
Caractérisation phytotechnique et zootechnique de variétés de triticale en agriculture biologique : Comment réfléchir leur valorisation en aviculture de chair ?

Auteur : Crevits, Coline

Promoteur(s) : Beckers, Yves; 14385

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13092>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**CARACTÉRISATION PHYTOTECHNIQUE ET
ZOOTECNIQUE DE VARIÉTÉS DE
TRITICALE EN AGRICULTURE
BIOLOGIQUE : COMMENT RÉFLÉCHIR LEUR
VALORISATION EN AVICULTURE DE
CHAIR ?**

COLINE CREVITS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS : YVES BECKERS & ANNE-MICHELLE FAUX (CRA-W)

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de GxABT

**CARACTÉRISATION PHYTOTECHNIQUE ET
ZOOTECNIQUE DE VARIÉTÉS DE
TRITICALE EN AGRICULTURE
BIOLOGIQUE : COMMENT RÉFLÉCHIR LEUR
VALORISATION EN AVICULTURE DE
CHAIR ?**

COLINE CREVITS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS : YVES BECKERS & ANNE-MICHELLE FAUX (CRA-W)

Organismes d'accueil

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Département connaissance et valorisation des produits, Unité valorisation des produits, de la biomasse et du bois du CRA-W pour la partie caractérisation physico-chimique variétale. Les aspects phytotechniques du travail ont été étudiés en collaboration avec le Département productions agricoles, Unité productions végétales du CRA-W.

Remerciements

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes avec qui j'ai pu collaborer, qui m'ont épaulée, et soutenue tout au long de la réalisation de ce travail, fruit de nombreuses rencontres et discussions enrichissantes.

Tout d'abord, je remercie mes promoteurs, Anne-Michelle Faux et Yves Beckers.

Je remercie Anne-Michelle Faux pour sa précieuse aide et son investissement pour le traitement statistique des résultats, et Yves Beckers pour l'organisation et la mise en œuvre de l'essai en poulailler. Je les remercie tous deux pour leur encadrement, leurs précieux conseils et les moyens qu'ils ont déployés pour le bon déroulement de mon travail de fin d'études.

Par ailleurs, j'aimerais remercier Bruno Godin, à la tête du laboratoire de technologie céréalière du CRA-W, pour le grand intérêt qu'il a porté à mon TFE, pour tout son savoir partagé et ses réponses toujours constructives à mes nombreuses questions.

Je souhaite également remercier toute l'équipe de l'unité de zootechnie de la faculté pour leur accueil chaleureux, et plus particulièrement Sylvie, pour ses conseils avisés, sa disponibilité sans faille notamment pour le suivi en poulailler et sa bonne humeur, et François, qui avec son humour, a rendu le travail journalier dans le poulailler agréable. Sans eux, l'expérimentation en poulailler n'aurait pas été possible.

J'adresse également mes remerciements à Martine Leclercq, technicienne au Département productions agricoles du CRA-W, qui n'a pas hésité à participer aux pesées hebdomadaires des poulets, mais aussi au suivi au champ, et ce, toujours dans la bonne humeur.

Je remercie Guillaume Jacquemin (CRA-W, Unité productions végétales, Pôle variétés) de m'avoir fourni les échantillons de triticales issus des sites de Ernage, Sommethonne et Warempage utilisés pour la caractérisation physico-chimique des variétés de triticales.

Je voudrais remercier également Christelle Boudry, de chez Puratos et Pierre-Yves Piret, de chez Prodabio, pour le temps qu'ils m'ont consacré et leur expérience qu'ils n'ont pas hésité à me partager au cours de nos nombreux échanges par mail.

Je remercie également toutes les belles rencontres gembloutoises que j'ai pu faire au cours des deux années passées en ces murs. Je remercie particulièrement Lucie, Adèle, Florine, Justine, Chloé, Camille, Florence et tous les autres de m'avoir gracieusement accueillie dans cette grande famille à mon arrivée en Master. Je n'aurais pas pu espérer un meilleur accueil. Merci de m'avoir fait découvrir votre folklore, malgré la situation sanitaire, et de m'avoir intégrée si rapidement. Ces deux années à Gembloux en votre compagnie resteront gravées à jamais.

Enfin, je remercie également mes parents, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de croire en moi durant ces 5 années d'étude.

Résumé

Actuellement, l'atteinte de l'autonomie alimentaire est le souhait de plus en plus d'éleveurs de poulets de chair en AB (agriculture biologique). Dans ce cadre, le triticale est une céréale d'intérêt au vu de ses qualités agronomiques et nutritionnelles dans ce type d'agriculture.

Cependant, en élevage de poulets de chair à croissance rapide, des taux d'incorporation élevés de triticale dans les régimes alimentaires des volailles génèrent des problèmes de viscosité intestinale, en raison de leurs teneurs relativement élevées en AXs (arabinoxylanes) et β -glucanes solubles, impactant les performances zootechniques des volailles.

Dans cette étude, les propriétés physico-chimiques, dont la viscosité, de 7 variétés de triticale ont été caractérisées. Une méthode de mesure de la viscosité a été développée au Rapid Visco Analyzer (RVA).

Les résultats de ces analyses ont révélé deux variétés à viscosité élevée ; Bilboquet, qui est pourvue d'un indice de viscosité élevé sur sa fiche technique et Vuka, qui elle, par contre, est réputée pour être une variété des moins viscosantes. Ces analyses ont également mis en évidence d'importantes corrélations entre la teneur en protéines et en amidon des grains, leur indice de blancheur ainsi que la granulométrie des grains, avec la viscosité des variétés de triticale étudiées.

Un essai en champs a également été mené avec 13 variétés de triticale dont les 7 caractérisées en laboratoire. Les variétés Brehat, Kitesurf, Lumaco et Ramdam se sont révélées comme étant les plus intéressantes d'un point de vue phytotechnique au vu de leurs caractéristiques, notamment leur tolérance au froid, leur nombre de plantes par mètre carré, leur nombre de talles et leur bonne couverture foliaire.

Enfin, un essai en poulailler a permis de tester l'introduction, à un taux de 60%, de trois variétés de triticale dans le régime de volailles, ainsi que d'un aliment complémentaire comprenant ou non un cocktail enzymatique capable d'inhiber les effets viscosants du triticale. L'essai de performances à partir des variétés de triticale a débuté à l'âge de 35 jours des poulets, et s'est terminé à un poids d'abattage de 2,4kg, soit à environ 70 jours d'âge des animaux.

De cet essai, aucun effet significatif sur les performances zootechniques des volailles, ni de la variété de triticale, ni de l'ajout d'enzymes n'a pu être mis en évidence. Ces résultats démontrent le peu d'effets des composés viscosants du triticale et de la complémentation enzymatique pratiquée chez les volailles âgées.

A l'avenir, un essai de ce type devrait être mené dès le premier jour d'âge des poulets, en leur fournissant préférentiellement des variétés issues d'un même site expérimental et en veillant à adapter l'activité enzymatique aux conditions expérimentales.

Mots-clés

Arabinoxylane – β -glucane – viscosité – agriculture biologique – poulet de chair

Abstract

Currently, reaching feed autonomy is one of the wishes of more and more organic broilers breeders. In this context, triticale is a cereal of interest in view of its nutritional and agronomic qualities in organic farming.

However, in conventional broiler breeding, we noticed that high introduction levels of triticale in broiler's feed induced intestinal viscosity because of their high content in soluble arabinoxylans and β -glucans affecting zootechnical performances of chickens.

In this study, physico-chemical properties including viscosity of 7 triticale varieties have been characterized. A measurement method of viscosity has been developed with a Rapid Visco Analyzer (RVA).

The results of these experiments have highlighted two varieties with high viscosity, Bilboquet which has a high viscosity index on its technical sheet and Vuka, which, at the opposite, is known to create very little viscosity. These analyses have also revealed significant correlations between protein and starch content of triticale, whiteness index of grains and grains granulometry with viscosity of triticale varieties studied.

A field trial has been done with 13 triticale varieties, of which the 7 varieties characterized in the laboratory. The varieties Brehat, Kitesurf, Lumaco and Ramdam have been revealed as being the most interesting from an agronomical point of view in view of their characteristics, especially their cold resistance, their plant number per square meter, their tillers number and their good leaf cover.

Finally, a henhouse trial allowed to test the introduction at a rate of 60% of three triticale varieties in broiler's diet as well as a complementary feed containing an enzymatic treatment or not. The trial strictly speaking began while chickens were 35 days old and carried on until the end of the broiler's cycle, so 70 days approximately.

Of this trial, none significant effects on zootechnical performances of broilers have been revealed, neither from triticale variety, nor from enzyme addition. These results demonstrate the few effects of viscous components of triticale and of enzyme addition in old broilers breeding.

In the future, a trial of this type should be implemented since the first day of the chickens, supplying them varieties coming from the same experimental site, and the same growing season to purge a potential environmental noise.

Keywords

Arabinoxylan – β -glucan – viscosity – organic farming - broiler

Table des matières

I. Introduction générale	1
II. Revue de la littérature scientifique	2
1. Le triticale	2
1.1 Taxonomie et génétique	2
1.2 Description botanique	2
1.3 Utilisations	3
1.4 Caractéristiques agronomiques de l'espèce	3
1.5 Production belge	4
1.6 Introduction du triticale dans le régime alimentaire du poulet de chair	5
2. La viscosité du triticale	6
2.1 Les arabinoxylanes et β -glucanes	6
2.2 Les conséquences de la viscosité	8
2.3 Les facteurs impactant les teneurs en arabinoxylanes et β -glucanes	8
2.3.1 Le déterminisme génétique	8
2.3.2 L'environnement et les caractéristiques pédoclimatiques	9
2.3.3 Les enzymes endogènes	9
3. L'ajout d'enzymes dans les régimes du poulet de chair	9
III. Objectifs du travail	11
IV. Matériel et méthodes	12
1. Caractérisation physico-chimique de variétés de triticale	12
1.1 Les échantillons	12
1.2 Paramètres physico-chimiques caractérisés	12
1.2.1 Humidité des grains, teneur en protéines et poids à l'hectolitre	12
1.2.2 Poids de mille grains	12
1.2.3 Temps de chute de Hagberg	12
1.2.4 Dureté NIRS	13
1.2.5 Composition chimique du grain (teneur en fibres, matière grasse, amidon et cendres)	13
1.2.6 Granulométrie des grains, moutures intégrales (Foss Cyclotec TM 1093)	13
1.2.7 Analyse de la couleur des grains et des moutures intégrales (Laboratory Mill 3100)	13
1.2.8 Mesure de la viscosité des grains	13
1.2.9 Teneurs en arabinoxylanes, arabinanes, xylanes et β -glucanes solubles	15
1.3 Analyse statistique	15
2. Caractérisation agronomique	16
2.1 Localisation et organisation de l'essai	16
2.2 Itinéraire phytotechnique	16

2.3 Relevés de terrain	17
2.4 Analyse statistique	17
3.Partie zootechnique	18
3.1 Matériel animal	18
3.2 Dispositif expérimental	18
3.2.1 Organisation générale	18
3.2.2 Alimentation des volailles.....	19
3.2.3 Paramètres mesurés	20
3.3 Caractérisation des aliments.....	20
3.4 Analyse statistique	21
V. Résultats et discussion	22
1. Caractérisation physico-chimique de variétés de triticales	22
1.1 Effets du site et de la variété	23
1.2 Corrélations entre variables	29
2. Caractérisation agronomique	33
2.1 Caractérisation agronomique des variétés	33
2.2 Corrélations entre caractéristiques agronomiques	36
3. Partie zootechnique	39
3.1 Performances zootechniques des poulets	39
3.2 Analyse des régimes des poulets.....	42
3.2.1 Composition chimique des variétés de triticales et des régimes	42
3.2.2 Mesure de la viscosité des variétés de triticales.....	42
3.2.3 Mesure de la viscosité des aliments	43
3.2.4 Activité enzymatique dans les différents régimes	45
VI. Contribution personnelle	48
VII. Conclusions générales	49
VIII. Perspectives	50
Références bibliographiques	
Annexes.....	

Table des figures

Figure 1 : Répartition des surfaces belges de céréales biologiques par espèce en 2018 (Lahon, 2019).....	4
Figure 2 : Evolution des superficies wallonnes des principales céréales biologiques cultivées entre 2017 et 2019 (Lahon, 2019).....	5
Figure 3 : Structure des arabinoxylanes de l'endosperme du froment– A : arabinose ; X : xylose ; F : acide férulique ; uX : xylose non substitué ; dX : xylose disubstitué ; mX ₂ : xylose monosubstitué en O-2 ; mX ₃ : xylose monosubstitué en O-3 (Saulnier <i>et al.</i> , 2007)	7
Figure 4 : Structure d'une molécule de β -glucane (Knudsen, 2014).....	7
Figure 5 : Profil d'un RVA typique d'une céréale, reprenant les diverses mesures réalisées au cours d'un cycle classique (Balet <i>et al.</i> , 2019).....	14
Figure 6 : Dispositif expérimental – A : Borodine + complément sans enzyme, B : Borodine + complément avec enzyme, C : Brehat + complément sans enzyme, D : Brehat + complément avec enzyme, E : Vuka + complément sans enzyme, F : Vuka + complément avec enzyme.....	18
Figure 7 : Organisation du poulailler.....	19
Figure 8 : Dispersion des 35 échantillons de grain de triticales (7 variétés cultivées dans 5 sites d'essai, conduits en bio ou en conventionnel) caractérisés par 31 variables physico-chimiques selon les deux premiers axes obtenus par analyse en composante principale.....	23
Figure 9 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la teneur en arabinoxylanes solubles.....	25
Figure 10 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la viscosité finale (RVA - eau- α -amylase).....	26
Figure 11 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la teneur en protéines.....	26
Figure 12 : Corrélogramme exprimant les corrélations entre propriétés physico-chimiques des grains de triticales.....	29
Figure 13 : Corrélation entre le dosage des arabinoxylanes solubles et une composante de la courbe du RVA.....	30
Figure 14 : Corrélogramme reprenant les corrélations entre mesures réalisées sur le triticales, significatives avec $p < 0,05$	36
Figure 15 : Evolution du poids moyen des poulets par traitement par rapport à la référence.....	41

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des variétés étudiées ((Faux <i>et al.</i> , 2020) dans Livre Blanc Céréales, Septembre 2020 – Variétés de céréales en AB) - TP = très précoce, P = précoce, DP = demi-précoce, DT = demi-tardif, T = tardif.....	4
Tableau 2 : Composition biochimique et valeurs alimentaires du froment et du triticales pour les porcs et les volailles – Les données sont fournies par rapport à la matière fraîche (AviFaF,nd).....	5
Tableau 3 : Teneurs moyennes en β -glucanes et arabinoxylanes du grain de triticales, du froment, et du seigle, l'un de ses parents d'hybridation (Rakha <i>et al.</i> 2011 ; Randhawa <i>et al.</i> , 2015 ; Knudsen, 2014). – Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes retrouvées parmi les sources citées –.....	7
Tableau 4 : Ensemble des opérations culturales réalisées sur le champ d'essai.....	16
Tableau 5 : Paramètres agronomiques relevés sur le triticales.....	17
Tableau 6 : Effet du site d'essai et de la variété sur les caractéristiques physico-chimiques des 7 variétés de triticales analysées dans les 5 sites expérimentaux. Moyenne estimée pour chacune des variétés, contrastes ¹ et erreur standard (SE).....	24
Tableau 7 : Effet de la variété, de la date de mesure, de l'interaction entre ces deux variables, de la répétition ainsi que de l'interaction de la répétition avec la date de mesure sur les caractéristiques des variétés étudiées.....	35
Tableau 8 : Test des effets fixes sur l'ingestion, la croissance, l'indice de consommation et le CV du poids des poulets (<i>p</i> -valeurs).....	39
Tableau 9 : Ingestion, croissance, indice de consommation et CV du poids des poulets selon la variété et selon le traitement enzymatique (moyenne \pm erreur standard).....	40
Tableau 10 : Caractérisation des régimes et de leurs composants (triticales et aliment complémentaire).....	42
Tableau 11 : Mesure de la viscosité des variétés de triticales intégrées dans le régime des poulets réalisée par Puratos.....	43
Tableau 12 : Mesure de la viscosité liée aux arabinoxylanes et β -glucanes solubles dans les aliments starter, transition et les régimes proposés aux poulets à partir du 35 ^{ème} jour.....	43
Tableau 13 : Résultats du dosage de l'activité enzymatique.....	45

Table des annexes

Annexe 1 : Dosage des arabinanes, xylanes et glucanes solubles par chromatographie liquide

Annexe 2 : Composition et valeur nutritionnelle des aliments starter, transition et des aliments complémentaires proposés aux poulets

Annexe 2.1 : Aliment starter poussin miette sans enzymes

Annexe 2.2 : Aliment transition miettes sans enzyme

Annexe 2.3 : Aliment complémentaire avec enzyme

Annexe 2.4 : Aliment complémentaire sans enzyme

Annexe 3 : Distribution granulométrique du grain des trois variétés de triticale ainsi que des deux aliments complémentaires – Mesures réalisées au Département Productions et Filières – Unité Mode d'élevage, bien-être et qualité (CRA-W)

Annexe 3.1 : Granulométrie du grain de la variété Vuka

Annexe 3.2 : Granulométrie du grain de la variété Borodine

Annexe 3.3 : Granulométrie du grain de la variété Brehat

Annexe 3.4 : Granulométrie de l'aliment complémentaire sans enzyme

Annexe 3.5 : Granulométrie de l'aliment complémentaire avec enzyme

Liste des abréviations

AGCC	Acides gras à chaîne courte
AB	Agriculture biologique
AXOS	Oligosaccharides dérivés d'arabinoxylanes
AX	Arabinoxylane
EMA	Energie métabolisable apparente
EN	Energie nette
GQM	Gain quotidien moyen
IB	Indice de blancheur
IC	Indice de consommation
MAT	Matière azotée totale
NSPs	Non Starch Polysaccharides – Polysaccharides non amylacés
PMG	Poids de mille grains
RVA	« Rapid Visco Analyzer »
TAXI	<i>Triticum aestivum</i> xylanase inhibitor
TCA	Taux de conversion alimentaire
WE- AX	Water extractable arabinoxylans – AXs solubles dans l'eau
WU- AX	Water unextractable arabinoxylans – AXs insolubles dans l'eau
XIP	Xylanase inhibitor protein

I. Introduction générale

C'est à la suite d'une hausse croissante de l'attrait des consommateurs pour les produits biologiques, synonymes de respect de l'environnement et de bienfaits pour la santé que l'AB (agriculture biologique) a débuté son essor dans nos régions. Dans ce cadre, la filière du poulet de chair est l'une des filières biologiques qui connaît la croissance la plus remarquable en Région wallonne, puisqu'entre 2015 et 2019, le nombre de poulets de chair biologiques vendus a presque doublé (Beudelot & Mailleux, 2019). C'est là tout l'intérêt de continuer à améliorer et développer une telle filière, la demande du consommateur étant bien présente, et la part du marché de ces produits ne cessant de croître.

Les législations relatives à l'élevage de poulets de chair biologiques imposent diverses dispositions, notamment en ce qui concerne l'alimentation des poulets. De fait, au minimum 20% de celle-ci doit provenir de l'exploitation elle-même ou être produite dans la région (Biowallonie asbl, 2020). Ce pourcentage sera porté à 30% dans la nouvelle réglementation européenne, d'application dès le 1^{er} janvier 2022 (Biowallonie asbl, 2020). A cette date également, la possibilité d'utilisation dérogatoire d'aliments source de protéines provenant de l'agriculture conventionnelle, à raison de 5% par période de 12 mois, sera limitée aux jeunes volailles. En outre, cette dérogation sera levée en 2025 (Biowallonie asbl, 2020). La disponibilité d'une source de protéines et d'énergie interne à la ferme est donc un atout pour les éleveurs, notamment dans le cadre du respect de ces législations, mais pas uniquement. Cela leur permet également d'atteindre un certain niveau d'autonomie alimentaire pour leur atelier « volailles », et de réduire leur dépendance à l'importation pour assurer l'apport protéique et énergétique des poulets, objectif que visent de plus en plus d'éleveurs et ce plus particulièrement dans le cadre de la production animale biologique.

En ce qui concerne le poulet de chair biologique plus particulièrement, les éleveurs voudraient pouvoir introduire dans leurs régimes leurs propres céréales. C'est le cas principalement du maïs, du froment et du triticale, celles-ci pouvant représenter jusqu'à 80% du régime, du fait de leur importante valeur énergétique (Juin *et al.*, 2015). Les éleveurs pourraient de la sorte valoriser leur propre production céréalière.

Concernant le triticale, l'objet de cette étude, son taux d'introduction est actuellement limité dans les régimes du poulet de chair biologique du fait de sa teneur en AXs (arabinoxylanes) solubles, et dans une moindre mesure en β -glucanes solubles. Ces molécules auraient des propriétés anti-nutritionnelles pour le poulet de par la viscosité intestinale qu'elles génèrent. Pouvoir introduire cette céréale dans les régimes des poulets à des taux d'incorporation plus élevés au vu de ses caractéristiques agronomiques et nutritionnelles intéressantes est l'un des souhaits des éleveurs.

II. Revue de la littérature scientifique

1. Le triticale

1.1 Taxonomie et génétique

Le triticale (x *Triticosecale* Wittm.) est une plante en C3 appartenant à la famille des poacées.

Il s'agit d'un genre hybride, issu d'un croisement entre une plante de blé femelle - *Triticum* sp., et le seigle (*Secale* spp, RR.) qui constitue le parent mâle (International Triticale Association, sd). Le parent femelle peut être du blé dur (*Triticum turgidum* L.) caractérisé par le génome AABB, ou du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) caractérisé par le génome AABBDD.

Le premier croisement entre blé et seigle a été réalisé en 1873 par l'Écossais A.S. Wilson. Cependant, les premiers hybrides créés étaient stériles. C'est en 1888 que l'Allemand W. Rimpau a produit le premier triticale fertile (International Triticale Association, sd).

Cet hybride permet d'associer en une même céréale, la productivité du *Triticum* ainsi que la qualité de son grain et dans un même temps la rusticité du seigle, sa robustesse hivernale, sa résistance aux maladies et sa tolérance aux stress biotiques et abiotiques (Józefiak *et al.*, 2007).

Les premiers triticales créés étaient octoploïdes, issus d'un croisement entre le blé tendre et le seigle. Puis, plus tard, on a synthétisé des triticales tétraploïdes et décaploïdes, sans succès, ainsi que des triticales hexaploïdes. Au départ, la plupart des recherches se sont focalisées sur les génomes octoploïdes mais ceux-ci présentaient une instabilité génétique et une stérilité des épillets dans certains cas (Randhawa *et al.*, 2015 ; Mergoum *et al.*, 2009). On s'est alors intéressés aux cultivars hexaploïdes issus d'un croisement entre blé dur et seigle qui sont aujourd'hui les cultivars les plus couramment cultivés (Gupta & Priyadarshan, 1982 ; Mergoum *et al.*, 2009). Ceux-ci présentent de fait une meilleure vigueur et stabilité reproductive (Gupta & Priyadarshan, 1982 ; Mergoum *et al.*, 2009).

Les triticales cultivés sont généralement des triticales de seconde génération, issus d'un croisement entre deux triticales primaires, ou d'un rétrocroisement avec le parent femelle initial notamment afin d'intégrer les caractères agronomiques désirés du *Triticum* dans l'hybride créé (Mergoum *et al.*, 2009 ; Mergoum *et al.*, 2019 ; Kavanagh & Hall, 2015). Les variétés de triticale analysées dans le cadre de cette étude sont hexaploïdes, l'information n'est cependant pas connue pour l'une des variétés étudiées, la variété Borodine, mais on peut en faire l'hypothèse (Community Plant Variety Office).

Au terme de cette section, le terme « triticale » se réfèrera toujours aux génotypes hexaploïdes.

1.2 Description botanique

Les caractéristiques du triticale sont généralement intermédiaires entre celles de ses parents d'hybridation. Le triticale a une taille d'environ 115cm, intermédiaire entre celle du blé dur, plus petit et du seigle plus grand (Kavanagh & Hall, 2015). Ses épis comprennent de 25 à 30 épillets environ et peuvent être barbus ou non.

Il présente des feuilles plus larges que le froment, un poids de mille grains et une taille supérieure ce qui induit une production de biomasse environ 20% supérieure au froment (Kavanagh & Hall, 2015). Du fait de sa descendance du seigle également, le triticale présente une capacité de tallage supérieure au froment (Agricultures et Territoires, 2013).

1.3 Utilisations

Le triticale est cultivé majoritairement pour ses grains utilisés en alimentation animale, dans les secteurs porcins et avicoles, mais aussi dans le secteur bovin en AB. Cette céréale peut alors être cultivée pure mais elle l'est très souvent sous forme de mélange avec du pois, de l'avoine, ou encore du seigle, récoltée pour le fourrage (grain immature) ou pour le grain (Faux *et al.*, 2019).

Le triticale est également utilisé dans une moindre mesure dans l'industrie de la bière, pour la production d'énergies renouvelables ainsi que pour l'alimentation humaine, notamment en panification. Cependant, ses teneurs élevées en α -amylases le rendent peu intéressant pour l'industrie boulangère (Rakha *et al.*, 2011 ; Fraś *et al.*, 2016).

1.4 Caractéristiques agronomiques de l'espèce

Le triticale est principalement une céréale d'hiver, semée dans le courant du mois d'octobre et récoltée au même moment que le froment, soit fin juillet-début août dans nos régions. Il est cultivé comme seconde paille dans les assolements céréaliers. Au vu de son importante capacité de tallage, le triticale est généralement semé à une densité correspondant à 85% de celle du froment (Agricultures et Territoires, 2013).

Du point de vue agronomique, le triticale présente de nombreux atouts. Cette culture serait en effet conduite plus aisément que les autres céréales au vu de sa compétitivité vis-à-vis des adventices, du fait de la concurrence qu'exerce son système racinaire puissant envers ces dernières mais aussi au vu de sa hauteur de paille (Juin *et al.*, 2015). Ses caractéristiques telles que sa tolérance aux stress biotiques et abiotiques, et la vigueur de son système racinaire font que cette céréale, à la différence du froment, de l'orge et de l'avoine, est capable de donner des rendements considérables sur des sols à faible potentiel tels que des sols salins, alcalins ou encore dans des conditions sèches (International Triticale Association, sd). A titre d'exemple, le rendement moyen entre 2018 et 2020 de trois variétés témoins en bio était de 7,175T/ha, contre 6,945 T/ha pour le froment. En conventionnel et sous protection fongicide, le rendement moyen était de 9,33T/ha et 8,12T/ha sans protection fongicide, en 2019 (Faux *et al.*, 2020 ; Eyllenbosch *et al.*, 2020).

Le triticale présente également des rendements en paille supérieurs au froment, ce qui est un atout non négligeable pour les fermes d'élevage (Agriculture et Territoires, 2013 ; Faux *et al.*, 2020).

Les faiblesses du triticale apparaissent notamment lorsque des conditions humides juste avant la récolte induisent une germination sur pied. Cela est notamment dû au fait que le triticale est issu d'espèces y étant particulièrement sensibles, le seigle et le blé dur (Arvalis – Institut du Végétal, 2020). Le triticale est principalement sensible à l'oïdium et à la rouille jaune, mais aussi à la fusariose et à la rouille brune. Il est également sensible à la verse ce qui implique dans le cas du triticale biologique une maîtrise minutieuse des densités de semis, et à l'ergot, du fait de sa descendance du seigle. Enfin, certaines variétés de triticale sont également sensibles à la rhynchosporiose (Arvalis – Institut du Végétal, 2020).

Le Tableau 1 ci-dessous présente les caractéristiques des variétés de triticale étudiées dans le cadre de cette étude.

Tableau 1 : Caractéristiques des variétés étudiées ((Faux *et al.*, 2020) dans Livre Blanc Céréales, Septembre 2020 – Variétés de céréales en AB) - TP = très précoce, P = précoce, DP = demi-précoce, DT = demi-tardif, T = tardif.

	N années essai	Développement		Production			Qualité du grain	Sensibilité maladies du feuillage (1-9, 9 = absence de symptômes) ⁵				
		Précocité ¹	Hauteur ² (cm)	Rendement en paille (t MS/ha) ³	Rendement en grain (kg/ha) ⁴	Poids spécifique du grain (kg/hl) ⁴	Teneur en protéines (%MS) ⁴	Septoriose	Oïdium	Rouille jaune	Rouille brune	Fusariose ⁶
Bilboquet	1	T	101	8.0	7821	70,3	12	NA	8,2	9	8,8	NA
Borodine	5+	T	95	6.7	6744	71,3	12,1	6,8	6,8	8,6	4,7	4,3
Brehat	2	DP	102	7.9	8251	73,9	11,5	8,2	8,1	7,9	8,6	8,8
Elicsir	4	DT	102	7.2	7247	74,8	12,2	7,2	6,9	7,9	8,6	8,8
Kasyno	1	DT	85	6.4	7318,5	72,6	12,1	NA	7,4	8	8,9	NA
Ramdram	3	DP	101	6.8	8180	71,6	11,3	6,9	7,9	7	8,8	6,3
Vuka	5+	DP	97	6.6	6601	74,2	12,4	6,6	7,1	8,6	5,3	5,2

¹ Définie sur les trois sites d'essai (Ath, Horion-Hozémont et Rhisnes) en 2020

² Mesurée sur les sites de Ath et Rhisnes en 2020

³ Mesuré sur le site de Horion en 2020

⁴ Moyennes de 2018 à 2020 sur les trois sites d'essai

⁵ Cotation moyenne minimale obtenue au cours des années durant lesquelles la variété a été testée

⁶ Valeurs de 2016, 2018 et 2019 uniquement

D'après les résultats présentés dans le Livre Blanc Céréales de Septembre 2020 (Faux *et al.*, 2020), les variétés Brehat, Elicsir et Ramdram sont les plus intéressantes d'un point de vue agronomique. Cette sélection est basée sur les critères suivants : (i) la variété est présente dans les essais pendant au moins deux années sur l'ensemble des sites, (ii) elle présente un rendement supérieur ou égal à la moyenne des témoins sur les trois dernières années, et (iii) elle est résistante aux maladies.

1.5 Production belge

En 2018, les triticales d'hiver et de printemps représentaient la 3^{ème} superficie la plus importante parmi la superficie totale des céréales biologiques cultivées en Belgique, soit une superficie minimale de 1600 ha sur un total d'environ 13000 ha de céréales biologiques (Lahon, 2019), le triticales étant intégré dans bon nombre de mélanges de céréales et légumineuses (Faux *et al.*, 2019).

