



HAL
open science

Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche

Cecile Barron, Joel Abecassis, Marc Chaurand, Valerie Lullien-Pellerin, Frederic Mabile, Xavier Rouau, A. Sadouti, Marie-Francoise Samson

► **To cite this version:**

Cecile Barron, Joel Abecassis, Marc Chaurand, Valerie Lullien-Pellerin, Frederic Mabile, et al.. Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche. *Innovations Agronomiques*, 2012, 19, pp.51-62. 10.17180/3fmv-8440 . hal-01267813

HAL Id: hal-01267813

<https://hal.science/hal-01267813v1>

Submitted on 29 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

Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche

Barron C., Abécassis J., Chaurand M., Lullien-Pellerin V., Mabillet F., Rouau X., Sadoudi A., Samson M.F.

INRA, UMR1208 Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes (INRA-CIRAD-SupAgro Montpellier-Université Montpellier2), F-34000 Montpellier, France

Correspondance : cecile.barron@supagro.inra.fr

Résumé

Le fractionnement par voie sèche tire profit des hétérogénéités structurales et de distribution des constituants du grain de blé afin de produire des ingrédients qui seront la base des produits céréaliers de grande consommation. Le procédé classique de mouture a été historiquement optimisé pour accéder aux constituants énergétiques du grain (amidon, protéine) par la production de farine/semoule qui sont généralement dépourvues de la majorité des fibres et des micronutriments du grain. Il est possible de revisiter ce procédé afin de produire des farines enrichies en ces composés d'intérêt nutritionnel. Par ailleurs des procédés innovants, tels que le broyage cryogénique ou le tri électrostatique, sont explorés afin d'extraire ces constituants pour la production de nouveaux ingrédients alimentaires, que ce soit à partir des grains ou en développant une raffinerie des sons de meunerie.

Mots-clés : céréale, blé, grain, fractionnement, fibre, micronutriment, mouture, décortilage, cryogénie

Abstract: Dry fractionation in order to access to molecules of interest

Dry fractionation exploits the heterogeneities in structure or distribution of wheat grain constituent in order to produce food ingredients that will be the base of a large number of cereal-based food products. Dry milling was optimized in the past to extract energetic compounds of grains (starch, protein) recovered in refined flour/semolina from which almost all fibres and micronutrients are discarded. Conventional milling processes can be revisited to produce flours enriched in these components of interest. Moreover, innovative technologies, such as cryogeny or electrostatic separation, are under investigations to produce new food ingredients either from wheat grains or brans (coming from conventional milling).

Keywords: cereal, wheat, grain, dry fractionation, fibre, micronutrient, milling, debranning, cryogeny

Introduction

L'idée que l'alimentation joue un rôle déterminant dans la santé devient de plus en plus présente dans l'esprit des consommateurs européens. D'après les recommandations des nutritionnistes, les céréales doivent constituer la base de la pyramide alimentaire et prendre une part majeure dans les effets de la nourriture sur la santé. Les grains de blé sont principalement constitués de glucides (65-75% amidon et fibres), protéines (7-12%) mais contiennent aussi des lipides (2-6%) et des micronutriments (Pomeranz, 1988). Ils sont ainsi une bonne source de minéraux (et plus spécifiquement de magnésium), de vitamines du groupe B, et contiennent des molécules ayant des activités d'intérêt (vitamine E, composés anti-oxydants, phyto-oestrogènes). Le procédé actuel de mouture a été perfectionné pour récupérer l'amande des grains avec une faible contamination des farines par les parties périphériques

du grain (germe et enveloppes). Les farines ainsi obtenues, bases des produits céréaliers de grande consommation, sont dépourvues de la majorité des fibres et des micronutriments du grain. Or, un certain nombre de données récentes suggère que les aliments à base de céréales complètes ont un rôle protecteur contre certaines maladies cardio-vasculaires, le diabète ou certains cancers (Jones, 2006). Cependant, l'utilisation de broyats ou moutures de grains complets ne constitue pas la meilleure réponse pour exploiter au mieux le potentiel des céréales. En effet, d'une part, certaines parties du grain peuvent être indésirables (présence de contaminants: mycotoxines, pesticides, métaux lourds...; propriétés techno-fonctionnelles ou nutritionnelles négatives: lipides très oxydables, perte de croustillant due aux fibres, irritation du colon par des particules d'enveloppes, etc...). D'autre part l'accessibilité et la bio-disponibilité des micronutriments et fibres du grain sont limitées par les structures cellulaires complexes des enveloppes. Par ailleurs, les procédés « d'extraction » par voie sèche présentent l'intérêt de limiter les effluents, qui engendrent des coûts de dépollution et séchage. Il y a donc bien une nécessité de développer une nouvelle technologie de fractionnement par voie sèche des céréales pour utiliser pleinement leur valeur santé (Hemery et al, 2007).

