HAL open science

Expérimentation et modélisation pour la compréhension des mécanismes de fractionnement des cereales

Frédéric Mabille, Joel Abecassis, Jean-Yves Delenne, Marie-Francoise Samson, Valerie Lullien-Pellerin

▶ **To cite this version:**

Frédéric Mabille, Joel Abecassis, Jean-Yves Delenne, Marie-Francoise Samson, Valerie Lullien-Pellerin. Expérimentation et modélisation pour la compréhension des mécanismes de fractionnement des cereales. Innovations Agronomiques, 2012, 19, pp.95-105. 10.17180/sf3q-8884 . hal-01267816

HAL Id: hal-01267816

https://hal.science/hal-01267816

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques 19 (2012), 95-105

Expérimentation et modélisation pour la compréhension des mécanismes de fractionnement des céréales.

Mabille F., Abecassis J., Delenne J.Y.[#], Sadoudi A., Samson M.-F., Lullien-Pellerin V.

INRA, UMR1208 Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes, F-34060 Cedex, Montpellier, France

[#] LMGC, UMR 5508, UM2, Montpellier, 34095 Cedex 5, France (actuellement au Département d'Ingénierie, Université de Cambridge, Trumpington Street, Cambridge, UK)

Correspondance : mabille@supagro.inra.fr ou lullien@supagro.inra.fr

Résumé

Pour pouvoir contrôler la composition et les propriétés des fractions générées par la mouture, il est essentiel de déterminer les relations entre la structure des grains et le devenir des tissus lors des procédés. Le développement d'outils de mesure des propriétés mécaniques des grains ou des tissus, ainsi que les outils de modélisation, permettent d'identifier les caractéristiques impliquées dans les différents modes observés de fractionnement et de développer des modèles prédictifs.

Une base de données a été construite pour mettre en relation des résultats issus de champs disciplinaires différents et acquis à des niveaux d'échelles distincts.

Mots clés : base de données, céréale, grain, fracture, multi-échelles, représentation virtuelle

Abstract: Experiments and modelling for better understanding of the mechanism involved in cereal fractionation

Determination of relationships between grain structure and tissue behaviour are important factors to control the composition and properties of fractions obtained from milling. Development of assays to measure the grain or tissue mechanical properties, as well as modelling tools, lead to the identification of main characteristics involved in the different ways to rupture and permit development of predictive models.

A database was built to create relationships between results from various scientific fields and obtained at distinct scales.

Keywords: database, cereal, grain, rupture, multi-scale, virtual model

Introduction

Depuis toujours, la filière céréale a été majoritairement tournée vers des usages alimentaires (Abecassis et al., 2009). Les industries de première transformation utilisent principalement des moulins pour produire des farines ou semoules qui, selon la nature des blés, serviront pour la fabrication de pain, de biscuit ou de pâtes. Ces dernières années, l'intérêt s'est accru pour mieux exploiter tout le potentiel du grain. En particulier, les recherches ont été orientées vers l'amélioration de la qualité nutritionnelle des produits, tout en cherchant à conserver leur qualité sanitaire et organoleptique. Plus récemment, des projets de recherche ont été initiés pour faire face à de nouveaux enjeux en terme de maîtrise des consommations énergétiques, mais aussi pour développer de nouveaux usages des coproduits vers des applications non-alimentaires innovantes. Ceci a conduit à s'intéresser aux mécanismes physico-chimiques qui permettent de relier la composition et la structure des grains de blé et les produits engendrés par les opérations de fractionnement.

1. Les propriétés mécaniques des tissus du grain de blé sont impliquées dans leur comportement au fractionnement

La première transformation (ou mouture) permet d'isoler la majeure partie de l'albumen amylacé des autres parties du grain : enveloppes et germe. Cette opération est réalisée par une succession de broyeurs, qui assurent l'ouverture du grain et la réduction en taille des fractions, et de tamis qui permettent de séparer les produits obtenus en fonction de leur granulométrie. Ce choix de technologie a été imposé par la structure composite du grain et par sa morphologie, et plus particulièrement par l'existence d'un profond sillon sur sa face ventrale (Figure 1). Ce sillon rend difficile les procédés d'abrasion pour obtenir des fractions d'albumen sans présence des autres parties du grain.

Figure 1 : Photo d'un ensemble de grains de blé (on remarquera la présence du sillon).

