

L'imagerie hyperspectrale proche infrarouge démontre **une bonne efficacité pour détecter les impuretés dans les lots de céréales**. Elle permet notamment d'atteindre des performances élevées pour les contaminants réglementés. Malgré certaines limites, la **méthode** reste globalement **fiable et précise**. L'usage de caméras à spectre réduit (1000-1700nm) offre une alternative économique pour une évaluation globale, même si moins précise. Cette technologie apparaît comme un **outil prometteur pour renforcer le contrôle qualité et orienter les processus de nettoyage**.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Avec le soutien de la Wallonie Relance
Projet N°204/2
Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Évaluation de la présence d'impuretés dans les céréales par imagerie hyperspectrale proche infrarouge

Contacts : c.demoitie@cra.wallonie.be, p.vermeulen@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Impuretés, Contaminants, Imagerie hyperspectrale, Proche infrarouge, Alcaloïdes de l'ergot

Introduction

La **présence d'impuretés ou de contaminants** dans les grains de céréales est un **critère** de qualité **important impactant** leur **vente, stockage et transformation**. De plus, la détection de contaminants **toxiques** est cruciale pour garantir l'**état sanitaire** des lots. Dans ce contexte, l'objectif est d'évaluer le potentiel de **l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge**, une méthode rapide, non destructive et plus représentative, **pour détecter** efficacement ces **impuretés** dans les céréales.

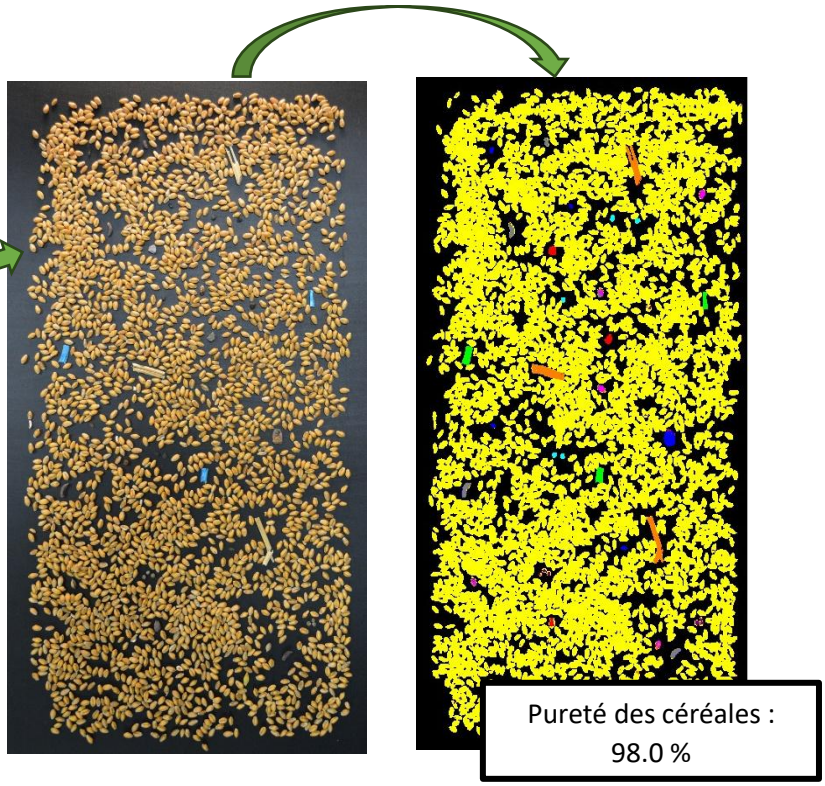
En pratique

Un système d'**imagerie** hyperspectrale proche infrarouge couplé à une bande transporteuse est utilisé **pour détecter de manière ciblée 8 catégories d'impuretés et contaminants** présents dans des grains de céréales : sol et graviers, déchets plastiques, insectes, résidus de récoltes et boutons floraux, grains cariés entiers, sclérotes d'ergot, graines de datura, et graines étrangères d'adventices. Les résultats de la détection permettent également d'**évaluer la pureté générale** d'un lot de céréales.



Mesure sur **bande transporteuse** avec la caméra **1000-2500 nm**

Légende	
	Grains de céréales sains
	Autres graines étrangères
	Graine de datura
	Sclérotes d'ergot
	Grains cariés
	Résidus de récolte & boutons floraux
	Insectes
	Déchets plastiques
	Sol & graviers
	Arrière-plan



Détection de la **présence d'impuretés** et estimation de la **pureté** d'un échantillon de **céréales**

La méthode permet de **détecter de manière ciblée différentes catégories d'impuretés** et fournit une **estimation de la pureté du lot de céréales** ainsi que la prévalence spécifique des différentes impuretés exprimée en pourcentage de pixels détectés.

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Performances

Les modèles développés entre **1000 et 2500 nm** montrent une **très bonne capacité de détection des contaminants**, avec des sensibilités et spécificités supérieures à 90 % pour les impuretés réglementées comme les sclérotes d'ergot et les graines de datura. La détection des résidus de récolte et des grains cariés est plus limitée, bien que les résultats soient prometteurs. Une réduction de la gamme spectrale (**1000–1700 nm**) entraîne une **baisse des performances, sauf pour certains contaminants** comme les plastiques. L'utilisation de caméras moins coûteuses fonctionnant dans cette gamme reste donc envisageable pour des applications ciblées.

Modèle	Classes	1000-1700 nm		1000-2500 nm	
		Sensibilité [%]	Spécificité [%]	Sensibilité [%]	Spécificité [%]
Modèle 1	Sol & graviers vs. Reste	90,9	91,4	99,3	97,0
Modèle 2	Déchets plastiques vs. Reste	99,2	100,0	99,2	100
Modèle 3	Insectes vs. Reste	87,2	96,5	96,3	98,2
Modèle 4	Résidus de récolte & boutons floraux vs. Reste	80,6	77,8	85,3	85,4
Modèle 5	Grains cariés vs. Reste	71,6	89,0	77,2	89,8
Modèle 6	Sclérotes d'ergot vs. Reste	87,6	95,8	92,9	97,4
Modèle 7	Graines de datura vs. Reste	94,5	89,8	95,4	95,8
Modèle 8	Autres graines étrangères vs. Grains de céréales sains	90,5	89,9	94,1	94,8

Détection et quantification des alcaloïdes de l'ergot

Les **sclérotes contiennent des alcaloïdes** dont les **teneurs** dans les denrées alimentaires sont **régulées** par le Règlement Européen 2024/1808. Dans une farine, les éventuels sclérotes ayant échappés aux contrôles préalables ne sont plus détectables. Aussi, une **méthode de détection des alcaloïdes** a été mise en place **par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem**. Cette méthode UPLC-MS/MS permet la détection et le dosage des 12 composés à quantifier pour vérifier le respect des teneurs en alcaloïdes dans les denrées alimentaires.

Conclusion et perspectives

L'**imagerie hyperspectrale proche infrarouge** constitue une **méthode rapide et efficace** pour détecter les impuretés et contaminants dans les grains, en s'appuyant sur leurs signatures spectrales spécifiques. Elle peut servir d'**étape de présélection** afin d'**orienter le nettoyage** ou de **guider vers des analyses plus approfondies**. L'intégration à un système de tri automatisé, le recours à des algorithmes de classification avancés et l'usage de caméras plus abordables représentent des axes prometteurs pour optimiser son application en milieu industriel. Le développement de **méthodes de détection et de quantification des alcaloïdes** permet lui, d'assurer un contrôle des produits ou les sclérotes ne seraient plus détectables et ainsi d'**assurer le respect des teneurs** en alcaloïdes dictées par la législation.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Limiter le risque lié aux contaminants produits par la fusariose de l'épi

Contact : c.jonard@cra.wallonie.be ; s.gofflot@cra.wallonie.be

- Les mycotoxines sont des **métabolites secondaires de moisissures** appartenant notamment aux genres *Aspergillus* spp., *Alternaria* spp., *Fusarium* spp. et *Penicillium* spp.
- Elles constituent un **risque important en matière de sécurité alimentaire**, celles-ci pouvant avoir des effets délétères sur la santé humaine et animale.
- Le développement **d'outils analytiques et la surveillance des contaminations** permettent l'anticipation du risque, l'avertissement du secteur et la prise de mesures adéquates.
- **Le tri** peut être envisagé comme une **solution pour diminuer la concentration de certains sous-lots.**

Méthode d'analyse multi-mycotoxines par UPLC-MS/MS

Extraction QuEChERS simplifiée

Extraction liquide-liquide avec une solution d'acétonitrile + 1% d'acide acétique

Ajout de sels ($MgSO_4$ et NaCl) afin de provoquer un relargage (salting-out) des mycotoxines vers la phase organique

Injection sur un système UPLC-MS/MS

Détection et quantification de 26 mycotoxines régulées et émergentes (AME, AOH, DON, 3Ac-DON, 15Ac-DON, ZEA, T2, HT2, OTA, OTB, ENN A, ENN A1, ENN B, ENN B1, FUM B1, FUM B2, FUM B3, MONI, CIT, BEA, AF B1, AF B2, AF G1, AF G2, DAS, STE)