1. Le grain : une structure hétérogène

Le grain de blé est un fruit sec indéhiscant (caryopse) constitué d'une unique graine intimement soudée à l'enveloppe qui la contient. De la surface externe vers le centre du grain, on distingue l'enveloppe du fruit ou péricarpe, puis l'enveloppe de la graine, ou testa, et enfin à l'intérieur de la graine, l'épiderme du nucelle, l'albumen et le germe (Figure 1). Chacun de ces tissus possède une structure et une composition particulière (Tableau 1).

Le germe est riche en lipides et contient des vitamines B et des minéraux. Les α -tocopherols dont le pouvoir anti-oxydant a été démontré sont concentrés dans le germe ainsi que des stérols végétaux connus pour abaisser le taux de cholestérol (Nyström et al, 2007, Ostlund et al, 2002).

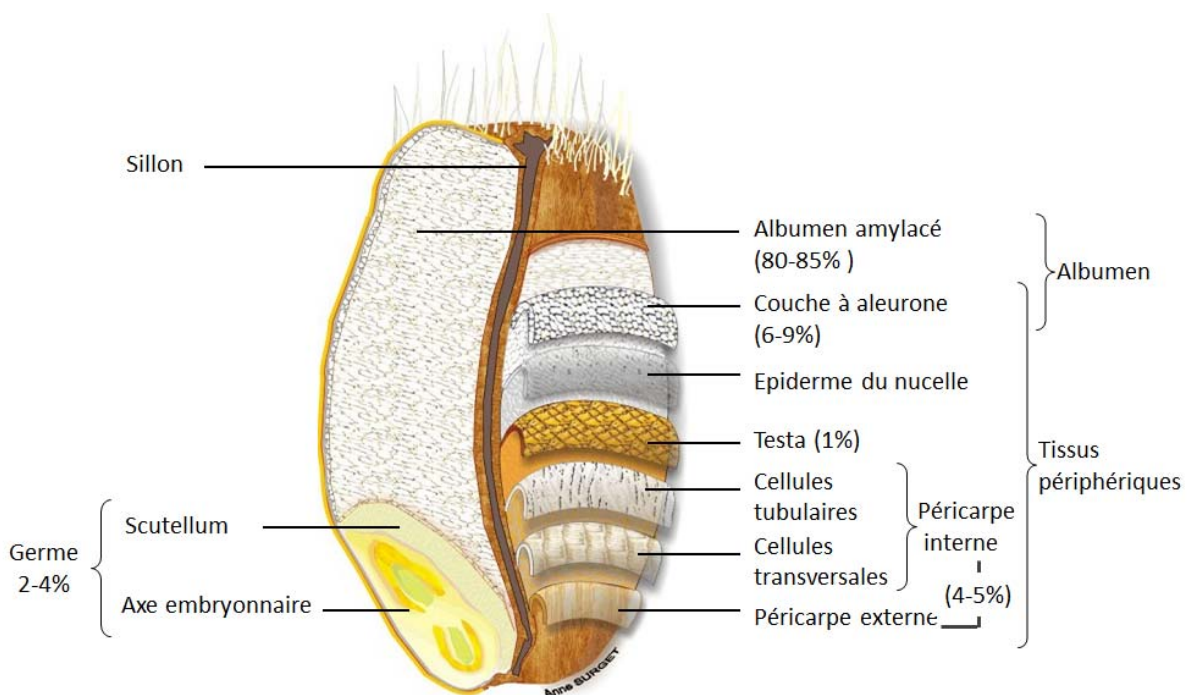


Figure 1. Anatomie schématique du grain de blé et proportion relative des principaux tissus du grain (adapté de Surget et Barron, 2005)

Tableau 1. Représentation schématique de la distribution des composés d'intérêt nutritionnel dans le grain de blé (adapté de Hemery et al, 2007).

	Tissus périphériques			Albumen amylicé	Germe
	Péricarpe	Testa	Aleurone		
Protéines	-	-	**	**	*
Lipides	-	*	*	-	***
Amidon	-	-	-	***	-
Fibres insolubles	***	***	**	*	**
Fibres solubles	-	-	*	**	*
Vitamines B	-	-	***	-	**
Vitamine E	-	-	*	-	**
Minéraux	*	*	***	-	**
Stérols végétaux	-	*	**	-	***
Phyto-oestrogène	-	-	***	-	-
Alkylresorcinsols	-	***	-	-	-

*, **, *** indique si un composé est présent, concentré, ou fortement concentré dans un tissu. - : indique qu'un composé n'est pas présent dans le tissu ou en très faible concentration.

