

Centre wallon de Recherches
agronomiques

Tri optique infrarouge grain à grain comme outil de phénotypage haut débit technologique et sanitaire



Pierre-Yves Werrie, Corentin Demoitie, Philippe Vermeulen et Bruno Godin

Laboratoire de technologie et tri des céréales

Contexte

SK-NIR & tri

Phénotypage technologique

Plateforme de spectroscopie

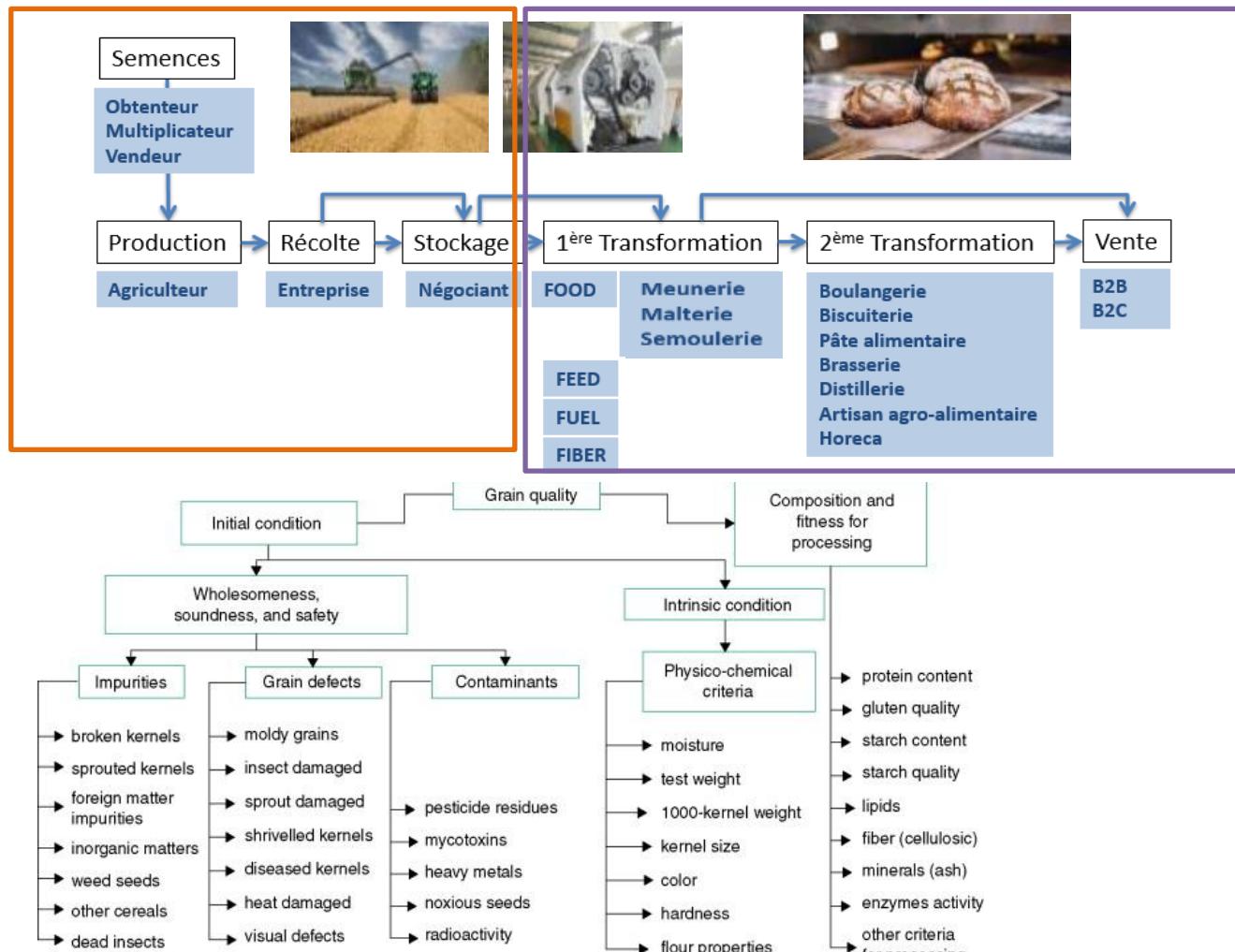
Application céréales

Perspective & conclusion

Garantir et maintenir la qualité

Vérifier et exploiter la qualité

La filière céréalier



Les attentes de qualité des céréales :

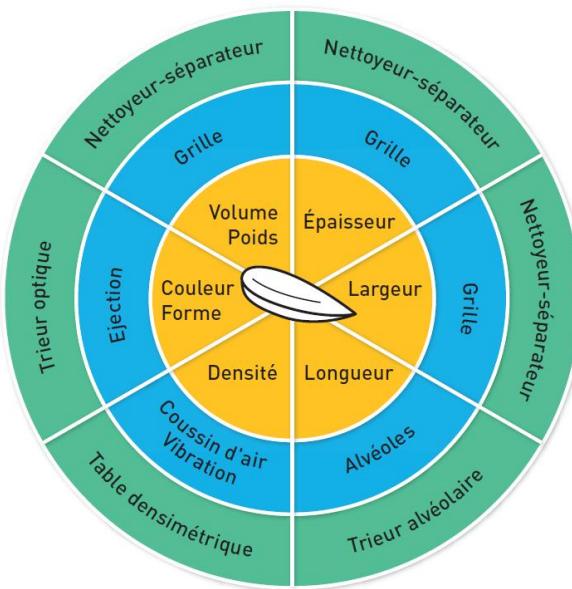
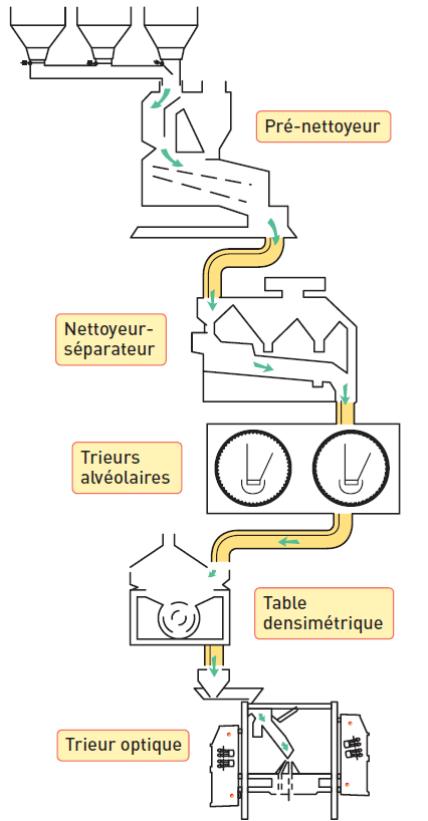
- Technologique
- Sanitaire

Baidhe, E., Clementson, C. L., Senyah, J., & Hammed, A. (2024)

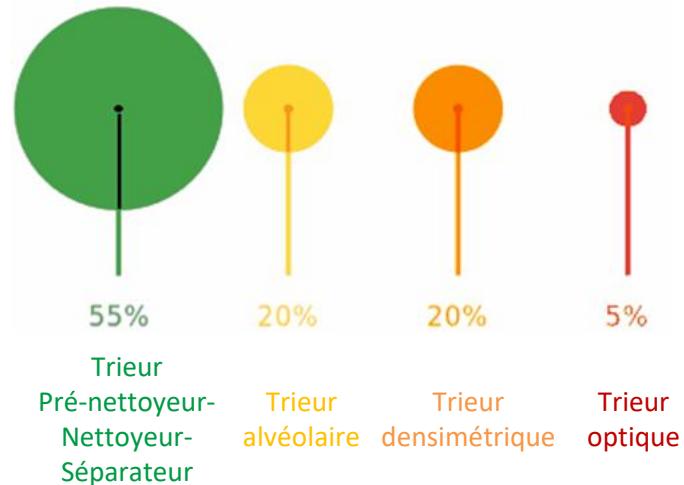
Leviers

Pré- récolte : Choix variétal & itinéraire technique

Post-récolte : Allotement et tri

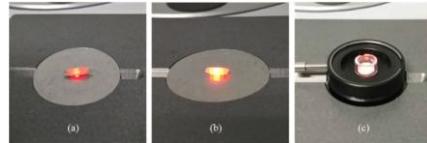


Répartition des déchets éliminés en production de semences



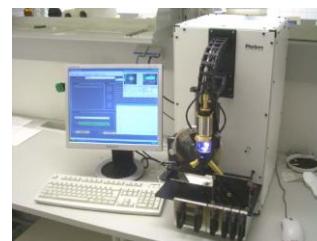
SEMAE 2022

Tri optique infrarouge grain à grain (Single-Kernel-NIR)



80' - NIR pour un seul grain (dureté, protéines)
Qualité et sélectionneurs

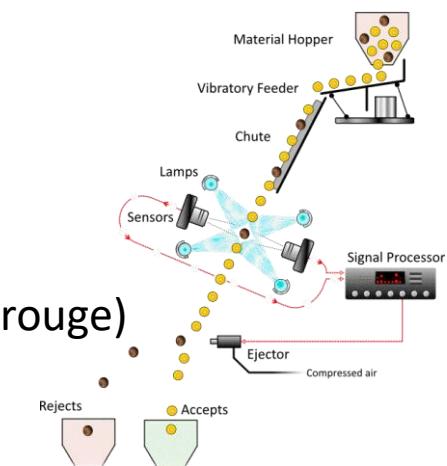
70' – NIR dans le champs des céréales



90'- NIR grain individuel et tri (automate)



Présent- application industrielle (T/h)



Principe de fonctionnement :

- Singularisation/Séparation des grains
- Détection (transmittance ou réflectance dans le proche infrarouge)
- Ejection (air comprimé)