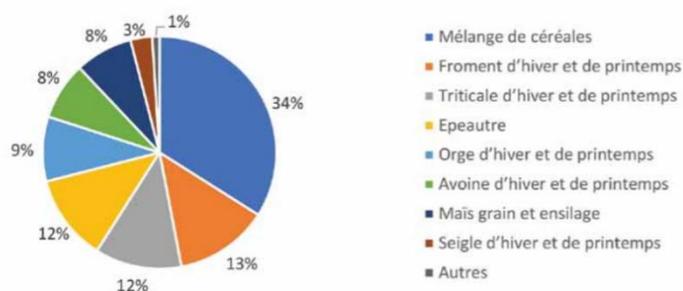


Figure 1 : Répartition des surfaces belges de céréales biologiques par espèce en 2018 (Lahon, 2019).

On peut remarquer sur la Figure 2 ci-dessous une légère évolution de la production de triticales wallonne entre 2017 et 2019 bien que l'on rencontre encore des problèmes d'indisponibilité du triticales, ce qui implique donc la nécessité de se fournir sur d'autres marchés (Lahon, 2019).

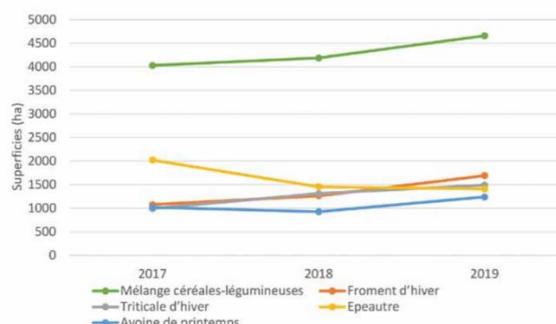


Figure 2 : Evolution des superficies wallonnes des principales céréales biologiques cultivées entre 2017 et 2019 (Lahon, 2019).

1.6 Introduction du triticale dans le régime alimentaire du poulet de chair

Le triticale présente de nombreux atouts pour l'alimentation des volailles. Il est légèrement moins riche en amidon que le froment, $74,4 \pm 1,7\%$ contre $76,3 \pm 6,9\%$ pour ce dernier selon Faux *et al.* (2019), et $67,8\%$ pour le triticale contre $69,1\%$ pour le froment selon les Tables INRAE- CIRAD- AFZ (2017-2021). Ces pourcentages sont exprimés en % de matière sèche du grain. Cependant, l'amidon du triticale semble mieux digéré par le poulet par rapport à celui du froment (Arvalis – Institut du Végétal, 2015 ; International Triticale Association, sd). En outre, le contenu en amidon du triticale semble varier selon la variété et les conditions pédoclimatiques (Fraš *et al.*, 2016 ; Rakha *et al.*, 2011).

Un atout supplémentaire du triticale concerne ses teneurs en acides aminés. Il contient notamment des teneurs en lysine et thréonine digestibles plus élevées que le froment, ces acides aminés étant essentiels pour les volailles (Mailleux *et al.*, 2021). Sa teneur en méthionine digestible, la méthionine étant l'acide aminé le plus limitant en poulet de chair, est assez semblable à celle du froment, il est cependant un peu plus pauvre en tryptophane digestible (Korver *et al.*, 2004 ; Mailleux *et al.*, 2021). Le triticale présente donc une valeur nutritive protéique intéressante et supérieure à celle du froment, du fait de son contenu en acides aminés limitants, principalement en lysine, thréonine et méthionine (Tableau 2).

Tableau 2 : Composition biochimique et valeurs alimentaires du froment et du triticale pour les porcs et les volailles – Les données sont fournies par rapport à la matière fraîche (AviFaF,nd).

Matières premières	MS (%)	EMAn coq (kcal/kg)	MAT (%)	MG (%)	CB (%)	Méthionine + cystine (g/kg)	Lysine digestible (g/kg)	Méthionine digestible (g/kg)	Thréonine digestible (g/kg)	Tryptophane digestible (g/kg)
Froment	86,8	2980	10,5	1,5	2,2	3,82	2,56	1,51	2,7	1,05
Triticale	87,3	2960	9,6	1,4	2,3	3,59	3,26	1,54	2,9	0,94

Le triticale est également la céréale qui contient les teneurs en phosphore disponible pour les volailles les plus élevées. La teneur en phosphore totale du triticale est supérieure à celle du froment, avec $3,97\text{g/kg}$ de MS contre $3,67\text{g/kg}$ de MS pour le froment, dont $1,86\text{g/kg}$ MS est sous forme de phosphore phytique pour le triticale contre $1,92\text{g/kg}$ pour le froment. L'activité phytasique du triticale étant supérieure à celle du froment, du fait de sa descendance du seigle, cela peut expliquer cette disponibilité accrue du phosphore (Rodehutschord *et al.*, 2016).

Les céréales et coproduits des céréales peuvent constituer jusqu'à 75 à 80% (en % sur brut) du régime des poulets de chair, elles représentent en conséquence un apport énergétique important du fait de leur contenu en amidon. Elles présentent cependant une faible teneur en protéines (Juin *et al.*, 2015). Les régimes des poulets de chair biologiques sont constitués au minimum de 30% de maïs pour assurer une couleur des graisses optimale et recherchée par le client (Lahon, 2019), et leur teneur peut monter

jusqu'à 65% (Juin *et al.*, 2015). La part de céréales dans la ration est complétée le plus souvent par le froment et le triticale.

Actuellement, les taux d'introduction classiquement pratiqués par les firmes de fabrication des aliments du bétail et les éleveurs sont variables, mais le plus souvent faibles pour le triticale. De fait, on a tendance à limiter son taux d'incorporation dans les régimes des poulets de chair afin de réduire le risque d'apparition de problèmes liés à sa viscosité spécifique.

De fait, de nombreux travaux historiques ont démontré des réductions de performances suite à l'ingestion de teneurs élevées en NSPs (Polysaccharides non amylacés) dans les régimes des poulets de chair à base de froment, orge, seigle ou triticale (Annison & Choct, 1991 ; Bedford, 2018). Selon les recommandations de DSM pour les poulets à croissance rapide, des taux d'incorporation maximums de 20-25% de froment peuvent être pratiqués dans les régimes, selon l'âge des volailles et dans des régimes exempts d'enzymes exogènes. Les valeurs pour le triticale sont inférieures à celles du froment, variant de 5 à 15%, mais tout de même plus élevées que celles du seigle, céréale plus riche en AXs et β -glucanes.

2. La viscosité du triticale

2.1 Les arabinoxylanes et β -glucanes

Les grains de céréales à paille contiennent des teneurs variables en AXs et β -glucanes solubles et insolubles dans l'eau, des polysaccharides structuraux dont les proportions varient majoritairement en fonction de la variété et des conditions environnementales. Ces molécules appartiennent au groupe des hémicelluloses, ou polysaccharides non amylacés, nommés NSPs (Knudsen, 2014). Elles sont localisées dans les parois primaires de l'albumen du grain, lui-même constitué de l'albumen amylacé, contenant des NSPs solubles, et de la couche à aleurones, contenant des NSPs insolubles. Les AXs sont également situées dans les tissus externes du grain qui assurent sa protection (Saulnier *et al.*, 2007).

Les AXs et β -glucanes solubles, et principalement les AXs dans le cas du triticale, ont pour effet d'augmenter la viscosité des digestas dans les premières parties du tractus digestif des monogastriques du fait de leur capacité de rétention d'eau importante (Levy Häner *et al.*, 2015). Les polysaccharides non amylacés insolubles ont également des effets anti-nutritionnels puisqu'ils exercent un effet « cage » qui empêche l'accès des enzymes aux nutriments (Musigwa *et al.*, 2021).

Les AXs ont des structures variables, qui influencent leur caractère viscosant.

Ce sont des polymères faisant partie de la famille des xylanes. Ils sont formés d'une succession linéaire de xyloses, plus particulièrement de résidus (1->4)- β -D-xylopyranosyl sur lesquels se greffent des groupements α -L- arabinofuranosyl au niveau des O2 et/ou O3 (Knudsen, 2014). Le rapport arabinose sur xyloses, soit le degré de substitution de la chaîne de xylose par des résidus arabinoses est utilisé pour caractériser la structure des AXs. Les AXs constitués de xyloses monosubstitués, de haut poids moléculaire et présentant un ratio arabinane/xylane faible seraient plus solubles dans l'eau, et donc plus susceptibles de générer cette viscosité (Levy Häner L. *et al.*, 2013B ; Martinant *et al.*, 1998). Cependant cela dépend aussi de leur interaction par des liaisons covalentes avec d'autres constituants des parois (Saulnier *et al.*, 2007).

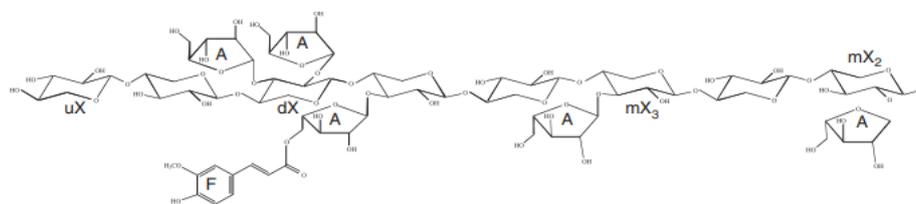


Figure 3 : Structure des arabinoxylanes de l'endosperme du froment– A : arabinose ; X : xylose ; F : acide férulique ; uX : xylose non substitué ; dX : xylose disubstitué ; mX₂ : xylose monosubstitué en O-2 ; mX₃ : xylose monosubstitué en O-3 (Saulnier *et al.*, 2007).

Les β -glucanes, eux, sont des polymères formés d'une succession de résidus D-glucopyranosyl. Ceux-ci sont reliés par deux à trois liaisons β (1->4) consécutives puis par une liaison β (1->3), et ainsi de suite (Knudsen, 2014). Les β -glucanes sont présents à des moindres concentrations chez le triticale, de telles substances sont plus abondantes dans des céréales telles que l'orge ou l'avoine.

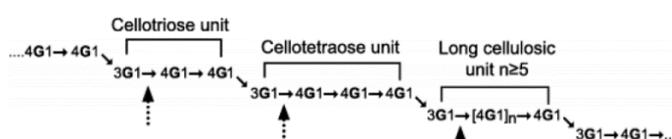


Figure 4 : Structure d'une molécule de β -glucane (Knudsen, 2014).

Rakha *et al.* (2011) démontrent que la proportion de NSPs solubles, et donc susceptibles de générer une certaine viscosité intestinale, varie en fonction de la céréale et de la variété étudiée, ce qui peut expliquer les résultats divergents des études menées à ce sujet. De fait, selon Rakha *et al.* (2011) et Rodohustcord *et al.* (2016), la proportion d'AX solubles par rapport aux AX totales serait supérieure chez le seigle, ils parlent respectivement de 30%, et 42%. En revanche, pour le froment et le triticale, cette proportion serait très semblable. Selon Fra \acute{s} *et al.* (2016), 15% des NSPs seraient solubles chez le triticale et le froment, et 20% environ d'après Rodohustcord *et al.* (2016).

Le Tableau 3 résume des teneurs moyennes en β -glucanes et AXs du triticale, ainsi que du froment, et du seigle, l'un de ses parents d'hybridation.

Tableau 3 : Teneurs moyennes en β -glucanes et arabinoxylanes du grain de triticale, du froment, et du seigle, l'un de ses parents d'hybridation (Rakha *et al.* 2011 ; Randhawa *et al.*, 2015 ; Knudsen, 2014) – Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes retrouvées parmi les sources citées – .

Céréale	Froment	Seigle	Triticale
β -glucanes (en % MS)	0,4	1,7	0,5 – 1
AXs totales (en % MS)	6 – 7,3	8,4 - 8,8	5,9 - 7,5
AXs solubles (en % MS)	0,8 - 1,8	1,2-3,7	1,5- 3,5

Il a été démontré à maintes reprises que ces substances réduisent les performances zootechniques des poulets de chair, or, la mesure de la viscosité qu'elles induisent n'est pas évidente puisqu'elle peut ne pas s'exprimer dans le tube digestif des animaux du fait de la présence et de l'action des xylanases internes au grain, des inhibiteurs de celles-ci et de l'adaptation du microbiote intestinal. Ces points seront détaillés ci-dessous.

2.2 Les conséquences de la viscosité

Les AXs et β -glucanes solubles, au vu de leur poids moléculaire et de leur conformation, ont la capacité de s'imprégner d'eau au sein du tube digestif du poulet de chair (Levy Häner *et al.*, 2015 ; Saulnier *et al.*, 2007 ; Rhaka *et al.*, 2011), ce qui a pour conséquence d'augmenter la viscosité des digestats. Ce processus est à l'origine des effets anti-nutritifs des céréales telles que l'orge, le seigle, le froment ou encore le triticale, objet de cette étude.

De fait, l'accroissement de la viscosité des digestas a pour effet de ralentir le déplacement du bol alimentaire, de réduire l'efficacité du mixage des digestats, et ainsi d'induire un mouvement moindre des solutés. Cela implique alors une réduction de la capacité d'absorption intestinale des protéines, des lipides et de l'amidon (Bedford, 2018).

Cette viscosité constitue également une barrière physique à l'activité des enzymes intestinales qui atteignent difficilement les digestas (Beckers *et al.*, 2005).

Le microbiote du système digestif du poulet de chair se voit également modifié par la présence de ces substances. Une prolifération bactérienne au niveau des parties distales de l'intestin grêle a pu être observée (Beckers *et al.*, 2005). Cela a pour effet d'augmenter la fermentation dans l'intestin grêle de nutriments qui auraient pu être digérés par les enzymes endogènes et les produits issus de la digestion utilisés pour la croissance du poulet (Matthiesen *et al.*, 2020). Tout cela a pour conséquence de réduire l'efficacité de l'utilisation des nutriments au vu du moindre accès des enzymes aux substrats (Knudsen, 2014) ainsi que le contenu en énergie métabolisable apparente du triticale (Métayer *et al.*, 2007). Les performances zootechniques du poulet de chair en sont finalement négativement affectées.

Des teneurs élevées en NSPs solubles sont également à l'origine de fientes plus humides et plus collantes. De fait, pour pallier la viscosité générée dans son tube digestif, le poulet a tendance à augmenter sa consommation d'eau pour diluer les matières viscosantes, ce qui a pour conséquence d'humidifier les litières (Carré *et al.*, 1994). Or, une humidité élevée de la litière est à l'origine de divers déséquilibres sanitaires ; cela favorise notamment le développement microbien, induisant alors une fermentation de la litière. En outre, l'ammoniac produit par ces microorganismes peut mener à des problèmes respiratoires des poulets (Dennery *et al.*, 2012).

De telles propriétés de la litière conduisent à un abîmement du bréchet des animaux, la qualité des carcasses s'en voit donc réduite (Carré *et al.*, 1994). De manière générale, l'inconfort que cela génère pour les animaux augmente leur sensibilité à diverses pathologies (Dennery *et al.*, 2012).

2.3 Les facteurs impactant les teneurs en arabinoxylanes et β -glucanes

2.3.1 Le déterminisme génétique

Alors que les teneurs en AXs totales semblent plutôt stables d'une variété de froment à l'autre et peu affectées par le facteur génétique, les teneurs en AXs solubles dans l'eau, elles, sont impactées de façon significative par le facteur variétal (Dornez *et al.*, 2008A ; Saulnier *et al.*, 1995). Li *et al.*, 2009 démontrent, eux, qu'à la fois les AXs totales et les AXs solubles dans l'eau dépendent du facteur génétique.

Selon Levy Häner *et al.* (2015) et Dornez *et al.* (2008A), le facteur variétal expliquerait 50% de la variabilité de la viscosité, et plus de 70% selon Levy Häner *et al.* (2013A). Le choix variétal a donc toute son importance dans ce contexte de limitation de la viscosité intestinale chez les poulets.

2.3.2 L'environnement et les caractéristiques pédoclimatiques

L'impact des caractéristiques pédoclimatiques du milieu sur les teneurs en β -glucanes et AXs est presque équivalent, et parfois même plus marqué que celui de la variété (Li *et al.*, 2009 ; Levy Häner *et al.*, 2015), comme l'ont démontré Li *et al.* (2009) sur les teneurs en AX totales et solubles. Il a notamment été démontré à plusieurs reprises qu'un froment soumis à un stress hydrique au cours de son développement présente une viscosité plus élevée (Levy Häner *et al.*, 2015 ; Li *et al.*, 2009), et ce d'autant plus que ces conditions succèdent à la floraison (Levy Häner *et al.*, 2013 A).

A l'inverse, les teneurs en AXs, dans le cas du froment, et en β -glucanes, dans le cas du seigle, et donc la viscosité semblent légèrement inférieures dans les systèmes irrigués par rapport aux systèmes non irrigués (Levy Häner, 2013A ; Grosjean *et al.*, 1999). La même constatation a été faite dans le cas de l'orge (Jirsa *et al.*, 2018 ; Pérez-Vendrell *et al.*, 1996). L'apport en eau permettrait une accumulation d'amidon par rapport aux AXs solubles (Gan *et al.*, 1998).

Selon Levy Häner *et al.* (2013 B et 2015), les triticales soumis à une température élevée pendant les phases de maturation et de remplissage du grain, période durant laquelle a lieu une modification structurale et compositionnelle des parois cellulaires, présenteraient une moindre viscosité.

Cependant, Zhang *et al.* (2010) ont montré que lorsque le triticales est soumis à des températures élevées et des conditions de sécheresse, les teneurs en AX étaient accrues, à l'opposé, elles étaient réduites sous des températures modérées et un arrosage correct.

Les résultats d'études concernant l'effet de la température sur la viscosité semblent contradictoires. Il semblerait que des interactions entre facteurs environnementaux impacteraient également la viscosité du triticales, et que le stade de la céréale soit déterminant également.

2.3.3 Les enzymes endogènes

Les grains de céréales contiennent également des endo- β -(1,4)- xylanases à raison de, en moyenne, 1.81EU (Unité Endoxylanase)/g ainsi que des inhibiteurs d'endoxylanases qui peuvent affecter la viscosité des céréales (Dornez *et al.*, 2008A). La majorité de ces endoxylanases est d'origine microbienne, et dans une moindre mesure d'origine interne à la plante (Dornez *et al.*, 2008A). Ces teneurs en xylanases et en inhibiteurs semblent affectées à la fois par l'environnement, le génotype ainsi que par les inputs tels que la fertilisation azotée (Dornez *et al.*, 2008A et B ; Gebruers *et al.*, 2010).

Le traitement technologique subi par les aliments peut affecter l'activité de ces enzymes et inhibiteurs d'enzymes endogènes. De fait, selon Carré *et al.* (1994), les traitements technologiques à haute température ont pour effet d'inhiber les enzymes endogènes de la céréale, ce qui permet à la viscosité des polysaccharides non amylacés solubles de s'exprimer pleinement.

3. L'ajout d'enzymes dans les régimes du poulet de chair

Des enzymes sont traditionnellement ajoutées dans les régimes des volailles dans le but d'améliorer la digestibilité d'aliments peu ou difficilement digestes et ainsi les performances zootechniques des poulets, la valeur alimentaire des aliments présentés étant accrue. C'est le cas notamment des NSPs, pour lesquels les volailles ne sécrètent pas d'enzyme capable de les digérer.

Les premières utilisations d'enzymes en alimentation animale remontent à 1925. Au début, l'amélioration de performance de volailles nourries avec de l'orge était faussement attribuée à l'ajout d'amylases, et c'est en 1960 que l'action des glucanases a été mise en évidence, lorsque l'utilisation d'amylases purifiées n'a pas démontré les résultats observés précédemment (Bedford, 2018). Ces amylases utilisées contenaient en fait d'autres activités, comme les β 1-3, 1-4 glucanases responsables des bienfaits observés. Ces enzymes du type xylanase et glucanase ont dès lors été utilisées.

Dans la majorité des expériences menées à ce sujet, les enzymes alimentaires ont permis une amélioration des performances zootechniques des volailles (Bedford, 2018).

Les effets couramment observés suite à l'ajout d'enzymes, et plus particulièrement de xylanases et de β -1-3-1-4-glucanases dans des régimes riches en céréales sont divers.

Premièrement, une réduction de la viscosité intestinale de jeunes poulets ainsi que de l'humidité fécale a pu être observée (Bedford, 2018). Dans un essai sur poulets à croissance rapide (Matthiesen *et al.*, 2020) dans lequel on a ajouté une enzyme commerciale, nommée Ronozyme® WX à base de xylanase dans le régime alimentaire des poulets, on a pu démontrer une amélioration des paramètres de production du poulet, soit la prise alimentaire, le GQM (Gain quotidien moyen), et l'IC (indice de consommation) (Matthiesen *et al.*, 2020). Une autre enzyme, Rovabio® Advance T-Flex comprenant des actions xylanasiques, β -glucanasiques et arabinofuranosidasiques dans les régimes de poulets à croissance rapide a permis une amélioration de l'EMA (énergie métabolisable apparente) et de l'EN (énergie nette) à la fois dans les régimes riches et pauvres en NSPs solubles (Musigwa *et al.*, 2021). Vandeplass *et al.* (2010) démontrent également une amélioration de la digestibilité de l'azote et des fibres, en plus d'une amélioration de l'EMA.

Les enzymes alimentaires semblent donc apporter des bienfaits, mais une incertitude subsiste quant à la source de ces bienfaits (Bedford, 2018).

Plusieurs études démontrent que l'ajout de xylanases améliorerait la digestibilité des protéines, des matières grasses, de l'amidon et de la cellulose de manière générale. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la présence de xylanases améliore l'accès des enzymes propres à l'animal telles que les amylases et les protéases aux nutriments, le mixage des aliments est alors plus efficace (Matthiesen *et al.*, 2020 ; Bedford, 2018 ; Widodo *et al.*, 2018A).

Aussi, l'étude menée par Matthiesen *et al.* (2020) a mis en évidence que l'ajout des enzymes réduisait la viscosité et améliorait la digestibilité déjà au niveau du jéjunum, puis au niveau de l'iléum (Matthiesen *et al.*, 2020). Les nutriments sont alors absorbés dans la partie proximale de l'intestin, où la microflore est censée être moins dense. Grâce à cet apport de xylanases, plus de nutriments sont disponibles pour la croissance du poulet et non détournés par la microflore intestinale ou les bactéries pathogènes qui les utilisent comme substrat au détriment de la volaille (Matthiesen *et al.*, 2020 ; Danisco Animal Nutrition, 2014).

Les bienfaits de l'apport d'enzymes ne s'arrêteraient pas là. De fait, les xylanases induisent la libération de xylo-oligomères de faible poids moléculaire (AXOS) efficacement fermentés par les bactéries bénéfiques du type *Bifidobacterium*. On observe alors une production accrue de AGCC (acide gras à chaîne courte). C'est une source d'énergie importante mais cela permet aussi de réduire le pH intestinal. Cette réduction du pH intestinal permet alors la croissance et le développement de microbes bénéfiques et d'inhiber la croissance de bactéries pathogènes (Baker *et al.*, 2021, Bedford, 2018 ; Widodo *et al.*, 2018B ; Matthiesen *et al.*, 2020 ; Bautil *et al.*, 2020). Ces AXOS auraient donc un effet prébiotique du fait qu'ils induisent la croissance et le développement d'un microbiote bénéfique à la santé générale du poulet, telles que des bactéries du genre *Bifidobacterium* dans le cæcum (Matthiesen *et al.*, 2020, Danisco Animal Nutrition, 2014).

Tous ces résultats proviennent d'études menées sur des poulets à croissance rapide. Notons qu'il n'existe que très peu, voire pas de résultats d'études menées sur des poulets à croissance lente.

III. Objectifs du travail

Le triticale est une céréale ayant de nombreuses propriétés attractives pour les éleveurs de volailles en AB. De fait, elle présente de nombreux atouts d'un point de vue agronomique notamment par sa tolérance aux stress biotiques et abiotiques et sa compétitivité face aux adventices.

Elle présente également des avantages nutritionnels pour les volailles. En effet, cette céréale est pourvue d'une valeur protéique supérieure à celle du froment au vu de son contenu en acides aminés limitants pour les poulets. L'amidon qu'elle contient serait également plus digestible par les volailles.

Cependant cette céréale contient des NSPs, les AXs et β -glucanes, dont les teneurs varient principalement en fonction de la variété et des caractéristiques pédoclimatiques du milieu telles que les précipitations, ou encore la température.

Divers effets néfastes liés à la présence de ces substances ont été décrits chez les poulets à croissance rapide, tels qu'une moindre absorption de nutriments, une humidité des litières ou encore une modification du microbiote intestinal, qui ont pour conséquence de réduire les performances zootechniques des volailles.

En revanche, les effets de telles molécules sur les performances de croissance des poulets à croissance lente n'ont pas, ou très peu été étudiés jusqu'à présent.

En réponse à cette problématique observée chez les poulets à croissance rapide, les éleveurs et les firmes productrices d'aliments limitent les taux d'incorporation du triticale dans les régimes des volailles biologiques. Ils travaillent également avec des enzymes exogènes du type xylanases et glucanases, qui permettent alors aux volailles de digérer ces substances et de ce fait, d'accroître la valeur alimentaire de cette céréale.

Face à ces constatations, l'objectif de ce travail est double. Premièrement, il consistera à définir l'importance de la viscosité du triticale pour le choix variétal en aviculture biologique. Dans un second temps, l'objectif sera de définir si l'utilisation des enzymes hydrolysant les NSPs avec le triticale en aviculture biologique a un intérêt, ou pas.

Les éleveurs et firmes productrices d'aliments pourront de la sorte adapter leurs pratiques en fonction des résultats obtenus.

Ces objectifs seront atteints au travers d'une expérience menée en poulailler mais également d'une caractérisation physico-chimique et agronomique des variétés étudiées.

IV. Matériel et méthodes

Ce TFE se scinde en une partie phytotechnique et une partie zootechnique.

La partie phytotechnique comprend deux aspects :

- La caractérisation physico-chimique de 7 variétés de triticale cultivées durant la saison culturale 2020 dans les conditions de l'agriculture conventionnelle (3 sites) et biologique (2 sites)
- La phytotechnie de 13 variétés de triticale cultivées en 2021 en AB sur un site

La partie zootechnique consiste en un essai de croissance durant les 35 derniers jours du poulet de chair à partir de 3 variétés de triticale complémentées ou non avec une hémicellulase exogène.

1. Caractérisation physico-chimique de variétés de triticale

1.1 Les échantillons

Sept variétés de triticale, cultivées sur cinq sites expérimentaux distincts, durant la saison culturale 2020 ont été caractérisées analytiquement. Pour chaque variété et chaque site d'essai, un échantillon de grains était disponible résultant en un total de 35 échantillons.

Trois des cinq sites expérimentaux étaient consacrés aux examens VCU (Valeur Culturelle et d'Utilisation). Ils étaient localisés à Ernage, Sommethonne et Warempage respectivement, et conduits dans les conditions de l'agriculture conventionnelle avec toutefois plusieurs restrictions : aucun régulateur de croissance, ni fongicide ne pouvait être appliqué. La fertilisation azotée, quant à elle, s'élevait respectivement à 80 (50-0-30), 140 (32-81-27) et 102 (48-54-0) unités d'N minéral par ha. Les deux sites expérimentaux restant étaient cultivés en AB. Ils étaient localisés à Rhisnes et Horion-Hozémont. Aucun traitement phytosanitaire n'a été réalisé. La fertilisation azotée s'élevait à 80 et 56 unités d'N organique à Horion et à Rhisnes respectivement.

1.2 Paramètres physico-chimiques caractérisés

Trente-et-un paramètres physico-chimiques des grains de triticale ont été caractérisés sur les 38 échantillons au sein du laboratoire de technologie céréalière du département Connaissance et Valorisation des Produits (D4), Unité valorisation des produits, de la biomasse et du bois (U11) du CRA-W.

1.2.1 Humidité des grains, teneur en protéines et poids à l'hectolitre

Les mesures de l'humidité des grains (ISO 712 :2009), de la teneur en protéines et du poids à l'hectolitre ont été réalisées par l'InfratecTM NOVA, qui utilise le spectre obtenu par transmission dans le proche infrarouge de 400 à 1100 nm pour prédire l'humidité et la teneur en protéines des grains. La teneur en azote, puis la teneur en protéines sont déterminées selon le principe de Dumas (ISO 16634-2 :2016) où la teneur en protéines équivaut à la teneur en N multipliée par un coefficient (*i.e.* 6,25). Le poids à l'hectolitre est mesuré par gravimétrie (ISO 7971-3 :2019).

1.2.2 Poids de mille grains

L'appareil Duran de GTEP est le compteur de grains utilisé pour la détermination du poids de 1000 grains selon la méthode de référence ISO 520:2010.

1.2.3 Temps de chute de Hagberg

Préalablement à la mesure du temps de chute de Hagberg, une mouture intégrale des grains est préparée. Les échantillons sont passés dans un broyeur Laboratory Mill 3100, avec une grille munie de

mailles de 0,8mm de diamètre. Ensuite, une prédiction de l'humidité à l'infrarouge est réalisée sur cette mouture afin de pouvoir corriger les valeurs obtenues pour une humidité de référence de 15%.

C'est le Perten Falling Number® qui a été utilisé pour déterminer le temps de chute de Hagberg. Il s'agit de la méthode internationale standardisée (ISO 3093:2009) pour la mesure de l'activité α -amylasique dans les grains de céréale.

Un agitateur Perten Shakematic sample Mixer est utilisé afin de mélanger la mouture intégrale à l'eau, ce mélange est ensuite utilisé pour la mesure.

1.2.4 Dureté NIRS

La dureté des grains est mesurée via la spectroscopie NIR (Near Infrared Reflectance), par la méthode ACC International 39-70-02. Elle est donnée sur une échelle de 1 à 100. Cette mesure est réalisée sur les moutures intégrales broyées cette fois avec l'outil Foss Cyclotec™1093, qui permet de former une mouture intégrale des grains, qui passe à travers un tamis à maille circulaire de 1mm, adaptée à la mesure de la dureté des grains par spectroscopie NIR.

1.2.5 Composition chimique du grain (teneur en fibres, matière grasse, amidon et cendres)

La composition chimique des grains a été prédite par des équations sur base du spectre proche infrarouge de 400 à 2500 nm obtenu par réflexion de la mouture intégrale des grains, produite avec le broyeur Laboratory Mill 3100. La teneur en cendres est déterminée par incinération (méthode ISO 2171 :2007), la teneur en amidon par la méthode polarimétrique ISO 10520:1997, et la teneur en fibres par la méthode ISO 5498:1981. La teneur en matières grasses a été déterminée par la méthode d'extraction de Randall (ISO 11085 :2015).

1.2.6 Granulométrie des grains, moutures intégrales (Foss Cyclotec™1093)

La mesure de la granulométrie a été réalisée par l'appareil QicPic, un analyseur d'images dynamiques de la marque Sympatec, avec le module de dispersion GRADIS pour la mesure de la granulométrie des grains, et le disperseur RODOS pour la mesure de la granulométrie des moutures intégrales.