L'albumen amylicé est principalement constitué d'amidon et de protéines de réserve, alors que les tissus périphériques contiennent la majeure partie des fibres et minéraux. En effet, ces tissus qui représentent environ 14% du grain en masse contiennent 75% des fibres présentes dans le grain. Par ailleurs, selon l'origine histologique, la structure et les propriétés des fibres varient (Fincher et Stone, 1986, Parker et al, 2005). Les fibres solubles du grain proviennent majoritairement de l'albumen amylicé. Les tissus les plus périphériques (péricarpe, testa) sont quant à eux riches en fibres insolubles, provenant principalement de parois végétales épaisses riches en cellulose, hétéroxylanes complexes ou composés de type cires, cutine de nature hydrophobe. Ils contiennent aussi des teneurs significatives en lignine, polymère phénolique qui imprègne la paroi végétale. Les parois végétales de la couche à aleurone sont elles aussi riches en fibres insolubles (90-95%) mais leur composition diffère. Elles sont constituées majoritairement d'arabinoxylanes peu substitués sur lesquels sont estérifiés des composés phénoliques (acide férulique) dont les propriétés anti-oxydantes sont reconnues (Rhodes et al, 2002), ainsi que de β -glucanes mixtes (Figure 2). Ces différences de composition et structure ont par exemple des conséquences sur la susceptibilité à l'hydrolyse enzymatique des tissus, qui pourrait refléter la digestibilité de ces fibres dans le tube digestif : les tissus les plus périphériques (péricarpe, testa) étant peu ou pas hydrolysés par des enzymes hydrolytiques tels que les xylanases, au contraire de la couche à aleurone (Ordaz-Ortiz et al, 2005). La susceptibilité à l'hydrolyse enzymatique peut être influencée par l'assemblage des polymères au sein de la paroi, mais aussi par la structure moléculaire des polymères pariétaux (ex. le taux de substitution et la distribution des arabinoses le long de la chaîne de xylose dans les arabinoxylanes).

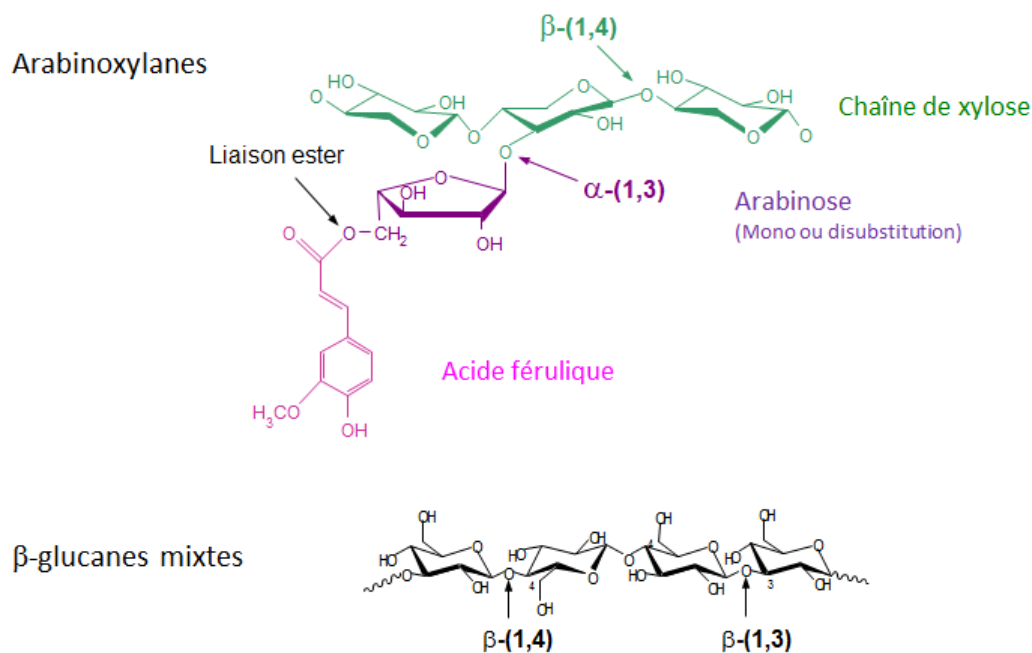


Figure 2. Structure moléculaire schématique des arabinoxylanes de blé et des β -glucanes mixtes.

Tout comme le germe, la couche à aleurone est constituée de cellules vivantes qui contiennent de nombreux composés bioactifs. Ainsi, si elle ne représente que 6-9% du grain en masse, ce tissu contient la majeure partie des vitamines B du grain, ainsi qu'environ la moitié des minéraux (Antoine et al, 2002 ;Pomeranz, 1988). Contrairement aux autres tissus périphériques, la couche à aleurone présente une forte teneur en protéines, dont la composition en acides aminés diffère des protéines de réserve présente dans l'albumen amylicé par leur plus grande richesse en lysine, acide aminé essentiel (Pomeranz, 1988).