Occurrence des mycotoxines dans les échantillons de froment 2023

Mycotoxines	ND (n)	< LOQ (n)	> LOQ (n)	Min – Max des échantillons > LOQ (µg/kg)
DON	39	1	5	171 - 567
ZEA	40	0	5	12 - 18
ENN B	38	5	2	28 - 131
ENN B1	44	1	0	Tous < LOQ

n : nombre d'échantillons (n total = 45) ; ND : Non détecté ; LOQ : Limite de quantification

Occurrence des mycotoxines dans les échantillons de froment 2024

Mycotoxines	ND (n)	< LOQ (n)	> LOQ (n)	Min – Max des échantillons > LOQ (µg/kg)
DON	11	25	52	131 - 1478
ZEA	53	25	10	16 - 55
ENN A1	35	36	17	10 - 49
ENN B	3	17	68	12 - 488
ENN B1	21	18	49	7 - 185

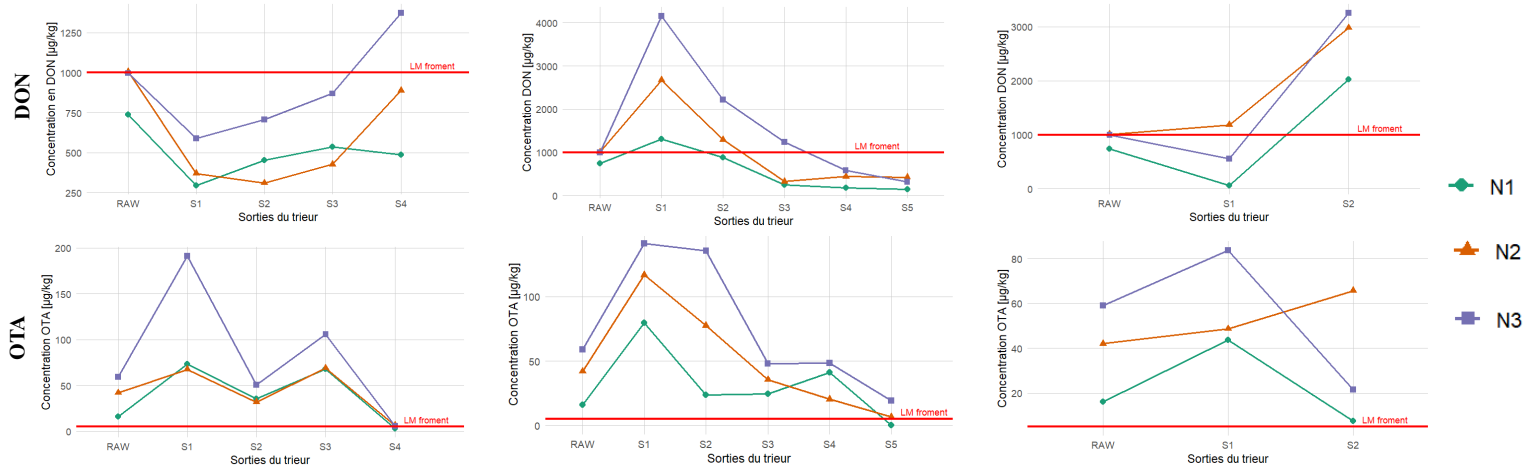
n : nombre d'échantillons (n total = 88) ; ND : Non détecté ; LOQ : Limite de quantification

Etat des lieux de la situation en 2023 et 2024

- **Présence de mycotoxines plus importante en 2024 qu'en 2023**, tant en nombre d'échantillons contaminés qu'en niveaux de contamination.
- **Mêmes mycotoxines en 2023 et 2024** sauf pour l'ENN A1 non-détectée en 2023
- **ENNs, mycotoxines émergentes, présentes dans la majorité des échantillons de 2024**

Tri d'échantillons contaminés en DON et OTA

- Pour le DON :
  - Nettoyeur séparateur : **Reduction du niveau de DON dans les plus petits grains**
  - Table densimétrique : **Fractions les moins denses plus contaminées**
  - Qsorter : Modèle FDK permet de **concentrer la contamination dans la fraction exclue**
- Pour l'OTA :
  - Nettoyeur séparateur : **Fractions avec les plus gros grains moins contaminées**
  - Table densimétrique : **Fractions les moins denses plus contaminées**
  - Qsorter : **Pas de tri efficace sur base du modèle FDK**



- Une **méthode d'analyse multi-mycotoxines robuste et fiable** a été mise en place.
- **Occurrence des mycotoxines plus élevée en 2024 qu'en 2023**, probablement à cause des conditions météorologiques.
- **Surveiller les mycotoxines émergentes** en parallèle des mycotoxines régulées car elles sont largement détectées dans le froment.
  → **Elargir à l'ergot dont la présence est accrue**. Un screening des alcaloïdes des l'ergot en froment serait nécessaire.
- Le **tri** peut être utilisé comme **méthode pour exclure les grains les plus contaminés** mais il n'est pas toujours pertinent. L'aspect **économique doit aussi être pris en compte.**

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Limiter le risque lié aux contaminants produits par la fusariose de l'épi

Contact : c.jonard@cra.wallonie.be ; s.gofflot@cra.wallonie.be

Mots-clefs : Froment, *Fusarium* spp., Mycotoxines émergentes, UPLC-MS/MS, Tri

Introduction

Les mycotoxines sont des **métabolites secondaires produits par des moisissures** appartenant notamment aux genres *Aspergillus* spp., *Alternaria* spp., *Fusarium* spp. et *Penicillium* spp., présentes dans diverses productions agricoles telles que le café, les épices et les céréales. Les contaminations par des mycotoxines posent un problème mondial pour la santé humaine et animale. La **production de mycotoxines peut survenir avant, pendant et après la récolte, lors du stockage**. Les conditions météorologiques (température, humidité) et les mauvaises conditions de stockage influencent fortement la contamination.

En Europe, **leur teneur dans les denrées est règlementée par le règlement (UE) 2023/915**. Or, avec le changement climatique, les profils de contamination évoluent, et une augmentation globale de la contamination est attendue**. La surveillance continue et l'analyse régulière des mycotoxines, qu'elles soient classiques ou émergentes, sont donc essentielles**. Le développement de méthodes analytiques robustes pour en mesurer les teneurs, et donc éviter leur introduction dans la chaine alimentaire et le développement de protocoles de tri visant à réduire les concentrations de lots dépassant les limites légales, est primordiale.

Etat des lieux de la contamination en mycotoxines dans le froment en 2023 et 2024 pour la Belgique

Un total de 133 échantillons a été analysé à l'aide de la méthode d'analyse multi-mycotoxines par UPLC-MS/MS. Une méthode que nous avons développée et valider afin de s'assurer de sa justesse et de sa robustesse. **En 2023 (Tableau 1), 9 échantillons sur 45 (20%), présentaient des teneurs en mycotoxines supérieures à la limite de quantification (LOQ)**. Les mycotoxines détectées étaient **le DON, la ZEA et l'ENN B.**

Tableau 1 : Contamination en mycotoxines des échantillons 2023

Mycotoxines	ND (n)	< LOQ (n)	> LOQ (n)	Min – Max des échantillons > LOQ (µg/kg)
DON	39	1	5	171 - 567
ZEA	40	0	5	12 - 18
ENN B	38	5	2	28 - 131
ENN B1	44	1	0	Tous < LOQ

n : nombre d'échantillons (n total = 45) ; ND : non détecté

En 2024 (Tableau 2), 74 échantillons sur 88 présentaient des concentrations supérieures à la LOQ pour au moins une mycotoxine, ce qui signifie que 84 % des échantillons contenaient des quantités quantifiables de mycotoxines. Les mycotoxines détectées étaient le **DON, la ZEA, l'ENN A1, l'ENN B et l'ENN B1**. **L'ENN B était la mycotoxine la plus fréquemment détectées** dans les échantillons de 2024, avec 68 échantillons contenant des concentrations allant de 12 à 488 µg/kg. A noter qu'actuellement, les ENNs ne sont pas réglementées en Europe. La toxicité de celles-ci est à l'étude.

Tableau 2 : Contamination en mycotoxines des échantillons 2024

Mycotoxines	ND (n)	< LOQ (n)	> LOQ (n)	Min – Max des échantillons > LOQ (µg/kg)
DON	11	25	52	131 - 1478
ZEA	53	25	10	16 - 55
ENN A1	35	36	17	10 - 49
ENN B	3	17	68	12 - 488
ENN B1	21	18	49	7 - 185

n : nombre d'échantillons (n total = 88) ; ND : non détecté

La présence de mycotoxines a été plus élevée en 2024 qu'en 2023, tant en nombre d'échantillons contaminés qu'au niveau des concentrations observées. Ceci peut certainement s'expliquer par les conditions météorologiques.