1.2.7 Analyse de la couleur des grains et des moutures intégrales (Laboratory Mill 3100)

Une analyse de la couleur des grains et des farines a également été réalisée avec le spectrophotomètre ColorFlex® EZ développé par la marque HunterLab, par la méthode ISO/CIE 11664:2019 (en). Cet appareil fournit les valeurs A (position sur l'axe rouge/vert), B (axe jaune/bleu) et L (axe de la clarté). Ensuite, l'indice de blancheur est obtenu par la formule :

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + A^2 + B^2}$$

(Equation 1)

1.2.8 Mesure de la viscosité des grains

C'est la mouture préparée pour la mesure du temps de chute de Hagberg qui est utilisée pour la mesure de la viscosité liée aux AXs et β -glucanes au Rapid Visco Analyzer (RVA).

Le RVA est un viscosimètre à tête rotative qui permet de suivre l'évolution de la viscosité d'une suspension au cours d'un cycle de chauffage/ refroidissement. Le profil typique du RVA est présenté sur la Figure 5 ci-dessous. Les mesures réalisées au cours du cycle du RVA et qui seront étudiées dans ce travail sont la viscosité après une minute d'analyse, la viscosité après deux minutes, la viscosité au pic (Peak viscosity), la viscosité au creux (Holding Strength) et la viscosité finale ('Final' viscosity).

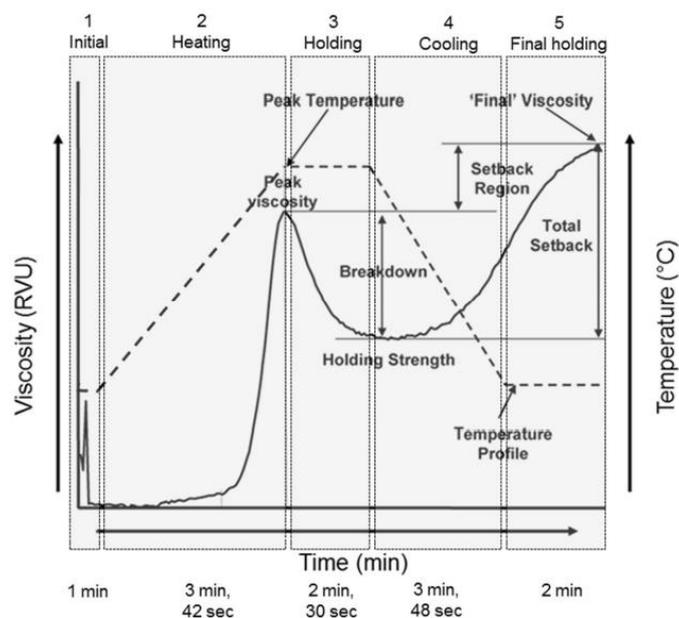


Figure 5 : Profil d'un RVA typique d'une céréale, reprenant les diverses mesures réalisées au cours d'un cycle classique (Balet *et al.*, 2019).

Classiquement, cet appareil permet la mesure de la viscosité liée au contenu en amylose et en chaînes d'amylopectines des grains (Colleoni-Sirghie *et al.*, 2004). Dans ce cas, il a été utilisé dans le but de caractériser la viscosité liée aux AXs et β -glucanes des grains de triticale uniquement. Pour ce faire, une certaine quantité d' α -amylase thermostable de Megazyme (3,000 U/mL; 54U/mg) est ajoutée au mélange eau-mouture intégrale afin de ne plus observer l'effet de la viscosité de l'amidon, et de n'observer que la viscosité liée aux β -glucanes et AXs solubles. En outre, l'analyse est réalisée avec deux solutions distinctes : de l'eau déminéralisée complétée avec une α -amylase d'une part et de l'AgNO₃ 2mM, un inhibiteur d'enzymes, d'autre part. Dans ce dernier cas, on observe alors la viscosité liée à la fois aux hémicelluloses solubles et à l'amidon qui se gélifie.

Avant de réaliser les analyses sur les échantillons de l'expérience, une mise au point a été réalisée sur des échantillons témoins afin de calibrer au mieux la méthode expérimentale.

La mise au point de la méthode à utiliser s'est basée sur un article de Colleoni-Sirghie *et al.* (2004) qui illustre le développement d'une méthode de mesure de la viscosité due aux β -glucanes chez l'avoine.

Un programme d'une durée de 20 minutes a été créé, identique au programme utilisé par Colleoni-Sirghie *et al.* (2004) en termes de température et de vitesse de rotation et développé par Zhou *et al.* (2000). Comme préconisé dans cet article, une quantité importante d' α -amylase thermostable, soit 560 μ l a été ajoutée au mélange eau - mouture intégrale. Une prise plus importante qu'habituellement, de 11,2 g, a été définie comme étant la plus adaptée à la mesure avec le mélange eau- α -amylase - mouture intégrale. Ce fait est basé sur des travaux réalisés sur le malt d'orge (Godin *et al.*, 2017), l'objectif étant de pouvoir visualiser la viscosité avec plus de précision sur le graphe sorti par le RVA, l'ajout d'enzyme faisant que la viscosité mesurée est très faible par rapport à une mesure classique du RVA (Godin *et al.*, 2017).

Deux modalités ont donc été réalisées par échantillon, chacune répétée deux fois. La première modalité consiste en un apport de 4g de farine, avec 24g d'AgNO₃ 2mM. La seconde modalité consiste en un apport de 11,2g de farine avec 24g d'eau et 560 μ l d' α -amylase. Ces quantités correspondent à une base de 14% d'humidité.

1.2.9 Teneurs en arabinoxyanes, arabinanes, xylanes et β -glucanes solubles

Cette mesure est réalisée en 4 étapes sur la mouture préparée pour la mesure du temps de chute de Hagberg. Elle débute par une concentration des NSPs solubles à l'éthanol, elle se poursuit par une solubilisation des hémicelluloses solubles. Ensuite, ces hémicelluloses solubles subissent une hydrolyse acide en monosaccharides et ceux-ci sont ensuite dosés par chromatographie.

Le détail de ces étapes se trouve en annexe (*cf* Annexe 1).

1.3 Analyse statistique

La variabilité de chacun des paramètres mesurés à travers les variétés et sites expérimentaux a été visualisée via la réalisation de boxplots. Les relations entre paramètres et la dispersion des échantillons selon ceux-ci ont été étudiées via la réalisation d'une analyse en composantes principales et le test de corrélation de Pearson entre paires de paramètres.

Cette première analyse de données a montré qu'aucune distinction ne peut être faite entre les propriétés physico-chimiques des échantillons issus des essais VCU (site d'Ernage, Sommethonne et Warempage) et celles des échantillons issus des essais conduits en AB (Horion-Hozémont et Rhisnes). Dès lors, l'analyse de la variance incluait deux facteurs, le facteur « site d'essai » et le facteur « variété ».

Leurs effets ont été testés sur chacun des paramètres mesurés successivement en utilisant le modèle mixte suivant :

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

(Equation 2)

où y_{ij} est la valeur observée pour la variété i dans le site j , μ est la réponse globale moyenne observée, α_i l'effet de la variété i , β_j est l'effet du site, et ε_{ij} l'erreur résiduelle associée à la variété i et au site j . Le modèle intégrait l'effet variétal comme effet fixe et l'effet du site d'essai comme effet aléatoire. Etant donné la présence d'un échantillon par combinaison de variété et de site, l'interaction entre les facteurs variété et site n'a pu être testée. La significativité des effets aléatoires n'étant pas fournie dans les résultats du test des modèles mixtes, l'effet aléatoire « site » a été testé *a posteriori* via le test de la différence de vraisemblance entre deux modèles, l'un incluant l'effet « site » (Equation 2), et l'autre sans effet « site ». En présence d'un effet variétal significatif ($p < 0.05$), les contrastes entre variétés ont également été testés par la méthode de Tukey.

Pour chaque paramètre, la normalité des données et l'homogénéité des variances parmi les différents sites d'essai ont été préalablement vérifiées en appliquant les tests de Shapiro et de Bartlett, respectivement sur les résidus de l'analyse de la variance (terme ε_{ij} de l'Equation 2).

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R (R Core Team, 2020). Le test du modèle mixte et l'analyse des contrastes ont été réalisés grâce aux fonctions *lmer* et *emmeans* des packages *lme4* et *emmeans*, respectivement.

2. Caractérisation agronomique

2.1 Localisation et organisation de l'essai

Les performances de treize variétés de triticale dans les conditions de l'AB ont été testées au sein d'un essai mis en place par le CRA-W en novembre 2020 dans la région agricole du Condroz, rue de l'Orgalise, 5350 Evelette (50°25'21''N-5°10'07''E). Les treize variétés testées sont les suivantes : Asellus, Bilboquet, Borodine, Brehat, Claudius, Elisir, Kasyno, Kitesurf, Lumaco, Ramdam, RGT Rutenac, Ruche, Vuka.

Le dispositif statistique comprend quatre blocs aléatoires complets, chaque variété est donc présente dans quatre micro-parcelles distinctes au sein de l'essai. Les micro-parcelles ont une surface de 13,5 m² (9*1,5m). Sur ce même site, des essais sont également menés sur froment, épeautre, petit épeautre et blé dur.

2.2 Itinéraire phytotechnique

La parcelle d'essai a reçu la certification biologique en 2011, les années de conversion correspondant aux années 2009 et 2010. Les précédents culturaux étaient, pour les cinq dernières années : prairie temporaire en 2020, froment en 2019, et prairie temporaire entre 2016 et 2018. L'ensemble des opérations culturales réalisées au cours de la saison sur la parcelle d'essai sont reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Ensemble des opérations culturales réalisées sur le champ d'essai.

Date	Opérations culturales
11-11-20	Labour Herse rotative (2x) Semis à 400 grains/m ² - 206 ± 36 kg/ha
22-03-21	Application engrais Orgafertil 6-6-12 à 30kgN/ha
12-04-21	Désherbage manuel
21-04-21	Deux passages herse étrille
28-05-21	Désherbage manuel
01-06-21	
07-06-21	
11-06-21	
14-06-21	

2.3 Relevés de terrain

Diverses mesures ont été réalisées au fil de la saison. Celles-ci sont présentées dans le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Paramètres agronomiques relevés sur le triticale.

Mesure	Date	Protocole
Résistance – Tolérance au froid	19-02-21 25-02-21	Attribution d'une valeur (échelle de 1 à 9) 9 : Aucun dégât 1 : Parcelle détruite par les dégâts du gel Si ≥ 5 , uniquement les feuilles sont touchées
Nombre de plantes par m²	11-03-21	Comptage du nombre de plantes par mètre linéaire, ramené ensuite par mètre carré. Quatre comptages par parcelle.
Nombre de talles	25-03-21	Comptage du nombre de talles de 8 plantes par micro-parcelle.
Couverture foliaire (1)	02-04-21 14-04-21 28-04-21 06-05-21 12-05-21	Estimation de la couverture foliaire par analyse d'image. Prise de deux photos par parcelle avec un smartphone maintenu à environ un mètre de hauteur et photographiant une largeur de 8 lignes de semis. Le pourcentage de couverture foliaire a ensuite été estimé en appliquant les fonctions « fieldMask » et « fieldArea » du package R « FIELDimager » (Matias <i>et al.</i> , 2020) sur les photos de la canopée.
Couverture foliaire (2)	14-04-21 22-04-21 28-04-21 06-05-21 12-05-21	Attribution d'une valeur (échelle de 1 à 9) 9 : Bonne couverture, parcelle sans « vide » 1 : Parcelle de terre nue >5 Plus de la moitié de la parcelle est correcte <5 Moins de la moitié de la parcelle est correcte
Port au tallage	14-04-21 22-04-21	Attribution d'une valeur (échelle de 1 à 9) 9 : Plagiotrope – port étalé 1 : Orthotrope – port dressé
Largeur des feuilles	14-04-21 22-04-21	Attribution d'une valeur (échelle de 1 à 9) 9 : Feuilles les plus larges 1 : Feuilles les moins larges
Précocité à l'épiaison	27-05-21 01-06-21 03-06-21 07-06-21 11-06-21	Date à laquelle le stade 51 est atteint (qui correspond au début de l'épiaison, au moment où l'épillet supérieur est sorti de la gaine et visible (Livre Blanc Céréales, 2017)). Afin de déterminer cette date, les parcelles ont été observées à 5 dates distinctes du 27/05 au 11/06. Plus cette date est précoce, plus la variété est précoce.
Hauteur des plantes	25-06-21	La hauteur de quatre plantes par parcelle est mesurée puis on calcule la moyenne.
Nombre d'épis	25-06-21	Comptage du nombre d'épis au mètre linéaire, à 3 endroits dans la parcelle.
Cotation maladies foliaires		Attribution d'une cotation (échelle de 1 à 9) 9 : Absence de symptômes 1 : Fortement développé

Parmi les paramètres agronomiques, l'observation des maladies n'est pas présentée dans les résultats, les maladies ayant fait leur apparition très tardivement dans la saison et leur cotation ayant été impactée par les pluies fin juin et début juillet.

2.4 Analyse statistique

La variabilité de chacun des paramètres agronomiques mesurés pour chaque variété a été visualisée pour chaque date de mesure et chaque bloc expérimental via la réalisation de boxplots. Ensuite, les corrélations entre variables mesurées ont été testées par la méthode de Pearson. Une analyse de la variance a été appliquée aux mesures réalisées au champ. Le modèle suivant a été utilisé :

$$y_{itk} = \mu + \alpha_i + \delta_t + (\alpha\delta)_{it} + \gamma_k + (\delta\gamma)_{ik} + \varepsilon_{itk}$$

(Equation 3)

Où y_{itk} est la valeur du paramètre pour la variété i observée à la date t au sein du bloc k , μ est la réponse globale moyenne, α_i l'effet de la variété i , δ_t l'effet de la date de mesure t , $(\alpha\delta)_{it}$, l'effet de l'interaction entre la variété i et la date de mesure t , γ_k , l'effet du bloc expérimental k , $(\delta\gamma)_{ik}$, l'effet de l'interaction entre la variété i , et le bloc k et ε_{itk} l'erreur résiduelle associée à la variété i , à la date d'observation t , et au bloc expérimental k . La date d'observation était considérée comme facteur discret. Le modèle intégrait les effets de la variété et de la date d'observation, et de leur interaction comme fixes, et les effets du bloc et de ses interactions avec la date d'observation comme aléatoires.

En l'absence de convergence du modèle, l'interaction entre la variété et le bloc n'a pu être testée. Pour les variables observées à une seule date (nombre de plantes/m², nombre de tiges, hauteur des plantes ; Tableau 5), l'équation 3 a été testée en excluant les termes incluant le facteur « date ».

En présence d'un effet fixe significatif ($p < 0.05$), les contrastes entre variétés et traitements enzymatiques ont également été testés par la méthode de Tukey.

3. Partie zootechnique

3.1 Matériel animal

Au total, 550 poussins mâles, de la souche XL 451 issue du couvoir L'œuf d'Or (Landenne) ont été utilisés au cours de l'essai en poulailler.

3.2 Dispositif expérimental

3.2.1 Organisation générale

Durant les 35 premiers jours d'âge des poulets, ceux-ci ont été répartis en 12 loges de 3m², et ont reçu des régimes alimentaires identiques.

A partir du 35^{ème} jour, ils ont été répartis en 48 loges de 1,5m², suivant un dispositif de bloc aléatoire complet avec répétitions. Le dispositif comprenait 4 blocs de 12 loges, le poids des poulets étant homogène par bloc, et par traitement. Six régimes différents, détaillés ci-après, ont été testés. Ce sont 528 poulets qui ont été utilisés pour l'essai à proprement parler, débutant au 35^{ème} jour, chaque loge comprenant 11 poulets. Au sein de chacun des 4 blocs, chaque traitement est répété deux fois. Par conséquent, chaque traitement est donc répété 8 fois au total (Figure 6).

En outre, les poulets supplémentaires ont été écartés dans une loge de réserve et ont reçu un régime classique.

		BLOC 3						BLOC 4					
Pen		26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
treatment		A	B	C	D	E	F	C	E	A	D	F	B
Pen		25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47
treatment		A	B	C	D	E	F	C	E	A	D	F	B
CORRIDOR													
Pen		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
treatment		B	D	E	F	A	C	E	B	F	C	A	D
Pen		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
treatment		B	D	E	F	A	C	E	B	F	C	A	D
		BLOC 1						BLOC 2					

Figure 6 : Dispositif expérimental – A : Borodine + complément sans enzyme, B : Borodine + complément avec enzyme, C : Brehat + complément sans enzyme, D : Brehat + complément avec enzyme, E : Vuka + complément sans enzyme, F : Vuka + complément avec enzyme.

Durant la première semaine de vie des poussins, une période d'éclairage de 24 heures a été instaurée, puis, à partir de leur septième jour de vie, une phase nocturne continue de 6 heures a été mise en place.

Des lampes chauffantes ont été placées dans les loges durant les 15 premiers jours, et allumées ou non en fonction des conditions de température extérieures. Un relevé journalier des paramètres d'ambiance (température et humidité relative) a été réalisé.

Seuls les aliments, la durée des phases diurnes et nocturnes et la densité animale par m² respectaient les prescriptions du cahier des charges de l'AB.

Dans ce dispositif, chaque loge est équipée d'une mangeoire et de trois abreuvoirs automatiques. De la sciure de bois a été utilisée comme litière.

En outre, des filets ont été apposés entre chaque loge afin d'éviter que les poulets ne puissent passer d'une loge à l'autre (Figure 7).

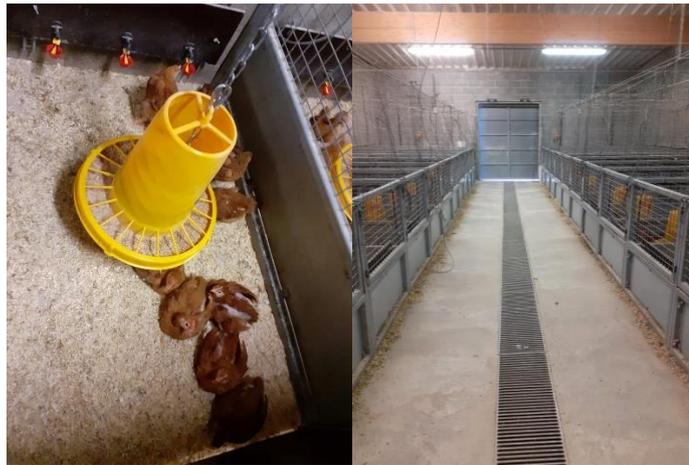


Figure 7 : Organisation du poulailler.

3.2.2 Alimentation des volailles

Les poussins ont reçu du jour 1 (J1) au jour 20 (J20), un aliment starter dépourvu de triticales et d'enzymes exogènes. Ensuite, entre les 20^{ème} et 35^{ème} jour (J35), ils ont été nourris avec un aliment de transition dépourvu de triticales et d'enzymes exogènes également. Ces aliments, fournis par la société Prodabio ont été distribués en miettes de manière ad-libitum.

L'essai à proprement parler a débuté au J35, et a duré jusqu'à l'abattage (J63 ou J70). Les volailles ont alors reçu les 6 régimes différents, soit une des trois variétés de triticales étudiées, Vuka, Borodine, ou Brehat, à viscosités à priori contrastées servies mélangées à un aliment complémentaire avec ou sans enzymes exogènes. Les formulations et les valeurs nutritionnelles des aliments starter, transition et des aliments complémentaires sont reprises en annexe (*cf*r Annexe 2). Concernant le triticales, il s'agit de semences biologiques, fournies par *Jorion Philipp seeds* pour les variétés Borodine et Brehat, et d'un lot issu de la récolte 2020 fourni par *Walagri* pour la variété Vuka.

Le triticales représente 60% du régime des volailles. L'aliment complémentaire contenant le prémix supplémenté avec le mélange d'enzymes ou non, représente les 40% restants. De l'huile de soja est apportée à raison de 1% au mélange afin d'améliorer l'appétence et la cohésion de l'aliment.

L'aliment complémentaire, fourni par la société Prodabio, est présenté en granulés, et mélangé au triticales moulu au broyeur à marteaux équipé d'une grille avec une maille de 5mm de diamètre. La distribution granulométrique du grain des 3 variétés de triticales, ainsi que des deux aliments complémentaires se trouve en annexe (*cf*r Annexe 3). Le mélange de l'aliment complémentaire et de la

variété de triticales concernée est réalisé dans une mélangeuse horizontale de manière à homogénéiser au maximum le régime final.

Enfin, c'est le cocktail d'enzymes Rovabio® Excel qui est présent dans le prémix de l'aliment complémentaire contenant les enzymes exogènes. Ce cocktail contient 19 activités enzymatiques distinctes issues d'un champignon non génétiquement modifié (*Talaromyces versatilis*) qui agissent de façon synergique afin d'hydrolyser les NSPs. Ce cocktail est constitué majoritairement de 300VU/g d'endo-1,3(4)- β -glucanase et 220 VU/g d'endo-1,4- β -xylanase.

3.2.3 Paramètres mesurés

Durant les 35 premiers jours de vie des poulets, un relevé journalier des paramètres d'ambiance (température et humidité relative) est réalisé ainsi qu'une pesée hebdomadaire de deux poulets par loge, soit 24 poulets au total afin de vérifier leur croissance.

A partir du 35^{ème} jour, soit le premier jour de l'expérimentation, une pesée hebdomadaire de chaque loge individuelle est réalisée. Le GQM des poulets peut alors être calculé. Une pesée individuelle des poulets de tous les traitements et répétitions sur deux des quatre blocs est également effectuée, en fin d'essai, soit le 18/05 pour le bloc 1 et le 25/05 pour le bloc 4, afin de mesurer l'homogénéité des poids des poulets par traitement.

La consommation par loge est quantifiée et l'indice de consommation calculé (qui est en fait le rapport entre l'aliment consommé et le gain de poids observé). Un relevé journalier des paramètres d'ambiance est toujours réalisé.

En outre, la durée de l'essai a été différente en fonction des blocs, l'essai ayant été arrêté une fois les poulets ayant atteint le poids d'abattage. L'essai a duré 4 semaines pour les blocs 1 et 3 qui comprenaient les plus gros poulets dès le début de l'expérience et 5 semaines pour les blocs 2 et 4.

3.3 Caractérisation des aliments

Des échantillons représentatifs collectés durant l'expérience des 6 régimes alimentaires présentés aux poulets, le grain de chacune des trois variétés de triticales et les deux types d'aliments complémentaires ont été caractérisés analytiquement.

Les teneurs en matière sèche analytique des aliments selon la méthode *AOAC, 1990, 934.01* et en cendres selon la méthode *AOAC, 1990, 942.05* ont été déterminées sur les échantillons représentatifs collectés durant l'expérience.

Ensuite, ces mêmes échantillons ont été broyés au broyeur Fritsch pulverisette 14.702, avec un tamis muni de mailles de 1 mm de diamètre, pour pouvoir être passés au spectroscope infrarouge. C'est un spectroscope XDS Rapid Content Analyzer XM-1100 Serie de la marque FOSS qui a été utilisé. Les spectres obtenus ont été interprétés au CRA-W, et ont permis d'obtenir les teneurs en matière sèche, en protéines totales, en celluloses, en matière grasse, en fibres insolubles dans le détergent neutre et en sucres solubles totaux des échantillons.

La viscosité des aliments starter, transition et des six régimes présentés aux poulets à partir de l'âge de 35 jours a été mesurée au RVA, selon les deux modalités présentées précédemment (*cf* section IV – 1.2.8).

D'autres mesures ont également été réalisées, par la société Puratos. L'activité enzymatique a été dosée avec les tablettes Xylazyme AX de Mégazyme selon une méthode développée en interne, dans les 3 rations complétées avec l'enzyme, ainsi que dans l'aliment complémentaire contenant l'enzyme.

La viscosité des trois variétés de triticales proposées aux poulets a également été mesurée par cette société. Pour cette mesure, les céréales ont été broyées avec un broyeur Retsch, avec un tamis muni de mailles de 0,8 mm. La viscosité des échantillons, hydratés à 150% est mesurée pendant 4 heures, à des temps fixes avec un viscosimètre rotationnel HAAKE et un rotor FL100.

3.4 Analyse statistique

L'analyse statistique portait sur la consommation d'aliment ainsi que sur les paramètres de performance des poulets, à savoir le GQM (g/jour) et l'IC (g/g) et le coefficient de variation du poids des poulets. La variabilité de ces paramètres a été visualisée, pour chaque semaine de suivi, via la réalisation de boxplots à travers les différents régimes alimentaires. Ensuite, une analyse de la variance a été réalisée afin de tester l'effet de la variété de triticales utilisée (3 variétés distinctes) et du traitement enzymatique (avec ou sans enzyme) sur chacun des quatre paramètres. Pour ce faire, le modèle suivant a été testé :

$$y_{ijkp} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + [\delta + (\alpha\delta)_i + (\beta\delta)_i + (\alpha\beta\delta)_i] * t + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + [(\gamma\delta)_k + (\alpha\gamma\delta)_{ik} + (\beta\gamma\delta)_{jk}] * t + \varepsilon_{ijkp}$$

(Equation 4)

où y_{ijkp} est la valeur du paramètre observé avec le régime basé sur la variété de triticales i et le traitement enzymatique j au sein de la répétition p du bloc k , μ est la réponse globale moyenne, α_i l'effet de la variété i , β_j est l'effet du traitement enzymatique j , $(\alpha\beta)_{ij}$, l'effet de l'interaction entre la variété i et le traitement enzymatique j , δ , l'effet, continu, de la semaine d'observation et $(\alpha\delta)_i$, $(\beta\delta)_i$ et $(\alpha\beta\delta)_i$ les effets de son interaction avec chacun des facteurs fixes, γ_k l'effet du bloc k , $(\alpha\gamma)_{ik}$ l'effet de l'interaction entre la variété i et le bloc k , $(\beta\gamma)_{jk}$ l'effet de l'interaction entre le traitement enzymatique j et le bloc k , $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ l'effet de l'interaction entre la variété i , le traitement enzymatique j et le bloc k , et $(\gamma\delta)_k$, $(\alpha\gamma\delta)_{ik}$ et $(\beta\gamma\delta)_{jk}$, les effets des interactions entre le bloc k , la variété i , le traitement enzymatique j et la semaine d'observation. Enfin, ε_{ij} est l'erreur résiduelle associée à la variété i , au traitement enzymatique j , et à la répétition p du bloc k . Le modèle intégrait les effets de la variété et du traitement enzymatique, et de leur interaction comme effets fixes, et l'effet du bloc et de ses interactions avec la variété et le traitement enzymatique comme effets aléatoires.

La significativité des effets aléatoires n'étant pas fournie dans les résultats du test des modèles mixtes, elle a été testée *à posteriori*, pour chaque effet aléatoire successivement (effet du facteur bloc et de ses interactions avec la variété et le traitement enzymatique), via le test de la différence de vraisemblance entre deux modèles, l'un incluant l'effet aléatoire (Equation 4) et l'autre sans l'effet aléatoire. En présence d'un effet fixe significatif ($p < 0.05$), les contrastes entre variétés et traitements enzymatiques ont également été testés par la méthode de Tukey.

V. Résultats et discussion

1. Caractérisation physico-chimique de variétés de triticale

La caractérisation physico-chimique des 35 échantillons de triticale (7 variétés cultivées dans 5 sites d'essai distincts) a finalement porté sur 31 variables. Celles-ci se distribuaient comme suit :

- Caractérisation agronomique et technologique : le poids de mille grains (ci-après dénommé PMG), le poids à l'hectolitre (PHL), le rendement en grains (RDT), la dureté et le temps de chute de Hagberg (Hagberg), soit 5 variables.
- Caractérisation biochimique : la matière protéique totale (MPT), la teneur en fibres, la teneur en matière grasse (MG), la teneur en cendres, la teneur en amidon, soit 5 variables.
- Caractérisation granulométrique du grain et de la farine : proportion de grains de diamètre inférieur à 2800 μm (Gr-<2800), sphéricité des grains (Spheri-gr), diamètre médian des grains selon une distribution basée sur la surface (Q2-gr), sphéricité des moutures intégrales (Spheri-mi), diamètre médian des moutures intégrales selon une distribution basée sur la surface (Q2-mi), soit 5 variables.
- Caractérisation de la viscosité
 - Variables mesurées au RVA (à l'AgNO₃ et à l'eau + α -amylase) : mesure de la viscosité après 1 minute (RVA-AgNO₃-visc1, RVA-H₂O- α -amylase-visc1), mesure de la viscosité après 2 minutes (RVA-AgNO₃-visc2, RVA-H₂O- α -amylase-visc2), viscosité au pic (RVA-AgNO₃-pic, RVA-H₂O- α -amylase-pic), viscosité au creux (RVA-AgNO₃-creux, RVA-H₂O- α -amylase-creux), viscosité finale (RVA-AgNO₃-final, RVA-H₂O- α -amylase-final), soit 10 variables.
 - Teneur en fibres : teneur en AXs solubles (AX-sol), teneur en arabinanes solubles (Arabinanes-sol), teneur en xylanes solubles (Xylanes-sol), teneur en glucanes solubles (Glucanes-sol), soit 4 variables.
- Caractérisation de la couleur des grains et des farines : indice de blancheur du grain (IB-gr), indice de blancheur des moutures intégrales (IB-mi), soit 2 variables.

Les conditions d'application de l'analyse de la variance étaient vérifiées pour l'ensemble des variables, à l'exception de quatre pour lesquelles le test de Shapiro a révélé un effet significatif ($p < 0,05$), le test de Bartlett était lui significatif ($p < 0,05$) sur quatre autres variables. L'analyse a été répétée après transformation logarithmique des variables, cependant celle-ci ne modifiait pas les résultats des tests de Shapiro et Bartlett. Après vérification de la distribution des résidus, laquelle s'avérait être unimodale, l'analyse de la variance de l'ensemble des 31 variables a été réalisée sur les variables non transformées.