2. La mouture : accès aux constituants sources d'énergie

Les grains de blé sont peu consommés en l'état. Une industrie dite de première transformation permet, à partir du grain, de produire des ingrédients qui seront la base de nombreux aliments (pain, pâtes, biscuits etc.). Le procédé de mouture est une combinaison d'opérations unitaires de broyage et de tri des particules selon leur taille ou leurs propriétés aérodynamiques. Ce procédé a été optimisé empiriquement afin d'extraire l'albumen amylicé des grains avec une faible contamination par les tissus périphériques. La farine ou semoule (dans le cas du blé dur) est ainsi pour l'essentiel constituée d'albumen amylicé. Les sons (et issues) renferment la majeure partie des tissus périphériques (de la couche à aleurone au péricarpe), avec une faible proportion (5-15%) d'albumen adhérent. Compte tenu de la distribution des constituants précédemment décrite, ce procédé permet donc d'extraire la majeure partie de l'amidon et des protéines de réserves, macronutriments source d'énergie. Ces constituants sont aussi à la base des propriétés techno-fonctionnelles d'usage, telles que les propriétés viscoélastiques du gluten qui permettent de créer des produits aux propriétés rhéologiques particulières tels que le pain et les pâtes alimentaires. Conjointement, ce procédé sélectionne les fibres de l'albumen amylicé, *ie* les plus solubles (mais en moins grande quantité). Mais en revanche, compte-tenu de la distribution hétérogène des constituants des grains, la farine blanche produite est pauvre en fibres ($\approx 3\%$), micronutriments et minéraux, qui se retrouvent dans les sons.

3. Accès aux constituants d'intérêt des enveloppes

Deux approches peuvent être envisagées pour tirer le meilleur parti du contenu santé du grain. D'une part, revisiter le procédé de mouture pour fabriquer des farines optimisées sur le plan nutritionnel et fonctionnel et d'autre part, produire des ingrédients alimentaires par raffinage par voie sèche (à partir de grains ou de sons de meunerie) qui seront réintroduits dans la formulation des aliments (Figure 3). Ces approches s'appuient sur l'analyse quantitative de la composition en tissu du grain, par la méthode dite des marqueurs biochimiques développée à l'INRA (Antoine et al, 2004b ; Hemery et al, 2009a). En effet, compte tenu des connaissances acquises sur la composition de chaque tissu du grain, il est possible d'évaluer la qualité d'un produit de mouture par sa composition en tissu, sans focaliser uniquement sur un constituant d'intérêt.

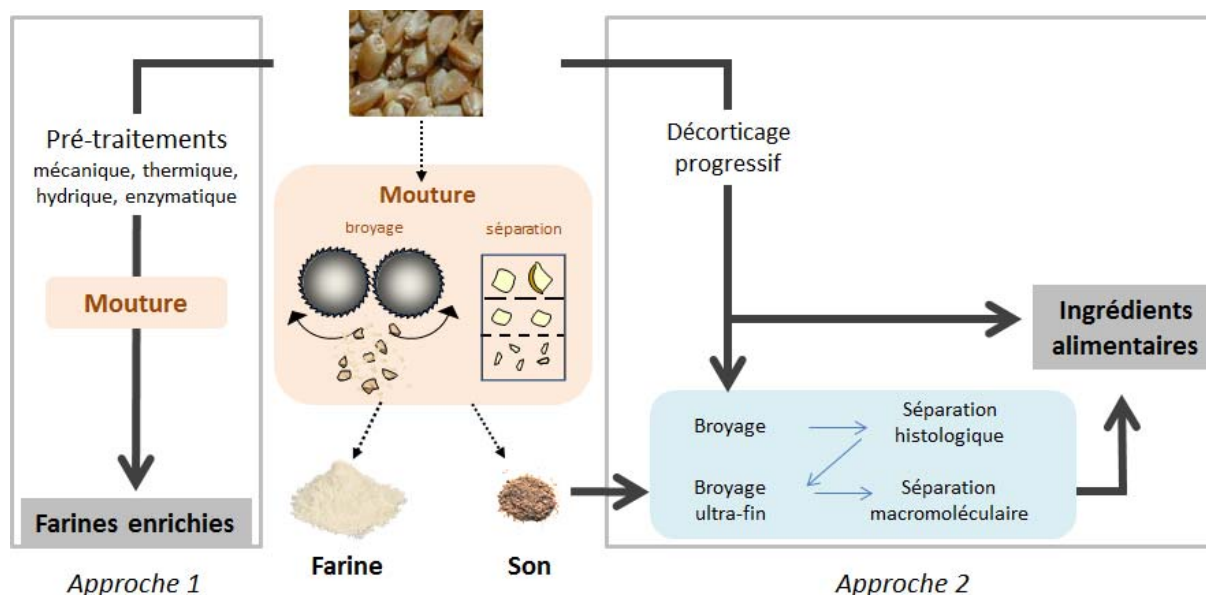


Figure 3. Approches schématiques du fractionnement par voie sèche des grains et sons de blé