Au cours de ces étapes, il apparaît évident que les propriétés mécaniques respectives des différents tissus jouent un rôle important sur le comportement au fractionnement des grains. Pour séparer les produits de l'albumen de ceux issus des enveloppes, il est en effet nécessaire que les tailles des produits soient distinctes pour que le tamisage soit efficace. Ainsi, pour améliorer la séparation farine/semoules issues de l'albumen et sons/remoulages provenant des parties périphériques du grain, les grains sont pré-traités (conditionnement hydrique) pour amplifier les différences de propriétés mécaniques des tissus. Cette opération rend les enveloppes moins friables comparativement à l'albumen qui se réduit en fragments de plus petite taille. La teneur en eau des grains est augmentée en ajoutant environ 5 litres d'eau pour 100 kilogrammes de blé, si la teneur en eau est voisine de 12% de la masse de matière sèche (ce qui est généralement le cas après récolte). Les grains sont ensuite mis au repos (6-24h en moyenne) pour permettre la pénétration de l'eau dans les tissus périphériques.

Si la teneur en eau des grains permet de moduler les différences de propriétés mécaniques respectives des tissus, leurs propriétés intrinsèques sont également dépendantes des facteurs de composition biochimique et de structure. En effet, l'efficacité de la séparation et le taux d'extraction de l'albumen varient en fonction des lots de grains en particulier des facteurs génétiques, ainsi que des conditions de culture (année, lieu, conditions agronomiques). On distingue des facteurs de dureté qui sont liés à la génétique des individus. Les grains de l'espèce *Triticum durum* (blé dur) permettent l'obtention d'un taux plus important de semoules, soit des fragments de grande taille (200-500 µm) lors de la réduction en taille de l'albumen comparativement à l'espèce *Triticum aestivum* (blé tendre) qui produit plus de farines (< 200 µm). Chez *Triticum aestivum,* on distingue également des niveaux de dureté différents, de type « hard » ou « soft » qui apparaissent majoritairement dépendant de l'expression de protéines spécifiques (puroindolines A et B) codées par une région particulière (locus Ha) sur le chromosome 5D (Morris et al., 2002 ; Chantret et al., 2005). De nombreux résultats expérimentaux montrent que la présence des isoformes sauvages de ces protéines conduit à des albumens plus friables comparativement à des grains dont le génome n'exprime pas l'une de ces protéines ou code pour une protéine mutée (Bhave et Morris, 2008). Cependant, les mécanismes qui sous-tendent le comportement

à la rupture de l'albumen et le rôle de ces protéines sont mal connus. L'hypothèse généralement admise est que ces protéines sous la forme sauvage joueraient un rôle dans la diminution de l'adhésion entre la matrice protéique et les granules d'amidon au sein de l'albumen, ce qui rendrait le matériau plus friable. Aujourd'hui, les sélectionneurs disposent d'outils performants pour la caractérisation génétique des variétés et sont en mesure de contrôler un certain nombre de spécificités des cultivars qui permettent d'appréhender leur comportement. Par ailleurs, plusieurs laboratoires de recherche en amélioration des plantes, dont l'UMR 1095 (GDEC, Clermont-Ferrand) ont développé des lignées quasi-isogéniques pour la dureté, en maîtrisant la nature des gènes codant pour les puroindolines. Ces lignées sont utilisées pour mieux étudier l'impact de la dureté et des puroindolines sur le comportement des tissus au fractionnement.

La microstructure de l'albumen, en particulier les propriétés de diffusion de la lumière (Figure 2), est influencée par les facteurs environnementaux (ensoleillement, pluviométrie, apport azoté...). La structure interne des grains apparaît vitreuse (translucide et dense) ou farineuse (opaque et blanche du fait de sa structure plus poreuse). Ces différences de structure affectent les propriétés mécaniques des grains. Par exemple, les grains les plus vitreux de blé dur (*T. durum*) sont recherchés parce qu'ils permettent d'obtenir un rendement en grosses semoules plus élevé qui sont utilisées pour la fabrication de pâtes alimentaires de meilleure qualité.

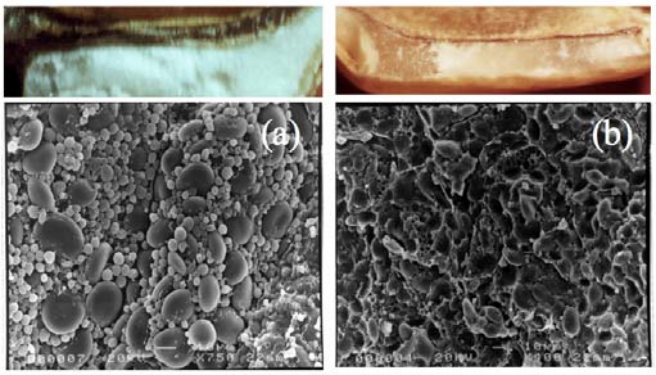

Figure 2 : Photos de coupes de grain et images de microscopie électronique à balayage correspondant respectivement à un albumen de blé de type farineux (a) ou vitreux (b).

Ainsi, les propriétés texturales de l'albumen (dureté et vitrosité) et les propriétés mécaniques des enveloppes conditionnent le comportement des tissus (granulométrie des produits et aptitude à la séparation entre tissus de nature différente) lors des opérations unitaires de fractionnement. Du fait de la répartition hétérogène des constituants du grain dans les différents tissus, le comportement au fractionnement joue un rôle dans la composition des fractions et leurs propriétés.