1.1 Effets du site et de la variété

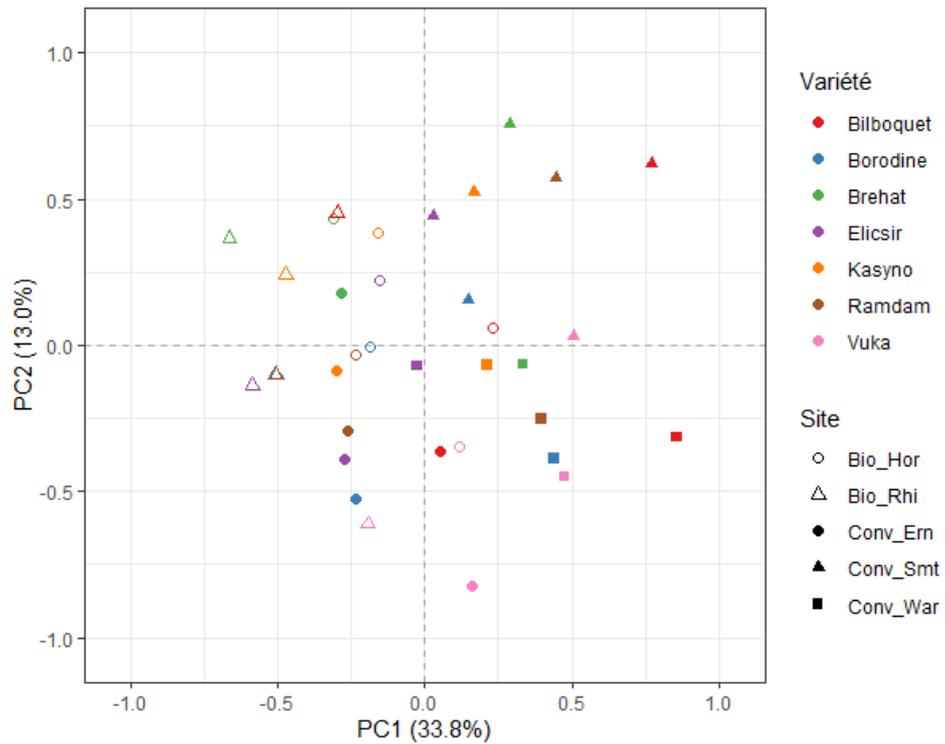


Figure 8 : Dispersion des 35 échantillons de grain de triticales (7 variétés cultivées dans 5 sites d'essai, conduits en bio ou en conventionnel) caractérisés par 31 variables physico-chimiques selon les deux premiers axes obtenus par analyse en composante principale.

La représentation graphique de la dispersion des échantillons selon les deux premiers axes obtenus par analyse en composantes principales (ACP) permet d'appréhender l'effet du site et de la variété sur les propriétés physico-chimiques des variétés de triticales étudiées. Elle suggère en particulier que l'effet du site d'essai est plus important que celui de la variété sur la distribution des échantillons.

Tableau 6 : Effet du site d'essai et de la variété sur les caractéristiques physico-chimiques des 7 variétés de triticale analysées dans les 5 sites expérimentaux. Moyenne estimée pour chacune des variétés, contrastes¹ et erreur standard.

Variable	Effet Site		Effet Variété						
	p-valeur	p-valeur	Bilboquet	Borodine	Brehat	Elicsir	Kasyno	Ramdam	Vuka
PMG (g)	<0,001	<0,001	52,9 ± 2,3 ^a	58,3 ± 2,3 ^{bc}	60,7 ± 2,3 ^c	55,3 ± 2,3 ^{ab}	59,1 ± 2,3 ^c	58,4 ± 2,3 ^{bc}	53,5 ± 2,3 ^{ab}
PHL (kg/ha)	<0,001	<0,001	71,4 ± 0,6 ^a	71,8 ± 0,6 ^a	72,4 ± 0,6 ^{ab}	74,2 ± 0,6 ^c	71,4 ± 0,6 ^a	72,0 ± 0,6 ^a	74,1 ± 0,6 ^{bc}
RDT (t/ha)	<0,001	0,004	8,77 ± 1,26 ^a	7,89 ± 1,26 ^{ab}	8,74 ± 1,26 ^{ab}	8,13 ± 1,26 ^{ab}	8,24 ± 1,26 ^{ab}	8,89 ± 1,26 ^b	7,65 ± 1,26 ^b
Dureté	<0,001	0,002	36,0 ± 4 ^{ab}	31,4 ± 4 ^a	39,8 ± 4 ^{ab}	29,4 ± 4 ^a	38,8 ± 4 ^{ab}	31,4 ± 4 ^a	43,2 ± 4 ^b
Hagberg (s)	<0,001	<0,001	85,8 ± 14 ^{ab}	119 ± 14 ^{bc}	62,8 ± 14 ^a	130 ± 14 ^c	81,8 ± 14 ^{ab}	68,0 ± 14 ^a	177 ± 14 ^d
MPT (%MS)	<0,001	<0,001	11,0 ± 0,7 ^{ab}	11,2 ± 0,7 ^{abc}	11,1 ± 0,7 ^{abc}	11,7 ± 0,7 ^{cd}	11,5 ± 0,7 ^{bcd}	10,7 ± 0,7 ^a	12,2 ± 0,7 ^d
Fibres (%MS)	<0,001	<0,001	3,10 ± 0,15 ^b	3,17 ± 0,15 ^b	2,92 ± 0,15 ^{ab}	2,62 ± 0,15 ^a	2,92 ± 0,15 ^{ab}	3,23 ± 0,15 ^b	3,16 ± 0,15 ^b
MG (%MS)	<0,001	<0,001	1,72 ± 0,12 ^a	1,98 ± 0,12 ^c	1,85 ± 0,12 ^b	1,96 ± 0,12 ^c	1,90 ± 0,12 ^{bc}	1,83 ± 0,12 ^b	2,37 ± 0,12 ^d
Cendres (%MS)	<0,001	<0,001	1,73 ± 0,07 ^{bc}	1,67 ± 0,07 ^{ab}	1,66 ± 0,07 ^{ab}	1,61 ± 0,07 ^a	1,74 ± 0,07 ^{bc}	1,68 ± 0,07 ^{ab}	1,81 ± 0,07 ^c
Amidon (%MS)	<0,001	0,024	66,0 ± 0,4 ^{ab}	66,0 ± 0,4 ^{ab}	66,4 ± 0,4 ^{ab}	66,8 ± 0,4 ^b	66,0 ± 0,4 ^{ab}	66,1 ± 0,4 ^{ab}	65,6 ± 0,4 ^a
Gr-<2800 (%)	<0,001	0,002	12,1 ± 2,1 ^b	3,82 ± 2,1 ^a	5,71 ± 2,1 ^a	5,06 ± 2,1 ^a	5,86 ± 2,1 ^a	6,07 ± 2,1 ^a	6,21 ± 2,1 ^a
Spheri-gr (0-1)	<0,001	<0,001	0,85 ± 0,01 ^a	0,88 ± 0,01 ^b	0,86 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^b
Q2-gr (µm)	<0,001	<0,001	3373 ± 66 ^a	3601 ± 66 ^c	3575 ± 66 ^{cb}	3460 ± 66 ^{ab}	3535 ± 66 ^{cb}	3579 ± 66 ^{cb}	3425 ± 66 ^a
Spheri-mi (0-1)	1	0,309	0,74 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,71 ± 0,01	0,73 ± 0,01
Q2-mi (µm)	<0,001	0,221	39,9 ± 1,2	39,6 ± 1,2	39,7 ± 1,2	37,8 ± 1,2	39,4 ± 1,2	38,2 ± 1,2	40,5 ± 1,2
RVA-AgNO3-visc1 (cPs)	0,025	0,023	-11,2 ± 4 ^b	-23,9 ± 4 ^{ab}	-25,6 ± 4 ^{ab}	-17,2 ± 4 ^{ab}	-27,8 ± 4 ^a	-21,1 ± 4 ^{ab}	-24,9 ± 4 ^{ab}
RVA-AgNO3-visc2 (cPs)	0,004	0,006	-13,3 ± 3,9 ^b	-27,1 ± 3,9 ^a	-26,7 ± 3,9 ^a	-19,6 ± 3,9 ^{ab}	-29,9 ± 3,9 ^a	-22,9 ± 3,9 ^{ab}	-28,7 ± 3,9 ^a
RVA-AgNO3-pic (cPs)	<0,001	0,350	5573 ± 218	5446 ± 218	5456 ± 218	5819 ± 218	5475 ± 218	5482 ± 218	5353 ± 218
RVA-AgNO3-creux (cPs)	<0,001	<0,001	1850 ± 202 ^{bc}	1669 ± 202 ^{abc}	2156 ± 202 ^c	1612 ± 202 ^{ab}	1246 ± 202 ^a	1942 ± 202 ^{bc}	1516 ± 202 ^{ab}
RVA-AgNO3-finale (cPs)	<0,001	0,162	7113 ± 257	7182 ± 257	6872 ± 257	6891 ± 257	7232 ± 257	7253 ± 257	7347 ± 257
RVA-H2O- α-amylase-visc1 (cPs)	<0,001	<0,001	135 ± 11 ^c	96,5 ± 11 ^{ab}	80,0 ± 11 ^{ab}	73,5 ± 11 ^a	70,0 ± 11 ^a	107 ± 11 ^{bc}	99,0 ± 11 ^{ab}
RVA-H2O- α-amylase-visc2 (cPs)	<0,001	<0,001	119 ± 9,9 ^c	75,9 ± 9,9 ^{ab}	59,0 ± 9,9 ^{ab}	53,9 ± 9,9 ^a	52,1 ± 9,9 ^a	84,1 ± 9,9 ^b	84,8 ± 9,9 ^b
RVA-H2O- α-amylase-pic (cPs)	<0,001	<0,001	577 ± 41 ^e	515 ± 41 ^{cd}	421 ± 41 ^a	440 ± 41 ^{ab}	437 ± 41 ^a	484 ± 41 ^{bc}	544 ± 41 ^{de}
RVA-H2O- α-amylase-creux (cPs)	<0,001	<0,001	126 ± 14 ^d	94,8 ± 14 ^c	82,4 ± 14 ^{abc}	70,9 ± 14 ^{ab}	69,1 ± 14 ^a	93,9 ± 14 ^{bc}	130 ± 14 ^d
RVA-H2O- α-amylase-finale (cPs)	<0,001	<0,001	416 ± 42 ^d	351 ± 42 ^{bcd}	331 ± 42 ^{abc}	276 ± 42 ^a	282 ± 42 ^{ab}	324 ± 42 ^{ab}	395 ± 42 ^{cd}
AX-sol (%MS)	0,01	<0,001	5,18 ± 0,48 ^{cd}	3,55 ± 0,48 ^{abc}	3,00 ± 0,48 ^{ab}	2,44 ± 0,48 ^{ab}	2,09 ± 0,48 ^a	4,30 ± 0,48 ^{bcd}	5,64 ± 0,48 ^d
Arabinanes-sol (%MS)	0,009	<0,001	4,95 ± 0,48 ^{cd}	3,39 ± 0,48 ^{abc}	2,78 ± 0,48 ^{ab}	2,28 ± 0,48 ^a	1,92 ± 0,48 ^a	4,08 ± 0,48 ^{bcd}	5,49 ± 0,48 ^d
Xylanes-sol (%MS)	0,585	<0,001	0,23 ± 0,01 ^b	0,15 ± 0,01 ^a	0,21 ± 0,01 ^b	0,16 ± 0,01 ^a	0,17 ± 0,01 ^a	0,22 ± 0,01 ^b	0,15 ± 0,01 ^a
Glucanes-sol (%MS)	0,003	0,005	0,33 ± 0,02 ^{ab}	0,30 ± 0,02 ^a	0,36 ± 0,02 ^b	0,29 ± 0,02 ^a	0,32 ± 0,02 ^{ab}	0,32 ± 0,02 ^{ab}	0,29 ± 0,02 ^a
IB-gr	<0,001	<0,001	45,7 ± 0,5 ^{bc}	47,9 ± 0,5 ^{cd}	46,2 ± 0,5 ^{bc}	48,2 ± 0,5 ^d	45,4 ± 0,5 ^b	45,0 ± 0,5 ^{ab}	43,6 ± 0,5 ^a
IB-fr	<0,001	<0,001	79,8 ± 0,4 ^{ab}	80,2 ± 0,4 ^b	80,5 ± 0,4 ^b	81,8 ± 0,4 ^c	79,9 ± 0,4 ^b	80,3 ± 0,4 ^b	78,7 ± 0,4 ^a

¹Pour une variable donnée, les valeurs suivies par des lettres différentes sont significativement différentes l'une de l'autre ($p < 0,05$)

L'effet du site est hautement significatif ($p < 0,001$) sur tous les paramètres agronomiques, technologiques et biochimiques mesurés (Tableau 6). C'est le cas également pour les mesures de granulométrie des grains et farines sauf pour la sphéricité des farines, pour laquelle l'effet du site est non significatif.

Le site expérimental a également un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur les mesures de blancheur des grains et des farines.

En ce qui concerne les paramètres de mesures de la viscosité, l'effet du site est hautement significatif ($p < 0,001$) sur tous les paramètres mesurés au RVA-eau- α -amylase, soit les conditions permettant de mesurer la viscosité liée aux AXs et β -glucanes, ainsi que sur les mesures de viscosité au pic, au creux et finale au RVA-AgNO₃. L'effet du site est également très significatif ($p < 0,01$) sur les teneurs en AXs, arabinanes et glucanes solubles.

L'effet du site est significatif ($p < 0,05$) sur la viscosité à une minute et très significatif ($p < 0,01$) sur la viscosité à 2 minutes au RVA-AgNO₃.

Nos données ne permettaient pas de tester l'interaction Site*Variété (*cfr* section IV-1.3). Toutefois, la classification des variétés selon différentes variables d'intérêt au sein de chaque site a été étudiée visuellement. Cette classification a été réalisée pour deux mesures relatives à la viscosité, ainsi que pour la teneur en protéines et est illustrée par les graphiques ci-dessous.

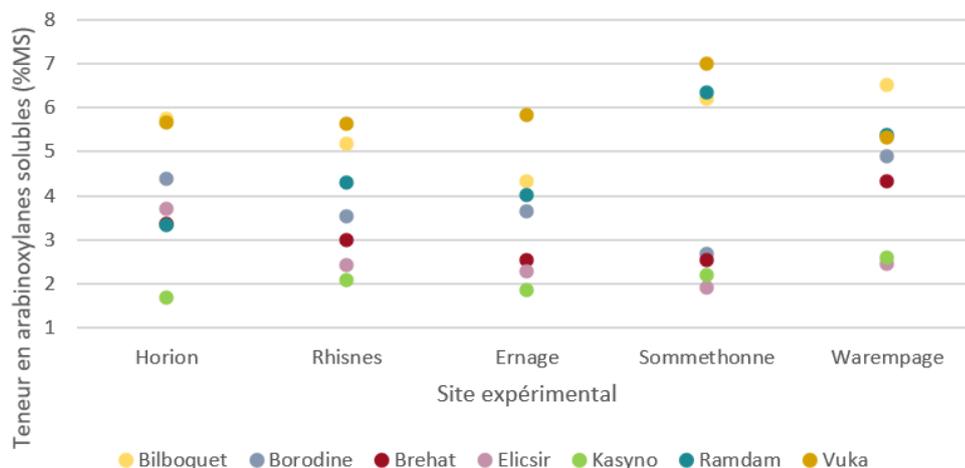


Figure 9 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la teneur en arabinoxylyanes solubles.

L'effet du site est significatif sur cette variable (Figure 9). On peut remarquer que les variétés se classent de façon identique au sein des sites de Rhisnes et Ernage (Figure 9). Une certaine variabilité existe entre les autres sites. Toutefois, les variétés ayant les teneurs en AXs solubles les plus élevées et les plus faibles semblent suivre la même tendance entre les sites.

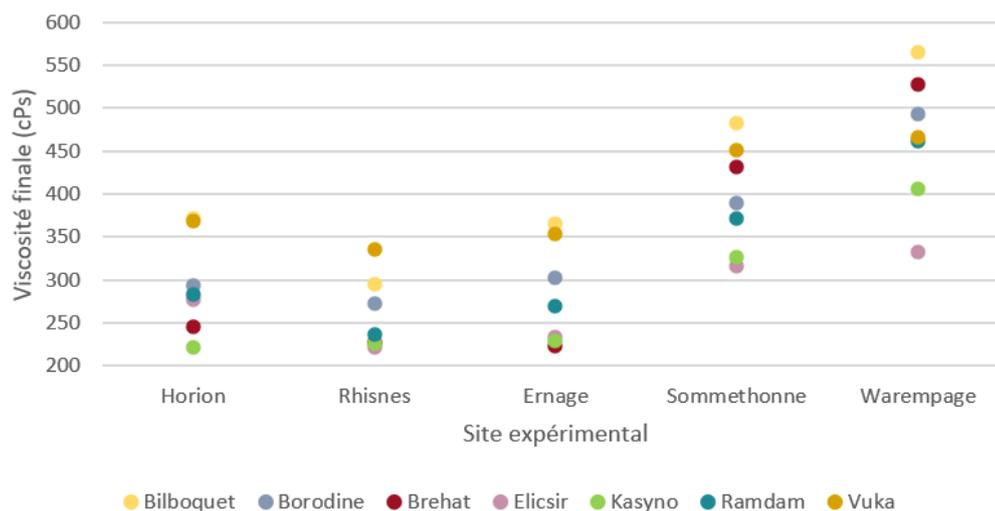


Figure 10 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la viscosité finale (RVA - eau- α -amylase).

Pour la viscosité finale, on observe un effet du site plus marqué (Figure 10), son effet étant hautement significatif sur cette variable (Tableau 6). On peut remarquer ci-dessus que la classification de la variété Brehat est assez variable entre les sites expérimentaux en ce qui concerne la viscosité finale. Or, Rakha *et al.* (2011) et Levy Häner *et al.* (2013B) ont montré que certaines variétés de triticales semblent plus sensibles aux variations de l’environnement que d’autres en ce qui concerne la viscosité.

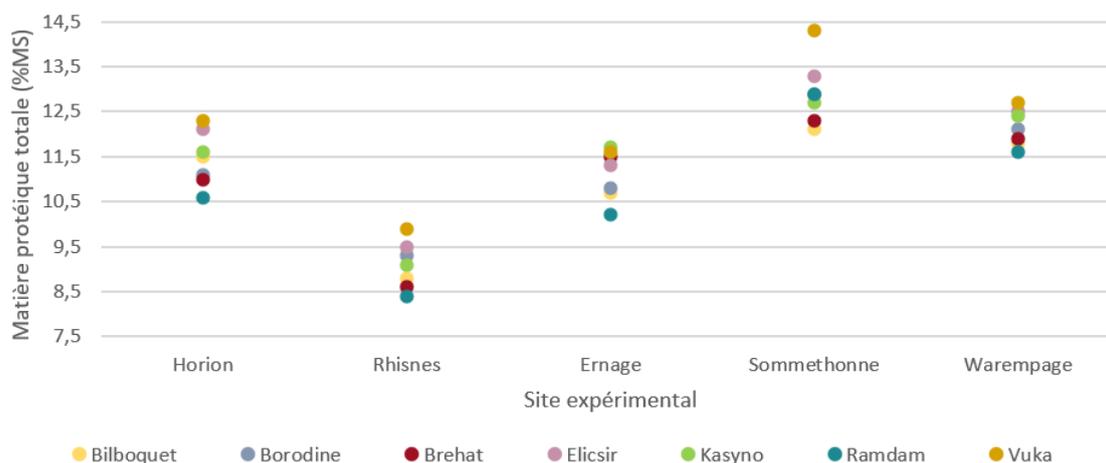


Figure 11 : Visualisation de la classification des variétés entre les sites pour la teneur en protéines.

Enfin, le graphe illustrant l’effet du site expérimental sur la protéine (Figure 11), montre un effet hautement significatif de celui-ci. Le site de Rhisnes induit des teneurs en protéines plus faibles, pour toutes les variétés confondues, à l’inverse du site de Sommethonne.

L’effet du site expérimental semble relativement identique sur toutes les variétés étudiées, il semblerait que l’ordre des variétés est légèrement modifié entre les sites, mais globalement, les variétés aux propriétés semblables restent proches l’une de l’autre dans leur classification.

L’effet variétal, lui, est significatif sur 27 variables parmi les 31 variables étudiées décrivant les propriétés physico-chimiques des grains de triticales (Tableau 6). Il est hautement significatif ($p < 0,001$) sur le PMG, le PHL, le Hagberg, la MPT, la teneur en fibres, la MG, et la teneur en cendres. Il l’est également sur les mesures de granulométrie des grains, Sphéri-gr et Q2-gr, ainsi que sur toutes les

composantes de mesure de viscosité au RVA-eau- α -amylase, sur les mesures des teneurs en AXs, arabinanes et xylanes, le RVA-AgNO₃-creux et les mesures de couleurs des grains et farines.

L'effet variétal est très significatif ($p < 0,01$) sur le RDT, la dureté, le Gr- <2800 , le paramètre RVA-AgNO₃-visc₂, et les glucanes-sol. Il est significatif ($p < 0,05$) sur la teneur en amidon et le paramètre RVA-AgNO₃-visc₁.

Aucun effet de la variété n'a été observé sur les paramètres de mesure de la granulométrie des moutures intégrales (Tableau 6).

Le PMG était le plus élevé pour les variétés Brehat, Kasyno, Borodine et Ramdam, et le plus faible pour la variété Bilboquet. Le PHL des grains de triticale est également significativement impacté par la variété, les variétés Eliscir et Vuka présentant le poids à l'hectolitre le plus important, Bilboquet et Kasyno le plus petit. Le rendement en grains était le plus élevé pour les variétés Ramdam et Bilboquet, et le plus faible pour Vuka. La dureté, elle, était plus élevée pour Vuka suivie de Brehat, et la plus faible pour Eliscir et Borodine.

La variété Vuka présentait un temps de chute de Hagberg significativement supérieur aux autres variétés, elle présente donc une activité α -amylasique inférieure aux autres variétés, à l'inverse des variétés Ramdam et Brehat.

En ce qui concerne les caractéristiques biochimiques des grains, la teneur en protéines était la plus élevée pour la variété Vuka, suivie des variétés Eliscir et Kasyno, Borodine, Brehat et Bilboquet, tandis que la variété Ramdam présentait la teneur la plus faible.

En outre, les résultats concernant le PHL, le rendement et la teneur en protéines concordent avec les résultats variétaux publiés dans le Livre Blanc 2020 (Faux *et al.*, 2020).

La teneur en matière grasse était significativement supérieure pour Vuka et la plus faible pour Bilboquet. Enfin, la teneur en amidon était plus élevée pour la variété Eliscir et la plus basse pour Vuka.

Des différences significatives entre variétés sont également observées du point de vue de leurs caractéristiques granulométriques. La variété Bilboquet présentait le pourcentage de grains de taille inférieure à 2800 μm le plus élevé, et elle se distinguait significativement des autres variétés. Outre sa proportion élevée de grains de taille inférieure à 2800 μm , la variété Bilboquet présentait également le plus petit diamètre médian, elle était suivie par Vuka et Eliscir, à l'opposé de la variété Borodine qui avait le plus grand diamètre médian.

L'effet variétal semble donc significatif sur la granulométrie des grains.

La viscosité des grains était également impactée par l'effet variétal. Au RVA-AgNO₃, c'est la variété Bilboquet qui présentait une viscosité plus élevée que les autres variétés après une et deux minutes d'analyse. Pour la mesure RVA-AgNO₃-creux, Bilboquet, Brehat et Ramdam étaient les plus visqueuses et Kasyno la moins visqueuse. Dans les conditions eau- α -amylase, permettant de mesurer la viscosité due uniquement aux AXs et β -glucanes solubles, la variété Bilboquet présentait une viscosité significativement supérieure aux autres après une et deux minutes d'analyse, les variétés Eliscir et Kasyno avaient les viscosités les plus basses. Pour les autres paramètres de mesure au RVA-eau- α -amylase, les variétés Bilboquet et Vuka présentaient les valeurs les plus élevées. Les variétés Brehat, Eliscir et Kasyno présentaient les viscosités les plus faibles au pic et au creux, la variété Ramdam s'ajoutait à ces variétés pour la viscosité finale.

Les teneurs en AXs et arabinanes solubles étaient plus élevées pour la variété Vuka, suivie par Ramdam et Bilboquet, desquelles elle est non significativement différente, et les plus faibles pour les variétés Kasyno, Eliscir, Brehat et Borodine.

En ce qui concerne les teneurs en β -glucanes solubles, ce sont les variétés Brehat, Bilboquet, Kasyno et Ramdam qui contiennent les teneurs les plus élevées. Ces teneurs, en valeurs absolues, sont tout de même bien inférieures aux teneurs en AXs solubles, les β -glucanes étant minoritaires dans le triticale (Randhawa *et al.*, 2015). Les variétés Vuka et Eliscir avaient, elles, les teneurs en β -glucanes les moins élevées. Les variétés Vuka et Borodine contenaient le moins de xylanes solubles, tandis que les variétés Bilboquet et Ramdam en contenaient le plus.

D'après ces résultats, les variétés Elicsir, Kasyno et Brehat semblent être les moins visqueuses au vu des résultats du RVA et de leurs teneurs en AXs et β -glucanes solubles.

Les variétés Vuka et Bilboquet sont les variétés les plus viscosantes. Elles contiennent cependant des teneurs assez différentes en molécules générant cette viscosité. La variété Vuka présente des teneurs en xylanes solubles parmi les plus faibles, et les teneurs en arabinanes solubles les plus élevées. En revanche, la variété Bilboquet contient les teneurs les plus élevées en xylanes solubles, et des teneurs en arabinanes solubles parmi les plus élevées également.

Le ratio arabinane/xylane (*cf* section II - 2.1) de ces variétés est donc différent (21,5 pour Bilboquet et 36,6 pour Vuka). La variété Bilboquet, présente un rapport inférieur à celui de Vuka. Or, il semblerait que les variétés présentant des AXs au rapport arabinane/xylane plus faible généreraient plus de viscosité (Saulnier *et al.*, 2007).

La variété Vuka présente une tendance inverse, son ratio est plus élevé par rapport à Bilboquet, or, elle fait également partie des variétés les plus viscosantes.

De fait, la viscosité ne dépendrait pas uniquement de ce ratio arabinane/xylane, mais aussi du poids moléculaire (lié à la présence d'acides féruliques) et de la longueur de ces chaînes d'AXs (Saulnier *et al.*, 2007). On observe ici qu'à la fois des chaînes de xylanes peu et abondamment substituées peuvent générer de la viscosité.

En outre, la composition biochimique de ces deux variétés, notamment leurs teneurs en matière grasse, et en protéines, est très différente également. Il semblerait donc que des variétés aux propriétés biochimiques contrastées et aux rapports arabinanes/xylanes distincts puissent générer un même niveau de viscosité.

Notons que les variétés qui présentent la viscosité la plus élevée au RVA avec l'AgNO₃ comme solution, sont également les variétés qui présentent les teneurs en amidon parmi les plus élevées, la viscosité mesurée par cette méthode étant principalement induite par la gélatinisation de l'amidon.

On a remarqué dans cette étude que l'effet du site expérimental et de la variété étaient significatifs sur la plupart des paramètres physico-chimiques mesurés, notamment sur la viscosité. Plusieurs auteurs ont étudié les effets du site expérimental et de la variété sur les propriétés physico-chimiques des grains de céréales.

Il semblerait que la teneur en protéines augmenterait avec l'apport d'azote, elle serait donc dépendante de l'environnement plus que du génotype (Oury *et al.*, 1998 ; Levy Häner *et al.*, 2015). Dans notre expérience, la variété et le site expérimental ont tous les deux un effet hautement significatif sur la teneur en protéines. On peut remarquer que les sites de Sommethonne et Warempage qui reçoivent une fertilisation azotée plus importante, ont également les teneurs en protéines les plus élevées (Figure 11). Lalević *et al.* (2019) démontrent également un effet fertilisation azotée important sur le PMG. Le site expérimental a donc un effet important sur ce paramètre, tel qu'observé dans cette étude.

Selon Levy Häner *et al.* (2015) et Oury *et al.* (1998), la viscosité dépendrait majoritairement du génotype. Dornez *et al.* (2008A) démontrent un effet variétal important sur la teneur en AXs solubles, et un effet moindre de l'environnement, la même tendance est observée dans ce cas. La Figure 9 illustre cela également avec une classification des variétés assez homogène entre les sites expérimentaux pour les AXs solubles.

Le rendement en grain semble dépendre majoritairement de l'effet du milieu, tandis que le poids à l'hectolitre dépend à la fois de l'environnement et de la variété (Levy Häner *et al.*, 2015). Dans cette étude, un effet important du site d'essai était observé sur le rendement, mais l'effet variétal était également très significatif sur ce paramètre.

En outre, Rahka *et al.* (2011) et Levy Häner *et al.* (2013B) montrent que les teneurs en NSPs de certaines variétés sont fortement dépendantes de l'environnement, alors que d'autres sont stables quelles que soient les variations environnementales auxquelles elles sont soumises. On a pu le remarquer pour la viscosité finale de la variété Brehat (Figure 10). Les orges à viscosité élevée seraient également plus impactés par l'environnement que ceux à faible viscosité (Pérez-Vendrell *et al.*, 1996)

Certains cultivars sont donc plus instables que d'autres face aux conditions environnementales, mais le choix variétal a toute son importance pour ce critère de viscosité.

1.2 Corrélations entre variables

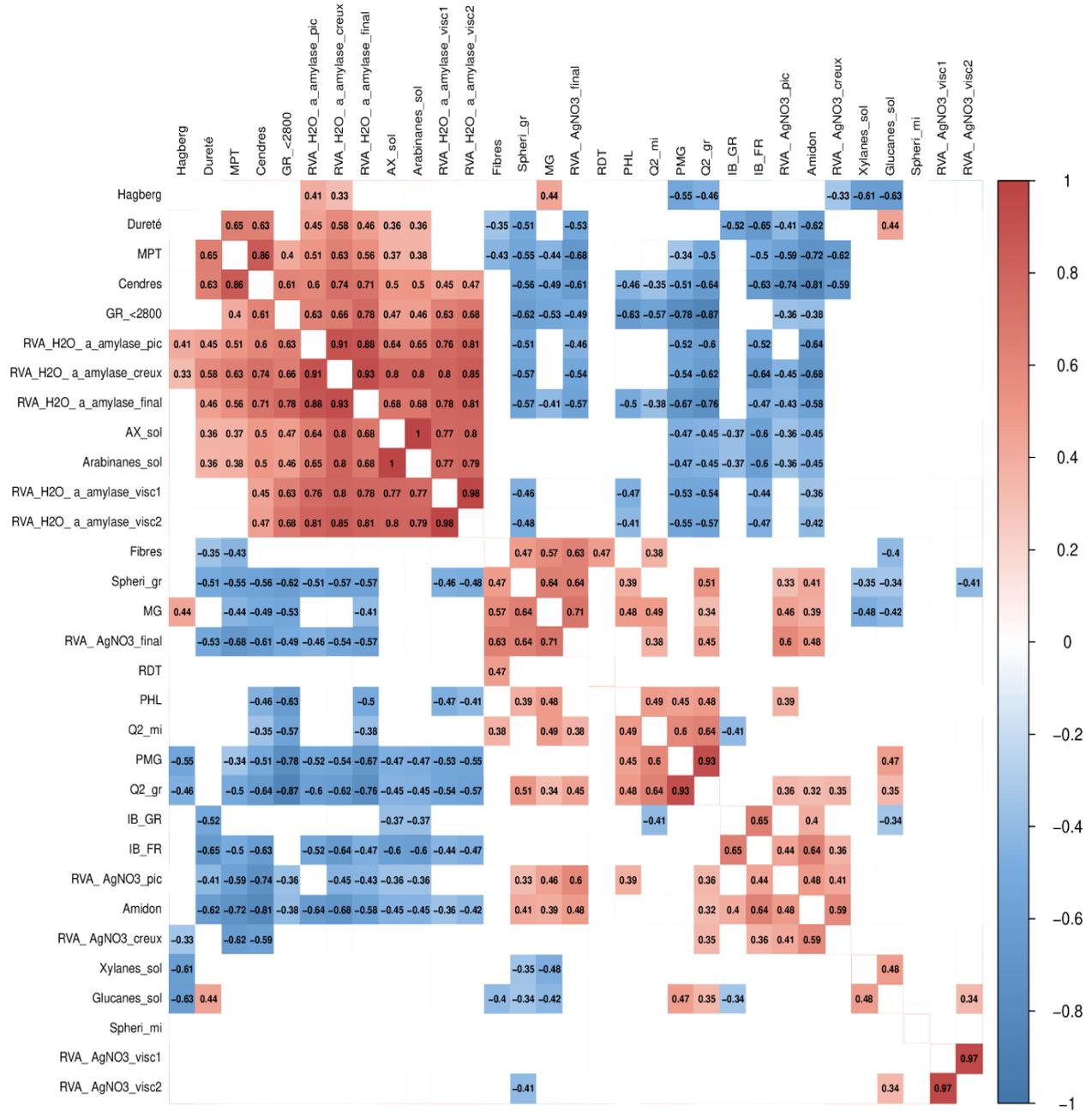


Figure 12 : Corrélogramme exprimant les corrélations entre propriétés physico-chimiques des grains de triticale.