Les ENNs étaient les mycotoxines les plus fréquemment rencontrées dans les échantillons récoltés en 2024, alors qu'elles n'ont été détectées que dans 7 échantillons en 2023. **Les ENNs** sont considérées comme des **mycotoxines émergentes, car elles ne sont ni réglementées ni analysées de manière routinière**. Cependant, ces mycotoxines suscitent **de plus en plus de questions, car elles sont détectées de plus en plus souvent et à des concentrations plus élevées.** C'est pourquoi, il est primordial de surveiller les mycotoxines émergentes aussi bien que les mycotoxines régulées.

Tri de lots contaminés pour réduire la contamination de sous-lot

Trois échantillons contenant du **DON, mycotoxines de champ**, et trois échantillons contenant de **l'OTA, mycotoxine de stockage**, à trois niveaux de concentration différents ont été soumis à **trois systèmes de tri, nettoyeur-séparateur, table densimétrique, et trieur optique et infrarouge au grain à grain** (QSorter Qualysense) afin d'évaluer leur capacité à éliminer les grains les plus contaminés.

Pour le DON, le **nettoyeur-séparateur permet d'isoler trois fractions dont la concentration est inférieure à la concentration initiale**, ces fractions représentant entre 75 et 80% du lot. Concernant, **la table densimétrique, l'essentiel des grains contaminés sont contenus dans les fractions 1 et 2, fractions les moins denses, qui constituent entre 40 et 45 % de l'échantillon**. Les trois fractions restantes, représentant 55 à 60 % des échantillons, ont des concentrations similaires ou inférieures à la concentration initiale. Pour le tri optique et infrarouge au grain à grain, il a été effectué sur base **d'un modèle infrarouge développé au CRA-W permettant la détection de grains affectés par la fusariose**. L'élimination de 20% des grains considérés comme « malades » montre une concentration importante de la contamination dans la fraction exclue. Ce tri permet donc la **récupération de 80% du lot.**

Concernant **l'OTA, pour le nettoyeur-séparateur**, seule la sortie 4, contenant les plus gros grains, montre une **diminution de concentration par rapport à la concentration initiale. Cette sortie représente environ 45% de la masse** du lot initial. Concernant la **table densimétrique**, après tri, une **augmentation de la concentration de la fraction 1, la moins dense, est observée**. La fraction 5, la plus dense, quant à elle montre **une diminution de la concentration en OTA (+/- 11 % du lot)**. Finalement, le modèle de tri *Fusarium* damaged kernel (FDK) (développé au sein du CRA-W) implémenté sur le trieur optique et infrarouge au grain à grain a également été appliqué. Cependant, l'OTA n'est pas une mycotoxine produite par *Fusarium* spp. C'est pourquoi, aucune tendance claire n'est observée après tri.

Le tri permet dans certains cas de **diminuer la concentration en DON et en OTA de certaines fractions**. Cependant, la pertinence du tri doit être évaluée en prenant compte du pourcentage de récupération du lot et du coût de l'opération. Il serait intéressant d'effectuer la même étude pour des concentrations initiales plus élevées et pour d'autres mycotoxines.

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la composition et de l'homogénéité des mélanges de semoules et de farines grâce à l'imagerie hyperspectrale

Contact : a.deryck@cra.wallonie.be, j.fernandez@cra.wallonie.be

- La valorisation des céréales à haute valeur ajoutée (blé dur, épeautre) exige des outils fiables pour garantir traçabilité et authenticité.
- L'imagerie hyperspectrale (HSI) permet un suivi rapide, non destructif et spatialement résolu de la composition et de l'homogénéité des mélanges.
- **Objectif : Développer une méthode combinant HSI et machine learning pour prédire composition et homogénéité.**

Acquisition des données

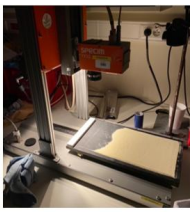
Froment – Blé dur



275 échantillons froment - blé dur



Homogénéisation selon 5 temps de mélange



Mesure sur Specim FX10 (400-1000 nm)

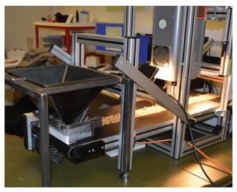
Froment – Epeautre



9 échantillons froment - épeautre



Homogénéisation selon 20 temps de mélange

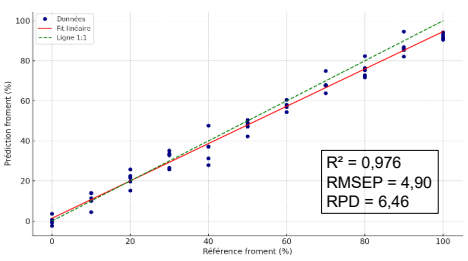


Mesure sur SWIR push broom system (1100-2400 nm)

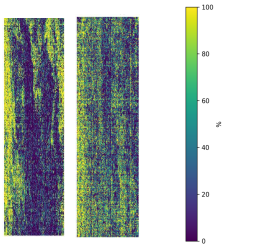
Prédiction de la composition

- PLS calibrées sur les spectres moyens de 80% des échantillons pour froment-blé dur et 66% pour froment-épeautre et optimisées par 10-fold CV.
- Modèles appliqués aux pixels individuels des échantillons. Génération de cartes de concentration + composition moyenne des mélanges. Performances calculées sur compositions moyennes des échantillons de validation (20% pour froment-blé dur, 33% pour froment-épeautre).

Performances PLS (9 LV) froment-blé dur très satisfaisantes et cartes de concentration suivent la tendance attendue (homogénéisation augmente avec temps de mélange)

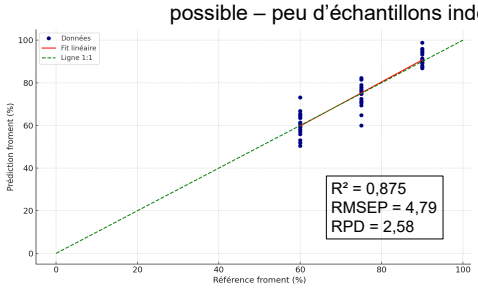


Référence vs Prédictions proportion froment

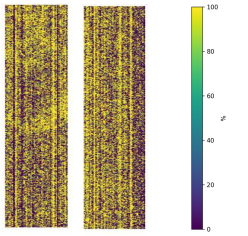


Cartes d'abondance froment à 0 s (gauche) et 120 s (droite) de temps de mélange

Performances PLS (17 LV) froment-épeautre correctes mais homogénéité semble presque atteinte à 0 s sur cartes de concentration (surajustement possible – peu d'échantillons indépendants)



Référence vs Prédictions proportion froment



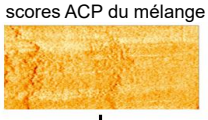
Cartes d'abondance froment à 0 (gauche) et 900 s (droite) de temps de mélange

Prédiction de l'homogénéité

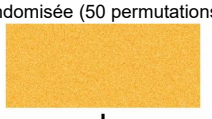
- Homogénéité calculée via l'algorithme sur base des cartes d'abondance PLS et scores ACP

Algorithme Homogénéité

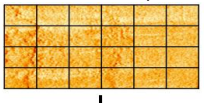
Carte d'abondances ou de scores ACP du mélange

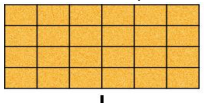


Carte d'abondance/score ACP randomisée (50 permutations)



Création de macropixels = Fenêtre glissante de taille de pixel fixe





Ecart type moyen sur les dimensions pour chaque macropixel

$$SD_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}(S_{ij} - \bar{S}_i)^2}{n-1}} \qquad Mean\ SD = \frac{\sum_{l=1}^{h} SD_l}{h}$$

n = number of pixels per macropixels
h = number of dimensions (PC)

Moyenne des écarts types pour l'image originale et la version randomisée

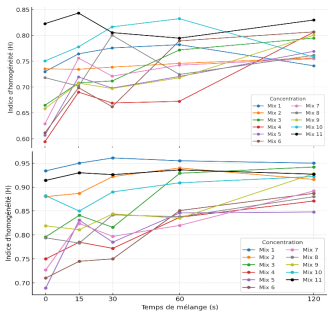
$$GMSD_{original} = \frac{\sum_{l=1}^{m} Mean\ SD_l}{m} \qquad GMSD_{random} = \frac{\sum_{l=1}^{m} Mean\ SD_l}{m}$$

m = number of macropixels

Obtention de l'indice d'homogénéité

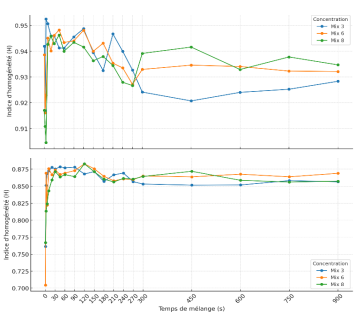
$$H\% = \frac{GMSD_{original}}{GMSD_{random}}$$

Indices calculés sur prédictions PLS et sur scores ACP suivent la tendance attendue (augmentent avec temps de mélange)



Evolution de l'homogénéité froment-blé dur sur base des prédictions PLS (haut) et des scores PC1 (bas)

Indices calculés sur prédictions PLS varient peu (PLS à améliorer). Indices calculés sur scores ACP suivent la tendance attendue.