2. Des outils, pour étudier le comportement des grains au fractionnement, ont été développés aux différentes échelles d'analyse

Du fait de la nature composite d'un grain de blé, la description des phénomènes de fractionnement et leur compréhension sont complexes et nécessitent des études aux différentes échelles d'analyse.

2.1. A l'échelle de la population de grains

Pour étudier le comportement en mouture, il est nécessaire de pouvoir disposer d'outils pertinents représentatifs des procédés industriels et qui permettent de caractériser les différences entre les lots de grains. Des outils tels que des pilotes à l'échelle ½ industrielle ont été mis en place dans les laboratoires (plate-forme nationale de fractionnement de l'INRA à Montpellier pour le blé dur, 150 kg/h, ou ENILIA-ENSMIC à Surgères pour le blé tendre, 200 kg/h) mais sont lourds à mettre en œuvre pour étudier un nombre conséquent de lots.

La nécessité de disposer d'outils travaillant à des échelles de l'ordre de 100-500 g s'est imposée ces dernières années pour pouvoir caractériser les variétés ou lots de grains à des étapes plus précoces, mais aussi pour aider à la compréhension du comportement à la rupture des tissus. Il était par ailleurs important de pouvoir mettre en place des outils de mesure des dépenses énergétiques aux différentes étapes du procédé pour les relier aux caractéristiques mécaniques des grains. L'INRA a ainsi développé un prototype (Brevet INRA-CHOPIN-ARVALIS, N° 0905572, 02/20/2009) qui permet de classer les lots de blé tendre en fonction de leur valeur meunière (aptitude à donner un bon rendement en farine). Un moulin instrumenté (Pujol et al., 2000) pourvu de broyeurs équipés de dispositifs de mesure de couples a aussi été développé pour quantifier les dépenses énergétiques au broyage (Figure 3). Ce moulin instrumenté permet une estimation du coût de la réduction granulométrique des différentes étapes du procédé.

Figure 3 : Broyeur instrumenté pour la mesure des couples et énergies de fractionnement.

Ces équipements permettent également d'obtenir des fractions pertinentes pour étudier l'influence sur le comportement au fractionnement des tissus de lots de grains issus de variétés de blé distinctes ou de conditions de culture différenciées, ou l'impact de pré-traitements physiques ou chimiques des grains préalable à la mouture (Desvignes et al., 2008). Nous avons ainsi mis en évidence les différences d'énergie requise pour obtenir un kilogramme de farine à partir de lots de grains distincts sur le plan de leur dureté et vitrosité (Pujol et al., 2000 ; Greffeuille et al., 2006a). Les grains de blés tendres de type soft nécessitent moins d'énergie à la mouture et produisent des produits contenant moins de granules d'amidon endommagés comparativement aux grains issus de blés tendres de type hard ou de blés durs.

Ainsi, la dureté des grains qui est contrôlée par des facteurs génétiques joue un rôle sur l'énergie requise au fractionnement, mais aussi sur la distribution granulométrique des produits et le taux d'amidon endommagé. Plus récemment, nous avons confirmé que la vitrosité des grains qui affecte la porosité de l'albumen et qui dépend des facteurs environnementaux, joue un rôle sur la cinétique de réduction en taille des particules (Lasme et al., 2012). Chez le blé dur, la valeur semoulière (rendement et qualité des grosses particules d'albumen) est un critère important de la qualité d'usage, et dépend également de la vitrosité des grains. Il a été montré que ce paramètre de vitrosité est corrélé positivement à la teneur en protéines des grains (Samson et al., 2005).

2.2. A l'échelle des tissus du grain

Pour pouvoir mieux comprendre le comportement mécanique des grains et le devenir des tissus lors des procédés, nous avons développé des micro-essais sur tissus isolés qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques intrinsèques dans des conditions contrôlées de température et d'humidité

Les tissus périphériques protégeant l'albumen amylacé peuvent être préparés par dissection manuelle à partir des grains et testés dans des micro-essais de traction jusqu'à la rupture du tissu. La mesure des caractéristiques d'extensibilité et de force maximale nécessaire pour la rupture sont alors évaluées et permettent de différencier à la fois les tissus issus de lots de grains différents, mais aussi les différents tissus périphériques des grains. Il a ainsi été montré, que le péricarpe externe (Antoine et al., 2003), dont les cellules sont très allongées et toutes orientées dans la direction longitudinale du grain, possède un comportement mécanique anisotrope. Par opposition, la forme régulière et hexagonale des cellules de la couche à aleurone, entraîne un comportement mécanique isotrope de ce tissu (Figure 4).