3.1. Revisiter le procédé de mouture

Dans la première approche, de nouvelles opérations unitaires peuvent être associées au procédé traditionnel de mouture afin de produire *in fine* des farines enrichies en composés bioactifs via le contrôle et l'optimisation de la teneur en certains tissus périphériques ciblés. La stratégie appliquée peut se décliner selon 3 axes : (i) incorporer plus de tissus périphériques dans les farines tout en préservant la qualité sanitaire par élimination des tissus les plus périphériques, (ii) modifier les lignes de fracture au sein du grain lors de la mouture pour faciliter l'enrichissement des farines en contenu cellulaire de la couche à aleurone (iii) modifier la dissociation/fragmentation des tissus périphériques pour enrichir sélectivement les farines.

Des pré-traitements mécaniques, tels que le décortiquage (classiquement utilisé dans la filière riz), peuvent être mis en œuvre avant mouture. Par abrasion sur une surface ou friction entre eux, les grains sont travaillés de l'extérieur vers l'intérieur pour éliminer les tissus les plus périphériques. Compte tenu de la forme non sphérique des grains, le décortiquage ne peut s'apparenter à un « pelage » couche par couche des grains : les fractions recueillies ne correspondent pas strictement à l'isolement d'un seul tissu. Par ailleurs, les tissus périphériques invaginés dans le sillon demeurent peu accessibles (Figure 4). Selon le taux de décortiquage, il est toutefois possible d'éliminer une grande partie du péricarpe externe (Dexter et Wood, 1996 ; Hemery et al, 2009a). Cette opération est aussi utilisée pour réduire la contamination par des mycotoxines (Rios et al, 2009). La combinaison du décortiquage et de la mouture dans un diagramme de fractionnement a permis d'obtenir des farines enrichies en couche à aleurone.

Ce diagramme, développé par l'INRA dans le cadre du programme européen Healthgrain (Rouau et al., 2008 ; Delcour et al, in press)), comporte un décortiquage initial pour éliminer le péricarpe externe, puis une seconde étape d'abrasion pour récupérer une fraction riche en couche à aleurone, et finalement une mouture pour éliminer les tissus périphériques du sillon resté sur le grain. La fraction recueillie dans la seconde étape est réintroduite dans la farine obtenue après mouture pour incorporer le maximum de couche à aleurone dans la farine finale.