Le corrélogramme ci-dessus présente les corrélations significatives ($p < 0,05$) entre variables étudiées (Figure 12).

On peut observer que le PMG est positivement corrélé au diamètre médian des grains Q2-gr ($r = 0,93$, $p < 0,001$), et négativement corrélé au Gr-<2800 ($r = -0,78$, $p < 0,001$), ce qui est assez logique.

Il est également négativement corrélé aux teneurs en AXs ($r = -0,46$, $p > 0,01$) et positivement corrélé aux glucanes solubles ($r = 0,47$, $p < 0,01$). Le Gr-<2800 lui est positivement corrélé aux teneurs en AXs solubles ($r = 0,46$, $p < 0,01$). Une corrélation positive est également observée entre Gr-<2800 et les diverses mesures sur la courbe du RVA dans les conditions eau- α -amylase ; RVA-H2O- α -amylase-visc1 ($r = 0,63$, $p < 0,01$), RVA-H2O- α -amylase-visc2 ($r = 0,68$, $p < 0,01$), RVA-H2O- α -amylase-pic ($r = 0,63$, $p < 0,01$), RVA-H2O- α -amylase-creux ($r = 0,66$, $p < 0,01$), RVA-H2O- α -amylase-finale ($r = 0,78$, $p < 0,01$).

Il semblerait donc que les grains de plus petite taille généreraient plus de viscosité.

Le Hagberg est corrélé négativement au Q2-gr ($r = -0,46$, $p < 0,01$), ainsi qu'aux teneurs en glucanes ($r = -0,62$, $p < 0,001$) et xylanes solubles ($r = -0,61$, $p < 0,001$).

Parmi les autres corrélations significatives observées, on retrouve la forte corrélation positive entre la teneur en protéines et la dureté du grain ($r = 0,65$, $p < 0,001$), et la corrélation négative entre teneur en protéines et amidon ($r = -0,72$, $p < 0,001$). La teneur en protéines est également positivement corrélée aux paramètres du RVA suivants à l'eau- α -amylase ; la viscosité au pic ($r = 0,51$, $p < 0,001$), au creux ($r = 0,63$, $p < 0,001$) et la viscosité finale ($r = 0,56$, $p < 0,001$), elle est également positivement corrélée aux teneurs en AXs solubles ($r = 0,37$, $p < 0,05$) et en arabinanes solubles ($r = 0,38$, $p < 0,05$). Les grains plus riches en protéines généreraient donc plus de viscosité.

En ce qui concerne l'indice de blancheur (IB) des farines, une mesure rapide, il semble négativement corrélé à la dureté des grains ($r = -0,65$, $p < 0,001$), ainsi qu'aux composantes du RVA-eau- α -amylase, par exemple à la viscosité au pic ($r = -0,52$, $p < 0,001$), et à la teneur en AXs solubles ($r = -0,60$, $p < 0,001$).

Enfin, on peut remarquer sur le corrélogramme (Figure 12) de très fortes corrélations entre les résultats de la méthode de dosage des AXs solubles par chromatographie et la méthode de mesure de la viscosité qui a été développée au RVA avec l'ajout d' α -amylase. La Figure 13 ci-dessous l'illustre, avec l'exemple de la mesure de la viscosité après deux minutes d'analyse ($r = 0,8$, $p < 0,01$). Cette corrélation confirme la pertinence et l'efficacité de la méthode développée au RVA et utilisée pour évaluer et comparer la viscosité des différentes variétés de triticale.

De plus, après une ou deux minutes de mesure au RVA, on a déjà une mesure de la viscosité qui est très fortement corrélée au résultat du dosage des AXs solubles.

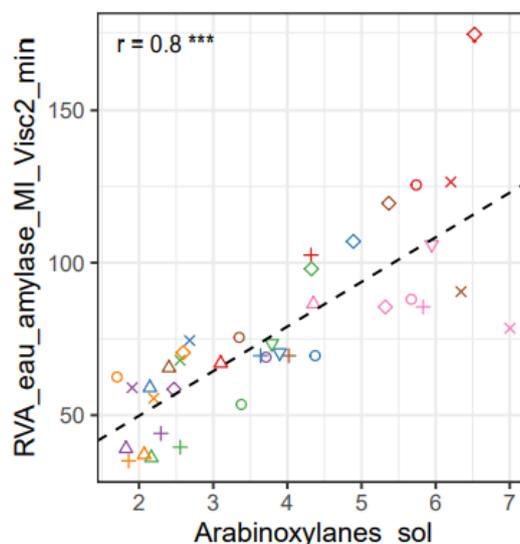


Figure 13 : Corrélation entre le dosage des arabinoxylanes solubles et une composante de la courbe du RVA.

Plusieurs corrélations entre propriétés physico-chimiques des grains ont été observées.

La corrélation positive observée entre protéines et dureté a également été mise en évidence dans une autre étude (Oury *et al.*, 1998). Ces auteurs justifient cette corrélation en évoquant qu'une teneur en protéines élevée, est synonyme d'une meilleure continuité et cohésion de la matrice protéique, cela génèrerait donc une dureté accrue. La corrélation négative entre teneur en protéines et amidon a également été mise en évidence sur du froment (Smeets *et al.*, 2016).

Plusieurs études, notamment sur le froment (Oury & Godin, 2007) et le triticale (Bouguennec *et al.*, 2013), ont mis en évidence une corrélation négative entre teneur en protéines et rendement. Dans cet essai, aucune corrélation significative entre teneur en protéines et rendement n'a pu être mise en évidence, bien que les variétés présentant les rendements les plus élevés semblent présenter de moindres teneurs en protéines. Cette absence de corrélation peut être liée au bruit de l'environnement comme Oury & Godin (2007) le citent également.

Dans cette étude, les variables de mesure de la viscosité se sont vues significativement corrélées à plusieurs autres caractéristiques physico-chimiques des grains de triticale.

On a notamment observé une corrélation positive entre teneur en protéine des grains et viscosité. Une étude menée par Bettge et Moris (2000) sur du froment illustre également une corrélation positive des AXs avec la dureté et la teneur en protéines.

Selon les résultats de notre étude, les variétés les plus visqueuses seraient donc plus riches en protéines, et donc en lysine (Bouguennec *et al.*, 2013). Les résultats de Smeets *et al.* (2016) vont également dans ce sens, démontrant une corrélation négative entre la teneur en amidon, négativement corrélée à la teneur en protéines, et la teneur en NSPs totaux.

Cette corrélation positive observée entre teneur en protéines et viscosité confirme la viscosité supérieure de la variété Vuka, cette variété présentant la teneur en protéines la plus importante. Cette corrélation est moins évidente pour la variété Bilboquet de laquelle Vuka est non significativement différente du point de vue de la viscosité.

En outre, plusieurs études ont démontré un antagonisme entre viscosité et teneur en protéines chez le froment et le triticale (Levy Häner *et al.*, 2015 ; Levy Häner *et al.*, 2013A). Piron *et al.* (2005) démontrent également une corrélation négative entre la teneur en AXs solubles et la MAT.

De plus, plusieurs auteurs ont observé une forte dépendance à l'environnement de la teneur en protéines (Oury *et al.*, 1998 ; Levy Häner *et al.*, 2015), c'est notamment le cas dans cette étude (Tableau 6). L'observation de cet antagonisme entre teneur en protéines et viscosité pourrait donc être fortement dépendante des conditions environnementales.

En outre, nos résultats ont mis en évidence d'autres variables fortement corrélées à la viscosité, les variables relatives à la granulométrie des grains, ainsi que leur PMG, les grains de grande taille et de PMG plus élevé étant moins visqueux.

Gan *et al.* (1998) observent également chez le seigle qu'un grain plus lourd, et d'un diamètre supérieur, génère moins de viscosité. C'est de fait la variété Bilboquet, parmi les plus visqueuses qui présente le plus grand pourcentage de grain de taille inférieure à 2800 μm . La variété Vuka suit cette même tendance également, bien que la corrélation soit moins marquée.

On a également remarqué que plus le temps de chute de Hagberg est élevé, plus les teneurs en xylanes et glucanes solubles sont faibles, et plus le diamètre médian est petit, c'est le cas de la variété Vuka.

Aucune corrélation entre la granulométrie de la mouture intégrale et la dureté n'a pu être établie, ce qui est inattendu. Piron *et al.* (2005) ont fait la même constatation, cette fois sur du froment.

Sur base de ces résultats, il est difficile de tirer des conclusions quant aux variétés présentant les meilleures propriétés physico-chimiques, au vu des antagonismes mis en évidence entre les propriétés recherchées.

En revanche, ces diverses corrélations permettent de faire ressortir deux variétés présentant une viscosité supérieure, Bilboquet et Vuka. Les variétés Kasyno, Elicsir et Brehat, quant à elles, sont les variétés les moins visqueuses. Elles présentent également d'autres atouts tels que leur teneur en protéines (Elicsir et Kasyno), leur rendement (Brehat) ou encore leur poids de mille grains (Brehat, Kasyno).

Les corrélations observées ont permis de mettre en évidence des variables qui, par leur forte corrélation avec les diverses mesures de la viscosité, pourraient constituer des variables de sélection indirecte de variétés peu viscosantes. C'est le cas de la dureté, de la teneur en protéines et en amidon, de la granulométrie, de l'indice de blancheur, ou encore la viscosité mesurée après une et deux minutes au RVA. La mesure de la viscosité étant difficile et chronophage, notamment par chromatographie, ces variables pourraient constituer des variables de sélection indirecte de variétés à caractère peu viscosant.

2. Caractérisation agronomique

Les tests de Shapiro et Bartlett ont été réalisés sur les résidus de chacune des neuf variables agronomiques caractérisées. Quatre variables ne respectaient pas l'une ou l'autre des conditions. Le test de Shapiro était en effet significatif ($p < 0,05$) pour 4 variables et le test de Bartlett pour 2 variables. La transformation de variable ne modifiant pas l'interprétation des résultats et la distribution des résidus étant unimodale, l'analyse des résultats non transformés a été poursuivie en considérant avec prudence les résultats proches du seuil de significativité. En outre, l'analyse de la variance n'a pas été réalisée sur la variable « Précocité à l'épiaison », car une seule valeur (date d'atteinte du stade 51 ; Livre Blanc Céréales, 2017) est retenue par variété.

2.1 Caractérisation agronomique des variétés

Les résultats de l'analyse de la variance sont présentés dans le Tableau 7 à la page 35.

On peut remarquer un effet de la date de mesure significatif ($p < 0,05$) sur la mesure de la couverture foliaire déterminée visuellement et hautement significatif ($p < 0,001$) sur la mesure de la couverture foliaire par imagerie (« Couverture foliaire R »), ce qui est attendu celle-ci évoluant au cours de la période de développement du triticale durant laquelle les mesures ont été réalisées. L'interaction variété*date de mesure est, elle, hautement significative ($p < 0,001$) pour les mesures de résistance au froid, de port au tallage et de couverture foliaire mesurée par analyse d'image.

L'effet de la répétition est hautement significatif ($p < 0,001$) sur le nombre de talles. L'interaction entre la répétition et la date de mesure est très significative ($p < 0,01$) sur la résistance au froid et hautement significative ($p < 0,001$) sur les deux mesures de couverture foliaire.

L'effet variétal est lui, très significatif ($p < 0,01$) sur le nombre de plantes par mètre carré et hautement significatif ($p < 0,001$) sur toutes les autres caractéristiques mesurées.

C'est la variété Brehat suivie de Lumaco qui présente la meilleure résistance au froid. Les variétés Kasyno, Borodine et Claudius sont, elles, les moins résistantes.

Les variétés Ramdam, Ruche et Lumaco ont le plus grand nombre de plantes au m², à l'opposé des variétés Borodine et Kasyno.

On remarque également que les variétés Ramdam et Lumaco présentent la plus grande capacité de tallage. A l'inverse, la variété Claudius présente la plus petite capacité de tallage.

En ce qui concerne la couverture foliaire, celle-ci a été définie visuellement, ainsi que par analyse d'image. Selon l'estimation visuelle, les variétés Lumaco et Brehat présentent la plus grande couverture foliaire. La variété Lumaco est également une des variétés présentant la meilleure couverture foliaire par analyse d'image, avec Asellus, Bilboquet et Brehat. La variété Claudius présentait une moindre couverture foliaire selon cette méthode. Selon l'estimation visuelle, c'est la variété RGT Rutenac, suivie de Ruche, Kasyno et Claudius qui ont une moindre couverture foliaire.

Les variétés Elisir et Kasyno ont le port au tallage le plus étalé, à l'inverse des variétés Asellus et Ramdam.

Concernant la largeur des feuilles, ce sont les variétés Kitesurf et Ramdam qui ont la largeur de feuille la plus importante à l'inverse de la variété Bilboquet, qui présente la plus petite largeur de feuille.

Les variétés RGT Rutenac, Kitesurf et Brehat sont les plus hautes, et Kasyno est significativement la plus petite, tel que c'était le cas dans le Livre Blanc 2020 (Faux *et al.*, 2020). Les variétés Kitesurf et RGT Rutenac n'étaient pas présentes dans les essais en 2020, Brehat et Elisir étaient les variétés les plus grandes parmi les variétés étudiées.

Enfin, la date au stade 51, permettant d'évaluer la précocité a été déterminée pour chaque variété. Les variétés Brehat, Lumaco et Asellus semblent donc être les plus précoces, et la

variété Kasyno la plus tardive. Selon les résultats du Livre Blanc 2020 (Faux *et al.*, 2020), les variétés Brehat, Ramdam et Vuka étaient les plus précoces parmi les variétés étudiées cette année.

Quant à la sensibilité aux maladies, les résultats publiés dans le Livre Blanc 2020 (Faux *et al.*, 2020), indiquent que, parmi les variétés testées, les variétés Vuka et Borodine sont relativement sensibles à la rouille brune tandis qu'Elisir montre une sensibilité plus importante à la rouille jaune (Faux *et al.*, 2020). Les sensibilités de ces variétés se confirment en 2021 par les observations effectuées dans les essais expérimentaux d'Ath et d'Horion-Hozémont, où la pression des maladies a été importante (Communications personnelles de G. Carbonnelle et J. Legrand). Les résultats relatifs à la sensibilité aux maladies des variétés testées pour la première fois cette année (Asellus, Claudius, Kitesurf, Lumaco, RGT Rutenac et Ruche) seront publiés dans le Livre Blanc 2021.

Tableau 7 : Effet de la variété, de la date de mesure, de l'interaction entre ces deux variables, de la répétition ainsi que de l'interaction de la répétition avec la date de mesure sur les caractéristiques des variétés étudiées.

Variable	Effet variétal													p -valeur	Effet date mesure	Effet Variété* Date mesure	Effet Rép	Effet Rép*Date
	Asellus	Bilboquet	Borodine	Brehat	Claudius	Elisir	Kasyno	Kitesurf	Lumaco	Ramdam	RGT Rutenac	Ruche	Vuka		p -valeur	p -valeur	p -valeur	p -valeur
Résistance au froid	7,1±0,3 ^{ab}	7,9±0,3 ^{bcd}	6,6±0,3 ^a	8,4±0,3 ^d	6,6±0,3 ^a	7,3±0,2 ^{bc}	6,5±0,3 ^a	8±0,3 ^{cd}	8,2±0,3 ^d	7,6±0,3 ^{bcd}	7,4±0,3 ^{bc}	7,4±0,3 ^{bc}	6,9±0,3 ^a	<0,001	0,120	<0,001	1	0,002
N plantes/m²	19,5±1,4 ^{bc}	21,1±1,4 ^{bc}	17,9±1,4 ^{ab}	22,5±1,4 ^{bc}	19±1,4 ^{ab}	19,4±1,4 ^{bc}	18±1,4 ^{ab}	21,5±1,4 ^{bc}	23,1±1,4 ^{bc}	24,8±1,4 ^c	20,5±1,4 ^{bc}	23±1,4 ^{bc}	22,5±1,4 ^{bc}	0,001			0,081	
Nombre de talles	3,2±0,7 ^a	3,3±0,7 ^{ab}	3,1±0,7 ^a	3,4±0,7 ^{ab}	3±0,7 ^a	3,3±0,7 ^a	3,3±0,7 ^{ab}	4,3±0,7 ^{bc}	4,7±0,7 ^c	4,8±0,7 ^c	3,7±0,7 ^{abc}	3,8±0,7 ^{abc}	3,1±0,7 ^a	<0,001			0	
Couverture foliaire	7,9±0,1 ^{ab}	8,1±0,1 ^{abc}	8,1±0,1 ^{abc}	8,5±0,1 ^c	7,8±0,1 ^{ab}	7,9±0,1 ^{abc}	7,8±0,1 ^{ab}	8,3±0,1 ^{bc}	8,5±0,1 ^c	7,9±0,1 ^{ab}	7,7±0,1 ^a	7,8±0,1 ^a	7,9±0,1 ^{ab}	<0,001	0,012	0,447	1	0
Couverture foliaire R	0,61±0,02 ^{cd}	0,57±0,01 ^{bc}	0,54±0,01 ^{ab}	0,59±0,01 ^c	0,51±0,01 ^a	0,54±0,01 ^{ab}	0,53±0,01 ^{ab}	0,57±0,01 ^b	0,65±0,01 ^c	0,53±0,01 ^{ab}	0,54±0,01 ^{ab}	0,56±0,01 ^b	0,53±0,01 ^{ab}	<0,001	<0,001	<0,001	1	0
Port au tallage	4,6±0,2 ^a	6,8±0,2 ^e	5,6±0,2 ^{bc}	5±0,2 ^{ab}	5,8±0,2 ^{bcd}	8,1±0,2 ^{ef}	8,1±0,2 ^f	4,8±0,2 ^{ab}	4,9±0,2 ^{ab}	4,4±0,2 ^a	6±0,2 ^{ede}	6,6±0,2 ^{de}	5,7±0,2 ^{bcd}	<0,001	0,903	<0,001	1	0,999
Largeur des feuilles	7,6±0,2 ^{cd}	5,6±0,2 ^a	6,1±0,2 ^{ab}	7,2±0,2 ^{cd}	7,2±0,2 ^{cd}	6,6±0,2 ^b	6,1±0,2 ^{ab}	8,6±0,2 ^e	7,7±0,2 ^{de}	8,6±0,2 ^e	6,7±0,2 ^{bc}	6,6±0,2 ^b	6,8±0,2 ^{bcd}	<0,001	0,179	0,118	1	0,984
Hauteur	111±2 ^{bcd}	113±2 ^{cd}	108±2 ^{bc}	118±2 ^{de}	109±2 ^{bc}	110±2 ^{bcd}	95±2 ^a	123±2 ^e	113±2 ^{cd}	114±2 ^{cd}	124±2 ^e	104±2 ^b	109±2 ^{bc}	<0,001			0,101	
Date au stade 51	29-05-21	01-06-21	02-06-21	27-05-21	01-06-21	01-06-21	03-06-21	30-05-21	29-05-21	30-05-21	02-06-21	01-06-21	01-06-21					

2.2 Corrélations entre caractéristiques agronomiques

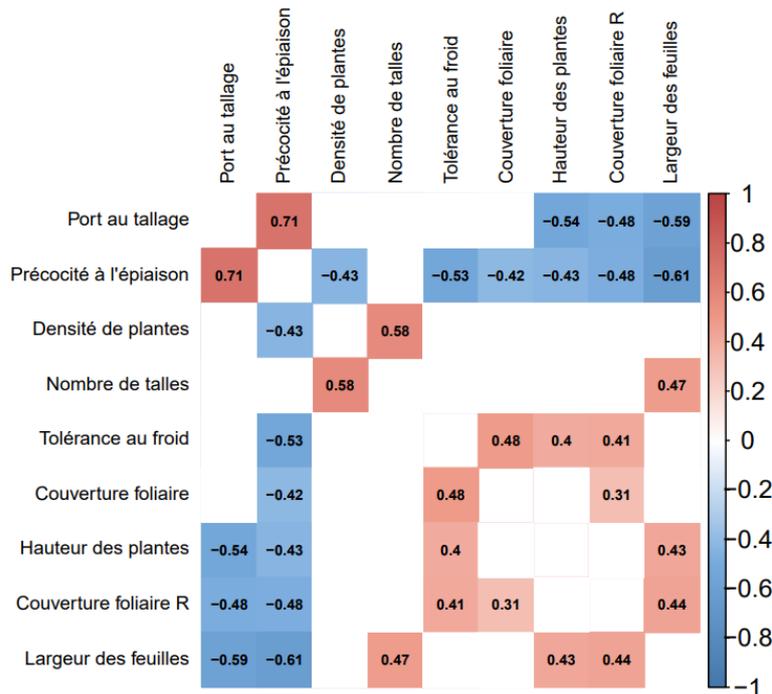


Figure 14 : Corrélogramme reprenant les corrélations entre mesures réalisées sur le triticale, significatives avec $p < 0,05$.

La Figure 14 ci-dessus illustre une corrélation négative entre la tolérance au froid et la précocité à l'épiaison ($r = -0,53$, $p < 0,001$). Les variétés les plus précoces apparaissent donc comme étant plus tolérantes au froid, puisque plus le stade 51 apparaît tardivement, plus faible est leur tolérance au froid. La tolérance au froid est positivement corrélée à la couverture foliaire ($r = 0,48$, $p < 0,001$) et à la hauteur des plantes ($r = 0,4$, $p < 0,05$). Les variétés les plus grandes et ayant une couverture foliaire plus importante seraient plus tolérantes au froid. Les variétés Brehat et Lumaco suivent cette corrélation entre tolérance au froid, précocité et couverture foliaire.

La Figure 14 montre que les variétés qui présentent un nombre de plantes au mètre carré plus important étaient les plus précoces ($r = -0,43$, $p < 0,05$) et présentaient un plus grand nombre de talles. Mason *et al.* (2007) montrent également une corrélation positive entre la précocité et le nombre d'épis au mètre carré.

De plus, plus la densité du froment est élevée, moins il y a d'adventices (Feledyn-Szewczyk, 2013, Feledyn-Szewczyk et Jończyk, 2015).

En ce qui concerne la mesure de la couverture foliaire, une corrélation positive ($r = 0,31$, $p < 0,001$) est observée entre la cotation visuelle de la couverture foliaire (échelle de 1 à 9) et la mesure effectuée par analyse d'image (« couverture foliaire R » sur la Figure 14). Cette mesure permet de confirmer la congruence des deux méthodes.

La couverture foliaire mesurée par analyse d'image apparaît positivement corrélée à la largeur des feuilles ($r = 0,44$, $p < 0,05$), ce qui n'est toutefois pas le cas de la mesure réalisée visuellement. Cette observation peut s'expliquer par la caractérisation plus fine de la couverture foliaire que permet l'analyse d'image.

Leistrumaité *et al.* (2009) montrent que les variétés ayant une couverture foliaire importante et plus de talles présenteraient de meilleurs rendements chez le seigle et l'orge. Les variétés Kitesurf et Lumaco devraient donc présenter des rendements intéressants en cette saison 2021. Les variétés Brehat, ayant une des meilleures couvertures foliaires, et Ramdam, ayant la meilleure capacité de tallage, suivent cette tendance puisqu'elles faisaient partie des variétés présentant les meilleurs rendements moyens entre 2018 et 2020 (Faux *et al.*, 2020).

La Figure 14 montre également une corrélation positive entre précocité à l'épiaison et port au tallage ($r=0,71$, $p<0,001$), d'une part, et entre la couverture foliaire R et la largeur des feuilles ($r=0,44$, $p<0,05$), d'autre part. Ces deux paires de variables sont par ailleurs négativement corrélées entre elles. Ces observations suggèrent que les variétés les plus précoces présentent un port au tallage davantage érigé, des feuilles relativement plus larges et une couverture foliaire plus importante. Par ailleurs, nombre de talles et largeur des feuilles sont apparus positivement corrélés entre eux ($r=0,47$, $p<0,05$).

Cette observation peut paraître paradoxale, un port étalé ne semblant pas engendrer une couverture foliaire plus importante. Cette moindre couverture foliaire des plantes au port étalé peut être également liée au fait que ces variétés semblent avoir des feuilles moins larges et, potentiellement, un nombre de talles plus faible – le nombre de talles étant apparu positivement corrélé avec la largeur des feuilles mais toutefois non-corrélé avec la couverture foliaire.

Nos résultats suggèrent donc que les variétés plus précoces auraient une largeur de feuille plus importante, produiraient plus de talles et auraient une couverture foliaire plus importante, tandis qu'elles présenteraient un port dressé. Wolfe *et al.* (2008), décrivent également les variétés qui ont une croissance rapide, qui produisent beaucoup de talles et qui ont un LAI élevé comme ayant la meilleure couverture foliaire. Ces plantes plus précoces, et qui permettent une couverture du sol rapide sont intéressantes pour la lutte contre les adventices (Wolfe *et al.*, 2008). En outre, Mason *et al.* (2007), préconisent également des variétés plus précoces pour pallier le fait que l'on a tendance à semer plus tard en bio, justement pour lutter contre les adventices.

Aucune corrélation entre la hauteur des plantes et la couverture foliaire n'a été mise en évidence dans notre étude. Leistrumaité *et al.* (2009) mettent eux en évidence une corrélation positive entre ces deux variables chez l'orge et le seigle. Mason *et al.* (2007), démontrent que la biomasse des mauvaises herbes est corrélée négativement avec la taille des plantes et le nombre d'épis au mètre carré. Feledyn-Szewczyk (2013), et Feledyn-Szewczyk & Jończyk (2015) montrent également que plus le froment (d'hiver et de printemps) est grand, moins le nombre d'adventices est important, puisque moins de lumière pénètre sous la canopée. Selon Wolfe *et al.* (2008), la hauteur des céréales est un paramètre important pour assurer la compétitivité vis-à-vis des adventices. Cependant, une variété de plus petite taille avec une grande couverture foliaire aurait une meilleure compétitivité vis-à-vis des adventices qu'une plante de grande taille (Wolfe *et al.* 2008), qui de plus, est plus sujette à la verse. De fait, on observe fréquemment une corrélation positive entre la taille des plantes, la longueur des tiges et le score de verse (Zuber *et al.*, 1999).

En outre, Dogan *et al.* (2009) montrent également une corrélation positive entre taille des plantes et rendements en grains. La variété Brehat suit cette tendance. Les rendements 2021 pour les nouvelles variétés RGT Rutenac et Kitesurf, de grande taille, permettront de vérifier cette tendance.

Tous ces paramètres sont importants pour la lutte contre les adventices en AB, une contrainte de taille pour les agriculteurs. Feledyn-Szewczyk & Jończyk (2015) montrent également que plus le nombre de talles est élevé, ainsi que la matière sèche du froment est élevée, ce qu'on peut rapporter à sa largeur de feuilles moins il y a d'adventices. Les variétés Ramdam et Lumaco semblent donc intéressantes pour la lutte contre les adventices au vu de leur capacité de tallage, et leur largeur de feuilles.

Du point de vue phytotechnique, les variétés Brehat, Kitesurf, Lumaco et Ramdam semblent les plus intéressantes au vu de leurs caractéristiques, notamment par leur tolérance au froid, leur hauteur, leur couverture foliaire et leur nombre de plantes par mètre carré. De fait, les variétés Kitesurf, Lumaco et Ramdam ont un nombre de talles supérieur aux autres variétés, et Brehat, Kitesurf et Lumaco une bonne couverture foliaire et tolérance au froid. Les variétés Brehat et Kitesurf font également partie des plantes les plus hautes. La variété Ramdam est, elle, intéressante pour son nombre de plantes par m². Sur base des paramètres étudiés dans notre étude, les variétés Kitesurf et Lumaco, actuellement dans leur première année d'essai, présentent des caractéristiques intéressantes. Les variétés Brehat et

Randam avaient présenté des rendements intéressants en moyenne de 2018 à 2020 (Faux *et al.*, 2020). A noter que le choix variétal reste singulier, variant d'un agriculteur à l'autre, en fonction des besoins en paille par exemple ou d'une diversité de précocité des variétés si leur surface à récolter est importante.

3. Partie zootechnique

Préalablement à l'analyse de la variance, les tests de Shapiro et Bartlett ont été réalisés sur les résidus de chacune des quatre variables analysées. Le test de Shapiro était hautement significatif ($p < 0,001$) pour une variable et significatif ($p < 0,05$) pour trois variables. Cependant, la transformation de variable ne modifiant pas l'interprétation des résultats et la distribution des résidus étant unimodale, l'analyse des résultats non transformés a été poursuivie en considérant avec prudence les résultats proches du seuil de significativité.

3.1 Performances zootechniques des poulets

Les résultats de l'analyse de la variance, présentés dans le Tableau 8 ci-dessous, permettent de visualiser l'effet de la variété de triticales, du traitement enzymatique, de la semaine d'expérimentation et de leurs interactions, sur l'ingestion, l'IC, le GQM et le coefficient de variation du poids des poulets.

En outre, afin d'alléger le Tableau 8, celui-ci ne présente que les résultats des tests des effets fixes, les effets aléatoires étant tous strictement non - significatifs.