Contexte

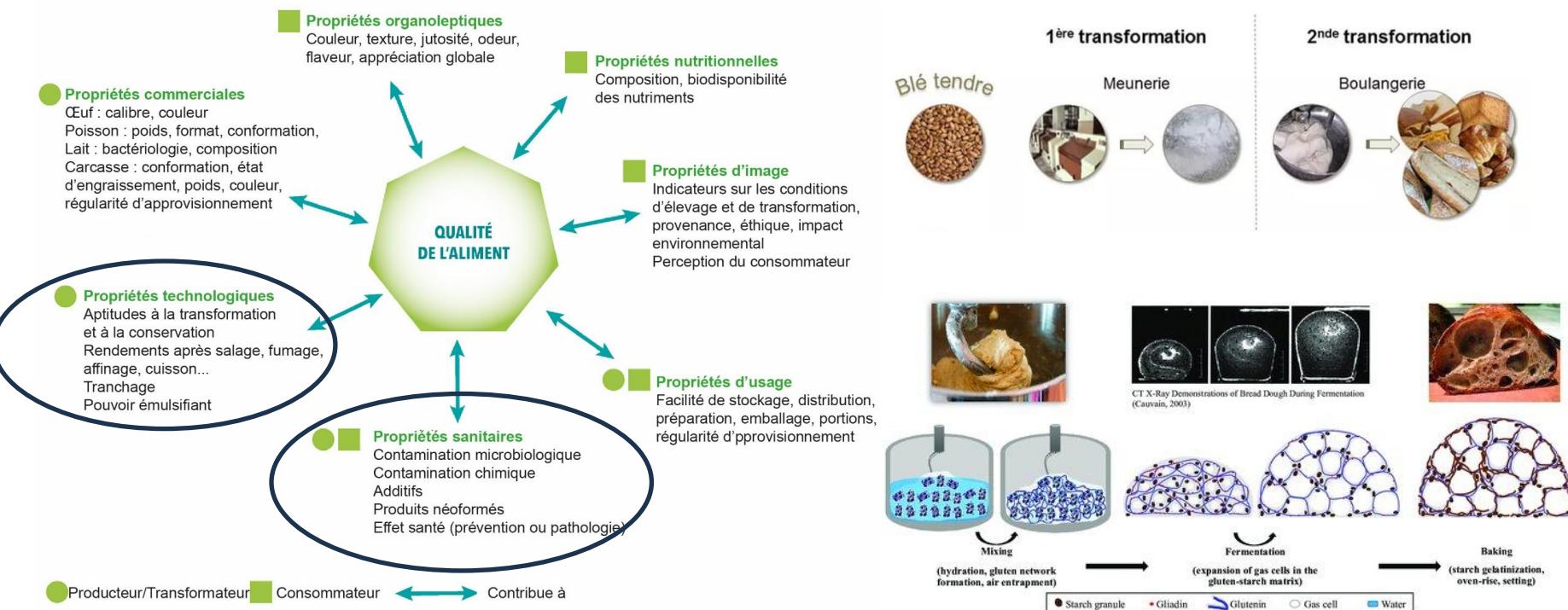
SK-NIR & tri

Phénotypage technologique

Plateforme de spectroscopie

Application céréales

Perspective & conclusion



Prache et al., 2022

Qualité technologique = Aptitude à la transformation

Aptitude à la transformation en lien avec des caractéristiques :

- **Physiques**
PMG, PS, Dureté, Humidité,..
- **Physico-chimiques**
Protéine, Amidon, Enzyme
- **Rhéo-fermentaires**
Rhéologique, Fermentaire

Classe de qualité (valeur commerciale)

Relative selon zone géographique et usage

Classes	Proteïnes en % de matière sèche	W en 10^{-4} joules/g	PS en kg/hl	Hagberg en seconde
Premium (A1)	> 11,5	> 170	> 77	> 240
Supérieur (A2)	> 11	Non spécifié	> 76	(> 220)
Medium (A3)	> 10,5	Non spécifié	Non spécifié	(> 170)
Access (A4)	Spécifique au contrat	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié

France Agrimer, 2022

Méthodes d'analyses	Caractéristiques technologiques étudiées		
	Gluten	Amidon	Alpha-amylase
- Poids à l'hectolitre (Poids spécifique)			
- Humidité par infrarouge ou conductivité			
- Protéines et Amidon par infrarouge			
- SDS/Redman Estimation force du gluten			- Hagberg (ou Stirring Number) Sans inhibition enzymatique
- Glutomatic Force et estimation nature du gluten		- Viscosimètre RVA et MCR Sans ou Avec inhibition enzymatique Propriétés rhéologiques à chaud et à froid	
- Mixolab Chopin + Stabilité gluten, absorption d'eau et propriétés rhéologiques à chaud et à froid			- Mixolab Chopin + Stabilité gluten, absorption d'eau et propriétés rhéologiques à chaud et à froid
- Zélény et sa mouture rapide Estimation force du gluten			- Alvéographe Chopin Force et nature du gluten
- Alvéographe Chopin Force et nature du gluten			

Qualité panifiable belge du froment	Améliorant	Premium	Supérieur
Variété	Q1A	Q1	Q2
Humidité (%)		≤ 14,5 (< 15,5)	
Hagberg(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 (ml)	≥ 40	≥ 35	≥ 30
Protéines (N*5,7 ; %MS)	≥ 12,0 (> 11,5) BIO : ≥ 11,5 (> 11,0)	≥ 11,5 (> 11,0) BIO : ≥ 11,0 (> 10,5)	≥ 11,0 (> 10,5) BIO : ≥ 10,5 (> 10,0)
Poids à l'hectolitre brut (kg/hl)		≥ 76,0 (> 73,0)	

Les valeurs entre parenthèses correspondent au seuil limite souple.

Projet FARWAL Vade Mecum sur la création d'une filière céréalière complète

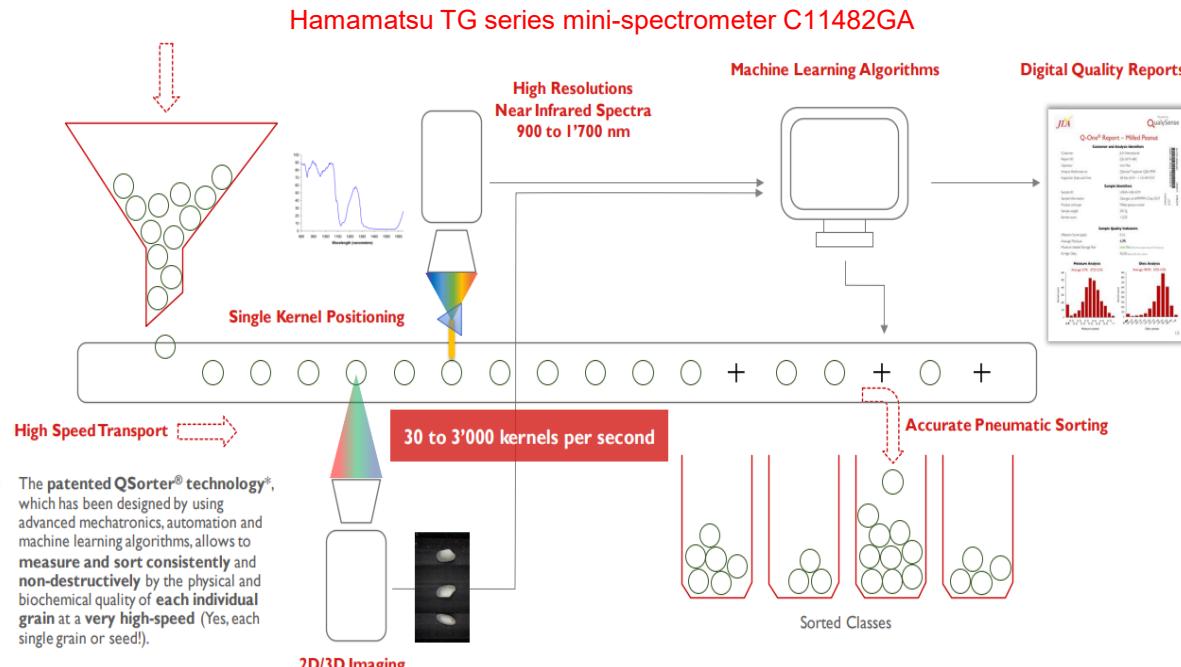
→ Classement des variétés et des itinéraires de production

Trieur Optique



Qsorter Explorer
Qualysense ©

20-30 ms/graine

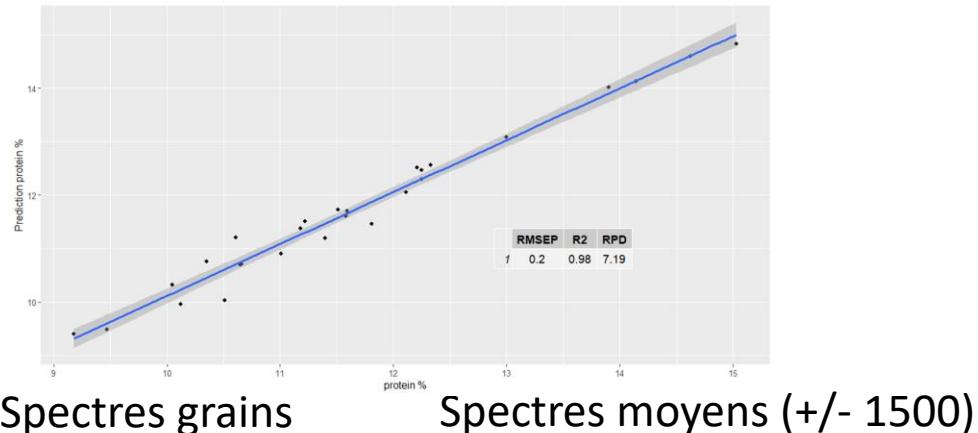


- 1. Acquisition : Spectre IR par réflexion 900-1700 nm et image RGB
- 2. Prédictions (machine learning)
- 3. Tri (seuil de coupure fixe ou variable)

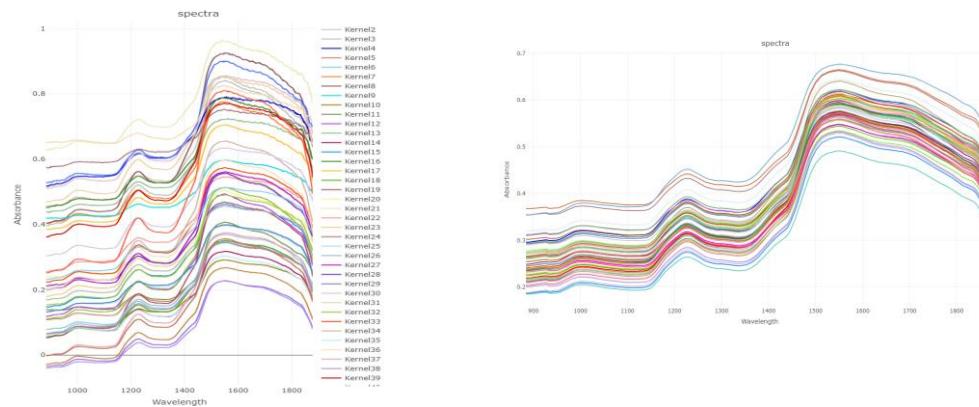
Machine learning :