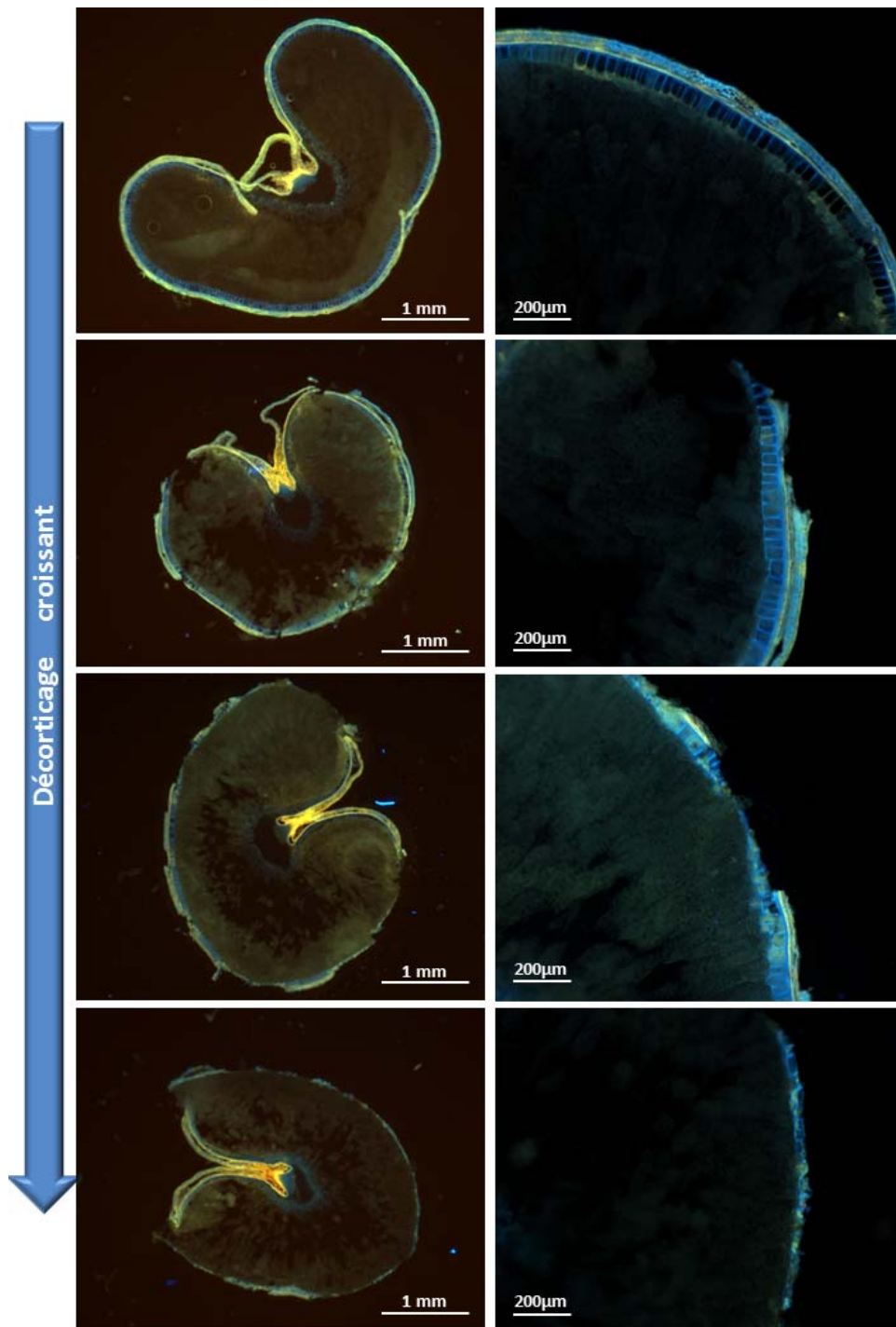


Figure 4. Observations de coupes transversales de grain de blé dur par microscopie d'épifluorescence. (images obtenues par l'addition de deux images acquises sous différentes conditions d'illumination (excitation dans la gamme de l'UV et du bleu), En bleu, visualisation des parois de la couche à aleurone, en vert/jaune du péricarpe.

Par ailleurs, des recherches sont développées sur l'impact de pré-traitements hydriques/enzymatiques lors de l'étape de conditionnement, préalable à la mouture. En effet, cette étape, qui amène les grains à environ 17% de teneur en eau, est connue pour faciliter la séparation entre les tissus périphériques et l'albumen amylicé. Ceci s'explique par la modulation des propriétés mécaniques des tissus périphériques et de l'albumen amylicé. Ainsi, il a été montré que l'augmentation de l'extensibilité et de la plasticité des tissus périphériques par l'hydratation a un impact sur la taille des sons obtenus après mouture. Si l'analyse des propriétés mécaniques de l'ensemble de tissus périphériques a été réalisée (Glenn et Johnston, 1992 ; Mabillet et al, 2001), l'exploration des propriétés individuelles de chaque tissu et les paramètres qui permettent de moduler leur résistance mécanique est en cours d'exploration à l'INRA. En effet, la maîtrise des propriétés mécaniques de chacun des tissus périphériques pourrait permettre de contrôler leur dissociation. Il a été montré que de nouveaux pré-traitements des grains, développés à l'INRA, permettent de moduler la séparation albumen amylicé / tissus périphériques et ainsi la composition et/ou les propriétés des farines (Desvignes et al, 2006 & 2008 & 2010), en modifiant la résistance mécanique des enveloppes. Par ailleurs, l'addition d'enzymes hydrolytiques lors du conditionnement, *ie* en condition hydrique limitée, peut aussi modifier la qualité des farines obtenues, qualité évaluée à travers la qualité des pains obtenus (Haros et al, 2002). Appliquées directement sur des sons, il a été possible d'augmenter la bioaccessibilité de composés phénoliques, connus pour leurs propriétés antioxydantes (Moore et al, 2006).

Les combinaisons d'opérations unitaires de fractionnement sont ainsi étudiées avec comme objectif la confection de farines plus riches nutritionnellement, mais présentant aussi des caractéristiques sanitaires et fonctionnelles supérieures aux farines intégrales.

3.2. Fractionnement des tissus périphériques

La seconde approche vise à utiliser le grain de blé ou des produits de mouture pour en extraire des ingrédients de haute valeur nutritionnelle. Compte tenu de la localisation de la majeure partie des composés bio-actifs du grain, les études ont principalement été engagées sur les tissus les plus externes (par décorticage) ou sur le son de blé. En effet, ce dernier est produit à l'échelle de plusieurs millions de tonnes chaque année en Europe, mais il reste faiblement valorisé. L'idée est ici d'éclater le son en ses différents constituants et de les purifier par voie sèche (Figure 5). On peut considérer un fractionnement à deux échelles :

- soit on cherche à isoler les différents tissus du son pour obtenir des concentrats de couche à aleurone, de testa, de péricarpe, voire de germe,
- soit on se place à une échelle inférieure avec l'objectif de récupérer les constituants cellulaires du son sous forme de différentes fractions de fibres et de contenus cellulaires aux propriétés bien marquées. Cette approche nécessite la maîtrise du broyage ultrafin pour descendre sous la taille cellulaire et des techniques de tri des particules fines. Les fractions obtenues seront additionnées à des farines ou utilisées comme ingrédients dans d'autres préparations pour être testées pour leurs effets fonctionnels et nutritionnels.