Tableau 8 : Test des effets fixes sur l'ingestion, la croissance, l'indice de consommation et le CV du poids des poulets (p -valeurs).

Variable	Effet Variété	Effet Enzyme	Effet Semaine	Effet Var*Enz	Effet Var*Sem	Effet Enz*Sem	Effet Var*Enz*Sem
MS ingérée (g/jour*poulet)	0,477	0,477	0,006	0,526	0,569	0,730	0,212
GQM (g/jour)	0,840	0,404	0,435	0,944	0,992	0,491	0,955
IC (gMS/gGQM)	0,906	0,442	0,035	0,804	0,976	0,691	0,687
CV poids des poulets ¹ (%)	0,681	0,684	-	0,137	-	-	-

¹ Le CV du poids des poulets a été mesuré une seule fois sur la période de l'essai, ce qui explique l'absence de valeur pour les effets incluant le facteur « semaine»

Aucun effet significatif ni du facteur variétal ni du traitement enzymatique sur les performances de croissance du poulet de chair n'a pu être mis en évidence lors de cet essai (Tableau 8).

On remarque cependant un effet semaine très significatif ($p < 0,01$) sur la matière sèche ingérée par les poulets, et significatif sur l'indice de consommation ($p < 0,05$). Aucun effet semaine n'est observé sur le GQM, qui est impacté par les résultats de la 4^{ème} semaine d'expérimentation.

De fait, les résultats relatifs à la 4^{ème} semaine d'expérimentation sont à considérer avec prudence, les poulets ayant été affectés au niveau de leur tractus respiratoire durant cette semaine de mesure, leurs performances ont été perturbées. Toutes les loges ont été touchées par ce problème respiratoire. Le Tableau 9 ci-dessous permet d'observer l'impact de ces problèmes respiratoires sur les performances zootechniques des volailles au cours de la 4^{ème} semaine d'expérience.

Tableau 9 : Ingestion, croissance, indice de consommation et CV du poids des poulets selon la variété et selon le traitement enzymatique (moyenne \pm erreur standard).

Variable	Semaine	Effet Variété			Effet Enzyme	
		Borodine	Brehat	Vuka	Enz-	Enz+
MS ingérée (g/jour* poulet)	1	124 \pm 3	120 \pm 3	119 \pm 3	120 \pm 2	123 \pm 3
	2	141 \pm 5	138 \pm 4	141 \pm 6	138 \pm 5	141 \pm 5
	3	153 \pm 5	145 \pm 6	146 \pm 6	148 \pm 5	148 \pm 6
	4	140 \pm 4	135 \pm 4	141 \pm 5	138 \pm 3	139 \pm 5
	5	174 \pm 5	171 \pm 5	175 \pm 8	175 \pm 3	171 \pm 3
	Modèle global		143 \pm 3	138 \pm 3	141 \pm 4	140 \pm 3
GQM (g/jour)	1	47,0 \pm 1,5	44,5 \pm 2,1	46,2 \pm 1,9	47,2 \pm 1,8	44,6 \pm 1,8
	2	47,2 \pm 2,0	45,0 \pm 1,4	48,5 \pm 2,2	46,4 \pm 1,8	47,5 \pm 1,8
	3	52,5 \pm 2,9	50,7 \pm 3,4	50,6 \pm 2,4	52,2 \pm 2,8	50,4 \pm 2,6
	4	32,0 \pm 1,7	29,5 \pm 1,3	32,5 \pm 1,6	31,5 \pm 1,4	31,1 \pm 1,4
	5	57,1 \pm 2,0	54,8 \pm 2,0	57,0 \pm 2,2	54,8 \pm 2,0	57,8 \pm 1,7
	Modèle global		45,6 \pm 1,4	43,2 \pm 1,4	45,3 \pm 1,4	45 \pm 1,2
IC (g MS/ gGQM)	1	2,7 \pm 0,0	2,7 \pm 0,1	2,6 \pm 0,1	2,6 \pm 0,1	2,8 \pm 0,1
	2	3,0 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1	2,9 \pm 0,1	3,0 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0
	3	2,9 \pm 0,1	2,9 \pm 0,1	2,9 \pm 0,1	2,9 \pm 0,0	3,0 \pm 0,0
	4	4,5 \pm 0,2	4,6 \pm 0,2	4,4 \pm 0,2	4,5 \pm 0,2	4,6 \pm 0,2
	5	3,1 \pm 0,2	3,2 \pm 0,2	3,1 \pm 0,2	3,3 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1
	Modèle global		3,3 \pm 0,1	3,4 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	3,3 \pm 0,1
CV poids des poulets (%)	Modèle global	11,3 \pm 1,5	12 \pm 1,5	10,2 \pm 1,5	11,5 \pm 1,2	10,8 \pm 1,2

Tous les effets fixes étant non significatifs ($p > 0,05$), aucun contraste n'a été estimé. Le tableau 9 ci-dessus détaille les performances des volailles mesurées par semaine d'expérimentation. On remarque bien que ces performances zootechniques sont comparables à ce qui est observé sur le terrain.

L'absence d'effet des variétés de triticales, bien que celles-ci aient des viscosités contrastées, est en contradiction avec notre hypothèse.

Les effets néfastes liés à la présence de concentrations élevées en AXs et β -glucanes solubles sont bien connus. Déjà en 1992, Annison montre que l'ajout de 30g/kg d'AXs solubles extraites du froment et intégrées dans un régime à base de sorgho réduit de façon considérable le gain de poids et l'IC des poulets à croissance rapide (Annison, 1992).

De fait, on a très tôt observé que les céréales viscosantes altéraient les performances de croissance des poulets à croissance rapide, par l'augmentation de la viscosité des digestats qu'elles génèrent (Levy Häner *et al.*, 2015).

En réponse à cela, les éleveurs et firmes productrices d'aliments se sont rapidement tournés vers l'utilisation d'enzymes exogènes, pour palier à ces effets néfastes relevés (Bedford, 2018).

Cependant, certaines études, bien que minoritaires, n'ont parfois pas observé d'effets négatifs sur les performances des poulets liés à l'introduction à des taux élevés de céréales visqueuses dans les régimes des volailles (Thacker *et al.*, 2002 ; Dusel *et al.*, 1998).

En revanche, l'ajout de xylanases à des régimes riches en AXs solubles permet habituellement des améliorations de performances. De fait, des poulets nourris avec un régime comprenant 65% de triticales avaient un meilleur IC, et GQM lorsqu'une xylanase était ajoutée au régime (Pourreza *et al.*, 2007).

Matthiesen *et al.* (2020) démontrent également que l'ajout de xylanases améliore l'IC ainsi que le poids final des poulets, et ce, d'autant plus que le substrat est visqueux (Matthiesen *et al.*, 2020 ; Widodo *et al.*, 2018A).

Dans notre étude, aucun effet de l'ajout d'enzyme n'a été observé, et ce qu'importe la variété.

En plus du fait qu'aucun effet ni de la variété de triticales, ni du traitement enzymatique n'ait été observé sur les performances zootechniques des poulets au cours de l'expérience, les poulets ont connu une croissance et un développement classique qu'importe le traitement qu'ils aient reçu (Figure 15).

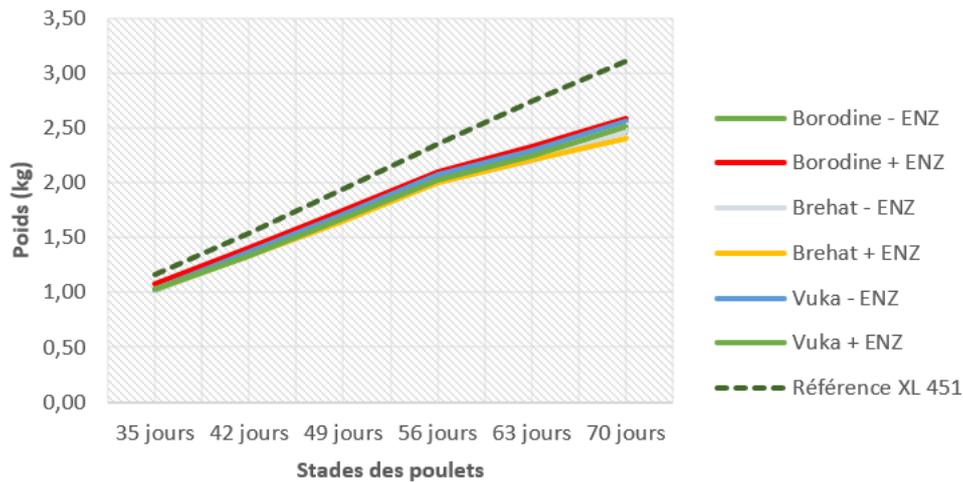


Figure 15 : Evolution du poids moyen des poulets par traitement par rapport à la référence.

On observe bien sur le graphique ci-dessus une évolution normale du poids des poulets, légèrement inférieure à la référence de l'entreprise de sélection, mais semblable à ce qui est observé dans les poulaillers biologiques classiques. Le décrochage observé à l'âge de 56 jours des poulets est expliqué par les problèmes respiratoires qu'ils ont connus entre le 56^{ème} et le 63^{ème} jour d'essai. A la fin de l'essai, soit après 70 jours, les poulets avaient des poids moyens de 2,5kg, le poids classiquement atteint par la souche XL 451 dans les poulaillers biologiques. De plus, les volailles des blocs 1 et 3 ont été abattues après 63 jours, celles-ci ayant déjà atteint leur poids d'abattage, ces volailles avaient un poids moyen de 2,41kg.

En outre, les litières des poulets étaient très sèches durant toute la durée de l'essai, ce qui constitue une preuve supplémentaire de l'absence de problèmes de viscosité, ceux-ci générant habituellement des problèmes d'humidité des litières (Carré *et al.*, 1994).

Enfin, les taux d'introduction du triticale dans les régimes ont été volontairement très importants de manière à mettre en évidence les éventuels effets négatifs des NSPs sur les paramètres de croissance.

3.2 Analyse des régimes des poulets

Afin de pouvoir justifier et interpréter les résultats obtenus, diverses analyses ont été réalisées sur les aliments présentés aux poulets.

3.2.1 Composition chimique des variétés de triticales et des régimes

Tableau 10 : Caractérisation des régimes et de leurs composants (triticales et aliment complémentaire).

Aliment caractérisé	MS60ir	MPT	CT	CEL	Amidon	MGR	NDF	SSt
	%	% MS	% MS	% MS	% MS	% MS	% MS	% MS
Complément + enz	91,7	32,3	12,8	7,25	25,0	9,79	19,9	6,57
Complément - enz	91,5	34,2	14,8	8,13	17,3	11,8	21,1	7,14
Borodine	87,9	10,6	1,69	2,63	69,3	0,797	11,9	4,34
Brehat	87,1	11,1	1,62	2,44	69,7	0,794	11,9	5,42
Vuka	88,5	11,2	2,04	2,97	68,2	1,32	12,8	3,36
Borodine + enz	89,5	16,9	5,25	3,72	54,6	5,61	16,3	4,79
Borodine - enz	89,5	17,9	6,47	4,37	51,7	6,08	17,0	5,10
Brehat + enz	88,8	16,7	5,75	3,81	55,8	5,36	16,3	5,27
Brehat - enz	89,0	17,9	5,38	3,93	53,7	6,11	16,6	5,59
Vuka + enz	89,4	18,2	5,38	3,96	53,0	6,07	16,4	4,59
Vuka - enz	89,8	18,9	6,93	4,57	49,5	6,81	17,3	4,74

MS60ir = teneur en matière sèche à 60°, MPT= matière protéique totale (N*6,25), CT= cendres totales, CEL= cellulose de Weende, MGR= matière grasse (extrait étheré), NDF = fibres insolubles dans le détergent neutre, SSt= sucres solubles totaux

La composition des deux aliments complémentaires semble relativement semblable, bien que le complément avec enzyme présente une teneur en amidon de plus de 7% supérieure à la valeur du complément dépourvu d'enzyme.

En ce qui concerne les 3 variétés de triticales, on remarque une teneur en protéines, en cendres et en matière grasse légèrement supérieure pour la variété Vuka, comme cela a pu être mis en évidence par la caractérisation de cette variété en laboratoire (Tableau 6). Cette même variété présente une teneur en fibres insolubles dans le détergent neutre plus élevée que les autres, ce qui peut s'expliquer par la plus petite taille de ses grains mesurée en laboratoire (Tableau 6).

Les régimes complets proposés aux volailles suivent ces mêmes tendances.

Cependant, ces différences compositionnelles n'ont pas eu d'effet significatif sur les performances de croissance des volailles.

3.2.2 Mesure de la viscosité des variétés de triticales

Une mesure de la viscosité des trois variétés de triticales utilisées dans l'alimentation des volailles a été réalisée par la société Puratos.

Tableau 11 : Mesure de la viscosité des variétés de triticale intégrées dans le régime des poulets réalisée par Puratos.

Durée (min)	Viscosité (Pa.s)		
	Borodine	Brehat	Vuka
0	5,48	4,01	5,45
20	13,4	14,0	18,5
40	13,5	13,6	19,4
60	12,4	11,2	17,9
120	12,5	10,8	16,9
180	10,3	9,72	15,6
240	10,9	8,31	15,1

La variété Vuka semble générer plus de viscosité que les autres, suivie par la variété Borodine, puis Brehat. Cette mesure va donc dans le sens des résultats du dosage des AXs et β -glucanes par chromatographie et de la mesure de la viscosité au RVA (*cf*r section V-1.1). Cependant, malgré ces différences de viscosité entre variétés, aucun effet sur les performances n'a été observé.

3.2.3 Mesure de la viscosité des aliments

Une mesure de la viscosité des aliments starter et transition ainsi que des 6 régimes proposés aux poulets a été réalisée au RVA, dans les conditions eau - α -amylase (*cf*r section IV-1.2.8). L'objectif étant de pouvoir comparer la viscosité des aliments starter et transition et la viscosité des régimes proposés aux poulets à partir du 35^{ème} jour, jour du début de l'expérimentation à proprement parler.

Tableau 12 : Mesure de la viscosité liée aux arabinoxylyanes et β -glucanes solubles dans les aliments starter, transition et les régimes proposés aux poulets à partir du 35^{ème} jour.

Mesure (eau + α -amylase)	Viscosité à 1 min (cPs)	Viscosité à 2 min (cPs)	Pic (cPs)	Creux (cPs)	Viscosité finale (cPs)
Régime starter	377	282	372	140	468
Régime transition	323	247	321	161	471
Régime Vuka + ENZ	107	91	318	57	173
Régime Vuka - ENZ	113	97	334	61	207
Régime Borodine + ENZ	98	75	269	55	153
Régime Borodine - ENZ	77	52	262	22	130
Régime Brehat + ENZ	99	77	300	48	166
Régime Brehat - ENZ	79	63	265	38	153

On peut remarquer dans le Tableau 12 que la viscosité mesurée des régimes starter et transition était plus de trois fois supérieure à celle des régimes proposés aux poulets au cours de l'expérimentation. Cela peut s'expliquer par la présence du maïs, du blé et du soja dans ces régimes, qui contiennent déjà des NSPs viscosantes bien qu'en moindre quantité que le triticale. En outre, il est possible que d'autres molécules, telles que des protéines aient contribué en partie à la viscosité supérieure des régimes starter et transition.

De plus, il semblerait que le régime avec enzyme soit en moyenne légèrement plus visqueux que le régime sans enzyme. Cependant, ces différences sont minimales et peuvent largement être expliquées par l'erreur expérimentale de la mesure. Cette erreur est d'autant plus importante que ces viscosités mesurées sont bien inférieures aux viscosités habituellement mesurées par le RVA. De plus, les enzymes ajoutées ont pu être inhibées par le traitement thermique subi lors de la granulation, mais également au cours de cette analyse au RVA. De fait, le programme utilisé au RVA atteint une température de 90°. La thermostabilité du cocktail enzymatique utilisé sera évoquée dans la section 3.2.4 qui suit.

Plusieurs études ont montré que des poulets dont le tube digestif est soumis à une certaine viscosité liée aux NSPs solubles dès leur plus jeune âge, vont développer, avec l'âge, une capacité de digestion de ces substances.

Notamment, Petersen *et al.* (1999) ont montré une viscosité intestinale deux fois moindre à 45 jours d'âge par rapport à 25 jours d'âge, ainsi qu'une réduction progressive de la viscosité intestinale avec l'âge des poulets, chez des poulets à croissance rapide nourris avec 660g/kg d'orge dès leur 10^{ème} jour d'âge.

De même, Szczurek *et al.* (2020) ont travaillé sur la digestibilité iléale des acides aminés chez des poulets dont le régime contenait 940g/kg soit d'orge, de froment ou de triticale, sans ajout d'enzyme. Ils mettent également en évidence une corrélation négative entre la teneur en NSPs soluble ingérée par les poulets et la digestibilité iléale standardisée des acides aminés essentiels chez des poulets âgés de 14 jours. En revanche, cette corrélation n'est plus d'application à l'âge de 28 jours ce qui démontre une meilleure tolérance à la viscosité du tube digestif du poulet de chair à croissance rapide avec l'âge, qui peut être liée à une modification du microbiote intestinal (Szczurek *et al.*, 2020).

Bautil *et al.* (2019) ont pu expliquer ce phénomène. Ils ont testé un régime composé de 649g/kg de froment du premier jour au 35^{ème} jour des poulets, correspondant à la fin de l'essai.

Ils ont pu remarquer qu'à partir de l'âge de 15 - 21 jours environ, les poulets développent une capacité d'hydrolyse des WU-AXs (AXs insolubles dans l'eau) en WE-AXs (AXs solubles dans l'eau) au niveau de l'iléum, du jéjunum et du caecum, via la sécrétion d'endoxylanases microbiennes. A partir de 21-28 jours, le microbiote iléal et caecal semble s'adapter à cette augmentation de teneurs en WE-AXs, en sécrétant des xylanases et arabinofuranosidases hydrolysant ces molécules et produisant des WE-AXs de faibles poids moléculaires qui pourront ensuite être fermentés. Cette capacité d'hydrolyse des WE-AXs semble augmenter de façon linéaire jusqu'à l'abattage des poulets. Lors de cette étude, ils ont également observé une réduction linéaire des teneurs en AX dans les matières fécales.

L'hypothèse d'une adaptation du tube digestif des poulets à la viscosité peut être une source d'explication des résultats obtenus lors de l'essai en poulailler. De fait, les régimes reçus par les poulets durant les 35 premiers jours ont pu permettre le développement d'un microbiote capable de digérer les NSPs.

D'après les résultats des études menées à ce sujet, il semblerait que l'apport de xylanases exogènes dans les régimes soit plus utile et mieux valorisée aux stades jeunes des poulets à croissance rapide.

Une étude menée par Lee *et al.*, 2017 démontre que l'ajout de xylanases améliore le GQM des poulets pendant les 11 premiers jours d'âge, mais à 21 jours d'âge, la réponse des poulets à la supplémentation enzymatique a été réduite.

A la suite des résultats de leur étude menée en 2019, Bautil *et al.* (2020) ont testé l'ajout d'AXOS (xylo-oligomères dérivés d'AXs) à raison de 0,5% dans un régime identique à celui testé dans leur étude précédente (Bautil *et al.*, 2019). L'ajout de ces substances équivaut à l'ajout de xylanases exogènes, puisqu'elles produisent elles-mêmes ces AXOS. Ils ont observé une réduction plus rapide de la viscosité intestinale des poulets dont le régime contenait ces AXOS par rapport au contrôle. De fait,

ils ont mesuré une réduction de viscosité à partir de 21 jours d'âge chez ceux-ci, et seulement à partir de 28 jours pour les poulets qui ont reçu un régime classique.

Ils confirment que l'ajout d'enzymes dès le premier jour des poulets permet une émergence accélérée d'un microbiote capable de digérer les NSPs.

Ces diverses études permettent de remarquer l'importance de la composition du premier régime des poulets pour le développement de leur système digestif. Notons cependant que toutes ces études ont été réalisées sur des poulets à croissance rapide. Il est possible que le délai d'adaptation du tube digestif soit allongé pour les poulets à croissance lente, vu que la quantité d'aliments qu'ils ingèrent est réduite par rapport à celle des poulets à croissance rapide à âge identique ou poids identique. Cependant, la viscosité du triticales n'a pas eu d'effet sur les performances zootechniques des volailles à partir de l'âge de 35 jours des poulets dans cette étude.

3.2.4 Activité enzymatique dans les différents régimes

L'absence d'effet de l'enzyme observée dans cette étude, mène à de nouveaux questionnements, notamment quant à l'efficacité de celle-ci. Pour rappel, c'est le cocktail enzymatique Rovabio® Excel, agréé en bio et dérivé d'un champignon *Talaromyces versatilis* qui a été utilisé. Il appartient à la famille GH11 (=Glycoside hydrolase family 11).

Son activité enzymatique, et plus particulièrement son activité xylanasique a été dosée dans les régimes proposés aux poulets ainsi que dans l'aliment complémentaire, comprenant le cocktail enzymatique.

Tableau 13 : Résultats du dosage de l'activité enzymatique.

Aliment dosé	Activité attendue (ppm)	Activité mesurée (ppm)	% STDED (3 valeurs) ¹
Aliment complémentaire + ENZ	125	29,7	18,9
Borodine + ENZ	50	17,8	11,2
Brehat + ENZ	50	36,7	5,41
Vuka + ENZ	50	10,8	14,4
¹ pourcentage de déviation standard entre les 3 variables mesurées			

Dans un premier temps, on peut remarquer que l'activité enzymatique mesurée est inférieure à l'activité annoncée. De plus, cette activité enzymatique est différente en fonction du régime, et passe du simple au triple entre les échantillons analysés. Etrangement, l'activité enzymatique du régime contenant la variété Brehat est plus importante que l'activité enzymatique dans l'aliment complémentaire seul.

Le fait que l'activité enzymatique mesurée soit inférieure à l'activité annoncée pourrait provenir d'une faiblesse de la méthode de dosage utilisée, que l'on peut notamment constater au vu de la déviation standard relativement importante entre les trois mesures réalisées. Cette méthode ne dose pas directement les enzymes, mais le fait de manière indirecte via une mesure de la quantité de substrat

hydrolysée par unité de temps. Les hydrolysats sont ensuite dosés par une méthode développée en interne par la société Puratos, et qui pourrait présenter des faiblesses.

De plus, il semblerait que l'activité mesurée soit inférieure à l'activité attendue déjà au niveau de l'aliment complémentaire. Il se pourrait alors que ces enzymes aient en partie été inhibées par le processus de granulation subi par l'aliment complémentaire. De fait, il semblerait que les enzymes fongiques soient plus sensibles à la température que les enzymes bactériennes (Vandeplas *et al.*, 2010).

Lafond *et al.* (2014) ont étudié des xylanases (GH11) dérivées du champignon *Talaromyces versatilis*, identique à celui duquel est dérivé notre cocktail enzymatique. Ils ont mis en évidence que certaines xylanases de cette famille perdaient déjà 75% de leur activité à 50°. De manière générale, l'activité de ces enzymes décroît à partir d'une température de 50-60° et elle semble quasi nulle à 80°. La durée de ces traitements n'est malheureusement pas précisée. Par contre, lorsque ces enzymes étaient incubées durant 180 minutes à 60° elles perdaient toute leur activité, et elle variait de 20 à 100% en fonction du type de xylanases à 50° (Lafond *et al.*, 2014). La durée des processus de granulation n'est cependant pas du même ordre de grandeur, cela ne donne donc pas une information pertinente quant à l'impact de la durée du processus sur la stabilité de l'enzyme.

A notre connaissance, aucune étude relative à l'impact de la durée du processus de granulation sur la persistance d'une enzyme de ce type n'a été réalisée. En revanche, Silversides et Bedford (1999) ont remarqué que la durée du traitement est moins importante que la température sur la thermostabilité d'une xylanase dérivée d'un champignon du genre *Trichoderma*. De fait, l'activité de la xylanase étudiée diminuait de manière linéaire à partir de 85°, que la durée du traitement thermique soit de 55 ou de 140 secondes (Silversides et Bedford, 1999).

Dans notre expérience, le processus de granulation a été réalisé à une température maximale de 70° pendant 3 minutes. A cette température, selon les résultats présentés par Lafond *et al.* (2014), les xylanases GH11 utilisées n'auraient plus qu'une activité comprise entre 20 et 50% de leur activité de départ. Cependant, cette enzyme est décrite par son producteur comme étant résistante à des températures de 90° (Communication personnelle de P.-Y. Piret).

La méthode de mesure ainsi que la température du processus de granulation peuvent expliquer l'activité enzymatique réduite dosée dans l'aliment complémentaire. Un facteur supplémentaire pourrait impacter l'activité enzymatique dans les régimes complets, ce sont les inhibiteurs de xylanases internes au grain de triticales.

Cette action des inhibiteurs de xylanase a déjà été mise en évidence dans d'autres études. De fait, après avoir détecté des activités xylanasiques bien inférieures aux activités attendues, Ponte *et al.* (2004), ont évalué la possibilité de l'action des inhibiteurs d'endoxylanase. Pour cela, ils ont incubé les xylanases de la famille GH11 étudiées avec un extrait de blé dur, céréale étudiée, dans un ratio 1:1. Ils ont alors pu remarquer qu'il ne persistait qu'environ 50% de l'activité xylanasique de départ.

Les inhibiteurs en cause, le TAXI (*Triticum aestivum* xylanase inhibitor) et le XIP (Xylanase Inhibiting Protein) sont bien connus principalement en froment (Gebruers *et al.*, 2010). Vidmantiene & Juodeikiene (2011) ont pu démontrer que ces inhibiteurs étaient également présents chez le triticales, via une caractérisation des protéines inhibitrices extraites du triticales et une comparaison de leur poids moléculaire à celui des inhibiteurs du froment (Vidmantiene & Juodeikiene, 2011).

Les inhibiteurs du type TAXI ayant la capacité d'inhiber les enzymes bactériennes et fongiques des familles 10 et 11 (Gebruers *et al.*, 2004) et les inhibiteurs XIP les enzymes fongiques du type 10 et 11 (Juge *et al.*, 2004), l'enzyme utilisée a donc pu être en partie inhibée par ces deux inhibiteurs.

En outre, Dornez *et al.* (2006) démontrent que ces teneurs en inhibiteurs varient d'un facteur 8 pour le TAXI et 1,5 pour le XIP entre variétés de froment, cela peut donc expliquer les variations observées entre les différents régimes basés sur des variétés différentes de triticales. Ces activités inhibitrices distinctes entre variétés ont également été remarquées chez le triticales (Vidmantiene & Juodeikiene, 2011).

Dans notre cas, on pourrait alors imaginer que la variété Vuka aurait des teneurs en inhibiteurs de xylanases supérieures à Borodine, et de même Borodine, supérieures à Brehat. Il faut tout de même rester prudents face à ces affirmations puisque Vidmantiene & Juodeikiene (2011) ont observé qu'une enzyme, bien qu'elle soit issue d'un champignon (*Aspergillus aculateus*), n'était inhibée par aucune des variétés de triticales qu'ils ont étudié.

Malgré les différences de viscosité mesurées entre les variétés étudiées (11,22 Pa.s pour Borodine -en moyenne entre 0 et 240 minutes (Tableau 13)-, 10,24 Pa.s pour Brehat, 15,56 Pa.s pour Vuka), et l'effet enzymatique testé, aucune différence entre traitement n'a été observée.

Ces résultats vont dans le sens de ceux de Piron *et al.* (2005), étudiant les effets de l'introduction de 60% de froment dans le régime de volailles à croissance rapide. Ils n'ont trouvé aucune corrélation entre la viscosité intestinale et les performances des volailles. De même, nous n'avons pas pu établir de lien entre les variétés définies comme étant les plus visqueuses analytiquement, et les performances zootechniques mesurées lors de l'expérience en poulailler.

Piron *et al.* (2005) observent même que les variétés les plus riches en AXs solubles et générant les viscosités *in vitro* les plus importantes, permettaient de meilleures performances zootechniques des volailles.

Dans cette étude, les régimes reçus durant les 35 premiers jours des poulets ont sans doute permis l'implantation d'une flore microbienne capable d'atténuer les effets des NSPs. Lorsque l'expérimentation à proprement parler a débuté, les poulets avaient donc déjà atteint un âge qui leur conférait une insensibilité aux NSPs responsables de la viscosité des digestas. De ce fait, la supplémentation enzymatique aurait été mieux valorisée au stade jeune du poulet, puisqu'elle permet à ce stade une mise en place plus rapide de ces capacités d'hydrolyse des NSPs.

De plus, le dosage enzymatique a montré que l'activité enzymatique était bien inférieure à l'activité attendue. Cela peut être dû à une faiblesse de la méthode de dosage, ou encore au processus de granulation. Les inhibiteurs de xylanases du triticales ont également pu avoir un impact sur l'activité enzymatique mesurée dans les régimes complets.

L'effet de la supplémentation enzymatique sur les performances zootechniques des volailles n'a donc pu être testé qu'en partie.

VI. Contribution personnelle

J'ai débuté mon travail par une caractérisation physico-chimique de variétés de triticales. Les recherches bibliographiques réalisées en collaboration avec le chef de laboratoire, ont permis, en parallèle à ces analyses, de développer une nouvelle méthode de mesure de la viscosité.

Lors de l'essai en poulailler qui a suivi cette partie analytique, j'ai participé à la mise en place de l'essai, entre autres via la préparation des diverses fiches de suivi (poids des poulets, ingestion journalière, ...). Au cours de l'essai, je participais à l'entretien général du poulailler, au relevé journalier des paramètres d'ambiance, j'organisais et je réalisais les pesées et mesures d'ingestion hebdomadaires. Je préparais également les 6 régimes alimentaires présentés aux poulets de façon journalière.

Afin de réaliser les diverses mesures des paramètres agronomiques requises, j'ai pu participer aux visites hebdomadaires d'une parcelle d'essais du CRA-W, et j'ai ainsi contribué aux observations et à la collecte de données.

Une fois les résultats rassemblés, je me suis familiarisée avec le logiciel R afin de traiter ces résultats. J'ai pris le soin de solliciter les personnes appropriées afin de m'assurer de la pertinence et du bien-fondé du traitement statistique réalisé.

J'ai également entretenu de nombreux échanges par mail, avec des professionnels ayant une affinité pour le sujet afin d'interpréter et de discuter au mieux les résultats obtenus.

Bien que la problématique de viscosité du triticales ait été largement étudiée dans le secteur de l'aviculture conventionnelle, ce travail constitue l'un des premiers ciblant le poulet de chair biologique.

VII. Conclusions générales

La caractérisation physico-chimique des variétés réalisée en amont de l'expérience en poulailler a permis de déceler des effets significatifs du site expérimental et de la variété sur les propriétés physico-chimiques des grains de triticales, notamment sur la viscosité.