Evolution de l'homogénéité froment-épeautre sur base des prédictions PLS (haut) et des scores PC1 (bas)

- L'HSI associée à des modèles de machine learning permet un contrôle simultané de la composition et de l'homogénéité en cours de mélange.
- Méthode non destructive et continue, transférable à d'autres secteurs (agroalimentaire, pharmaceutique).
- Performances dépendantes de la capacité à discriminer **spectralement** les constituants.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Evaluation de la composition et de l'homogénéité des mélanges de farines et de semoules grâce à l'imagerie hyperspectrale

Contact : a.deryck@cra.wallonie.be

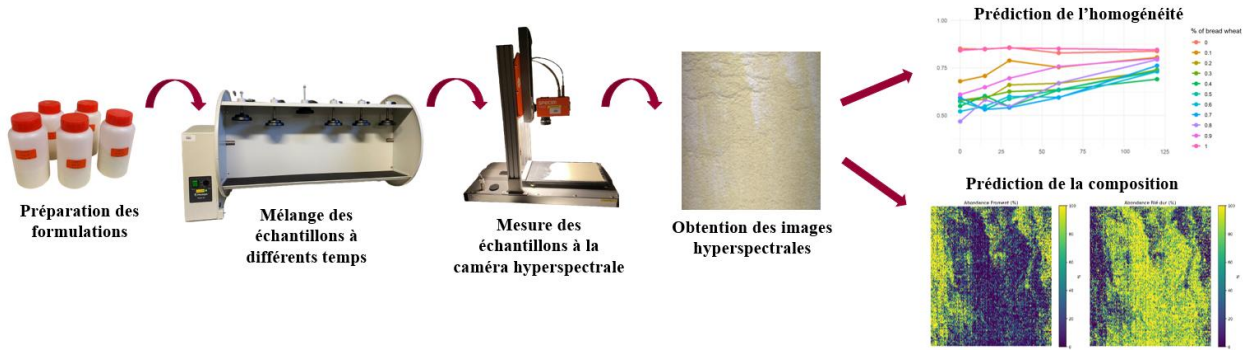
Mots-clefs : Semoules, Adultération, Homogénéité, Imagerie hyperspectrale

Introduction

Le regain d'intérêt pour des **céréales différenciées** (épeautre, blé dur) renforce l'exigence d'**authenticité des produits** transformés. L'écart de prix avec le froment peut conduire à des formulations partiellement substituées, parfois peu explicitées, d'où la nécessité de **détecter et quantifier les composants** pour préserver la transparence et la valeur des filières. Au-delà de la composition, l'**homogénéité du mélange** conditionne la qualité finale. Un temps de mélange trop court mène à des formulations hétérogènes, alors qu'un temps de mélange trop long devient coûteux et peut favoriser le dé-mixage. Les méthodes de référence, efficaces mais lentes et destructives, se prêtent mal à un suivi en continu. L'**imagerie hyperspectrale en proche infrarouge** représente une alternative rapide, non destructive et est compatible avec un contrôle continu. Cette étude poursuit un double objectif : (1) mesurer la **composition des formulations** en poudre et (2) suivre leur **homogénéité** pendant l'opération de mélange à partir d'images hyperspectrales.

En pratique

Des formulations de **semoules de froment–blé dur** et de **farines de froment–épeautre** ont été préparées selon plusieurs ratios, puis suivies à différents temps de mélange au moyen d'une caméra hyperspectrale. Les acquisitions ont servi à produire des cartes de composition permettant d'estimer les proportions froment-blé dur et froment-épeautre ainsi que des indicateurs d'homogénéité calculés à partir d'**analyses supervisées** et **non supervisées**. L'ensemble permet d'observer **l'évolution spatiale des formulations** en poudre au cours du **processus de mélange** tout en contrôlant les proportions des composants.



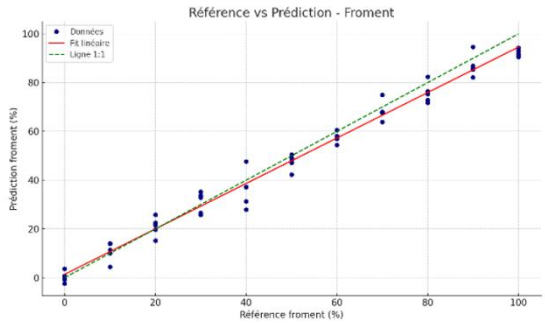
Résumé graphique de l'étude réalisée

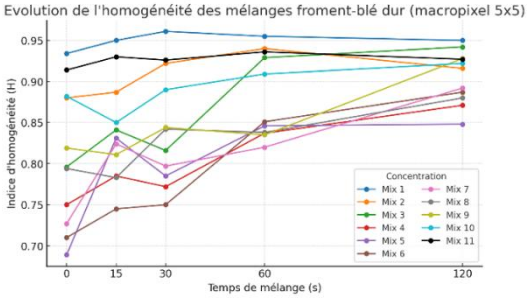
Performances

Sur le couple **froment–blé dur**, les modèles de composition fournissent des **résultats compatibles avec un contrôle de routine** et les cartes associées mettent en évidence une répartition cohérente des constituants au sein des images. L'indice d'homogénéité augmente au fil du temps de mélange, ce qui traduit une convergence progressive vers un état homogène, particulièrement visible pour des formulations aux ratios intermédiaires.

ValCerWal

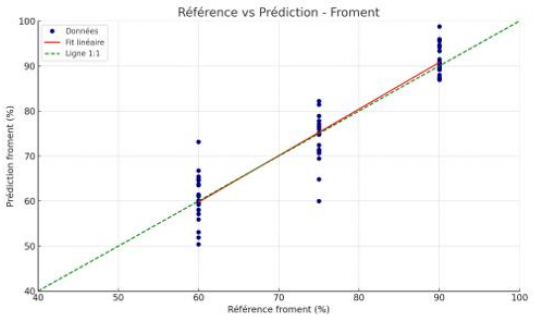
Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

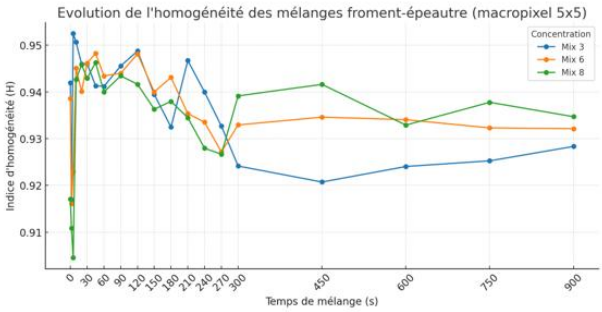




Prédiction de la composition (à gauche, en % de froment) et de l'homogénéité (à droite) des échantillons froment-blé dur

Sur le couple **froment–épeautre**, les **performances apparaissent fragiles**. Une séparation spectrale moins marquée et un effet de jour de mesure influent fortement sur les analyses. Les cartes de concentrations obtenues ne reflètent pas de manière fiable l'évolution attendue pendant le mélange. En l'état, ce jeu requiert une standardisation plus stricte et un échantillonnage élargi avant tout déploiement en routine. Les estimations d'homogénéité basée sur une approche non-supervisée (Analyse en Composantes Principales) sont plus réalistes mais ne permettent pas d'obtenir simultanément les informations de composition.





Prédiction de la composition (à gauche, en % de froment) et de l'homogénéité (à droite) des échantillons froment-épeautre

Conclusion et perspectives

L'imagerie hyperspectrale en proche infrarouge offre une **voie rapide et non destructive pour mesurer la composition et suivre l'homogénéité des formulations** de semoules et de farines au sein de la filière céréalière. Les résultats obtenus sur le couple **froment–blé dur** montrent que **l'intégration en routine est possible**. La transférabilité vers d'autres formulations est envisageable dès lors que les composants sont nettement discriminables spectralement. Pour le **froment–épeautre**, **un renforcement du plan expérimental** (standardisation des acquisitions, augmentation des lots indépendants, ajout de spectres de référence ou recours à des approches auto-supervisées) est recommandé avant tout déploiement industriel.

En Wallonie, où l'épeautre reste minoritaire mais en développement et où la transformation locale constitue un enjeu fort, ces outils peuvent **valoriser les céréales régionales**, **renforcer la traçabilité** et **consolider la confiance dans les circuits courts**. Leur intégration en routine ouvre en outre la voie à des mesures en continu, non destructives et sans préparation d'échantillon, autorisant un suivi plus fréquent des lots, l'ajustement des temps de mélange et, à terme, une réduction de lots non-conformes.