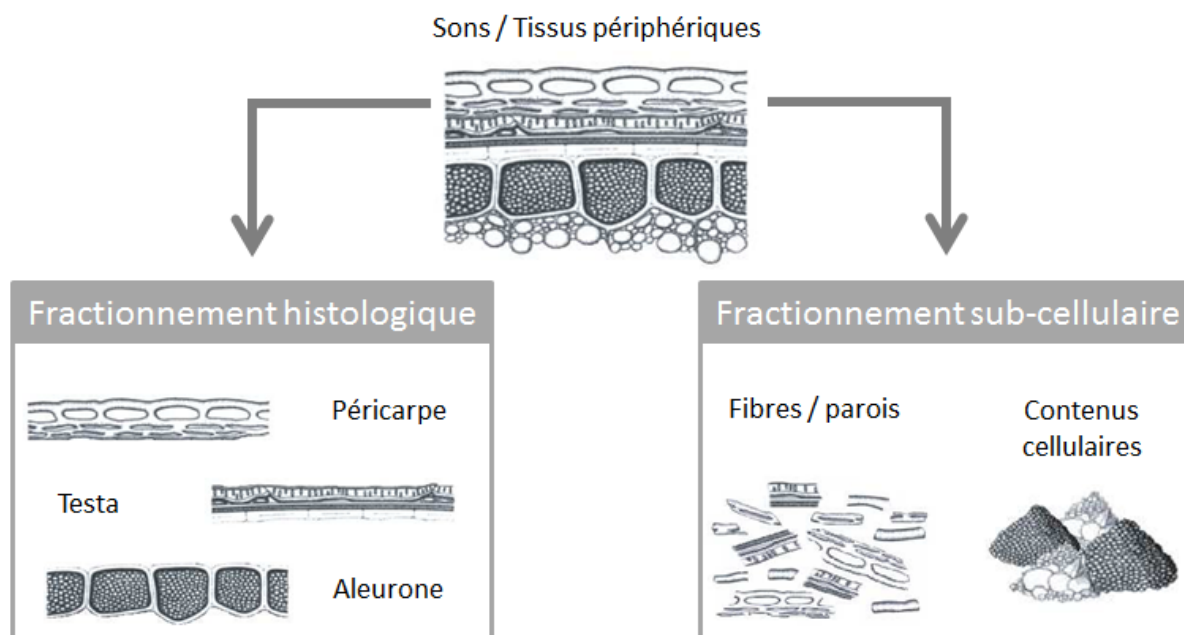


Figure 5. Approches développées pour le fractionnement des sons

3.2.1. Fractionnement histologique

Le fractionnement histologique a été particulièrement poussé pour obtenir des couches à aleurone. Il combine des opérations unitaires de broyage, tamisage et de tri électrostatique à partir de sons pour obtenir des couches à aleurone, mais avec un rendement de l'ordre de 10% (Brevet La Trobe University, Australie (Stone et Minifie, 1988)). D'autres procédés ont été brevetés par Bühler AG permettant d'obtenir des fractions pratiquement pures de couches à aleurone (90% par analyse microscopiques) qui sont constitués de plaquettes de 5 à 40 cellules intactes (Bohm et al, 2003). Ces fractions sont plus riches en fibres (notamment β -glucanes mixtes), protéines, acide férulique et stérols. Ces préparations d'aleurone ont une activité anti-oxydante supérieure au son et seraient plus digestibles (Amrein et al, 2003).

Par décorticage, il est possible de produire des fractions plus ou moins enrichies en un tissu spécifique. Ainsi, pour des taux de décorticage faibles (2-4%), les fractions recueillies sont enrichies en péricarpe externe (Hemery et al, 2009a) et sont donc riches en fibres insolubles, peu hydrolysables par des enzymes. Pour des taux plus élevés, ce sont les tissus périphériques adjacents qui peuvent être récupérés, et ainsi des fibres insolubles hydrolysables. Le fractionnement par voie sèche conserve dans ce cas les associations de constituants telles qu'elles existent dans les structures natives. Dans ce cas, outre les différences de capacité à être fermentées dans le tube digestif (qui peuvent être reliées à leur susceptibilité à l'hydrolyse enzymatique), les fibres extraites contiennent les composés phénoliques qui leur sont propres (lignine pour le péricarpe, acide férulique pour la couche à aleurone) (Dexter et Wood, 1996). Des études sont en cours pour évaluer les propriétés anti-inflammatoires de ces différentes sources de fibres alimentaires du grain de blé (péricarpe *vs* aleurone).