On a également mis en évidence des corrélations importantes entre divers paramètres physico-chimiques des grains tels que leur teneur en protéines, leur indice de blancheur ou encore leur granulométrie, avec leur viscosité.

A l'avenir, si ces corrélations sont confirmées par d'autres études, ces mesures pourraient constituer des variables de sélection indirecte de variétés à caractère peu viscosant, rendant alors cette mesure moins laborieuse.

Les variétés Kasyno, Elixir et Breat sont ressorties comme étant les variétés les moins visqueuses. Elles présentaient également d'autres atouts tels que leur teneur en protéines, leur rendement ou encore leur poids de mille grains.

En outre, selon les paramètres caractérisés dans l'essai phytotechnique, les variétés Breat, Kitesurf, Lumaco et Ramdam sont ressorties comme étant les plus intéressantes.

D'après les résultats de l'essai en poulailler, il semblerait que la viscosité du triticales n'ait pas d'effet significatif sur les performances zootechniques des volailles lorsqu'il est introduit à partir du 35^{ème} jour des poulets et qu'il représente 60% du régime, bien que des différences de viscosité entre les variétés testées aient été constatées.

De même, un apport enzymatique exogène à activité xylanase et glucanase n'a pas permis une amélioration de performances des volailles.

Il semblerait que les critères à prendre en compte pour discriminer les variétés de triticales destinées à l'alimentation des volailles de chair en AB soient différents des idées classiques et largement partagées par la profession. De fait, d'après les résultats de cette étude, la viscosité ne semblerait pas être un facteur important à considérer à partir de l'âge de 35 jours des poulets.

A ce stade, des taux d'incorporation élevés du triticales pourraient donc être pratiqués par les éleveurs. Au vu de la littérature et des résultats de cet essai, l'apport enzymatique serait probablement mieux valorisé au stade jeune du poulet, et des taux d'incorporation de triticales élevés, sans apport enzymatique, y seraient plus problématiques.

Les éleveurs visant l'autonomie alimentaire devraient donc privilégier des variétés plus performantes du point de vue phytotechnique, plutôt que de choisir les variétés de triticales selon leur caractère viscosant, du moins pour des poulets de 35 jours et plus. Les variétés Breat, Kitesurf, Lumaco et Ramdam apparaissent intéressantes du point de vue phytotechnique, tandis que la variété Breat présentait également des propriétés physico-chimiques intéressantes.

VIII. Perspectives

Ce travail ouvre à de nouvelles perspectives pour de futurs essais, qui devraient permettre de donner une indication aux éleveurs quant à l'effet de taux d'incorporation élevés de triticales aux stades jeunes du poulet.

De fait, bien que la viscosité ne semble pas affecter les performances zootechniques des volailles à partir de l'âge de 35 jours, la littérature suggérerait qu'elle soit problématique pour les jeunes volailles.

Afin de pouvoir confronter cette hypothèse, des taux d'incorporation élevés de triticales devraient être testés dès le premier jour d'âge des poulets.

Il faudrait alors veiller à travailler avec des variétés de triticales issues de mêmes sites expérimentaux, afin de gommer un éventuel effet de l'environnement sur les propriétés des grains étudiés.

L'étude de l'effet d'une complémentation enzymatique nécessiterait un apport enzymatique liquide postérieurement au traitement thermique afin de s'assurer de la présence de l'enzyme dans l'aliment, si pas, une maîtrise minutieuse de la thermostabilité des enzymes utilisées.

Si, lors d'un tel essai, la viscosité du triticales s'avérait problématique au stade jeune du poulet, les variétés Elicsir, Kasyno et Brehat seraient recommandées, au vu de leur moindre viscosité.

La variété Brehat fait également partie des variétés les plus avantageuses du point de vue phytotechnique. En revanche, la variété Bilboquet, pourvue d'un indice de viscosité élevé sur sa fiche technique, et Vuka, qui elle, par contre, est réputée pour être une variété des moins viscosantes, sont à déconseiller selon les résultats de la caractérisation physico-chimique des variétés, la variété Vuka présente également peu d'avantages du point de vue phytotechnique.

Références bibliographiques

- Agricultures et Territoires, 2013. Triticale – Fiche technique agriculture biologique. Available at https://hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Hauts-de-France/Fiche_technique_Triticale.pdf (Accessed : 11 March 2021).
- Annisson G., 1992. Anti-Nutritive Effect Of Wheat Pentosans In Broiler Chickens: Roles Of Viscosity And Gut Microflora. *Br. Poult. Sci.* **33**(4), 821–834, DOI:10.1080/00071669208417524.
- Annisson G., Choct M., 1991. Anti-Nutritive Activities Of Cereal Non-Starch Polysaccharides In Broiler Diets And Strategies Minimizing Their Effects. *Worlds. Poult. Sci. J.* **47**(3), 232–242, DOI:10.1079/WPS19910019.
- Arvalis – Institut du Végétal, 2020. Variétés et interventions d’automne 2020 – Triticale. Choisir & Décider – SYNTHÈSE NATIONALE. Available at: https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/ca/db/56/39/choisir1_cap_2020_national_triticale4970327749088888438.pdf (Accessed : 3 March 2021).
- Arvalis – Institut du Végétal, 2015. L’amidon du triticale bien digéré par le poulet. Available at : [Triticale : un aliment de choix pour les poulets \(arvalis-infos.fr\)](https://www.arvalis-infos.fr/) (Accessed 5 March 2021).
- AviFaF, nd. Available at: <http://www.avifaf.fr> (Accessed : 12 July 2021).
- Balet S., Guelpa A., Fox G. & Manley M., 2019. Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool for Measuring Starch-Related Physicochemical Properties in Cereals: a Review. *Food Anal. Methods* **12**(10), 2344–2360, DOI:10.1007/s12161-019-01581-w.
- Bautil A., Verspreet J., Buyse J., Goos P., Bedford M.R. & Courtin C.M., 2020. Arabinoxylan-oligosaccharides kick-start arabinoxylan digestion in the aging broiler. *Poult. Sci.* **99**(5), 2555–2565, DOI:10.1016/j.psj.2019.12.041.
- Bautil A., Verspreet J., Buyse J., Goos P., Bedford M.R. & Courtin C.M., 2019. Age-related arabinoxylan hydrolysis and fermentation in the gastrointestinal tract of broilers fed wheat-based diets. *Poult. Sci.* **98**(10), 4606–4621, DOI:10.3382/ps/pez159.
- Beudelot A., Mailleux M., 2019. Les chiffres du bio 2019. Rapport juin 2020. Available at : <https://mk0biowalloniejo431r.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/06/Le-bio-en-chiffre-2019.pdf> (Accessed :13 February 2021).
- Beckers Y., Piron F., Wéry O., Vandeplass S. & Théwis A., 2005. Des enzymes exogènes pour valoriser davantage le froment chez les volailles et les porcs. *10ème Carrefour des Prod. Anim. Gembloux, 26 janvier 2005* (March 2015), 1–6.
- Bedford M.R., 2018. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. *Br. Poult. Sci.* **59**(5), 486–493, DOI:10.1080/00071668.2018.1484074.
- Bettge A.D. & Morris C.F., 2000. Relationships among grain hardness, pentosan fractions, and end-use quality of wheat. *Cereal Chem.* **77**(2), 241–247, DOI:10.1094/CCHEM.2000.77.2.241.

Biowallonie asbl, Août 2020. Production de volailles : réglementation bio

Bouguennec A., Vilariño M., Masson E., du Cheyron P. L.P., 2013. Amélioration des conditions de production et d'utilisation du triticale dans le cadre d'une agriculture durable. *Innov. Agron.* **27**, 89–109.

Carré B., Gomez J., Melcion J.P. & Giboulot B., 1994. La viscosité des aliments destinés à l'aviculture. Utilisation pour prédire la consommation et l'excrétion d'eau.

Colleoni-Sirghie M., Jannink J.L. & White P.J., 2004. Pasting and thermal properties of flours from oat lines with high and typical amounts of β -glucan. *Cereal Chem.* **81**(6), 686–692, DOI:10.1094/CCHEM.2004.81.6.686.

Community Plant Variety Office. Search the CPVO Register. Available at: <https://public.plantvarieties.eu/publicSearch> (Accessed :24 May 2021).

Danisco Animal Nutrition, 2014. Feed enzyme innovation – past, present and potential. *Int. Poult. Prod.* (September), 1–3.

Dennery G., Dezat E., Rousset N., Septembre 2012. Vers une gestion efficace des litières, de l'approvisionnement aux techniques d'élevage avicole. Available at: https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/brochure_12_litiere_volaille.pdf (Accessed : 31 March 2021).

Dogan R., Kacar O., Coplu N. & Azkan N., 2009. Characteristics of new breeding lines of triticale. *African J. Agric. Res.* **4**(2), 133–138.

Dornez E., Gebruers K., Joye I.J., De Ketelaere B., Lenartz J., Massaux C., Bodson B., Delcour J.A. & Courtin C.M., 2008A. Effects of genotype, harvest year and genotype-by-harvest year interactions on arabinoxylan, endoxylanase activity and endoxylanase inhibitor levels in wheat kernels. *J. Cereal Sci.* **47**(2), 180–189, DOI:10.1016/j.jcs.2007.03.008.

Dornez E., Gebruers K., Joye I.J., De Ketelaere B., Lenartz J., Massaux C., Bodson B., Delcour J.A. & Courtin C.M., 2008B. Effects of fungicide treatment, N-fertilisation and harvest date on arabinoxylan, endoxylanase activity and endoxylanase inhibitor levels in wheat kernels. *J. Cereal Sci.* **47**(2), 190–200, DOI:10.1016/j.jcs.2007.03.009.

Dornez E., Joye I. J., Gebruers K., Lenartz J., Massaux C., Bodson B., Delcour J. A., Courtin.C.M., 2006. Insight into variability of apparent endoxylanase and endoxylanase inhibitor levels in wheat kernels. *J. Sci Food Agric* **86** :1610 – 1617, DOI :10.1002/jsfa.

Dusel G., Kluge H., Jeroch H. & Simon O., 1998. Xylanase supplementation of wheat-based rations for broilers: Influence of wheat characteristics. *J. Appl. Poult. Res.* **7**(2), 119–131, DOI:10.1093/japr/7.2.119.

Eylenbosch D., Meza R., Sinnaeve G., Godin B., Jacquemin G., 2020. Variétés - Triticale et seigle. In : Bodson B., De Proft M., Watillon B. (eds) Livre Blanc Céréales. Editions Septembre 2020. Gembloux.

- Faux A.-M., Legrand J., Stalport A., Mahieu O., Godin B., Sinnaeve G., 2020. Variétés de céréales en agriculture biologique – Triticale. In : Bodson B., De Proft M., Watillon B. (eds) Livre Blanc Céréales. Editions Septembre 2020. Gembloux.
- Faux A.-M., Decruyenaere V., Stilmant D., 2019. Autonomie alimentaire en élevage bovin biologique (1^{ère} partie) : typologie des ressources fourragères. *Itinéraires BIO*, **45**, 34-43.
- Feledyn-Szewczyk B. & Jończyk K., 2015. Differences between organically grown varieties of spring wheat, in response to weed competition and yield. *J. Plant Prot. Res.* **55**(3), 254–259, DOI:10.1515/jppr-2015-0036.
- Feledyn-Szewczyk B., 2013. The influence of morphological features of spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) and common wheat (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*) varieties on the competitiveness against weeds in organic farming system. *J. Food, Agric. Environ.* **11**(1), 416–421.
- Fraś A., Gołębiowska K., Gołębiowski D., Mańkowski D.R., Boros D. & Szecówka P., 2016. Variability in the chemical composition of triticale grain, flour and bread. *J. Cereal Sci.* **71**, 66–72, DOI:10.1016/j.jcs.2016.06.016.
- Gan Y.T., McLeod J.G., Scoles G.J. & Campbell G.L., 1998. Relationship between extract viscosity and kernel size in winter rye. *Can. J. Plant Sci.* **78**(3), 423–427, DOI:10.4141/P97-085.
- Gebruers K., Dornez E., Bedö Z., Rakszegi M., Courtin C.M. & Delcour J.A., 2010. Variability in xylanase and xylanase inhibition activities in different cereals in the HEALTHGRAIN diversity screen and contribution of environment and genotype to this variability in common wheat. *J. Agric. Food Chem.* **58**(17), 9362–9371, DOI:10.1021/jf100474m.
- Gebruers K., Brijs K., Courtin C.M., Fierens K., Goesaert H., Rabijns A., Raedschelders G., Robben J., Sansen S., Sørensen J.F., Van Campenhout S. & Delcour J.A., 2004. Properties of TAXI-type endoxylanase inhibitors. *Biochim. Biophys. Acta - Proteins Proteomics* **1696**(2), 213–221, DOI:10.1016/j.bbapap.2003.08.013.
- Godin B., Smedt C. De, Deneyer V., Pietercelie A. & Sinnaeve G., 2017. The Rapid Visco Analyser as a rheological tool to determine the potential brewing quality of barley and malt (February 2020), 5030, DOI :10.13140/RG.2.2.31231.56483.
- Godin B., Agneessens R., Gerin P.A. & Delcarte J., 2011. Composition of structural carbohydrates in biomass: Precision of a liquid chromatography method using a neutral detergent extraction and a charged aerosol detector. *Talanta* **85**(4), 2014–2026, DOI:10.1016/j.talanta.2011.07.044.
- Grosjean F., Maupetit P. & Beaux M.F., 1999. Variability of wheat and other cereal water extract viscosity. 2 - Range and causes of variation. *J. Sci. Food Agric.* **79**(1), 123–130, DOI :10.1002/(SICI)1097-0010(199901)79:1<123::AID-JSFA203>3.0.CO;2-E.
- Gupta P.K. & Priyadarshan P.M., 1982. *Triticale: Present status and future prospects*, Advances in Genetics, 255–345, DOI:10.1016/S0065-2660(08)60300-4.
- International Triticale Association, sd. Triticale History. Triticale (x *Triticosecale* Wittmack) is an artificial intergeneric hybrid between a female wheat plant (*Triticum* spp.) and a male rye parent (*Secale* spp.). Available at: <http://triticale.org/triticale-history/> (Accessed :10 March 2021).

- JIRSA O., SEDLÁČKOVÁ I. & VACULOVÁ K., 2018. Quantification of β -glucans in Barley - Review. *Kvas. Prum.* **64**(1), 2–5, DOI :10.18832/kp201801.
- Józefiak D., Rutkowski A., Jensen B.B. & Engberg R.M., 2007. Effects of dietary inclusion of triticale, rye and wheat and xylanase supplementation on growth performance of broiler chickens and fermentation in the gastrointestinal tract. *Anim. Feed Sci. Technol.* **132**(1–2), 79–93, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2006.03.011.
- Juge N., Payan F. & Williamson G., 2004. XIP-I, a xylanase inhibitor protein from wheat: A novel protein function. *Biochim. Biophys. Acta - Proteins Proteomics* **1696**(2), 203–211, DOI:10.1016/j.bbapap.2003.08.014.
- Juin H. (INRA EASM), Brachet M. (INRA EASM), Dusart L. (ITAVI), Morinière F. (CDA 85), Pattier S. (CA 72), Nayet C. (CA 26), Uzureau A. (CAB) Carrière J. (ITAB) Bordeaux C. (CRA P. et Roinsard A. (ITAB).), 2015. Alimentation des volailles en agriculture biologique. *Aliment. des volailles en Agric. Biol.* 68.
- Kavanagh V. & Hall L., 2015. Biology and biosafety In *Triticale breeding - Progress and Prospect*. In : Eudes, F. (ed.), 2015. *Triticale*. Springer International Publishing, Lethbridge, Canada, 3–13.
- Knudsen K.E.B., 2014. Fiber and nonstarch polysaccharide content and variation in common crops used in broiler diets. *Poult. Sci.* **93**(9), 2380–2393, DOI:10.3382/ps.2014-03902.
- Korver D.R., Zuidhof M.J. & Lawes K.R., 2004. Performance characteristics and economic comparison of broiler chickens fed wheat- and triticale-based diets. *Poult. Sci.* **83**(5), 716–725, DOI:10.1093/ps/83.5.716.
- Lafond M., Guais O., Maestracci M., Bonnin E. & Giardina T., 2014. Four GH11 xylanases from the xylanolytic fungus *Talaromyces versatilis* act differently on (arabino)xylans. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **98**(14), 6339–6352, DOI:10.1007/s00253-014-5606-x.
- Lahon L., 2019. Céréales biologiques – Etat des lieux de la filière wallonne. Available at: <https://www.fwa.be/sites/fwa.be/files/2019-09/Rapport%20C%20C3%A9rales%20Bassedef.pdf> (Accessed : 31 March 2021).
- Lalević D., Biberdžić M., Ilić Z., Milenković L., Tmušić N. & Stojiljković J., 2019. Effect of cultivar and increased nitrogen quantities on some productive traits of triticale. *Agric. For.* **65**(4), 127–136, DOI:10.17707/AgricultForest.65.4.11.
- Lee S.A., Apajalahti J., Vienola K., González-Ortiz G., Fontes C.M.G.A. & Bedford M.R., 2017. Age and dietary xylanase supplementation affects ileal sugar residues and short chain fatty acid concentration in the ileum and caecum of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* **234**(May), 29–42, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2017.07.017.
- Leistrumaitė A., Liatukas Ž. & Razbadauskienė K., 2009. The spring cereals traits of soil cover, disease resistance and yielding essential for organic growing **7**(I), 374–380.
- Levy Häner L., Ellemsi Y. & Pellet D., 2015. Effets de la variété et du milieu sur la viscosité du blé. *Rech. Agron. suisse* **6**(3), 94–101.

- Levy Häner L., Stamp P., Kreuzer M., Bouguennec A. & Pellet D., 2013 **A**. Experimental determination of genetic and environmental influences on the viscosity of triticale. *Cereal Res. Commun.* **41**(4), 613–625, DOI:10.1556/CRC.2013.0032.
- Levy Häner L., Stamp P., Kreuzer M., Bouguennec A. & Pellet D., 2013 **B**. Viscosity of triticale varieties differs in its response to temperature after flowering. *F. Crop. Res.* **149**, 347–353, DOI:10.1016/j.fcr.2013.05.020.
- Li S., Morris C.F. & Bettge A.D., 2009. Genotype and environment variation for arabinoxylans in hard winter and spring wheats of the U.S. Pacific Northwest. *Cereal Chem.* **86**(1), 88–95, DOI:10.1094/CCHEM-86-1-0088.
- Livre Blanc Céréales, février 2007. Principaux stades repères de la végétation en céréales. Available at : <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2017/01/principaux-stades-reperes-de-la-vegetation-en-cereales.pdf> (Accessed: 27 July 2021).
- Mailleux M., Henrotte B, Boutsen R. & Counasse D., 2021. Alimentation des monogastriques et fabrication à la ferme. *Itinéraires BIO*, **57**, 10-43.
- Martinant J.P., Cadalen T., Billot A., Chartier S., Leroy P., Bernard M., Saulnier L. & Branlard G., 1998. Genetic analysis of water-extractable arabinoxylans in bread wheat endosperm. *Theor. Appl. Genet.* **97**(7), 1069–1075, DOI:10.1007/s001220050993.
- Mason H.E., Navabi A., Frick B.L., O'Donovan J.T. & Spaner D.M., 2007. The weed-competitive ability of Canada western red spring wheat cultivars grown under organic management. *Crop Sci.* **47**(3), 1167–1176, DOI:10.2135/cropsci2006.09.0566.
- Matias, F. I., Caraza-Harter, M.V., Endelman, J.B., 2020. FIELDimageR : An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. *Plant Phenome J.* **3**, e20005.
- Matthiesen C.F., Pettersson D., Smith A., Pedersen N.R. & Storm A.C., 2020. Exogenous xylanase improves broiler production efficiency by increasing proximal small intestine digestion of crude protein and starch in wheat-based diets of various viscosities. *Anim. Feed Sci. Technol.* **272**(xxxx), 114739, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2020.114739.
- Mergoum M., Sapkota S., ElDoliefy A.E.A., Naraghi S.M., Alamri M. S., AbuHammad W., 2019. *Triticale (xTriticosecale Wittmack) Breeding*, Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals, 1–603.
- Mergoum M., Singh P.K, Peña R.J., Lozano-del Río A.J., Cooper K.V, Salmon D.F., Gómez Macpherson H., 2009. Triticale: A “New” crop with old challenges. *Cereals* (February), DOI:10.1007/978-0-387-72297-9.
- Métayer J.P., Vilariño M., Gaüzère J.M., Skiba F., 2007. Effet de la dureté et de la viscosité spécifique sur la valeur alimentaire du blé chez le poulet de chair (2003), 154–158.
- Musigwa S., Cozannet P., Morgan N., Swick R.A. & Wu S.B., 2021. Multi-carbohydrase effects on energy utilization depend on soluble non-starch polysaccharides-to-total non-starch polysaccharides in broiler diets. *Poult. Sci.* **100**(2), 788–796, DOI:10.1016/j.psj.2020.10.038.

- Oury F.X. & Godin C., 2007. Yield and grain protein concentration in bread wheat: How to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes? *Euphytica* **157**(1–2), 45–57, DOI:10.1007/s10681-007-9395-5.
- Oury F.X., Carré B., Pluchard P., Bérard P., Nys Y. & Leclercq B., 1998. Genetic variability and stability of poultry feeding related characters in wheat, in relation to environmental variation. *Agronomie* **18**(2), 139–150, DOI:10.1051/agro:19980204.
- Pérez-Vendrell A.M., Brufau J., Molina-Cano J.L., Francesch M. & Guasch J., 1996. Effects of cultivar and environment on β -(1,3)-(1,4)-D-glucan content and acid extract viscosity of Spanish barleys. *J. Cereal Sci.* **23**(3), 285–292, DOI:10.1006/jcrs.1996.0029.
- Petersen S.T., Wiseman J. & Bedford M.R., 1999. Effects of age and diet on the viscosity of intestinal contents in broiler chicks. *Br. Poult. Sci.* **40**(3), 364–370, DOI:10.1080/00071669987467.
- Piron F., Beckers Y., Ounissi K., Lenartz J. T.A., 2005. Comparaison de quatre variétés de blé d'hiver : effets de différents critères physico-chimiques sur les performances zootechniques du poulet. Sixièmes Journées de la Recherche avicole, St-Malo, 30 et 31 mars. 277-281. Available at : http://www.journees-de-la-recherche-avicole.org/JRA/page-JRA800.php?page=Contenu/Archives/6_JRA/nutrition.php&on=Archives&w=800 (Accessed: 31 July 2021).
- Ponte P.I.P., Ferreira L.M.A., Soares M.A.C., Gama L.T. & Fontes C.M.G.A., 2004. Xylanase inhibitors affect the action of exogenous enzymes used to supplement *Triticum durum*-based diets for broiler chicks. *J. Appl. Poult. Res.* **13**(4), 660–666, DOI:10.1093/japr/13.4.660.
- Pourreza J., Samie A.H. R.E., 2007. Effect of supplemental enzyme on nutrient digestibility and performance of broiler chicks fed on diets containing triticale. *J. Poult. Sci.* **6** (2) 115-117, DOI: 10.3923/ijps.2007.115.117.
- Rakha A., Åman P. & Andersson R., 2011. Dietary fiber in triticale grain: Variation in content, composition, and molecular weight distribution of extractable components. *J. Cereal Sci.* **54**(3), 324–331, DOI:10.1016/j.jcs.2011.06.010.
- Randhawa H.S., Bona L. G.R.J., 2015. *Triticale breeding - Progress and Prospect*. In : Eudes, F. (ed.), 2015. *Triticale*. Springer International Publishing, Lethbridge, Canada, 15–32.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rodehutschord M., Rückert C., Maurer H.P., Schenkel H., Schipprack W., Bach Knudsen K.E., Schollenberger M., Laux M., Eklund M., Siegert W. & Mosenthin R., 2016. Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes. *Arch. Anim. Nutr.* **70**(2), 87–107, DOI:10.1080/1745039X.2015.1133111.
- Saulnier L., Sado P.E., Branlard G., Charmet G. & Guillon F., 2007. Wheat arabinoxylans: Exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *J. Cereal Sci.* **46**(3), 261–281, DOI:10.1016/j.jcs.2007.06.014.
- Saulnier L., Peneau N. & Thibault J.-F., 1995. Variability in grain extract viscosity and water-soluble arabinoxylan content in wheat. *J. Cereal Sci.* **22**(3), 259–264, DOI:10.1006/jcrs.1995.0062.

- Silversides F.G. & Bedford M.R., 1999. Effect of pelleting temperature on the recovery and efficacy of a xylanase enzyme in wheat-based diets. *Poult. Sci.* **78**(8), 1184–1190, DOI:10.1093/ps/78.8.1184.
- Smeets N., Nuyens F., Van Campenhout L. & Niewold T., 2016. Insight into the chemical composition of wheat used in European broiler diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* **216**, 176–184, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2016.03.018.
- Szczurek W., Szymczyk B., Arczewska-Włosek A. & Świątkiewicz S., 2020. Apparent and standardised ileal digestibility of amino acids in wheat, triticale and barley for broiler chickens at two different ages. *Br. Poult. Sci.* **61**(1), 63–69, DOI:10.1080/00071668.2019.1673317.
- Tables INRAE- CIRAD-AFZ, 2017-2021. Composition et valeurs nutritionnelles des matières premières pour bovins, ovins, caprins, porcs, volailles, chevaux, lapins et salmonidés. Available at : <https://feedtables.com/fr/content/table-feed-profile> (Accessed: 12 July 2021).
- Thacker P.A., McLeod J.G. & Campbell G.L., 2002. Performance of growing-finishing pigs fed diets based on normal or low viscosity rye fed with and without enzyme supplementation. *Arch. Anim. Nutr.* **56**(5), 361–370, DOI:10.1080/00039420215631.
- Vandeplass S., Dauphin R.D., Thonart P., Théwis A. & Beckers Y., 2010. Effect of the bacterial or fungal origin of exogenous xylanases supplemented to a wheat-based diet on performance of broiler chickens and nutrient digestibility of the diet. *Can. J. Anim. Sci.* **90**(2), 221–228, DOI:10.4141/cjas09067.
- Vidmantienė D. & Juodeikienė G., 2011. The quality of feed grain: Endoxylanase and endoxylanase inhibition activity levels in triticale. *Vet. ir Zootech.* **53**(75), 76–83.
- Widodo A.E., Nolan J. V., Akter M., O'Neill H.M. & Iji P.A., 2018 **A**. Response of broiler chickens to triticale-based diets supplemented with microbial enzymes (1. Growth and intestinal function). *Poult. Sci. J.* **6**(1), 25–40, DOI:10.22069/psj.2018.13811.1280.
- Widodo A.E., Nolan J. V., Akter M., O'Neill H.M. & Iji P.A., 2018 **B**. Response of broiler chickens to triticale-based diets supplemented with microbial enzymes (2. Microbial profiles and activities). *Poult. Sci. J.* **6**(1), 41–50, DOI:10.22069/psj.2018.13813.1281.
- Wolfe M.S., Baresel J.P., Desclaux D., Goldringer I., Hoad S., Kovacs G., Löschenberger F., Miedaner T., Østergård H. & Lammerts Van Bueren E.T., 2008. Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica* **163**(3), 323–346, DOI:10.1007/s10681-008-9690-9.
- Zhang B., Liu W., Chang S.X. & Anyia A.O., 2010. Water-deficit and high temperature affected water use efficiency and arabinoxylan concentration in spring wheat. *J. Cereal Sci.* **52**(2), 263–269, DOI:10.1016/j.jcs.2010.05.014.
- Zhou M., Robards K., Glennie-Holmes M. & Helliwell S., 2000. Effects of enzyme treatment and processing pasting on thermal properties of oats. *J. Sci. Food Agric.* **80**(10), 1486–1494, DOI:10.1002/1097-0010(200008)80:10<1486::aid-jsfa668>3.0.co;2-%23.
- Zuber U., Winzeler H., Messmer M.M., Keller M., Keller B., Schmid J.E. & Stamp P., 1999. Morphological traits associated with lodging resistance of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* **182**(1), 17–24, DOI:10.1046/j.1439-037X.1999.00251.x.

Annexes

Annexe 1 : Dosage des arabinanes, xylanes et glucanes solubles par chromatographie liquide

Cette méthode débute par une concentration des NSPs solubles à l'éthanol. Pour ce faire, de l'éthanol 80% est ajouté à la mouture intégrale, les falcons sont vortexés et mélangés à trois reprises puis plongés dans un bain marie à 100°. Les échantillons sont vortexés tout au long du chauffage à 100° puis centrifugés pendant 10 minutes. Le surnageant est éliminé. On ajoute ensuite 10ml d'éthanol 80%, on vortexe, on centrifuge 5 minutes et on jette le surnageant. Cette étape est répétée, avec de l'éthanol 99%. Le falcon est ensuite séché à 40° pendant une nuit.

Les hémicelluloses solubles sont ensuite solubilisées dans l'eau. Après avoir ajouté 20ml d'eau dans chaque falcon, ceux-ci sont vortexés à 3 reprises, après une incubation à 20° pendant 30 minutes et une centrifugation pendant 10 minutes, on garde ensuite le surnageant, contenant les molécules d'intérêt, qui sera soumis à l'hydrolyse acide. Les hémicelluloses solubles sont alors hydrolysées en monosaccharides avec de l'acide sulfurique 72%, à 543µl/15mL de solution à hydrolyser. La solution est ensuite passée à l'étuve à 121° pendant 125 minutes. L'hydrolysate est neutralisé au CaCO₃ et filtré à 0,20µm. Les monosaccharides sont ensuite dosés par un système chromatographique liquide (HPLC). Les monosaccharides (xylose, arabinose, et glucose) sont séparés par un système de chromatographie liquide (HPLC) ACQUITY UPLC H-Class (Waters, Zellik, Belgium) équipé d'une colonne analytique de type divinylbenzène-styrène sulfonate greffée avec du plomb (Carbo Sep CHO-682 Pb analytical LC column ; 3000mmx7.8mm I.D. : 7µm taille des particules) (concise separations, San Jose, USA). La colonne analytique a été équipée d'une précolonne deashing H⁺ et CO₃⁻ (BioRad, Hercules, USA). La précolonne est mise à température ambiante alors que la colonne analytique a été mise à une température de 80°. Le HPLC a été couplé à un détecteur à indice de réfraction (RI) ACQUITY RI (Waters, Zellik, Belgium) à 50° pour le dosage des monosaccharides. La phase mobile utilisée a été constante (mode isocratique). L'injection était automatique et le volume d'injection était de 50 µL.

Les deux étapes d'hydrolyse et de chromatographie sont réalisées selon une méthode décrite par Godin *et al.* (2011).