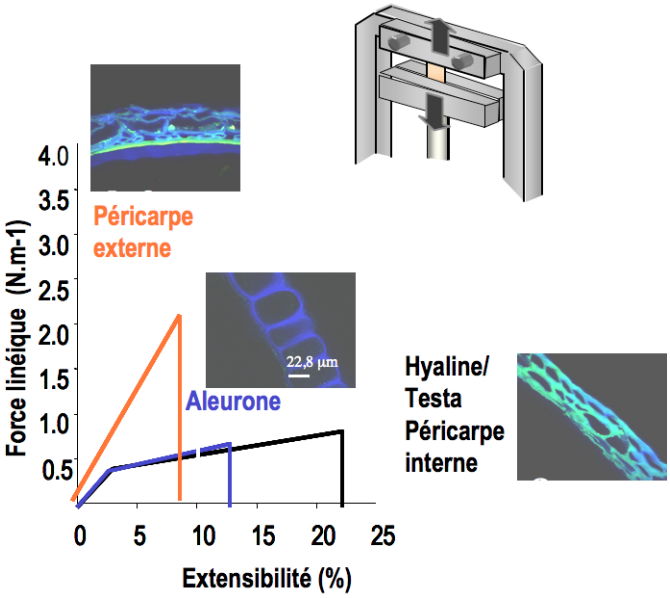

Figure 4 : Comparaison entre le comportement à la rupture et visualisation au microscope à fluorescence des différents tissus constitutifs des enveloppes du grain (photos de microscopie, BIA Nantes).

Ces mesures ont également permis de mettre en évidence les différences d'extensibilité des tissus (Greffeuille et al., 2006b) selon la dureté des grains (hard vs soft). Ce comportement différencié a été confirmé à l'aide des blés quasi-isogéniques pour la dureté dont les tissus périphériques isolés montrent un comportement d'extensibilité distinct lors des tests de traction (Greffeuille et al., 2007). Ces différences de propriétés mécaniques ont pu être reliées au comportement des tissus lors de la mouture, dans un diagramme semi-industriel, puisque la taille des sons apparaît reliée aux propriétés d'extensibilité des tissus (Figure 5).

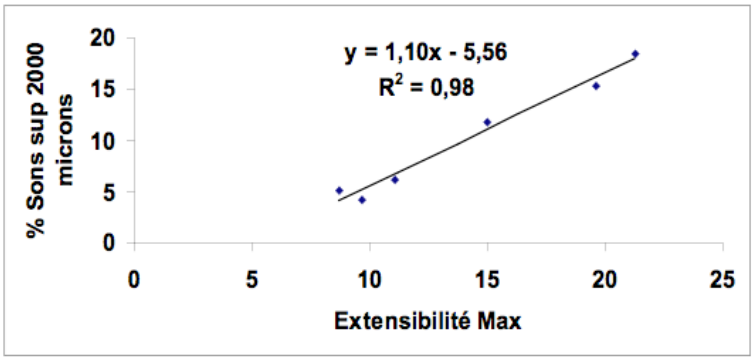

Figure 5 : Relation entre la taille des sons de mouture et leur extensibilité mesurée expérimentalement.

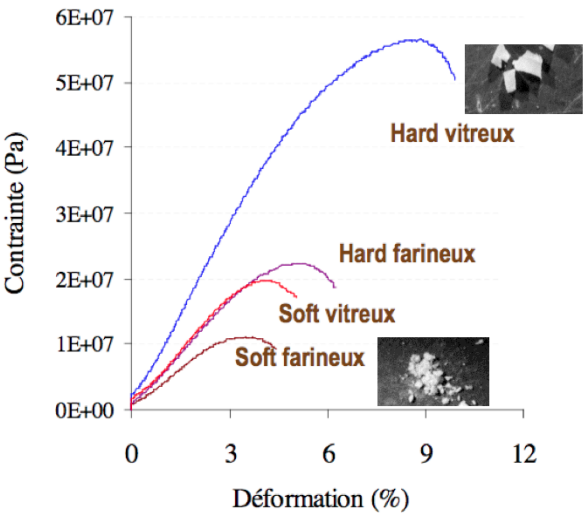

Figure 6 : Mesures des propriétés mécaniques d'éprouvettes d'albumen de lots de grains de dureté et vitrosité différenciée. L'aire sous les courbes est une représentation géométrique de l'énergie à la rupture des éprouvettes.

De la même façon, l'étude du comportement mécanique de l'albumen de blé a été réalisée après usinage d'éprouvettes parallélépipédiques taillées dans le grain qui permettent de s'affranchir de la complexité de la forme du matériau et notamment de la présence du sillon (Morris et al., 2011). Le test retenu est un test de compression simple jusqu'à rupture. Ces études (Haddad et al., 1999, Greffeuille et al., 2006a) ont permis de différencier les énergies à la rupture des albumens provenant de grains de différentes duretés ou vitrosités (Figure 6). Les grains de blé de type hard vitreux présentent la plus grande résistance à la rupture, par opposition au type soft farineux qui sont les plus friables.