Développement et implémentation de modèles **PLS-DA** et **PLS-R** :

Valeur(s) de référence(s)



Spectres



Pré-traitement :

- SNV
- Savitzky-Golay

Modèles de prédiction qualité technologique sur froment

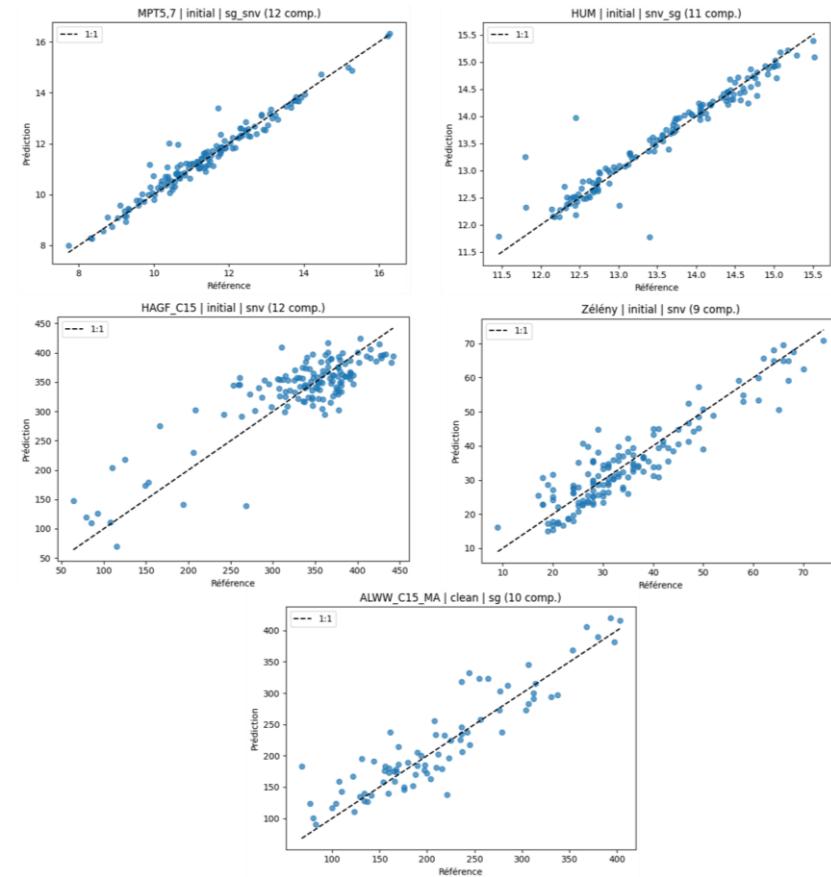
- 5 Preprocessing (RAW, SNV, Savitzky-Golay (11, 2, d = 1), SNV + SG, SG + SNV)
- Validation hold-out 80%/20% (Stratified Split sur valeurs de référence)
- Sélection nLV et preprocessing sur 10-fold CV

	Protéines	Humidité	Zélény	Hagberg	W
Unité	% (M.S.)	%	ml	s	10-4 J
Prétraitement	SG + SNV	SNV + SG	RAW	RAW	SG
N	707	707	707	707	400
Outliers (excluded)	0	0	0	0	0
Année de récolte	2022 – 2023 – 2024				
Min.	6.2	10.34	9	62	52
Max.	17.56	16.02	74	473	532
Moy.	11.37	13.61	34.98	329.65	210.78
SD	1.64	0.97	13.51	78.89	83.12
nLV	12	11	9	12	10
RMSECV	0.393	0.247	6.361	42.211	44.465
RMSEP	0.341	0.271	5.270	40.452	34.751
R²	0.950	0.917	0.843	0.731	0.810
RPD	4.50	3.49	2.53	1.94	2.31



Composition

Rhéologie



Applications potentielles dans



1) Automatisation du contrôle qualité



2) Amélioration de la qualité des lots



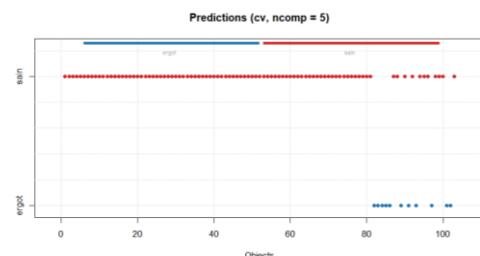
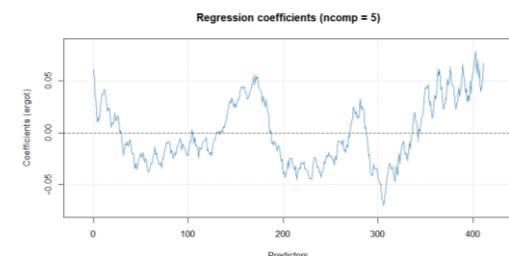
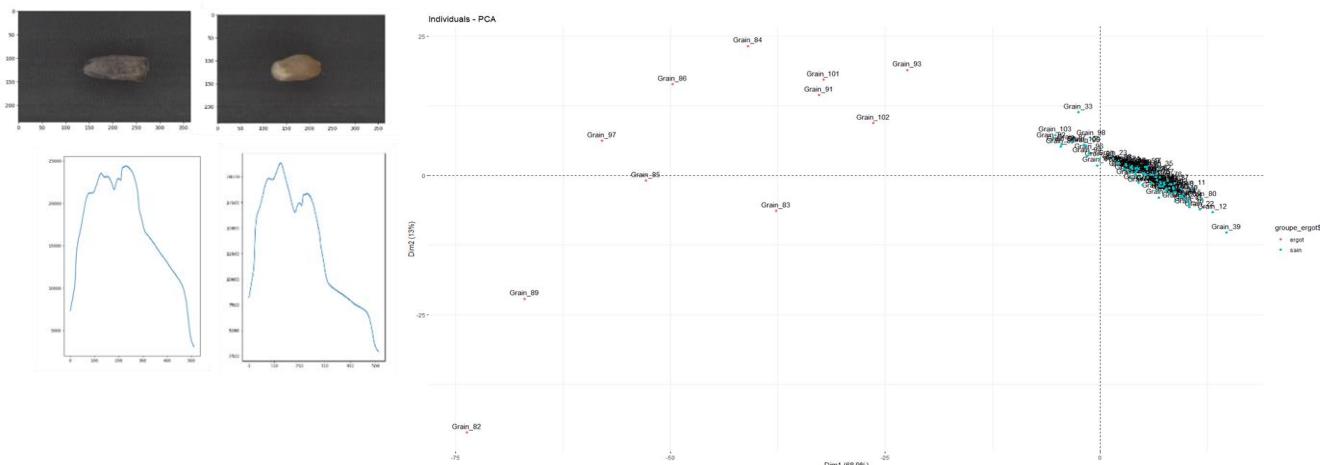
3) Appui à l'amélioration variétale

1) Automatisation du contrôle qualité (Détection des contaminants)

Qualité sanitaire : ergot (*Claviceps purpurea*)



Directive européenne 1399/2021, la présence de sclérotes dans les lots de céréales destinées aux denrées alimentaires ne doit pas dépasser 0.2 g/kg (3 à 5 sclérotes)

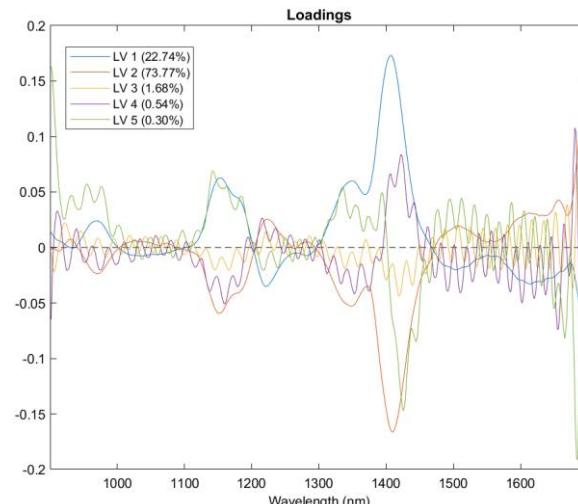
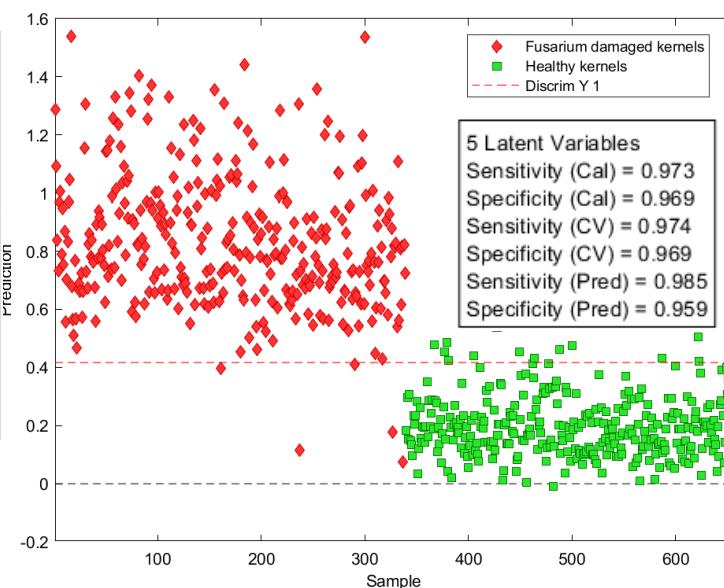
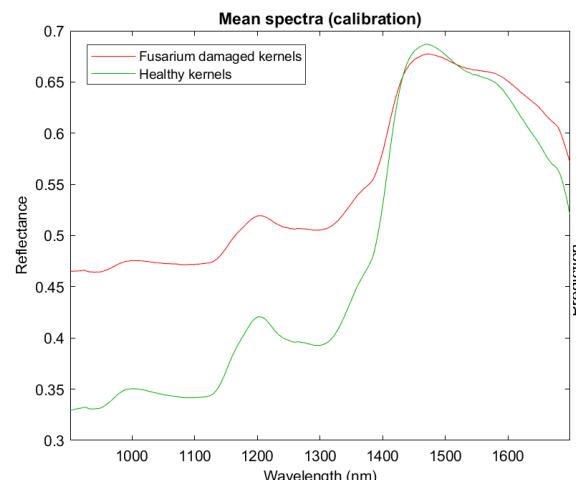