Annexe 2 : Composition et valeur nutritionnelle des aliments starter, transition et des aliments complémentaires proposés aux poulets

Annexe 2.1 : Aliment starter poussin miette sans enzymes

Composition	Valeur (%)	Val. batch
Maïs BIO	30,0177%	600,354
Blé BIO	25,5000%	510,000
Soja 51 BIO	22,4500%	449,000
Tourteau de soja 46 BIO	10,0000%	200,000
Gluten de maïs 60	2,5000%	50,000
Son fin BIO	2,0000%	40,000
Huile de soja BIO	2,0000%	40,000
Protéine de pomme de terre	1,1523%	23,046
Minéraux, vitamines et additifs	4,38%	87,600

Nutrients	Valeur	Nutrients	Valeur
1 MS (g/kg)	895,0585	253 MET (g/kg)	3,6625
3 MAT (g/kg)	226,6070	255 THREO (g/kg)	8,5614
4 Graisse brute (g/kg)	60,7127	256 TRYP (g/kg)	2,6523
5 Cellulose brute (g/kg)	34,9848	314 dvLEU v (g/kg)	17,2608
6 Cendres brutes (g/kg)	68,7098	351 vLYSpl (g/kg)	10,0280
11 Sucres + Amidon (g/kg)	398,3751	352 vM+Cpl (g/kg)	7,4405
12 Sucres (g/kg)	39,8749	353 vMETpl (g/kg)	4,3033
13 Amidon Amyl (g/kg)	325,2721	355 vTHRpl (g/kg)	7,1197
18 Na+K+Cl (meq)	234,4199	356 vTRPpl (g/kg)	2,2857
21 Nitrogène (g/kg)	37,6315	364 vLEUpl (g/kg)	17,7028
25 MS org	844,3771	401 CARO avail (mg/kg)	12,0035
83 OEvoll. (KCAL)	2,947,0977	461 Vitamine A	10,000,0000
84 OEpoulet (KCAL)	2,710,4383	462 Vitamine D3	3,000,0000
101 Ca (g/kg)	7,9989	463 Vitamine E (mg/kg)	75,0000
102 P (g/kg)	7,1752	468 VIT B2 NATURAL (mg/kg)	1,3153
103 Phosphate (g/kg)	16,3654	469 VIT B2 AJOUTEE (mg/kg)	8,0000
106 oPP (g/kg)	3,8947	602 Mais bio	300,1770
107 oPP farine (g/kg)	4,0011	701 MS Bio + Conv	813,6715
111 Mg (g/kg)	2,6888	702 MS Biologique	813,6715
112 K (g/kg)	9,0952	704 Organique (g/kg)	957,4000
113 Na (g/kg)	1,6036	706 MS Biologique/MS (%)	91,9677
114 Cl (g/kg)	2,1123	708 MS Biologique+Conversion/MS (%)	91,9677
171 ACIDE LINOÏQUE (g/kg)	20,8673	709 MS Convnt.+Biol.+Conv./MS (%)	95,7200
251 LYS (g/kg)	11,6509	710 MS Non Bio + Non Oms/MS (%)	7,6573
252 MET+CY (g/kg)	7,4885	715 MS conventionnelle (g/kg)	33,6985

Ratios de nutriments	Valeur	Ratios de nutriments	Valeur
100 x Conversion / MS org		100 x vM+Cpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	74,1973
100 x MS Bio + Conv / MS org	96,3635	100 x vMETpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	42,9131
100 x MS Biologique / MS org	96,3635	100 x vTHRpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	70,9979
100 x MS conventionnelle (g/kg) / MS org	3,9909	100 x vTRPpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	22,7935
100 x vLYSpl (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	0,3700		

Sommes d'ingrédients	Valeur	Sommes d'ingrédients	Valeur
0,69 x BLE BIO + 0,1 x FEVEROLES BIO + 0,109 x MAÏS BIO + 0,844 x ORGE C2 + 0,211 x POIS BIO + SEIGLE BIO + TRITICALE C2	20,8669 %		

Annexe 2.2 : Aliment transition miettes sans enzyme

Composition	Valeur (%)	Val. batch
Maïs BIO	36,9634%	739,268
Soja 51 BIO	28,8500%	577,000
Blé BIO	21,7500%	435,000
Gluten de maïs 60	2,5000%	50,000
Huile de soja BIO	2,5000%	50,000
Son fin BIO	2,0000%	40,000
Tourteau de soja 46 BIO	0,8000%	16,000
Protéine de pomme de terre	0,5566%	11,132
Minéraux, vitamines et additifs	4,08%	81,6

Nutrients	Valeur	Nutrients	Valeur
1 MS (g/kg)	892,3508	253 MET (g/kg)	3,4480
3 MAT (g/kg)	210,8228	255 THREO (g/kg)	7,9171
4 Graisse brute (g/kg)	66,4173	256 TRYP (g/kg)	2,4170
5 Cellulose brute (g/kg)	33,2060	314 dvLEU v (g/kg)	16,5265
6 Cendres brutes (g/kg)	63,7860	351 vLYSpI (g/kg)	9,0028
11 Sucres + Amidon (g/kg)	414,7665	352 vM+Cpl (g/kg)	6,8308
12 Sucres (g/kg)	36,5295	353 vMETpl (g/kg)	3,8731
13 Amidon Amyl (g/kg)	344,5974	355 vTHRpl (g/kg)	6,5714
18 Na+K+Cl (meq)	230,3521	356 vTRPpl (g/kg)	2,0969
21 Nitrogène (g/kg)	35,8526	364 vLEUpI (g/kg)	16,9609
25 MS org	840,5105	401 CARO avail (mg/kg)	13,3927
83 OEvoll. (KCAL)	3,039,1473	461 Vitamine A	10,000,0000
84 OEpoulet (KCAL)	2,824,8584	462 Vitamine D3	3,000,0000
101 Ca (g/kg)	7,4886	463 Vitamine E (mg/kg)	75,0000
102 P (g/kg)	6,4010	468 VIT B2 NATURAL (mg/kg)	1,2666
103 Phosphate (g/kg)	14,6361	469 VIT B2 AJOUTEE (mg/kg)	8,0000
106 oPP (g/kg)	3,3020	602 Mais bio	369,6340
107 oPP farine (g/kg)	3,3961	701 MS Bio + Conv	816,2600
111 Mg (g/kg)	2,6320	702 MS Biologique	816,2600
112 K (g/kg)	8,2623	704 Organique (g/kg)	960,4000
113 Na (g/kg)	1,6163	706 MS Biologique/MS (%)	92,8634
114 Cl (g/kg)	1,8260	708 MS Biologique+Conversion/MS (%)	92,8634
171 ACIDE LINOÏQUE (g/kg)	24,2916	709 MS Conv.+Biol.+Conv./MS (%)	96,0200
251 LYS (g/kg)	10,5803	710 MS Non Bio + Non Oms/MS (%)	6,8216
252 MET+CY (g/kg)	7,0640	715 MS conventionnelle (g/kg)	28,2479

Ratios de nutriments	Valeur	Ratios de nutriments	Valeur
100 x Conversion / MS org		100 x vM+Cpl (g/kg) / vLYSpI (g/kg)	75,8740
100 x MS Bio + Conv / MS org	97,1148	100 x vMETpl (g/kg) / vLYSpI (g/kg)	43,0216
100 x MS Biologique / MS org	97,1148	100 x vTHRpl (g/kg) / vLYSpI (g/kg)	72,9936
100 x MS conventionnelle (g/kg) / MS org	3,3608	100 x vTRPpl (g/kg) / vLYSpI (g/kg)	23,2920
100 x vLYSpI (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	0,3187		

Sommes d'ingrédients	Valeur	Sommes d'ingrédients	Valeur
0,69 x BLE BIO + 0,1 x FEVEROLES BIO + 0,109 x MAIS BIO + 0,844 x ORGE C2 + 0,211 x POIS BIO + SEIGLE BIO + TRITICALE C2	19,0365 %		

Annexe 2.3 : Aliment complémentaire avec enzyme

Composition	Valeur (%)	Val. batch
Tourteau de soja 46 BIO	24,9097%	498,194
Maïs BIO	23,0000%	460,000
Soja 51 BIO	22,0000%	440,000
Pois BIO	7,5000%	150,000
Huile de soja BIO	4,3803%	87,606
Gluten de maïs 60	3,2500%	65,000
Protéine de pomme de terre	3,7500%	75,000
Minéraux, vitamines et additifs	11,21%	224,2

Nutrients	Valeur	Nutrients	Valeur
1 MS (g/kg)	921,3859	253 MET (g/kg)	4,6716
3 MAT (g/kg)	305,9620	255 THREO (g/kg)	11,8202
4 Graisse brute (g/kg)	85,5063	256 TRYP (g/kg)	3,5225
5 Cellulose brute (g/kg)	40,9296	351 vLYSpl (g/kg)	15,4178
6 Cendres brutes (g/kg)	142,6871	352 vM+Cpl (g/kg)	9,8784
11 Sucres + Amidon (g/kg)	251,7366	353 vMETpl (g/kg)	6,0852
12 Sucres (g/kg)	50,1633	355 vTHRpl (g/kg)	10,1544
13 Amidon Amyl (g/kg)	172,2913	356 vTRPpl (g/kg)	3,1074
18 Na+K+Cl (meq)	271,9573	380 Endo-1,3(4)-bêta-glucanase (N° EC 3,2,1,6) (CFU/kg)	3,750,0000
21 Nitrogène (g/kg)	48,2178	381 Endo-1,4-bêta-xylanase (N° EC 3,2,1,8) (CFU/kg)	27,500,0000
25 MS org	802,2699	401 CARO avail (mg/kg)	13,5250
83 OEvoll. (KCAL)	2,860,3524	461 Vitamine A	25,000,0000
84 OEpoulet (KCAL)	2,530,1514	462 Vitamine D3	7,500,0000
101 Ca (g/kg)	20,2300	463 Vitamine E (mg/kg)	187,5000
102 P (g/kg)	10,7825	602 Mais bio	230,0000
103 Phosphate (g/kg)	24,5649	701 MS Bio + Conv	741,9920
106 oPP (g/kg)	6,8463	702 MS Biologique	741,9920
107 oPP farine (g/kg)	6,8463	704 Organique (g/kg)	887,9000
111 Mg (g/kg)	1,6551	705 MS Conventinelle/MS (%)	9,6400
112 K (g/kg)	11,7053	706 MS Biologique/MS (%)	81,7900
113 Na (g/kg)	3,9980	708 MS Biologique+Conversion/MS (%)	81,7900
114 Cl (g/kg)	6,3698	709 MS Convent.+Biol.+Conv./MS (%)	88,7900
171 ACIDE LINOLEIQUE (g/kg)	30,9775	710 MS Non Bio + Non Oms/MS (%)	17,7500
251 LYS (g/kg)	17,3201	715 MS conventionnelle (g/kg)	63,2375
252 MET+CY (g/kg)	9,2778		

Ratios de nutriments	Valeur	Ratios de nutriments	Valeur
100 x Conversion / MS org		100 x vLYSpl (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	0,6094
100 x MAT (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	12,0926	100 x vM+Cpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	64,0713
100 x MS Bio + Conv / MS org	92,4866	100 x vMETpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	39,4689
100 x MS Biologique / MS org	92,4866	100 x vTHRpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	65,8617
100 x MS conventionnelle (g/kg) / MS org	7,8823	100 x vTRPpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	20,1545

Sommes d'ingrédients	Valeur	Sommes d'ingrédients	Valeur
0,501 x BLE BIO + 0,844 x FEVEROLES BIO + 0,103 x MAIS BIO + 0,925 x ORGE BIO + 0,071 x POIS BIO + TRITICALE BIO	2,9015 %		

Annexe 2.4 : Aliment complémentaire sans enzyme

Composition	Valeur (%)	Val. batch
Tourteau de soja 46 BIO	24,9683%	499,366
Maïs BIO	19,0000%	380,000
Soja 51 BIO	22,2000%	444,000
Pois BIO	7,5000%	150,000
Huile de soja BIO	5,6867%	113,734
Gluten de maïs 60	3,5000%	70,000
Protéine de pomme de terre	3,7500%	75,000
Minéraux, vitamines et additifs	13,395%	267,9

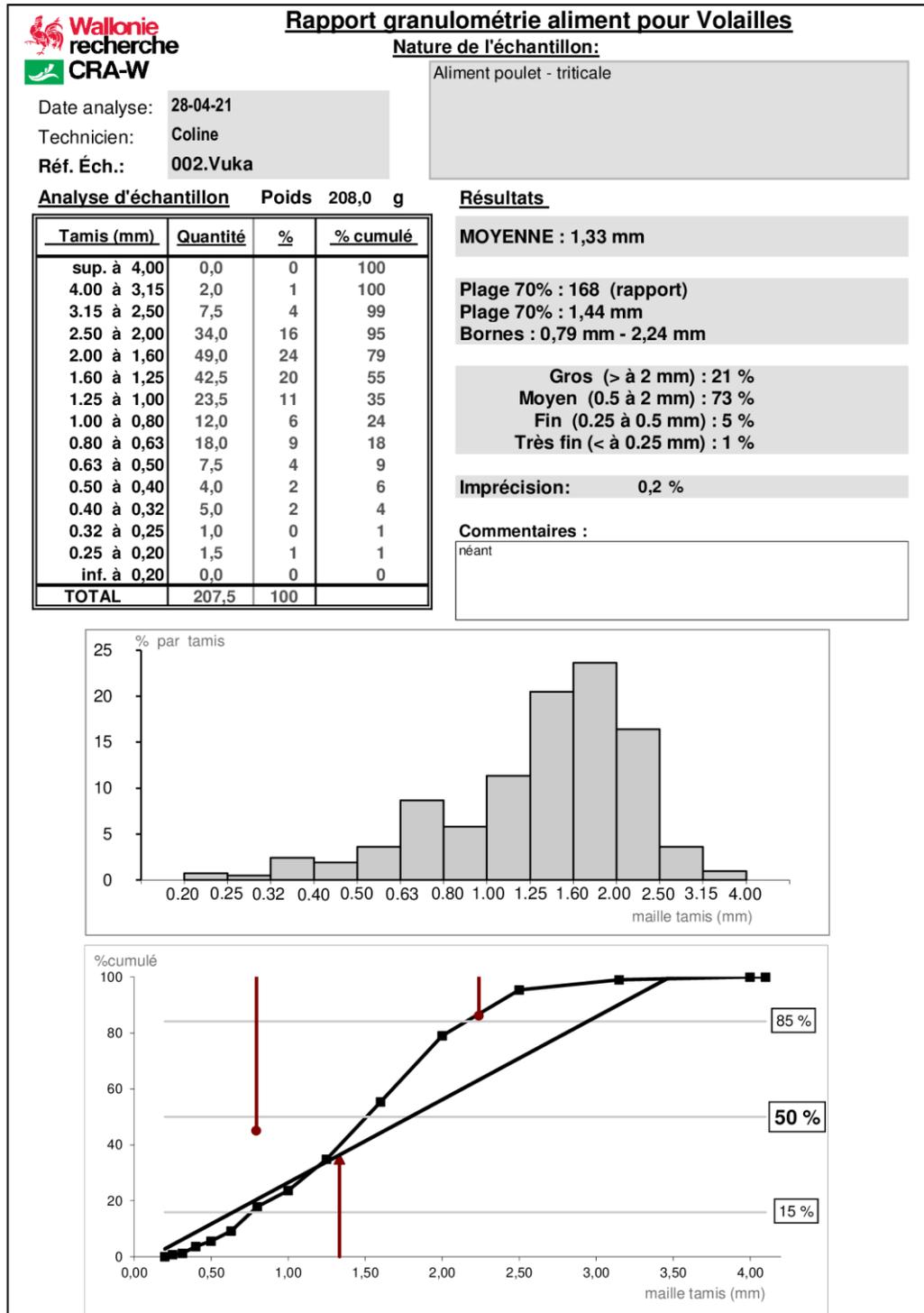
Nutrients	Valeur	Nutrients	Valeur
1 MS (g/kg)	923,6562	252 MET+CY (g/kg)	9,2270
3 MAT (g/kg)	305,1959	253 MET (g/kg)	4,6521
4 Graisse brute (g/kg)	97,1766	255 THREO (g/kg)	11,7929
5 Cellulose brute (g/kg)	40,1789	256 TRYP (g/kg)	3,5210
6 Cendres brutes (g/kg)	161,6938	351 vLYSpl (g/kg)	15,4207
11 Sucres + Amidon (g/kg)	227,1725	352 vM+Cpl (g/kg)	9,8344
12 Sucres (g/kg)	50,0246	353 vMETpl (g/kg)	6,0607
13 Amidon Amyl (g/kg)	149,1053	355 vTHRpl (g/kg)	10,1331
18 Na+K+Cl (meq)	279,0321	356 vTRPpl (g/kg)	3,1036
21 Nitrogène (g/kg)	48,1055	401 CARO avail (mg/kg)	13,3250
25 MS org	785,0891	461 Vitamine A	25,000,0000
83 OEvoll. (KCAL)	2,861,7076	462 Vitamine D3	7,500,0000
84 OEpoulet (KCAL)	2,529,3194	463 Vitamine E (mg/kg)	187,5000
101 Ca (g/kg)	18,2786	602 Mais bio	190,0000
102 P (g/kg)	10,7336	701 MS Bio + Conv	722,6162
103 Phosphate (g/kg)	24,4207	702 MS Biologique	722,6162
106 oPP (g/kg)	6,8521	704 Organique (g/kg)	866,0500
107 oPP farine (g/kg)	6,8521	705 MS Conventinne/MS (%)	8,3350
111 Mg (g/kg)	4,4286	706 MS Biologique/MS (%)	79,3550
112 K (g/kg)	11,8376	708 MS Biologique+Conversion/MS (%)	79,3550
113 Na (g/kg)	3,9934	709 MS Convent,+Biol.+Conv./MS (%)	86,6050
114 Cl (g/kg)	6,2300	710 MS Non Bio + Non Oms/MS (%)	20,1850
171 ACIDE LINOÏQUE (g/kg)	37,2265	715 MS conventionnelle (g/kg)	65,4625
251 LYS (g/kg)	17,3176		

Ratios de nutriments	Valeur	Ratios de nutriments	Valeur
100 x Conversion / MS org		100 x vLYSpl (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	0,6097
100 x MAT (g/kg) / OEpoulet (KCAL)	12,0663	100 x vM+Cpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	63,7738
100 x MS Bio + Conv / MS org	92,0426	100 x vMETpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	39,3020
100 x MS Biologique / MS org	92,0426	100 x vTHRpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	65,7110
100 x MS conventionnelle (g/kg) / MS org	8,3382	100 x vTRPpl (g/kg) / vLYSpl (g/kg)	20,1264

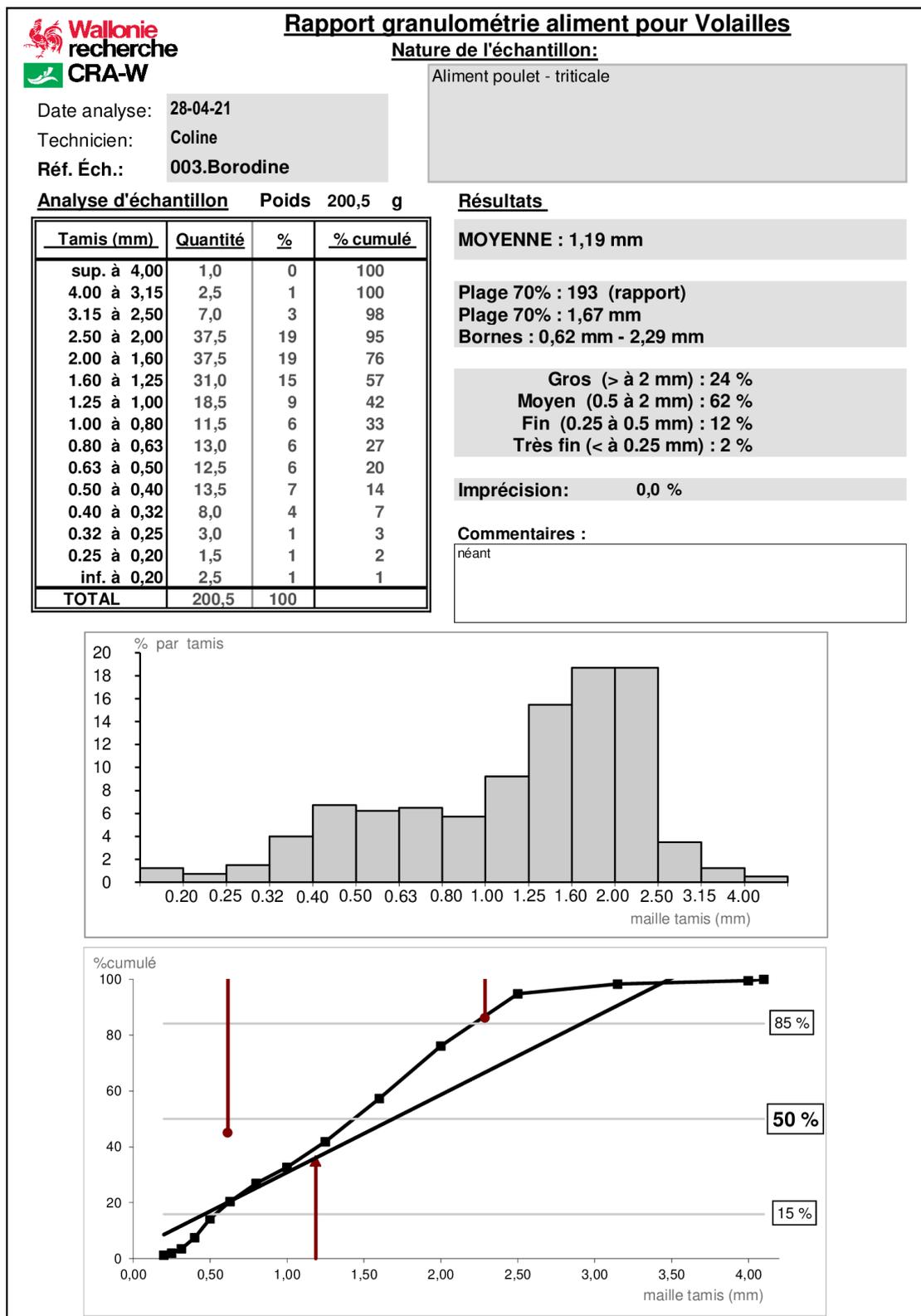
Sommes d'ingrédients	Valeur	Sommes d'ingrédients	Valeur
0,501 x BLE BIO + 0,844 x FEVEROLES BIO + 0,103 x MAIS BIO + 0,925 x ORGE BIO + 0,071 x POIS BIO + TRITICALE BIO	2,4895 %		

Annexe 3 : Distribution granulométrique du grain des trois variétés de triticales ainsi que des deux aliments complémentaires – Mesures réalisées au Département Productions et Filières – Unité Mode d'élevage, bien-être et qualité (CRA-W)

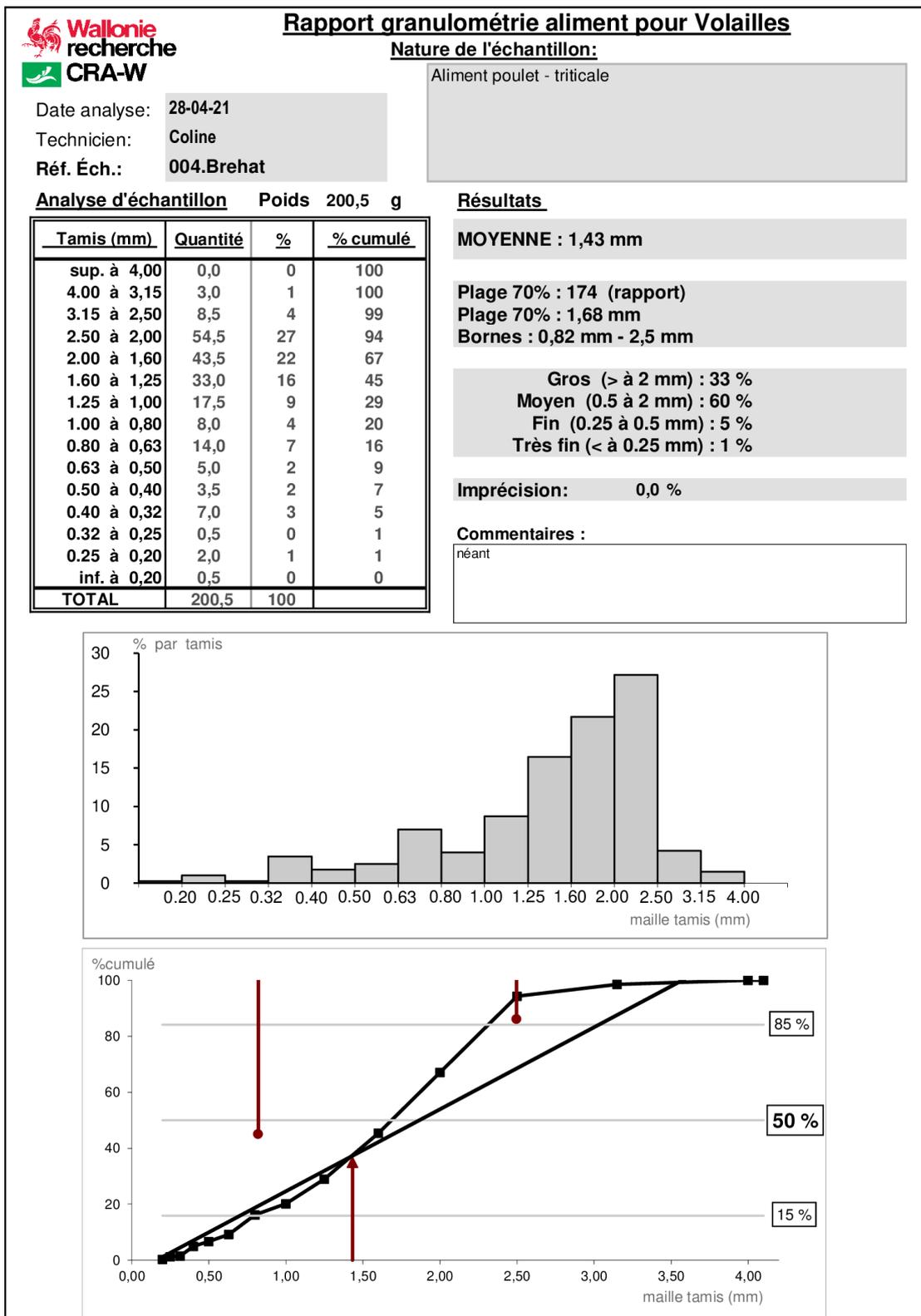
Annexe 3.1 : Granulométrie du grain de la variété Vuka



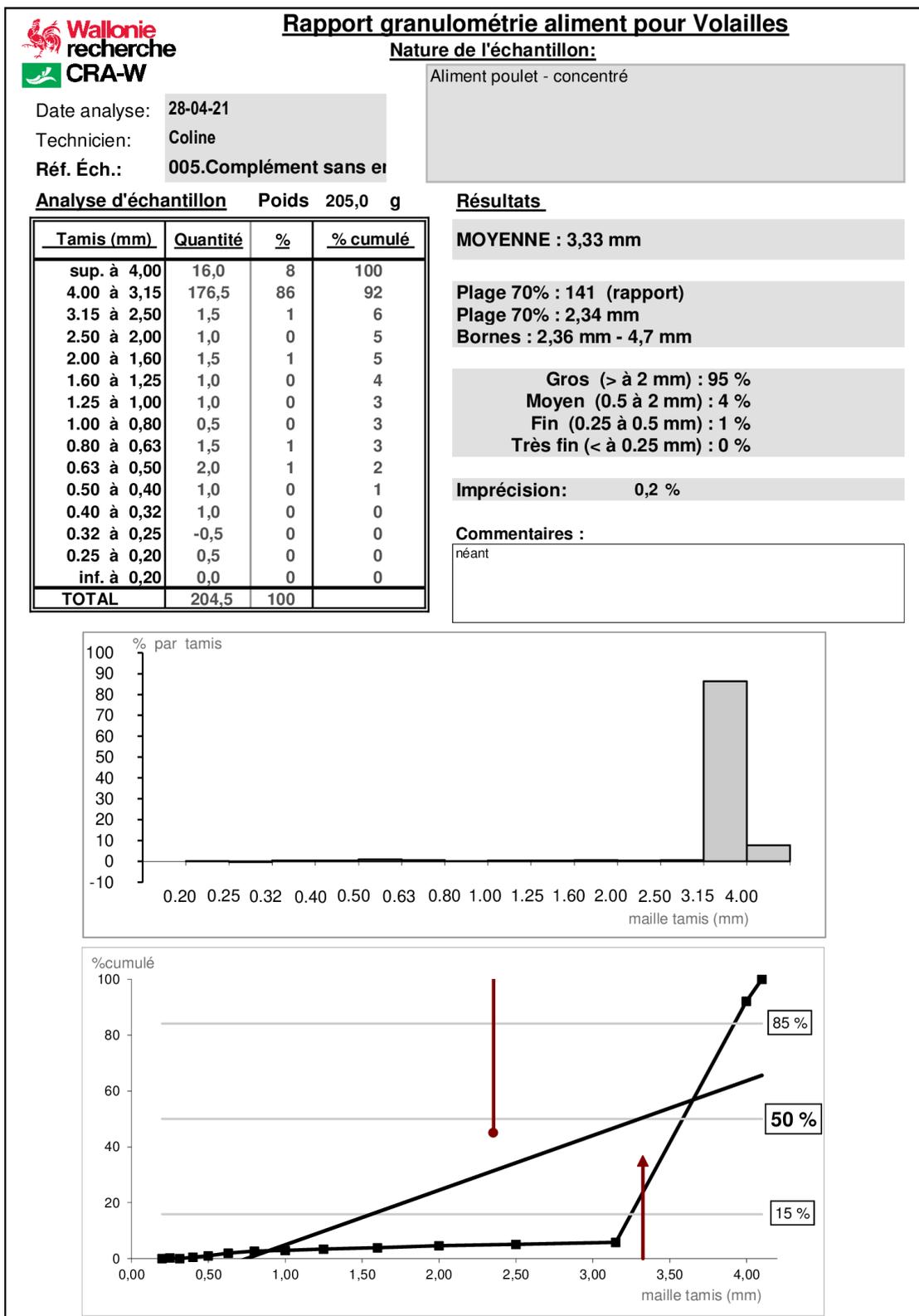
Annexe 3.2 : Granulométrie du grain de la variété Borodine



Annexe 3.3 : Granulométrie du grain de la variété Brehat



Annexe 3.4 : Granulométrie de l'aliment complémentaire sans enzyme



Annexe 3.5 : Granulométrie de l'aliment complémentaire avec enzyme