Les énergies mécaniques totales pour la rupture des éprouvettes d'albumen ont été corrélées significativement avec les énergies consommées lors d'un test de broyage à l'aide du micro moulin instrumenté (Figure 7). Cette relation permet de justifier l'approche multi échelle retenue, et offre une méthode de prédiction basée sur l'analyse d'une dizaine de grains.

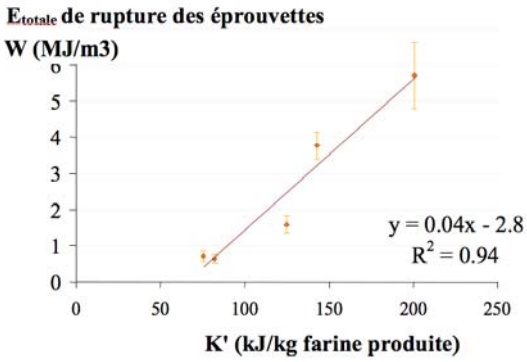

Figure 7 : Corrélation entre l'énergie à la rupture d'éprouvettes d'albumen réalisées à partir de lots de grains de dureté et vitrosité différenciée et les énergies consommées au broyage de ces lots mesurées à l'aide du micro-moulin instrumenté.

En complément des mesures en déformation quasi-statique, les recherches se poursuivent en vue de mettre au point des méthodes de caractérisation des propriétés à la rupture sous sollicitations mécaniques rapides, pour se rapprocher des conditions de sollicitations mises en œuvre au cours des procédés de broyage.

2.3. Vers la modélisation du comportement à la rupture

L'albumen de blé a une structure particulière constituée de granules (ou particules) d'amidon de différentes tailles enchâssés dans une matrice protéique. Ce type de microstructure qui implique un assemblage dense de particules est connu en physique sous le nom de matériau granulaire cohésif. De nombreux matériaux naturels ou utilisés dans l'industrie présentent une structure granulaire, par

exemple les conglomérats, bétons, asphaltes. Le comportement mécanique de ces matériaux est marqué par des caractéristiques spécifiques. La nature granulaire de l'albumen de blé joue notamment un rôle fondamental dans la transmission des contraintes et dans la propagation des fissures, conditionnant les résultats et rendements des procédés de broyage. Différents paramètres mécaniques tels que le rapport de rigidités entre particule et matrice, la compacité du milieu (densité des particules et nombre de contacts particule-particule) ou encore la nature des différentes interfaces (particule–particule, particule-matrice) ont une influence déterminante sur le comportement à la rupture.

Un modèle numérique a été développé (Topin et al. 2007, 2009) pour pouvoir analyser finement, à l'échelle de la microstructure, les mécanismes physiques à l'origine de la fragmentation de l'albumen de blé. Ce modèle, appelé Lattice Element Method (LEM), est basé sur la numérisation de la structure d'un échantillon en utilisant un maillage d'éléments unidimensionnels disposés sur un réseau. Les propriétés mécaniques du matériau sont associées à ces éléments en fonction de la phase ou de l'interface qu'ils représentent. Un objectif majeur de ce type d'approche a été de prendre en compte simultanément les hétérogénéités de structures et de propriétés élastiques dues à la présence des différentes phases de matrice protéique, pores et granules d'amidon, tout en autorisant la propagation de rupture à travers des phases et interfaces (Figure 8). Dans la version la plus simple du modèle développé, les éléments sont des ressorts. Chaque ressort appartenant à une phase (amidon, protéine, pore ou interfaces) est caractérisé par une raideur ainsi que par un seuil de rupture en force ou en énergie d'adhésion.

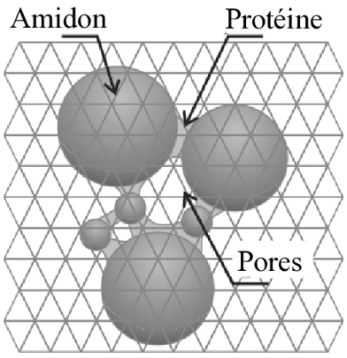

Figure 8 : Représentation des particules d'amidon, de la matrice protéique et des pores tels que développé dans le modèle de type « Lattice Element ».

Le comportement à la rupture de ce modèle est évalué en simulant une déformation sur des échantillons numériques. De manière plus précise, on impose les déplacements des bords supérieurs et inférieurs tout en laissant libres les bords latéraux soumettant ainsi l'échantillon à des forces de traction ou de compression. À chaque itération de l'algorithme de calcul, tous les éléments supportant une force qui excède un seuil limite sont supprimés, conduisant à une fissuration progressive du réseau d'éléments. Un intérêt majeur de ce type d'approche est qu'elle permet de mettre en évidence les paramètres du modèle à l'origine de la propagation des fissures dans l'albumen de blé. Les propriétés mécaniques macroscopiques (contraintes, déformations, rigidité), obtenues grâce au modèle, peuvent être reliées à celles mesurées expérimentalement sur des échantillons d'albumen. De plus, elles permettent d'accéder aux propriétés locales calculées par la simulation (répartition des contraintes, chemin de fissuration, forces de liaisons entre granules et matrice protéique).