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal : Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

Gestion des données relatives aux échantillons

Contacts : m.joissains@cra.wallonie.be; p.vermeulen@cra.wallonie.be

-CRAWLSPEC-

A solution for spectral data management

Scope

In order to centralize and facilitate access to spectral data derived from vibrational spectroscopy and the corresponding metadata, the CRA-W is developing an original solution called CRAWLSPEC: Centralised Reference Analytical Web-accessible Library of SPECtra

1. Spectra acquisition Multi devices

At the CRA-W, there are plenty of different NIR/MIR/RAMAN devices (+/-30) for spectral data acquisition on-site. Most of those devices have a specific format extention (SPC, NIR, BRUKER, ASD,...). Therefore there is a real need to be able to extract the data from the raw files in order to insert them in a centralized database system.

2. Manager C# Desktop App

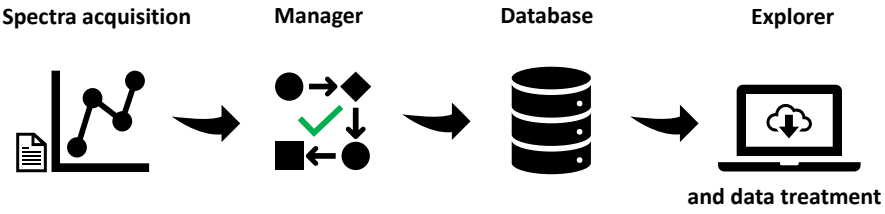
The CRAWLSPEC-Manager has for purpose to ensure the integrity of the data and their insertion into database. It is also used for metadata management (sample information, quantitative/qualitative parameters, experimental condition,...).

3. Database SQL Server

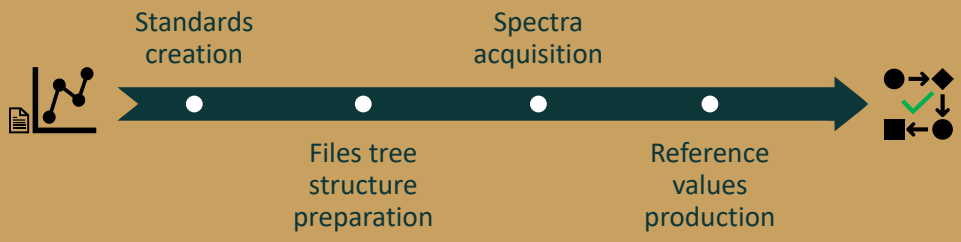
The database is used to store spectra and any related data. As much relevant data/metadata is stored in order to have the most complete and useful system.

4. Explorer ASP.NET Web App

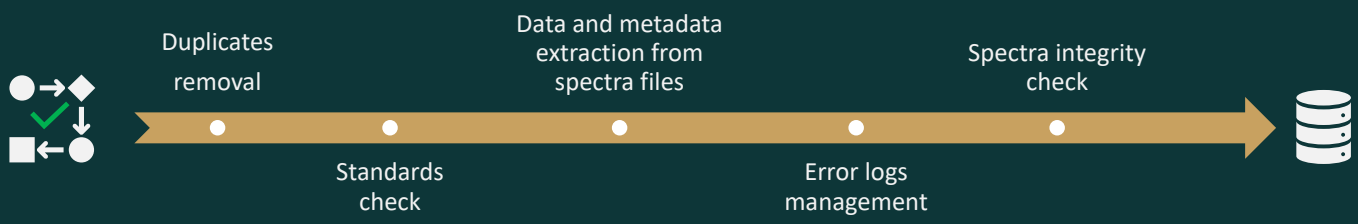
In order to extract data from the database, a web application, the CRAWLSPEC-Explorer, was built with different search criteria. Users can search data according to project, product, year, device,... and get them in JDX/CSV format. A comprehensive user management system is also in place, allowing each user to be granted personalised access to each dataset according to his/her needs.



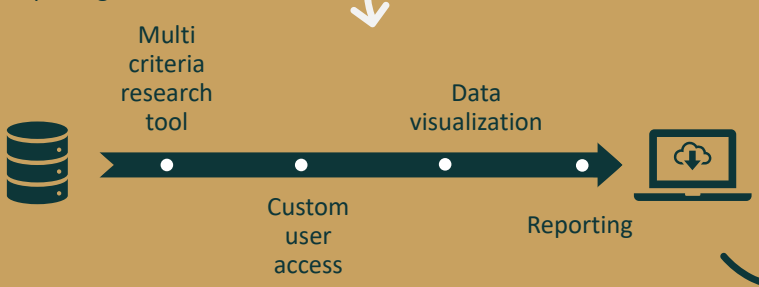
1. Checking, from spectra acquisition to Manager



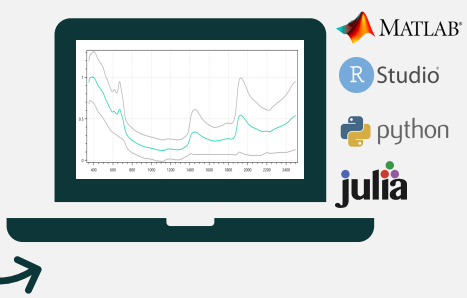
2. Centralizing, from Manager to database



3. Exploring, from database to Explorer



4. Processing, from Explorer to data treatment



What's next ?

- New spectra formats
- Spectra quality checking
- Data management improvement
- Data exploitation tools

Wallonie recherche CRA-W
Centre wallon de Recherches agronomiques
Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be
CePICOP
COLLÈGE des PRODUCTEURS
Wallonie agriculture SPW
Wallonie Relance
Projet N°204/2
Avec le soutien de la Wallonie

ValCerWal

Comment améliorer la VALorisation des CERéales WALlonnes ?

E1 – Gestion des données relatives aux échantillons

Contacts : m.joissains@cra.wallonie.be, p.vermeulen@cra.wallonie.be

Mots-clefs
Base de données, Données de référence, Librairies spectrales, CRAWLSPEC, Application web, Céréales

Introduction

Afin de centraliser et de faciliter l'accessibilité aux données spectrales issues de la spectroscopie vibrationnelle et aux métadonnées correspondantes, le CRA-W a développé une solution originale dénommée **CRAWLSPEC** (**C**entralised **R**eference **A**nalytical **W**eb-accessible **L**ibrary of **SPEC**tra).

En pratique

CRAWLSPEC regroupe les outils nécessaires pour l'alimentation et l'exploitation de la base de données en se basant sur 4 fonctionnalités principales : la **centralisation** et l'**intégration** des données qui constituent la méthodologie pour regrouper les données, ainsi que l'**extraction** et l'**exploitation** des données qui constituent les résultats de la base de données (Figure 1).