Méthodes « des contrôles officiels »
règlements EU 401/2006 et 691/2013

60 à 100 échantillons élémentaires (1 kg) dans une benne de 30 tonnes

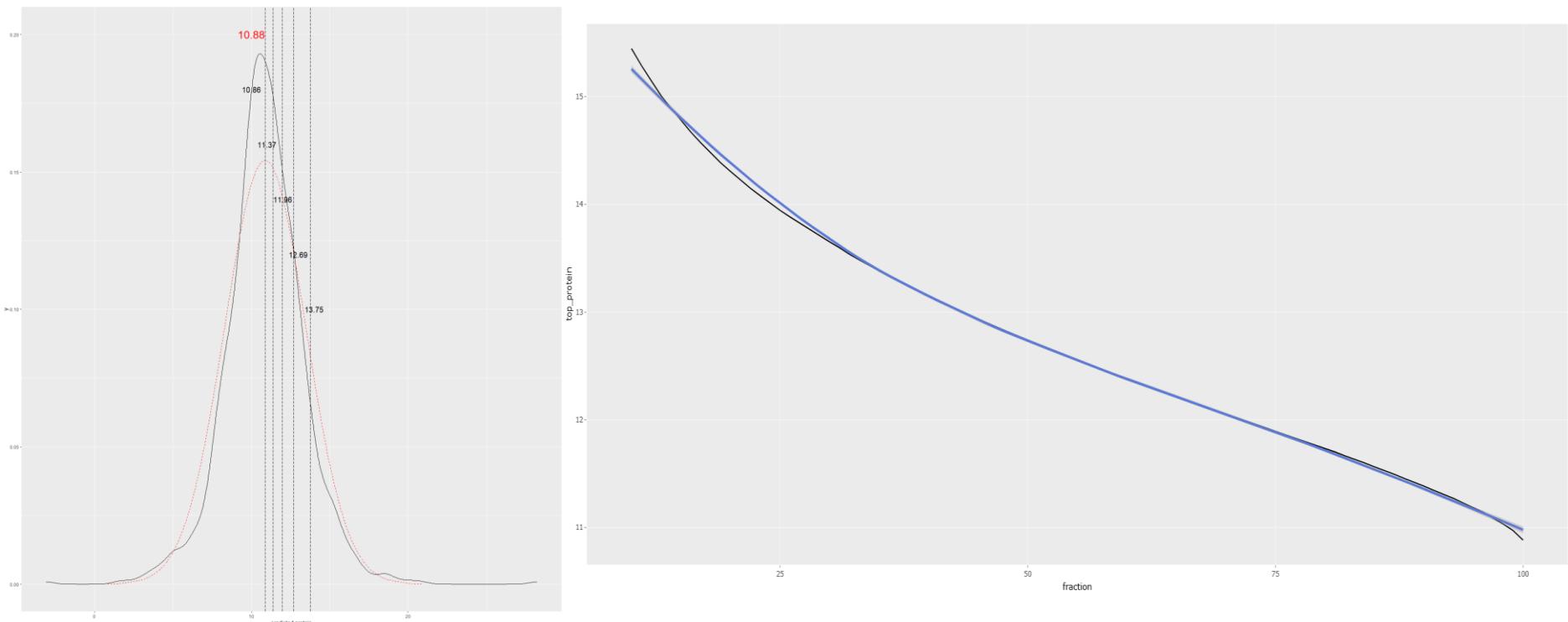
1) Automatisation du contrôle qualité (Détection des contaminants)

Qualité sanitaire : Grains fusariés



1) Automatisation du contrôle qualité

Qualité technologique : Teneur en protéine Froment



→ Distribution (homogénéité du lot – Robustesse technologique)
potentiel de tri

2) Amélioration de la qualité des lots

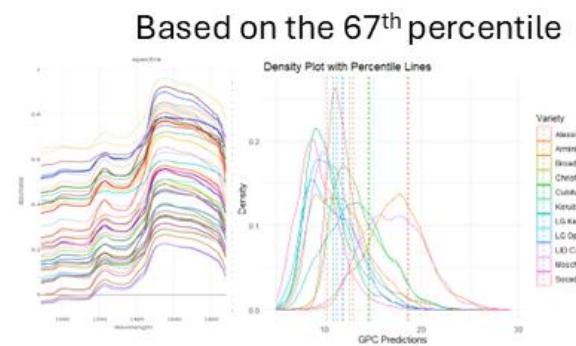
Qualité technologique : Teneur en protéine Froment

Wheat grades/varieties

Standard
Breadmaking



Single kernel NIR sorting (GPC)



Unsorted
Low Protein fraction (LPF)
High protein fraction (HPF)

Technological quality evaluation on

Grain/flour



Dough



Pan-Bread



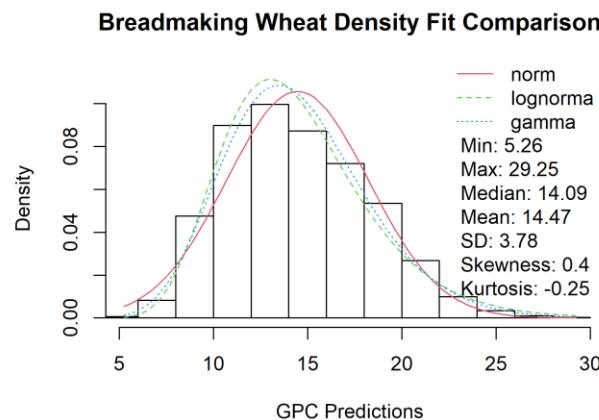
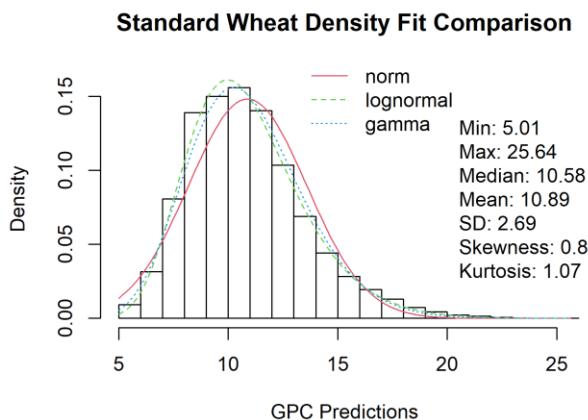
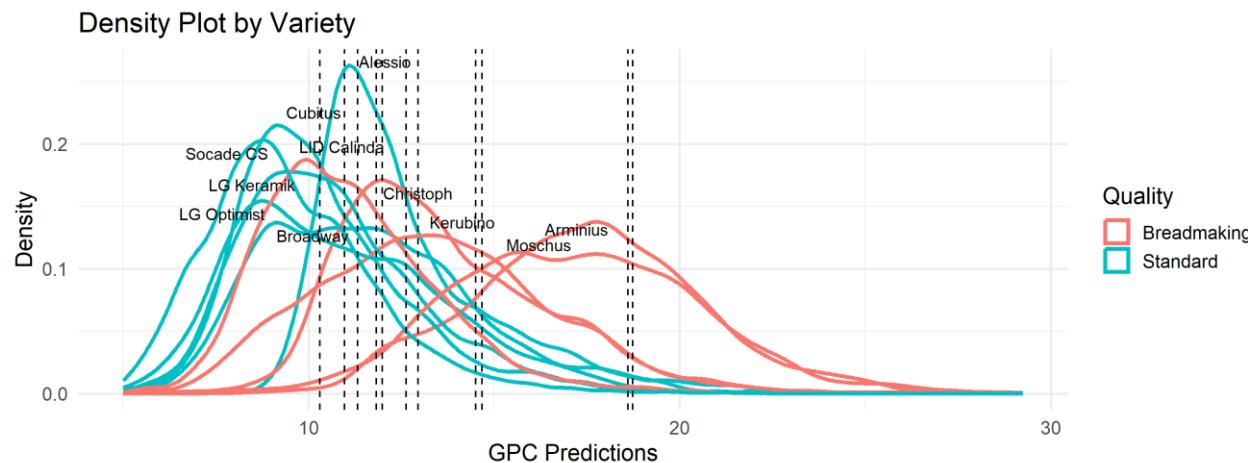
Grain/flour protein content
Falling number/sedimentation index
Flour milling
(Yield, Particle size, ash, Glutomatic)

Dough rheological quality
(Glutopeak, Alveolab, Mixolab)