Une étude a été menée en faisant varier la quantité de protéine et les adhésions à l'interface entre les granules d'amidon et la matrice protéique. Des échantillons représentatifs de la texture de l'albumen ont été générés pour une fraction de particules très dense (de l'ordre de 80 %). La matrice protéique a été ajoutée connectant les particules voisines. En faisant varier la fraction volumique de matrice, on obtient une représentation bidimensionnelle des échantillons, évoluant d'une porosité élevée (4%) à une porosité nulle (20%). Deux séries d'études paramétriques en traction et en compression ont été effectuées en faisant varier la quantité de protéine (effet environnemental) et le paramètre d'adhésion à l'interface (effet génétique), correspondant au seuil de rupture entre les particules et la matrice. Ces études démontrent que l'adhésion entre la matrice et les granules, ainsi que la quantité de protéines sont des paramètres indépendants et essentiels pour décrire le comportement à la rupture de l'albumen de blé (Figure 9).

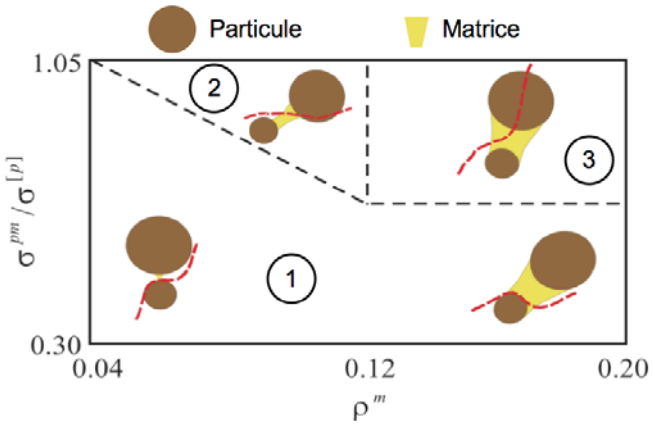

Figure 9 : Représentation des chemins de rupture (rouge) dans la matrice protéique (jaune) ou le granule d'amidon (marron). En abscisse : fraction volumique de matrice protéique, en ordonnées : rapport entre le seuil de rupture de l'interface particules-matrice protéique et le seuil de rupture des particules.

Du point de vue de la microstructure, la proportion d'éléments rompus dans la phase amidon peut être considérée comme une mesure de l'endommagement des granules et nous a permis de distinguer trois régimes principaux de fissuration dans l'espace paramétrique. Étant donné que dans les processus de mouture, le taux de granules d'amidon endommagés est un indicateur de la dureté du grain, ces trois régimes de fissuration peuvent être mis en parallèle avec les trois principaux types de blés (blé tendre type soft [1], blé tendre type hard [2] et blé dur [3]). Ces résultats confirment que l'endommagement des granules est contrôlé par une combinaison entre la densité de la matrice protéique et son adhésion avec les granules d'amidon. Le comportement du modèle est aujourd'hui en cours de validation et de confrontation aux valeurs expérimentales. Par ailleurs, il a permis de valider l'importance des propriétés d'adhésion à l'interface granules d'amidon-matrice qui sont en cours de caractérisation par des techniques de microscopie à force atomique.

Le modèle numérique permet d'étudier les effets de la composition et de la structure de l'albumen sur le comportement à la rupture, au-delà des échantillons disponibles chez les sélectionneurs. Il permet aussi de choisir les sollicitations les mieux adaptées au matériau en fonction de l'usage des fractions.

3. Intégrer les approches pour mieux appréhender le comportement au fractionnement

Etant donné la structure composite et la complexité de forme des grains, la compréhension des mécanismes de fractionnement et de leur relation avec la composition et les propriétés des fractions nécessite non seulement la caractérisation des propriétés mécaniques des tissus, mais aussi de faire le lien avec les autres caractéristiques (technologiques, morphologiques, biochimiques).