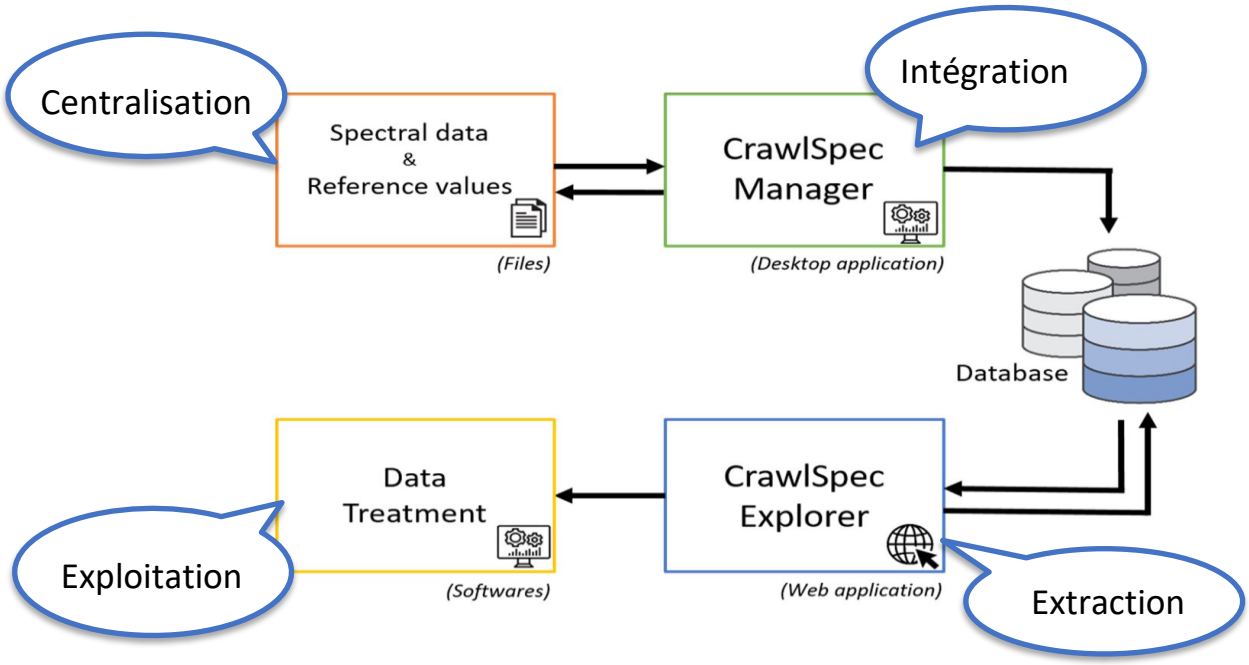


Figure 1 – Système d'informations spectrales CRAWLSPEC

L'étape préliminaire à la centralisation et à l'intégration des données dans une base de données est la mise en place de la sémantique pour identifier les différents objets repris dans la base de données, à savoir : les identifiants des échantillons, les catégories de produits ainsi que les paramètres analytiques qualitatifs et quantitatifs. Ainsi, chaque lot d'échantillons et chaque échantillon ainsi que chaque donnée de référence et donnée spectrale sont **identifiés par un n° DQ**. Chaque échantillon est classé dans une **catégorie de produits** définie et en application au sein des laboratoires du département. Pour les besoins du projet, des groupes ont été créés pour classer les farines suivant le type de broyeur/moulin utilisé, permettant d'obtenir une granulométrie précise pour un usage spécifique. Chaque échantillon est aussi décrit par des métadonnées (paramètres qualitatifs) et par des données analytiques (paramètres quantitatifs). Chaque **paramètre qualitatif** est défini par un nom, une abréviation, un format, un type de données. Il est classé dans différentes catégories de paramètres et de produits. Pour les besoins du projet, en lien avec le triage et le broyage des céréales, une nomenclature a été définie pour identifier les trieurs et les fractions de tri ainsi que les moulins et les fractions de mouture. Les données analytiques concernent des **paramètres quantitatifs** des échantillons. Chaque paramètre est défini par un nom, une abréviation, une méthode analytique

associée, une unité de mesure. Il est classé dans différentes catégories de paramètres et de produits. Près de 150 paramètres de technologie céréalière ont été créés pour les besoins du projet.

Pour centraliser les **données de référence qualitatives et quantitatives**, issues des différents laboratoires et unités d'expérimentation internes et externes au CRA-W, une structure de fichier MS Excel a été mise en place. Les données de référence sont stockées, par lot DQ, suivant un modèle de fichier MS Excel qui reprend la liste de correspondance de chaque lot DQ auquel est ajouté le code produit, les paramètres qualitatifs et quantitatifs. Ces fichiers sont stockés sur le serveur de fichiers dans le dossier correspondant au projet.

En ce qui concerne les **données spectrales** acquises en laboratoire ou sur site, les fichiers sont stockés sous format propriétaire et dans une arborescence structurée en fonction du type d'instrument, de la catégorie de produit et du projet.

Une fois l'ensemble des données formatées en utilisant la sémantique qui a été définie, une application informatique locale (**CRAWLSPEC Manager**) vise à intégrer les informations dans une base de données centralisée et sécurisée, tout en vérifiant leur intégrité.

Afin de faciliter l'exploitation des données de la base CRAWLSPEC, une application web (**CRAWLSPEC Explorer**) a été créée. Elle est destinée à soumettre des requêtes à la base de données. Cette interface conviviale permet d'extraire les données spectrales et les métadonnées qui y sont liées. Cela peut se faire suivant des requêtes standardisées sur une catégorie de produits ou un projet. Les résultats sont exportés sous différents formats de fichier suivant les spécifications de l'utilisateur. Elles peuvent ensuite être exploitées pour le développement de modèles de classification (données qualitatives) ou de régression (données quantitatives).

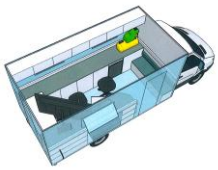
Par ailleurs, afin de faciliter le travail de développement des équations, un outil de conversion de format de fichier (**CRAWLSPEC Converter**) a été créé afin de convertir le fichier de données dans le format accepté par le logiciel de modélisation propre à chaque marque d'instrument.

CRAWLSPEC explorer propose aussi un onglet **« Report** » permettant de réaliser un rapport qui compile le nombre de spectres et de données de référence associées par produit, par projet et par spectromètre.

Toutes les données spectrales et les données de référence associées obtenues sur des échantillons issus des récoltes 2022, 2023 et 2024 ou d'autres jeux d'échantillons de projets précédents ont été intégrées dans la base de données CRAWLSPEC. Le projet ValCerWal a permis ainsi de centraliser toutes les données analytiques générées sur grains et farines, pour chaque espèce de céréales, par les différents laboratoires, en particulier les données technologiques et les données liées aux fractions de tri. Toutes ces données sont disponibles sur demande auprès du CRA-W-U12, sous un format csv. Tout ceci est décrit par ailleurs en détail dans 2 livrables du projet, intitulés « CRAWLSPEC : collecte des données » et « CRAWLSPEC : exploitation des données ».

Conclusion et perspectives

CRAWLSPEC permet de pérenniser l'exploitation des données pour le développement de modèles de calibration et de discrimination. Cet outil de gestion de données spectrales permet d'accompagner les acteurs des secteurs agricole et alimentaire dans la mise en œuvre de l'Industrie 4.0. Elle contribue à partager l'expertise du CRA-W dans le domaine des capteurs optiques et de la modélisation.





MOBILAB : Laboratoire mobile pour la démonstration de l'application des capteurs et analyseurs innovants en agriculture et agro-alimentaire



La 4ème révolution industrielle est en marche ! Elle se traduit par une évolution rapide de nos systèmes de production et de transformation vers **l'industrie 4.0**. Celle-ci désigne une nouvelle génération de moyens de production, robotisés et intelligents. Avec la révolution numérique, les frontières entre les mondes physiques et digitales s'amenuisent pour donner vie à des fermes, à des circuits de production et des industries de transformation 4.0 interconnectés dans lesquelles les collaborateurs, les machines et les produits interagissent. La 4ème révolution industrielle passe notamment par le développement de capteurs et d'analyseurs de terrain pour le suivi des productions et l'analyse des produits. En lieu et place d'amener l'échantillon au laboratoire, ces nouveaux outils innovants deviennent des outils incontournables pour assurer *in situ* la qualité, la sécurité et la traçabilité des productions agricoles et des produits agro-alimentaires.

Le laboratoire mobile « Mobilab » constitue un outil de pointe **dédié à la démonstration et à la recherche dans le domaine de l'utilisation des capteurs et des analyseurs innovants en agriculture et en agro-alimentaire**. Il a été conçu et réalisé dans le cadre du projet Mobilab, un des projets du programme Smart Farming, financé par le Plan de Relance de Wallonie 2022-2025. La réception finale du laboratoire mobile a été faite au CRA-W le 27/5/2025.

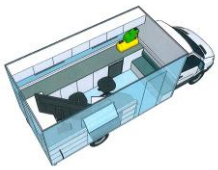
Le Mobilab offre une **solution complète** pour mener des missions de démonstration et de recherche directement sur le terrain. Depuis la gestion des échantillons (échantillonnage, collecte, conditionnement) jusqu'à leur analyse et à la collecte des données (grâce à l'outil CRAWLSPEC manager & explorer), tout est pensé pour que le laboratoire mobile fonctionne **en totale autonomie**.

Le Mobilab est équipé **d'outils analytiques de pointe** notamment des spectromètres de spectroscopie vibrationnelle, un système d'imagerie hyperspectrale, des analyseurs rapides basés sur différentes technologies et une station météo. Ces équipements permettent de caractériser les produits agricoles et agro-alimentaires, de suivre leur transformation, et de détecter les contaminants ainsi que les stress (biologiques, chimiques et microbiologiques).

Grâce à des **supports audiovisuels** et à des démonstrations en direct, le Mobilab permettra de présenter diverses applications sur le terrain : à la ferme, dans les champs, en vergers ou encore au sein des entreprises. **Entièrement modulable**, il est adaptable à chaque mission afin de répondre aux besoins en matière de recherche, d'analyse ou de démonstration dans le cadre des projets et collaborations du CRA-W.

En amenant le laboratoire sur le terrain, cet outil vise à contribuer **à lever le frein existant en Région Wallonne quant à l'acceptation et l'utilisation de ces nouvelles technologies** par le monde agricole et par les entreprises wallonnes. Il vise ainsi à garantir la qualité, la sécurité et la traçabilité des productions agricoles et des produits agro-alimentaires.

Mobilab





Diverses démonstrations sont prévues dans le cadre du symposium ValCerWal, ciblées sur les nouvelles technologies :

- Prédiction de la teneur en protéine du froment avec un **spectromètre proche infrarouge portable** ;
- Evaluation du mitadinage dans une production de blé dur par **imagerie hyperspectrale proche infrarouge** ;
- **Tri optique** sur la qualité technologique ou sanitaire dans une production de céréales par spectroscopie proche infrarouge



Teneur en protéines
sur froment



Mitadinage
sur blé dur



Tri optique
sur céréales

ENVIE D'EN SAVOIR PLUS ?