Bread morphology
Texture profile analysis (TPA)
Crumb structure

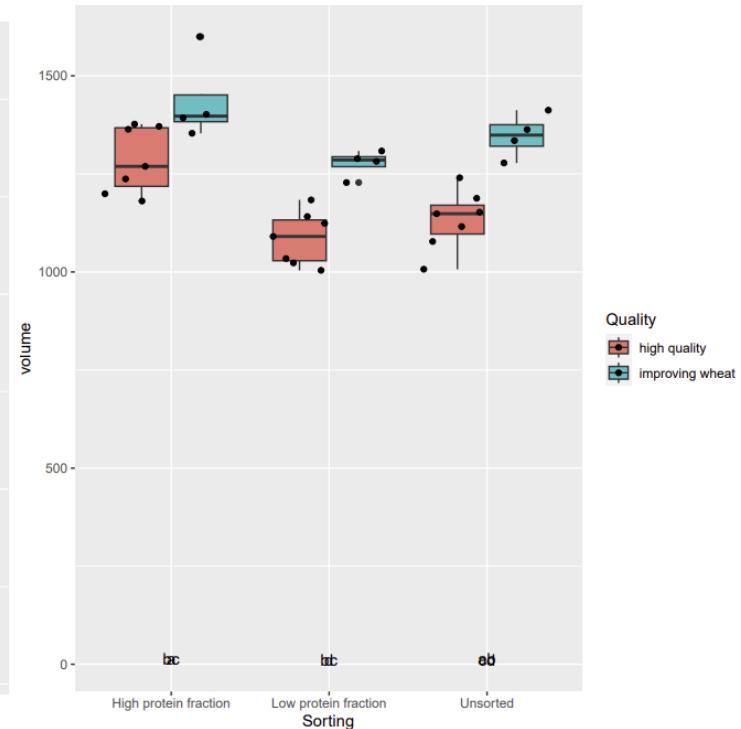
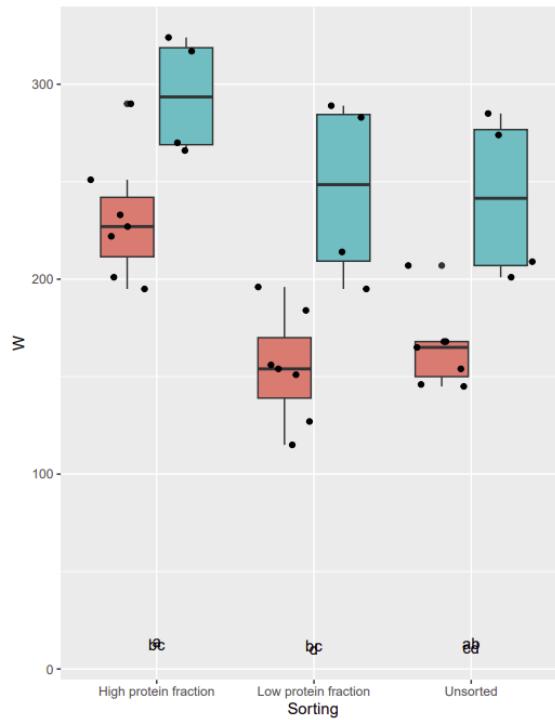
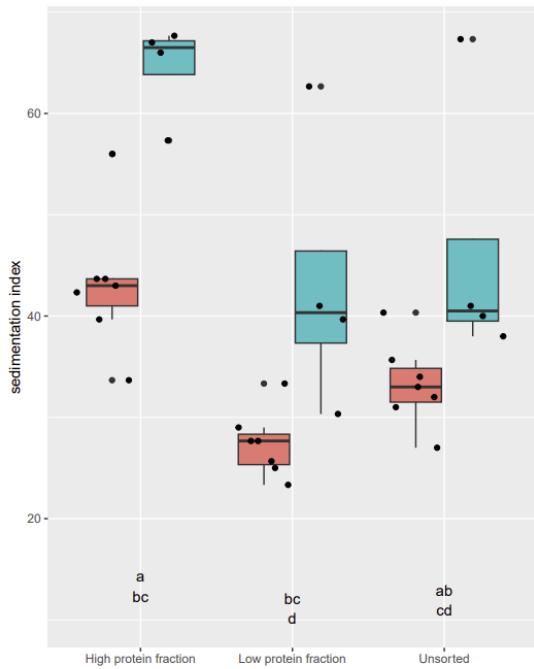


2) Amélioration de la qualité des lots



2) Amélioration de la qualité des lots

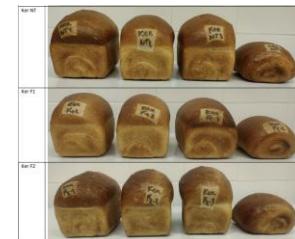
Qualité technologique : Teneur en protéine Froment



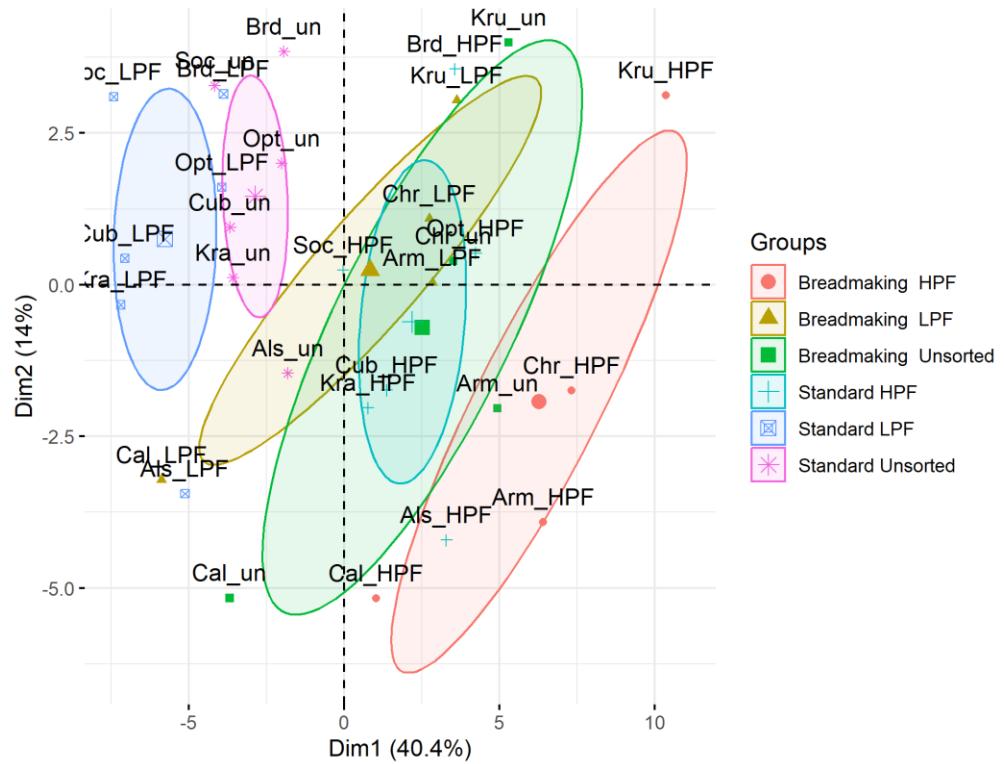
Évaluation robustesse technologique

2) Amélioration de la qualité des lots

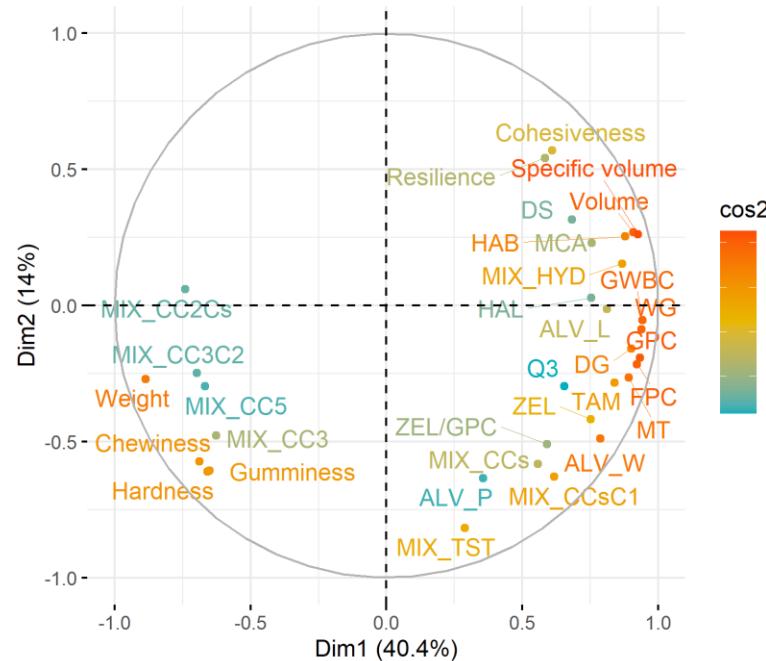
Qualité technologique : Teneur en protéine Froment