La nature pluridisciplinaire des analyses et les différents niveaux d'échelles d'étude rendent nécessaire le développement d'un outil qui permet l'intégration de données de ces différents champs disciplinaires, ainsi que d'un nombre d'échantillons important issus des différents programmes de recherche. L'UMR

IATE a développé, en partenariat avec des chercheurs de l'UMR MISTEA à Montpellier, une base de données de type relationnel appelée "Grain Virtuel". La structure de la base a été réalisée en répartissant les données en quatre groupes relatifs à des champs de compétences variés. Ces quatre parties s'attachent chacune plus spécifiquement aux propriétés morphologiques, aux analyses de composition biochimique des fractions, aux propriétés mécaniques des tissus ou aux informations relatives aux procédés de transformation. Il va de soit que toutes ces données sont hiérarchisées. La base de données possède la spécificité de permettre le stockage de données complexes, comme des tableaux de valeurs, des images ou des graphiques. Une des difficultés dans la conception de la base a été la prise en compte d'information à des échelles de description très hétérogènes. Par exemple, nous disposons de données de type technologique, relatives à une population de grains traitée dans un dispositif semi-industriel, que l'on souhaite mettre en relation avec une caractéristique locale d'un tissu du grain. Il a donc été mis en place un système de filiation des données pour disposer de façon fiable de leurs origines et de l'historique de leur obtention (Figure 10).

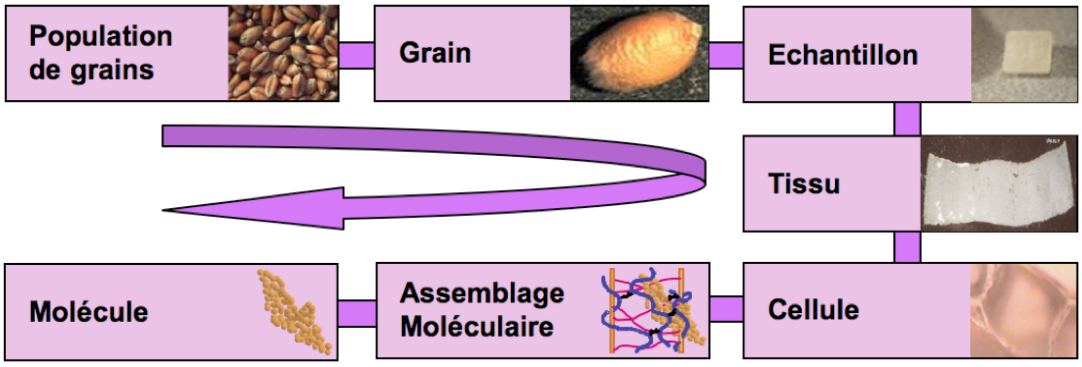

Figure 10 : Relation de filiation entre les différentes échelles de description de la base Grain Virtuel

Cette base est reliée à une interface Web disposant d'outils originaux d'exploitation des données ; en particulier, une interface de traitements statistiques permettant l'analyse des données issues de champs disciplinaires distincts. La base possède aussi un module de représentation et de calcul morphologique basé sur un modèle paramétrique développé au laboratoire (Mabille et Abecassis, 2003). Il est établi à partir des données morphologiques mesurées expérimentalement et stockées dans la base. Le modèle actuel inclut en plus de ces mesures morphologiques, des caractéristiques histologiques. Cette approche peut être utilisée, par exemple, pour illustrer les gradients de teneur en cendres sur la base d'une répartition centripète (Figure 11). En s'appuyant sur quelques hypothèses simplificatrices et dans la mesure où les teneurs en cendres des fractions de mouture sont connues, il est possible de déterminer la position d'origine des fractions dans le grain.

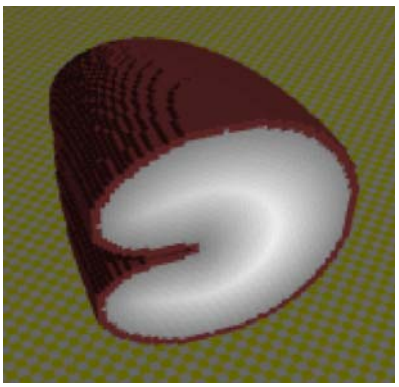

Figure 11 : Modélisation morphologique d'une section de grain de blé : illustration d'une composition en cendres.

La base de données Grain virtuel à vocation à être un outil de synthèse de la connaissance sur le fractionnement des grains de blé. Elle permet aux chercheurs de mieux faire le lien entre les différents niveaux d'échelle d'analyse, mais aussi de faciliter la capitalisation et la représentation de données expérimentales pour l'ensemble des acteurs de la filière.

Conclusion

Etant donné la structure composite et hétérogène du grain de blé, l'étude des mécanismes de fractionnement ne peut s'appréhender qu'à l'aide d'approches pluri-disciplinaires et multi-échelles. Les travaux réalisés à l'UMR IATE vont dans ce sens et ont permis de mieux caractériser les propriétés mécaniques des tissus qui peuvent être reliés au comportement des grains en fonction de certaines de leurs caractéristiques (dureté, vitrosité) qui dépendent de facteurs génétiques ou environnementaux.