Voir fiche projet **Mobilab** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/mobilab
ValCerWal sur https://www.cra.wallonie.be/fr/valcerwal

Contacts : Philippe Vermeulen (p.vermeulen@cra.wallonie.be)
Louis Paternostre (l.paternostre@cra.wallonie.be)
Corentin Demoitié (c.demoitie@cra.wallonie.be)
Pierre-Yves Werrie (p.werrie@cra.wallonie.be)
Vincent Baeten (v.baeten@cra.wallonie.be)

Mention : Le projet MOBILAB est financé par la fiche 142 du plan de relance de la Wallonie (PRW) – Programme Digital Wallonia Agriculture du futur.

Wallonie recherche CRA-W
LA FERME CONNECTÉE | digital wallonia .be
wagralim APPETITE FOR INNOVATION
Wallonie Relance

Démonstration : Buchi NeoSpectra™



CONTEXTE & OBJECTIF

Démonstration de l'évaluation rapide et fiable de la **qualité des céréales**, essentielle pour les producteurs, coopératives et industriels. Les méthodes rapides par spectroscopie proche infrarouge **en laboratoire** nécessitent le transport de l'échantillon vers le laboratoire. L'utilisation d'un **spectromètre portable** comme le NeoSpectra, offre une alternative efficace et rapide **sur site**.



Si-Ware : Mesure de grains à la source



NeoSpectra™ et interface

AVANTAGES

- **Mobilité** : Analyse sur terrain, silos, etc.
- **Rapidité** : Prédiction en quelques secondes de plusieurs paramètres
- **Simplicité** d'utilisation
- **Coûts réduits**
- **Large gamme spectrale** 1350-2550 nm

PERFORMANCES

Performances prometteuses pour l'humidité et la teneur en protéines sur froment.

	Moyenne	ET	SEC	R^2	SECV	RPD	Nbre de groupes
Humidité	13,6	0,97	0,24	0,94	0,35	2,8	3
Protéines	11,8	2,03	0,46	0,95	0,63	3,2	3

ET: Ecart-type; SEC/SECV: standard Error of Calibration/Cross-validation; R^2: coefficient de détermination; RPD: Residual Prediction Deviation

Dans l'état actuel des recherches, les performances obtenus avec ce type de spectromètre portable sur le pois sont fiables. Des modèles de calibration sur froment sont en cours de développement. Les modèles doivent être enrichis avec un plus grand nombre d'échantillons pour améliorer la robustesse. Une validation indépendante est également requise.

Démonstration : Buchi NeoSpectra™



EN PRATIQUE

- **Collecte** d'échantillons de +/- 300 g





- **Mesure sur site** avec le Neospectra
  - par contact direct
  - à l'aide de la coupelle rotative

RÉSULTATS

Application smartphone connectée au cloud pour une prédiction en temps réel.





ENVIE D'EN SAVOIR PLUS ?

Voir fiche projet **Mobilab** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/mobilab

Contacts : Philippe Vermeulen (p.vermeulen@cra.wallonie.be)
Louis Paternostre (l.paternostre@cra.wallonie.be)

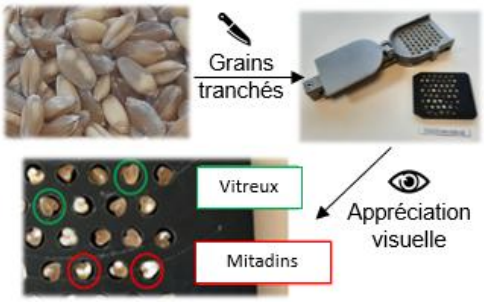
Mention : Le projet MOBILAB est financé par la fiche 142 du plan de relance de la Wallonie (PRW) – Programme Digital Wallonia Agriculture du futur.



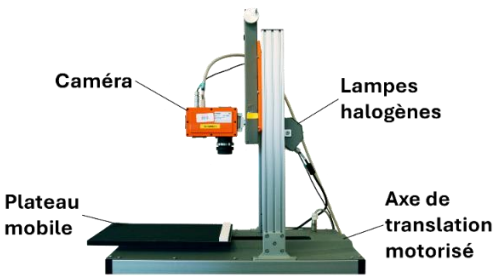
CONTEXTE ET OBJECTIF

Démonstration de l'évaluation rapide du **taux de mitadinage** d'un lot de grains de blé dur, analyse typiquement fastidieuse et peu répétable.

Cette étude, réalisée dans le cadre du projet ValCerWal, montre que l'utilisation d'un système d'**imagerie hyperspectrale proche infrarouge,** tel que le *SPECIM FX17 LabScanner,* est une alternative prometteuse d'évaluation.



Méthode de référence d'évaluation du mitadinage



Specim FX17 & LabScanner

AVANTAGES

- **Méthode d'évaluation automatisée, rapide et non-destructive**
- **2 modes de mesure étudiés :**
  - Sur **2 x 50 grains** (cf. méthode de référence)
  - Sur un échantillon en vrac de **100 g** (plus représentatif du lot)

PERFORMANCES

Bonne identification des grains véritablement vitreux, erreurs occasionnelles principalement dues aux grains partiellement mitadins.

- **Évaluation du mitadinage au grain par grain**

	Sensibilité	Spécificité
Détection de grains mitadins	73,5 %	92,4 %

- **Evaluation de pixels mitadins dans une couche de 100 g de grains**

	Sensibilité	Spécificité
Détection de pixels mitadins	70,6 %	97,0 %

Dans l'état actuel des recherches, ces caméras permettent d'obtenir une estimation du taux de mitadinage d'un lot avec une erreur équivalente à la méthode de référence.

Mobilab

Démonstration : SPECIM FX17 LabScanner



VALCERWAL

EN PRATIQUE

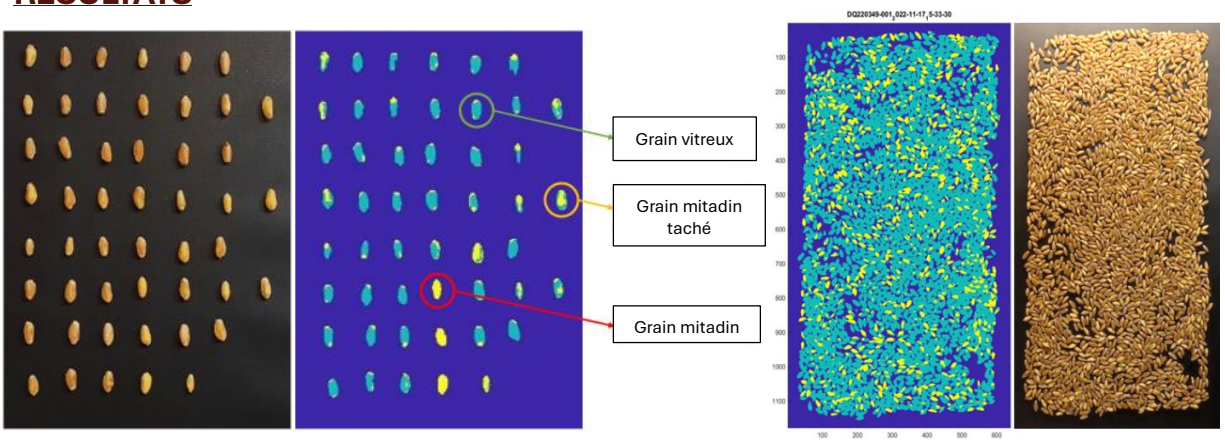
Mesure de 2 x 50 grains



Mesure de 100 g de grain



RÉSULTATS



Les images prédites présentent des grains ou portions de grain mitadins (en jaune) et des grains ou portions de grain vitreux (en bleu). Les résultats sont exprimés à l'échelle du grain (mitadin ou vitreux) lors de l'analyse grain par grain, et en pourcentage de pixels prédits mitadins lors de l'analyse en vrac.

ENVIE D'EN SAVOIR PLUS ?

Voir fiche projet **ValCerWal** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/valcerwal
Voir fiche projet **Mobilab** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/mobilab

Contacts : Philippe Vermeulen (p.vermeulen@cra.wallonie.be)
Corentin Demoitié (c.demoitie@cra.wallonie.be)

Mention : Application développée dans le cadre du projet VALCERWAL et mise en démonstration dans le laboratoire mobile du projet MOBILAB (fiche 142 du plan de relance de la Wallonie (PRW) – Programme Digital Wallonia Agriculture du futur).

Wallonie recherche CRA-W
LA FERME CONNECTÉE | digital wallonia .be
wagralim APPETITE FOR INNOVATION
Wallonie Relance

Mobilab

Démonstration : SPECIM SWIR et FX17



VALCERWAL

CONTEXTE & OBJECTIF



Démonstration de l'évaluation rapide de la **pureté** et l'état sanitaire d'un lot de **céréales**, analyses typiquement longues et fastidieuses.