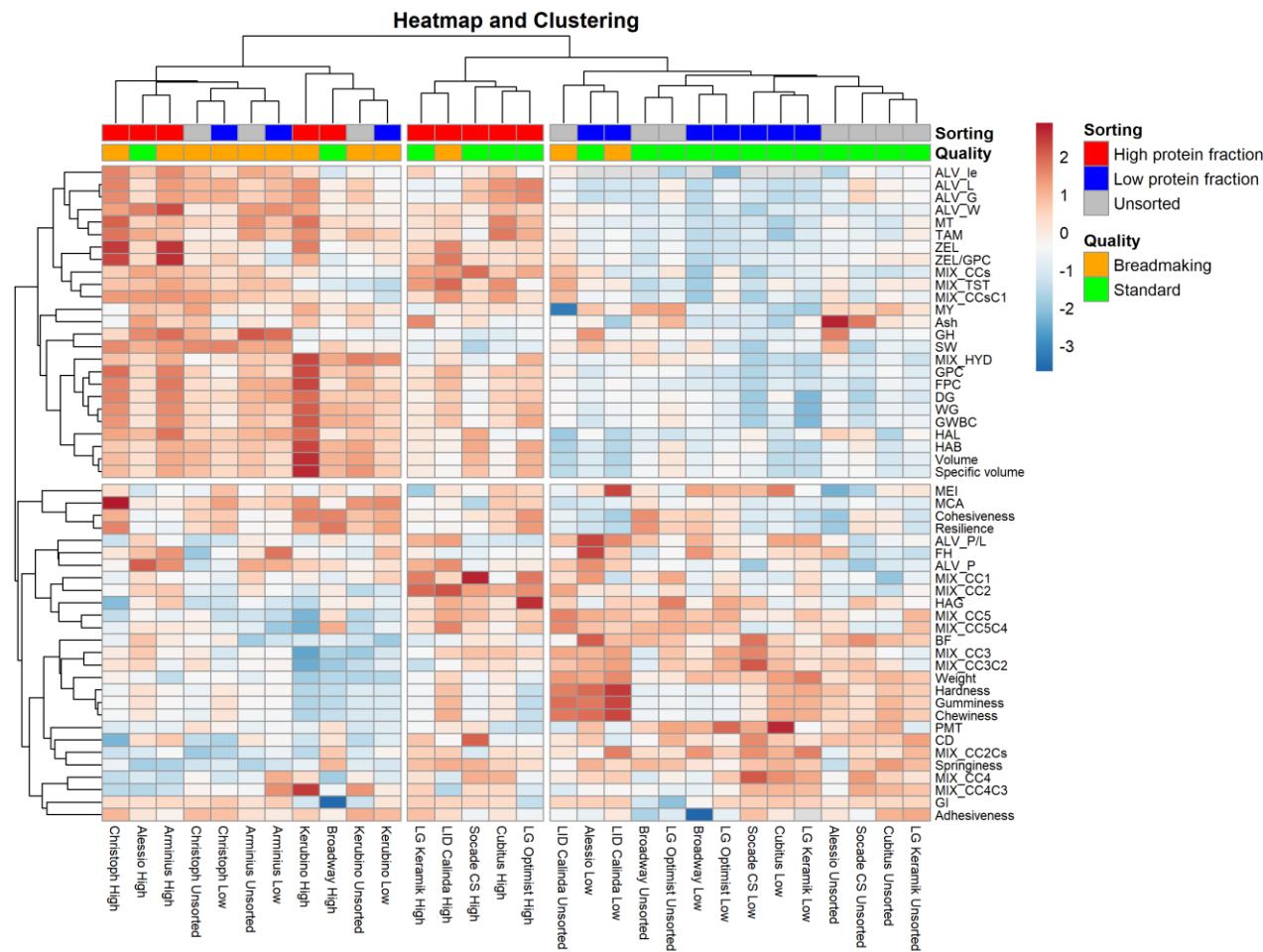
Individuals - PCA



Variables - PCA



2) Amélioration de la qualité des lots

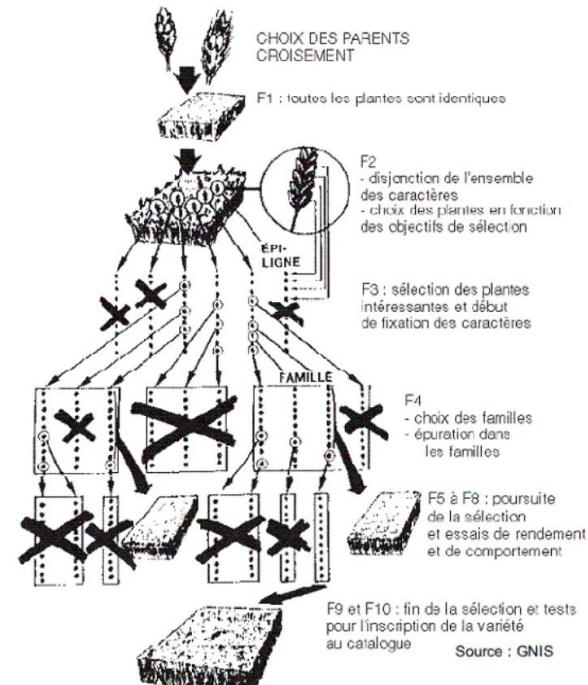
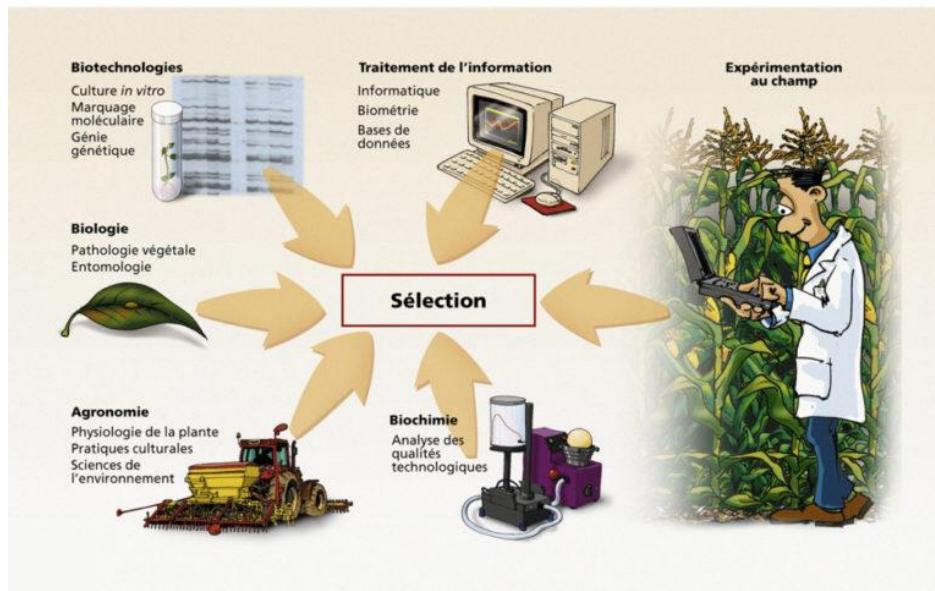


3) Appui à l'amélioration variétale

Qualité technologique : Teneur en protéine & mitadinnage Blé dur



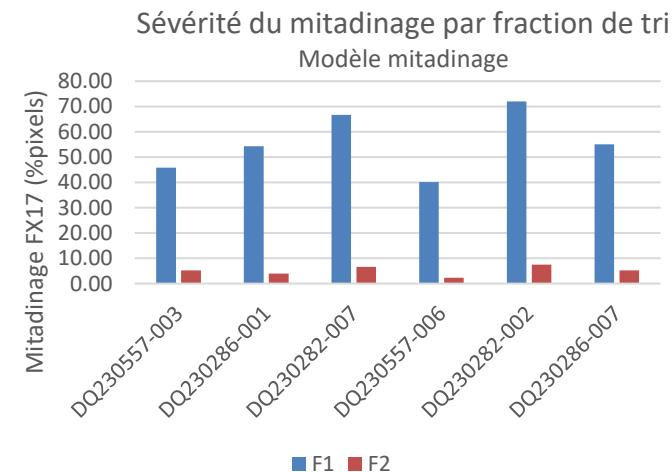
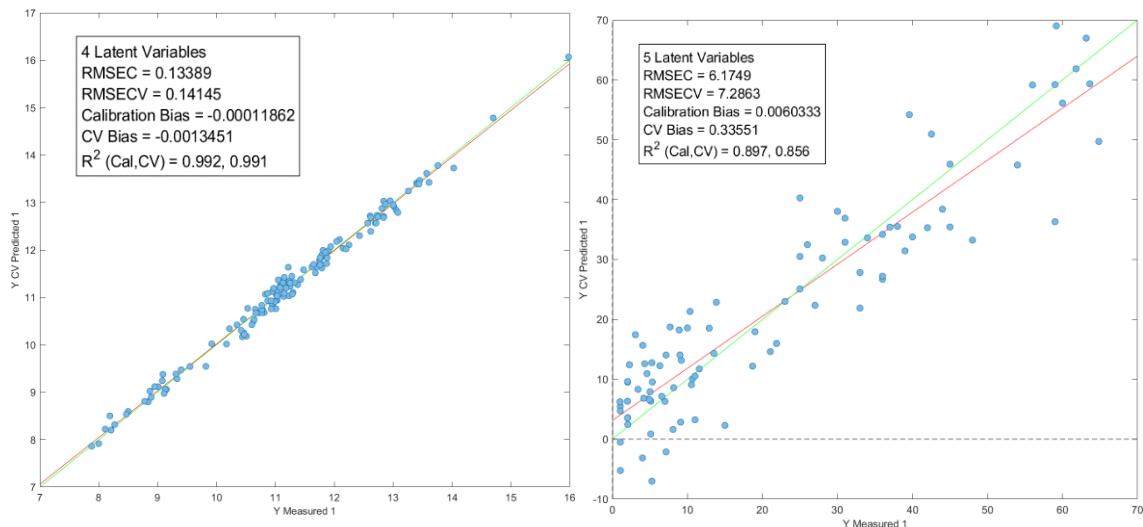
La sélection : une activité pluridisciplinaire



Blé dur de qualité (protéine/mitadinnage) adapté au (futur) climat belge

3) Appui à l'amélioration variétale

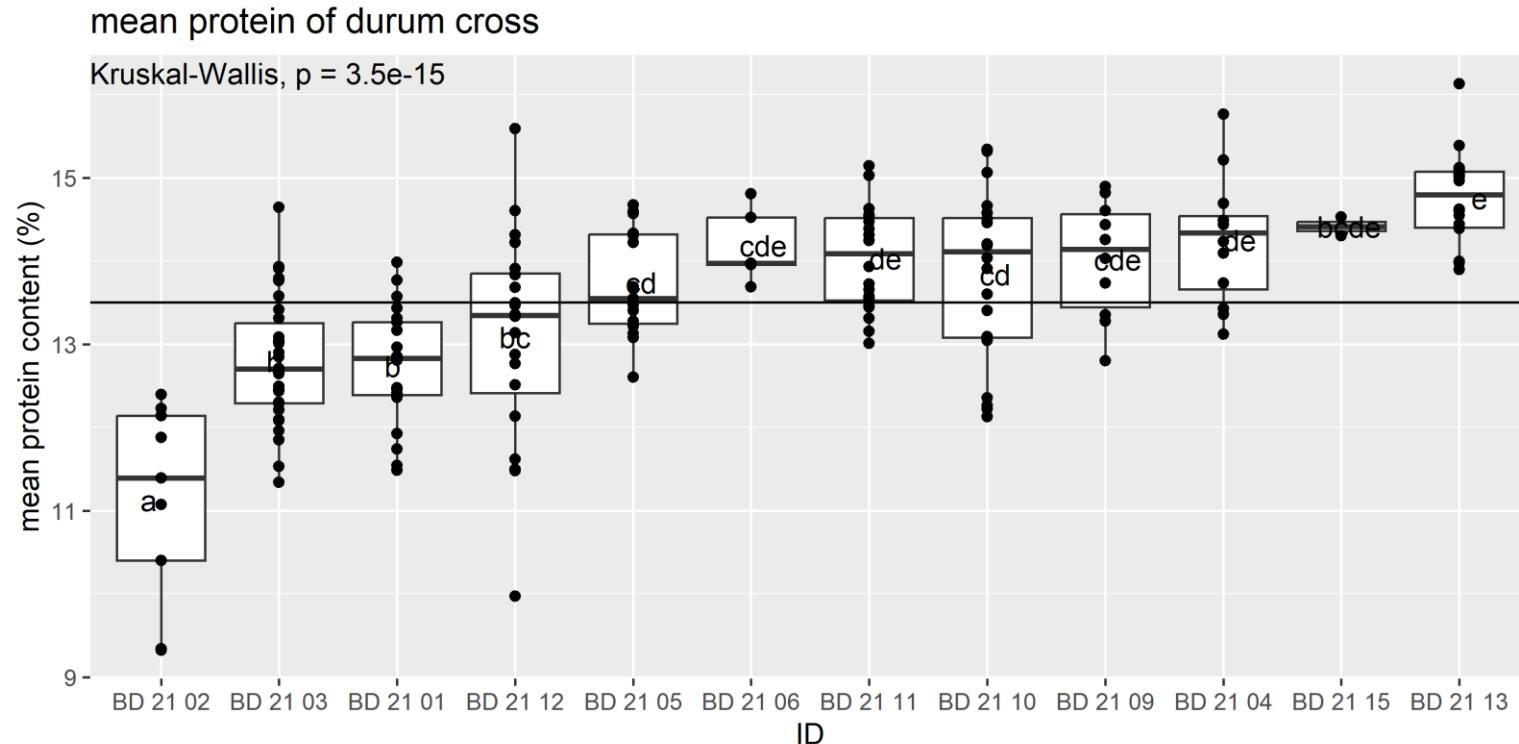
Qualité technologique : Teneur en protéine & mitadinnage Blé dur