Les recherches de l'UMR ont également permis de proposer un modèle prédictif du comportement à la rupture de l'albumen qui a montré l'importance du taux de remplissage du grain (teneur en protéine) et des propriétés d'adhésion matrice protéique-granules d'amidon. Les travaux se poursuivent à la fois pour mieux évaluer la structure de l'albumen (distribution et taille des granules, porosité), notamment grâce aux outils de tomographie qui permettent l'imagerie 3D directe des objets, mais aussi par la mesure locale des propriétés d'adhésion des composants (amidon et matrice protéique) au sein des structures. *In fine*, le modèle doit permettre de prendre en compte les données de propriétés des enveloppes pour appréhender le comportement plus complexe du grain et le devenir des différents tissus lors des procédés.

Les outils de modélisation, ainsi que la mise en relation des données de la base Grain Virtuel, doivent aider, à plus long terme, à prédire la composition et les propriétés des fractions en fonction des caractéristiques des grains.

Références Bibliographiques

Abecassis J., Bergez J.E., Aizac B., Charcosset A., Dedryver C.A., Greffeuille V., Jacquet F., Jez C., Lessire M., Rastoin J.L., Rousset M., 2009. Les filières céréalières : Organisation et nouveaux défis. Ed. Quae, 165 p.

Antoine C., Peyron S., Mabille F., Lapierre C., Bouchet B., Abecassis J., Rouau X., 2003. Individual contribution of grain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran. J. Agric. Food Chem. 51, 2026-2033.

Bhave M., Morris C.F., 2008. Molecular genetics of puroindolines and related genes: allelic diversity in wheat and other grasses. Plant Mol. Biol. 66, 205-219.

Chantret N., Salse J., Sabot F., Rahman S., Bellec A., Laubin B., Dubois I., Dossat C., Sourdille P., Joudrier P., Gautier, MF., Cattolico L., Beckert M., Aubourg S., Weissenbach,J., Caboche M., Bernard M., Leroy P., Chalhoub B., 2005. Molecular basis of evolutionary events that shaped the hardness locus in diploid and polyploid wheat species (*Triticum* and *Aegilops*). Plant Cell 17, 1033-1045.

Desvignes C., Chaurand M., Dubois M., Sadoudi A., Abecassis J., Lullien-Pellerin V., 2008. Changes in common wheat grain milling behavior and tissue mechanical properties following ozone treatment. J. Cereal Sci. 47, 245-251.

Greffeuille V., Abecassis J., Rousset M., Oury F.-X., Faye A., Bar l'Helgouac'h C., Lullien-Pellerin V., 2006a. Grain characterization and milling behaviour of near-isogenic lines differing by hardness. Theor. Appl. Genet. 114, 1-12.

Greffeuille V., Abecassis J., Lapierre C., Lullien-Pellerin V., 2006b. Bran size distribution at milling and mechanical and biochemical characterization of common wheat grain outer layers: A relationship assessment. Cereal Chem 83, 641-646.

Greffeuille V., Mabille F., Rousset M., Oury F.X., Abecassis J., Lullien-Pellerin V., 2007. Mechanical properties of outer layers from near-isogenic lines of common wheat differing in hardness. J. Cereal Sci. 45, 227-235.

Haddad Y., Mabille F., Mermet A., Abecassis J., Benet J.C., 1999. Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behavior. Powder Technol. 105, 89-94.

Lasme P., Oury F.-X., Michelet C., Abecassis J., Mabile F., Bar-L'Helgouac'h, Lullien-Pellerin V., 2012. A study of puroindoline b involvment in the milling behavior of hard type common wheats. Cereal Chem. (sous presse).

Mabille F., Abecassis J., 2003. Parametric modelling of wheat grain morphology: a new perspective. J. Cereal Sci. 37, 43-53.

Morris G., 2002. Puroindolines: the molecular genetic basis of wheat grain hardness. Plant Mol. Biol. 48, 633-647.

Morris G., Delwiche S., Bettge A., Mabille F., Abecassis J., Pitts M., Dowell F., Deroo C., Pearson T., 2011. Collaborative Analysis of Wheat Endosperm Compressive Material Properties. Cereal Chem. 88, 391-396.

Pujol R., Létang C., Lempereur I., Chaurand M., Mabille F., Abecassis J., 2000. Description of a micromill with instrumentation for measuring characteristics of wheat grain. Cereal Chem. 77, 421-427.

Samson M.F., Mabille F., Cheret R., Abecassis J., Morel M.H., 2005. Mechanical and physicochemical characterization of vitreous and mealy durum wheat endosperm. Cereal Chem. 82, 81-87.

Topin V., DelenneJ.Y., Radjai F., Brendel L., Mabille F., 2007. Strength and failure of cemented granular matter. Europ. Physic. J. E, 23, 413-429.

Topin V., Radjai F., DelenneJ.Y., Delenne J.Y., Mabille F., 2009. Mechanical modelling of wheat harness and fragmentation. Powder Technol. 190, 215-220.