Cette étude, réalisée dans le cadre du projet ValCerWal, montre que l'utilisation de systèmes d'**imagerie hyperspectrale proche infrarouge,** tels que *SPECIM FX17* et *SWIR*, est une alternative prometteuse pour détecter et quantifier la présence d'impuretés.

AVANTAGES

- Méthode **automatisée**, **rapide** et **non-destructive.**
- Utilisation d'une **caméra PIR** permettant de mesurer les grains sur une **bande transporteuse**.
- 2 gammes spectrales envisagées : 1000-1700 nm et 1000-2500 nm.
- Plusieurs catégories d'**impuretés** détectées (datura, sclérotes d'ergot, graines étrangères, plastiques, graviers ...).
- Différentes **espèces de céréales** prises en compte (froment, seigle, triticale et blé dur).

PERFORMANCES

Modèle	Classes	1000-1700 nm		1000-2500 nm	
		Sensibilité [%]	Spécificité [%]	Sensibilité [%]	Spécificité [%]
Modèle 1	Sol & graviers vs. Reste	90,9	91,4	99,3	97,0
Modèle 2	Déchets plastiques vs. Reste	99,2	100,0	99,2	100
Modèle 3	Insectes vs. Reste	87,2	96,5	96,3	98,2
Modèle 4	Résidus de récolte & boutons floraux vs. Reste	80,6	77,8	85,3	85,4
Modèle 5	Grains cariés vs. Reste	71,6	89,0	77,2	89,8
Modèle 6	Sclérotes d'ergot vs. Reste	87,6	95,8	92,9	97,4
Modèle 7	Graines de datura vs. Reste	94,5	89,8	95,4	95,8
Modèle 8	Autres graines étrangères vs. Grains de céréales sains	90,5	89,9	94,1	94,8

Wallonie recherche CRA-W · LA FERME CONNECTÉE · digital wallonia .be · wagralim APPETITE FOR INNOVATION · Wallonie Relance

Mobilab

Démonstration : SPECIM SWIR et FX17

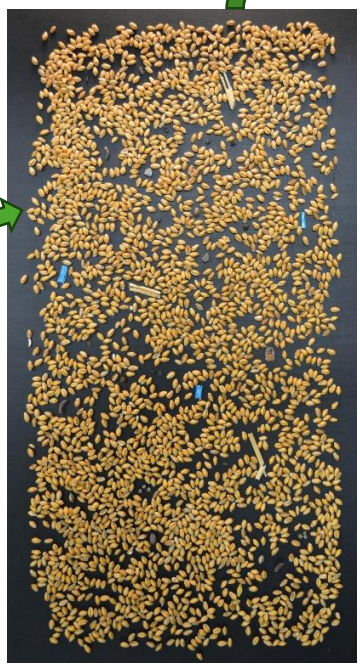


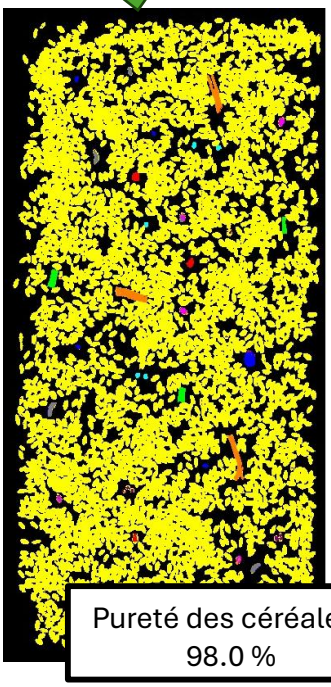
VALCERWAL

EN PRATIQUE



Mesure sur **bande transporteuse** avec la caméra **1000-2500 nm**





Pureté des céréales : 98.0 %

Détection de la **présence d'impuretés** et estimation de la **pureté** d'un échantillon de **céréales**

Légende	
	Grains de céréales sains
	Autres graines étrangères
	Graine de datura
	Sclérotes d'ergot
	Grains cariés
	Résidus de récolte & boutons floraux
	Insectes
	Déchets plastiques
	Sol & graviers
	Arrière-plan

La méthode permet de détecter de manière ciblée différentes catégories d'impuretés et fournit une estimation de la pureté du lot de céréales ainsi que la prévalence spécifique des différentes impuretés exprimée en pourcentage de pixels.

ENVIE D'EN SAVOIR PLUS ?

Voir fiche projet **ValCerWal** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/valcerwal
Voir fiche projet **Mobilab** sur https://www.cra.wallonie.be/fr/mobilab

Contacts : Philippe Vermeulen (p.vermeulen@cra.wallonie.be)
Corentin Demoitié (c.demoitie@cra.wallonie.be)

Mention : Application développée dans le cadre du projet VALCERWAL et mise en démonstration dans le laboratoire mobile du projet MOBILAB (fiche 142 du plan de relance de la Wallonie (PRW) – Programme Digital Wallonia Agriculture du futur).

Wallonie recherche CRA-W · LA FERME CONNECTÉE · digital wallonia .be · wagralim APPETITE FOR INNOVATION · Wallonie Relance

CePiCOP asbl

Centre Pilote wallon des Céréales et des Oléo-Protéagineux asbl

Le CePiCOP œuvre pour le développement et la vulgarisation des techniques liées aux cultures de **céréales**, d'**oléagineux** et de **protéagineux** en Wallonie, tant en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique.

Reconnu comme Centre Pilote par la Région Wallonne, le CePiCOP **encadre et conseille les agriculteurs sur les plans technique et économique**.

Cet engagement se traduit par une diversité de missions:



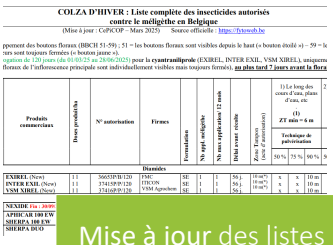
Expérimentation en céréales, oléagineux et protéagineux



Rédaction et publication d'avertissements hebdomadaires

Livre Blanc Céréales

Rédaction de synthèses



Mise à jour des listes de produits phytopharmaceutiques autorisés en Belgique



Organisation et animation de réunions (phytolicence ou non)



Conseil et encadrement des agriculteurs sur le plan technique



Expertise aux tiers *(ex: Biowallonie)*



Participation aux projets régionaux, nationaux et interrégionaux

Le CePiCOP est actif sur l'ensemble de la Wallonie. Ce travail est mené en **collaboration avec des partenaires** actifs dans le monde agricole:

LIÈGE université Gembloux Agro-Bio Tech — Province de Liège Agriculture CPL-Végémar — Wallonie recherche CRA-W — Province de HAINAUT Carah — Corder — ASBL OPA Qualité Ciney — Wallonie agriculture SPW

Contacts généraux :
✉ : info@cepicop.be
☎ : 081/62.21.39
Site internet :
: https://centrespilotes.be/cp/cepicop/
(ou via le QR code ci-contre)
Réseaux sociaux :

Avec le soutien de la Wallonie

COLLÈGE des PRODUCTEURS

Le **Collège des Producteurs** est une structure créée pour connecter les différents maillons des filières alimentaires, depuis les producteurs jusqu'aux acheteurs, transformateurs, institutions et citoyens.

- ➔ Des contacts permanent avec les autorités, décideurs, et acteurs de l'agriculture.
- ➔ Une équipe opérationnelle de chargés de mission et services transversaux.
- ➔ Composition du collège des producteurs : 44 agriculteurs (4 par filière) et 22 représentants d'associations agricoles (syndicats), de fédérations de la distribution (COMEOS) et des points de ventes indépendants en alimentation (APLSIA), de l'agroalimentaire, des associations de citoyens-conso (AB REOC, Ecoconso, ACRF), de l'environnement (CANOPEA).

En tant que **plateforme de dialogue** entre les différents acteurs du monde agricole en Wallonie l'objectif est de mieux organiser les filières agricoles, pour que chaque maillon – producteurs, transformateurs, distributeurs – travaille de manière plus cohérente et transparente. Cela contribue à renforcer la structure du secteur, favoriser une meilleure compréhension entre professionnels, et tendre vers un prix plus juste pour les producteurs.

---

1. **FACILITER DES INITIATIVES FILIÈRES :**

Animation de **commissions filières** (bovins, fruits, grandes cultures, etc.) - Élaboration de **plans stratégiques** de développement des filières pour servir de feuille de route aux acteurs filières privés/publics et décideurs - Remontée des réalités du terrain via **l'Observatoire mensuel des filières** agricoles- **Services directs aux producteurs** : intermédiation commerciale, mise à disposition de codes-barres, label Prix Juste Producteur

2. **ÊTRE UN POINT RELAIS DES INFORMATIONS FILIÈRES**

Le Collège développe également plusieurs outils et actions pour renforcer la compréhension mutuelle :

- Site www.celagri.be : dossiers thématiques neutres sur les pratiques agricoles
- Cartographies agricoles (abattoirs, moulins, aquaculteurs…)

3. **FAIRE VALOIR L'AVIS DES PRODUCTEURS**

COLLÈGE des PRODUCTEURS