Diminution mitadinage fraction vitreuse en-dessous norme industrie même pour lots très mitadins

3) Appui à l'amélioration variétale

Qualité technologique : Teneur en protéine & mitadinnage Blé dur

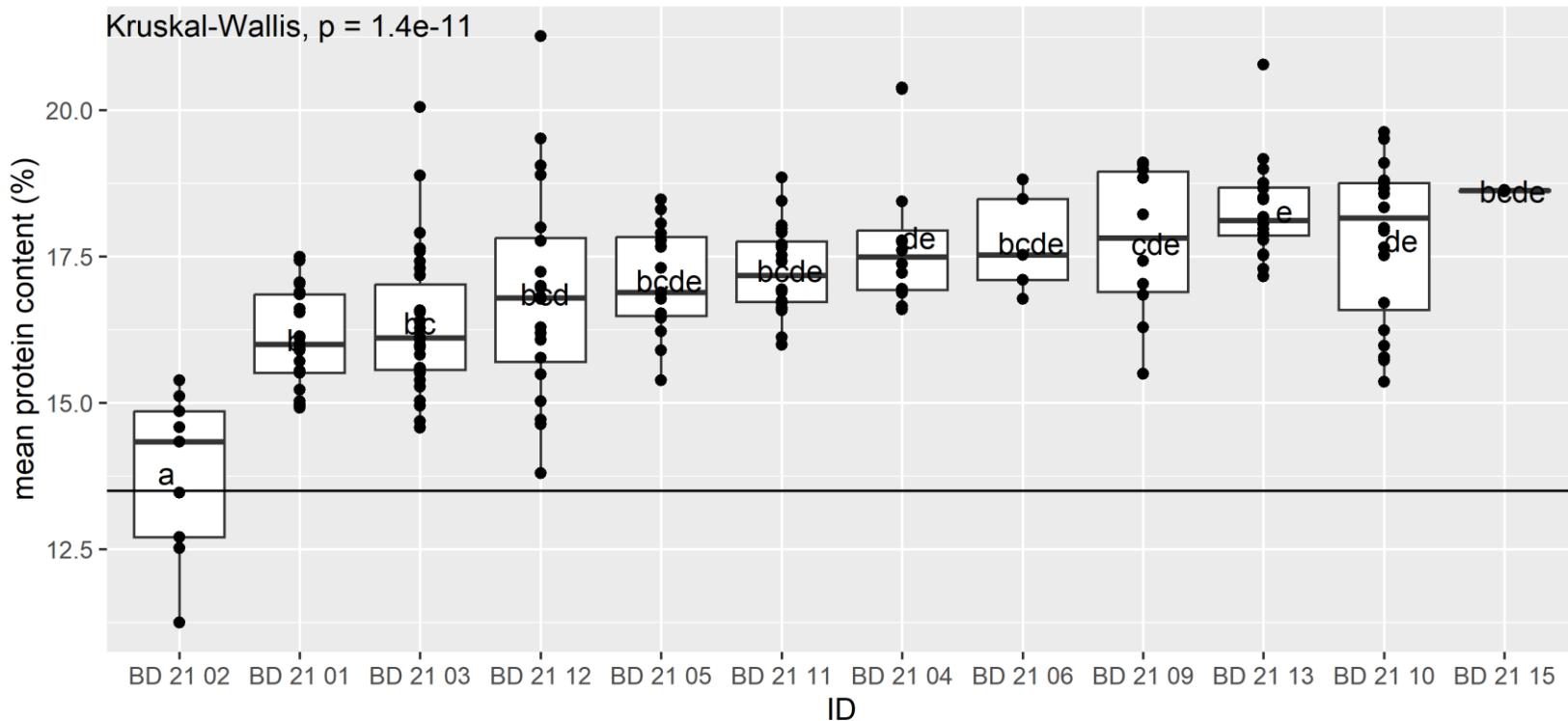


Chaque point est une répétition d'un croisement de blé dur en F3
Ecart important entre les croisements et au sein des répétitions de ceux-ci

3) Appui à l'amélioration variétale

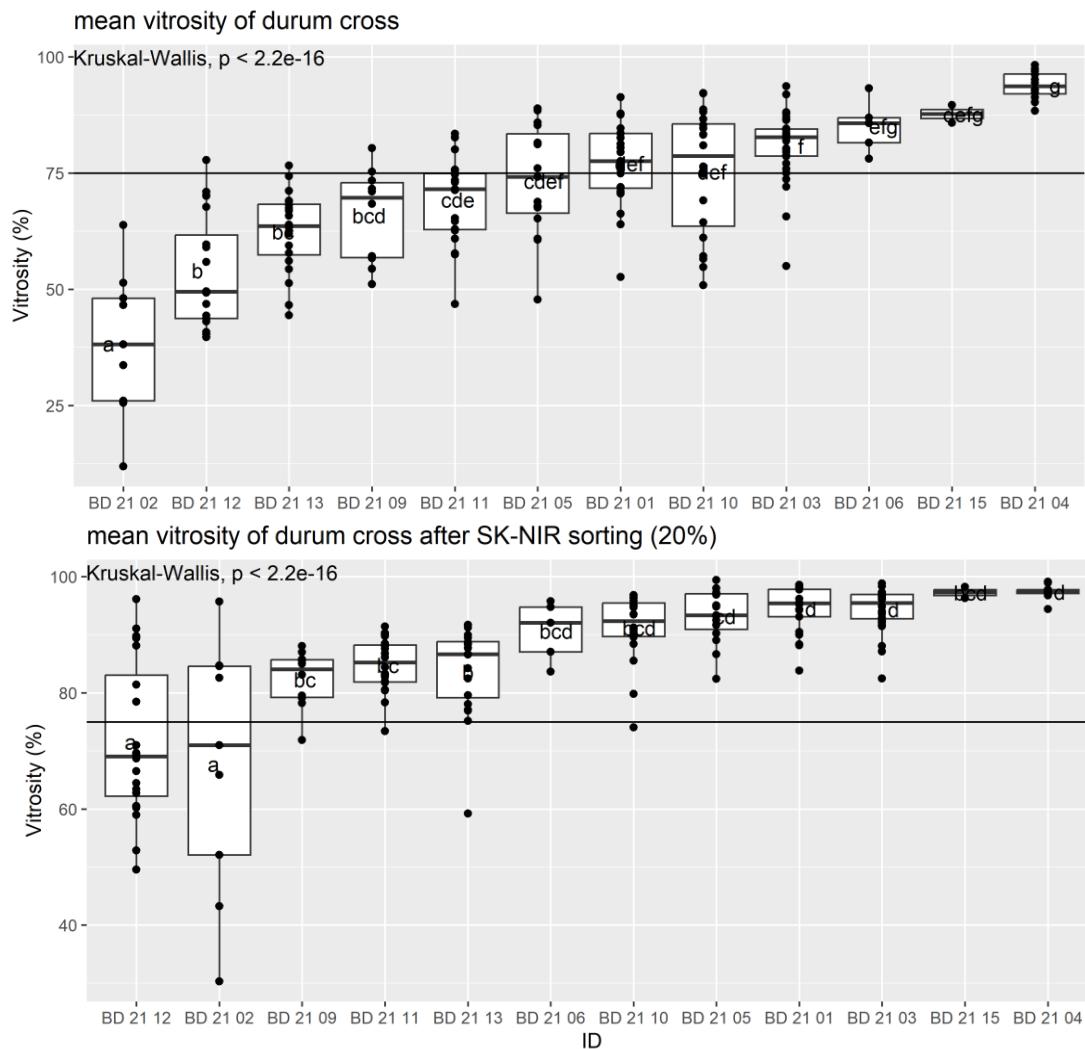
Teneur en protéine moyenne après tri des 20% supérieurs

mean protein of durum cross after SK-NIR sorting (20%)



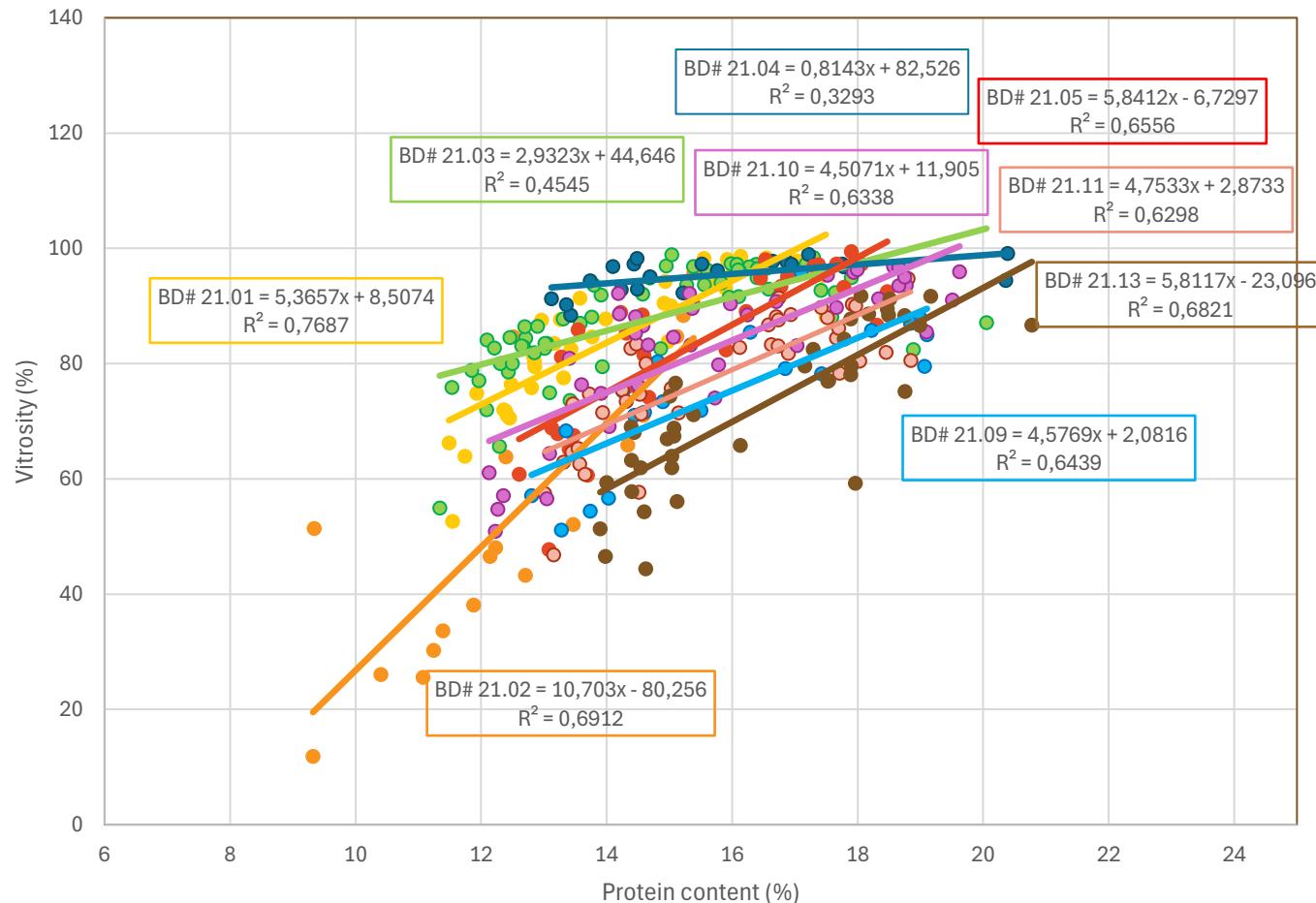
3) Appui à la création variétale

Tendance similaire pour la vitrosité des grains



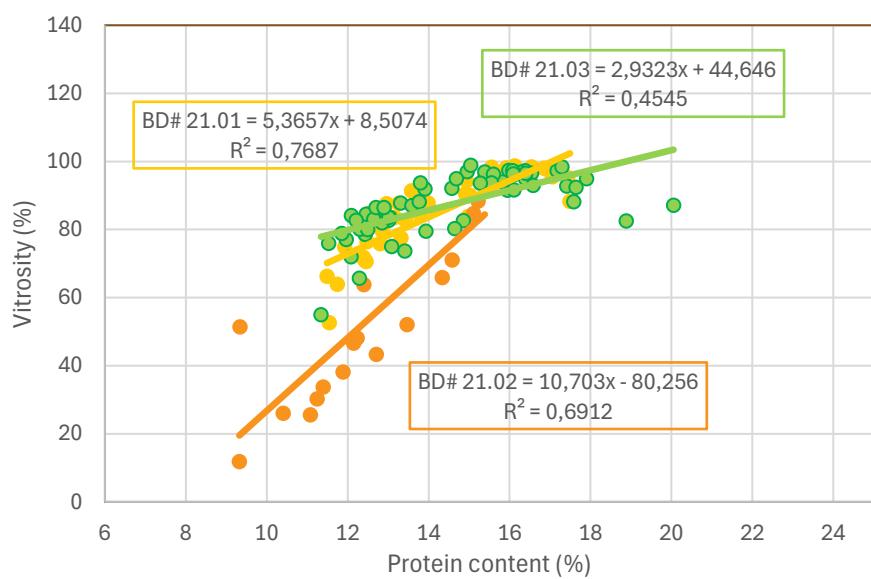
3) Appui à l'amélioration variétale

Relation Vitrosité vs Protéines selon chaque croisement

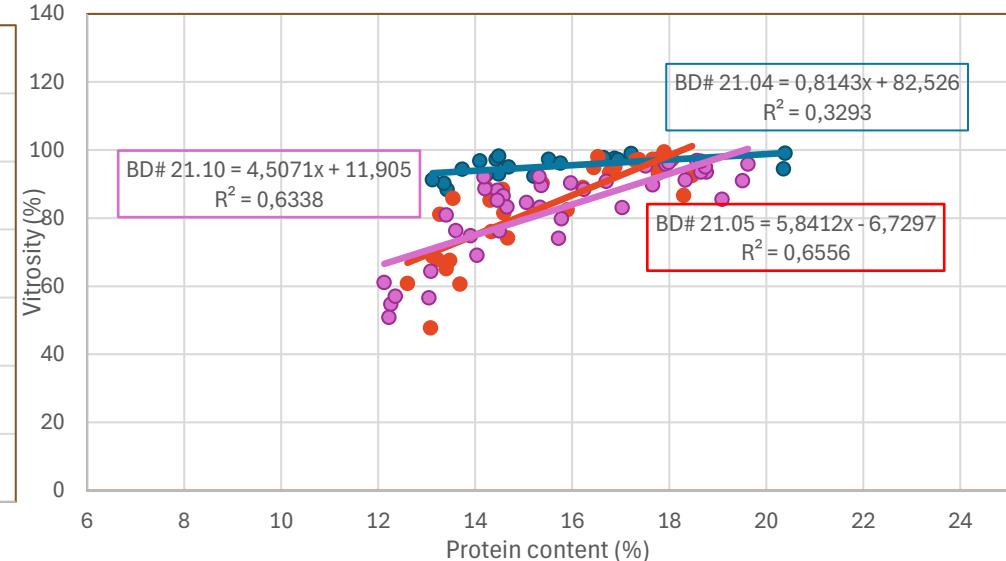


3) Appui à l'amélioration variétale

Croisement incluant
Wintergold



Croisement incluant
Karur



3) Appui à l'amélioration variétale

Classement rapide et bon marché de la descendance

- La pépinière F4 est sur 6 rangs
- 2 rangs avec des grains à haute teneur en protéines



- Les spectres NIR en tant qu'indicateur du caractère cible
- Possibilité d'étendre à d'autres environnements (GEI)
- Inclure des données génomiques



Sélection phénotomique

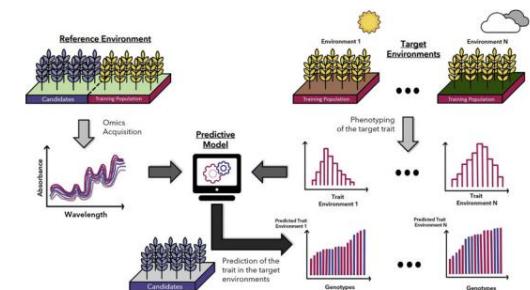
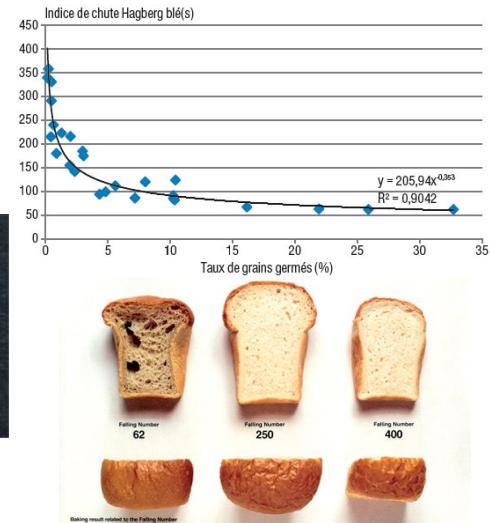


Fig. 1 Prediction of a target trait for the selection candidates in different environments with GLOB selection. Training population is phenotyped for the target traits (e.g., productivity) in the target environments. Omics or phenomic data (e.g., NIR spectra) are collected on both the candidate and the training individuals in a same reference environment, for capturing a genetic similarity between individuals. Genotypic values of the selection candidates are predicted for the target traits in each target environment.

Pauline Robert, Charlotte Brault, Renaud Rincent, Vincent Segura. Phenomic Selection: A new and efficient alternative to genomic selection. Methods in Molecular Biology, 2022, Methods in Molecular Biology, 2467, pp.397-420. ff10.1007/978-1-0716-2205-6_14ff. fffal-03654962f

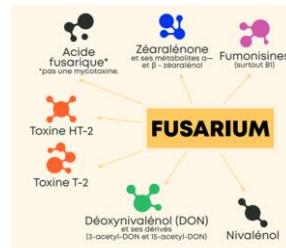
Technologique

- Temps de chute de Hagberg (pré-germination physiologique)
- Qualité des protéines (Zélény, W,...)



Qualité sanitaire

- Grains fusariés (mycotoxines)
- Carie



Amélioration variétale



Des questions / collaborations ?
p.werrie@cra.wallonie.be

Merci pour votre attention !

Join us!

DATES

From Monday 29 September PM
to Friday 3 October AM

REGISTRATION FEE

2500 €
50% discount for students (1250 €)
including attendance to the training, training material,
coffee breaks, lunches and participation to a social
event

REGISTRATION

<https://gqr.sh/bbn2>



CRA-W
Walloon Agricultural
Research Center

+32 81 87 52 05
f.stevens@cra.wallonie.be
www.cra.wallonie.be



29 September to 3 October 2025

Walloon Agricultural
Research Center (CRA-W)
Gembloux, Belgium

**Theoretical and practical course
dedicated to
scientists and industry professionals
seeking to discover
or improve their skills in
spectroscopy and chemometrics**

Speakers

Spectroscopy

- Vincent BAETEN
- Audrey PISSARD
- Louis PATERNOSTRE
- Octave CHRISTOPHE

Applications

- Philippe VERMEULEN
- Corentin DEMOITIE
- Damien VINCKE

Chemometrics

- Juan Antonio
FERNANDEZ PIERNA
- Antoine DERYCK
- François STEVENS

Invited speakers



Beatriz Carrasco
Mining4Quality



Tom FEARN
University College
London



Wouter Saey
KU Leuven



Pierre DARDENNE
Consultant

Centre wallon de Recherches agronomiques

Répondre aux questions d'aujourd'hui et relever les défis de demain
www.cra.wallonie.be