3.2.2. Fractionnement sub-cellulaire

Des procédés innovants, généralement utilisés dans des domaines de productions à plus haute valeur ajoutée que la meunerie, ont été développés pour le raffinage des sons. Ainsi, l'étude du broyage à très basse température des sons de blé par utilisation d'azote liquide a été entreprise par l'INRA. Cette étude est menée à la fois à l'échelle modèle au laboratoire sur les tissus isolés du grain (Hemery et al, 2010b) et à l'échelle pilote sur des équipements spécialement dessinés à cet effet (Hemery et al, 2011a). La cryogénéisation rend le matériau plus cassant donc il se réduit plus vite et plus finement tout en demandant moins d'énergie au broyage. Des tailles de particules inférieures à celles obtenues par

un broyage identique pratiqué à température ambiante sont atteintes. Cette taille est un critère important pour la bio-accessibilité de constituants d'intérêt tels que les composés phénoliques du son (Hemery et al, 2010a). Un autre avantage attendu des basses températures est de mieux préserver l'activité des nutriments présents dans les sons en limitant leur dénaturation.

Aux très petites tailles de particules, les procédés conventionnels de séparation comme le tamisage ou le tri aérodynamique sont moins efficaces. Le tri électrostatique est une technique de séparation des particules qui s'est avérée efficace pour isoler des produits enrichis en tissu de type couche à aleurone (Bohm et Kratzer, 2005). Le principe du tri électrostatique est basé sur le fait que les différentes couches histologiques du son présentent des propriétés contrastées vis-à-vis de la charge électrostatique en raison de leurs différences de composition et de structure (Antoine et al, 2004a). Ces différences de propriétés se retrouvent quand ces tissus sont réduits en poudre (Hemery et al, 2009b). Après avoir chargé électriquement ces particules, il est donc possible de les séparer dynamiquement en déviant leur trajectoire dans un champ électrique et obtenir ainsi des fractions enrichies en certains constituants des tissus. Un équipement pilote pour la séparation de poudres ultra-fines a été réalisé et mis en service à l'INRA (Figure 6). La combinaison des opérations de broyage ultra-fin et de tri électrostatique, a permis d'isoler des fractions riches en fibres du péricarpe de particules riches en fibres de la couche à aleurone (Hemery et al, 2011b). Le fractionnement est alors situé à l'échelle sub-cellulaire contrairement aux fractions produites jusqu'à présent à l'échelle industrielle qui permettait d'isoler des fractions enrichies en fragments de tissu de type couche à aleurone. Ainsi, la combinaison raisonnée d'opérations unitaires classiquement mises en œuvre avec des méthodes plus originales telles que le cryobroyage ou de nouvelles techniques de tri, selon la charge des particules, doit permettre de dépasser les limites permises par les procédés de meunerie ou de semoulerie et de mieux utiliser le potentiel nutritionnel du grain. Ces techniques permettent de développer une véritable raffinerie sèche des sons et ouvrent ainsi, par exemple, l'accès aux contenus cellulaires de la couche à aleurone riche en constituants d'intérêt notamment minéraux, vitamines, molécules anti-oxydantes qui est aujourd'hui insuffisamment exploitée.



Figure 6. Équipement pilote de tri électrostatique de la plateforme de fractionnement des produits végétaux de l'INRA (Montpellier).

A moyen terme, l'UMR IATE poursuit sa recherche d'optimisation des conditions d'obtention de fractions d'intérêt nutritionnel, tout en maintenant les qualités technologiques et sanitaires des produits. Cette recherche s'inscrit dans les objectifs de l'unité qui visent à mieux déterminer les relations entre composition et structure des tissus du grain, leur comportement au cours des procédés et les propriétés des produits. Elle nécessite des collaborations avec les chercheurs qui s'intéressent aux effets de la structuration et des interactions entre constituants de l'aliment, ainsi qu'avec des nutritionnistes pour pouvoir, à plus long terme, moduler à façon la fonctionnalité des fractions générées.

Conclusion

Les grains de blé ne sont pas ou peu consommés en l'état par le consommateur final. Une industrie dite de première transformation permet, à partir du grain, de produire des ingrédients qui seront la base de nombreux aliments (pain, pâtes, biscuits etc.). Le fractionnement par voie sèche tire profit des hétérogénéités de distribution des constituants au sein du grain afin de moduler la composition des ingrédients produits. Il est nécessaire de tenir compte de l'impact de ces procédés, et pas uniquement de la richesse globale en constituant d'intérêt dans le grain, afin de s'assurer de leur présence dans les ingrédients alimentaires (intégrés par la suite dans la formulation des aliments).

Afin d'utiliser pleinement la valeur santé des grains, les procédés conventionnels peuvent être revisités et de nouvelles technologies développées. Ces nouveaux procédés permettent de conserver l'intérêt de la voie sèche en enrichissant les produits en constituants d'intérêt par le biais d'un tissu spécifique du grain ou d'une fraction subcellulaire. Les assemblages supramoléculaires sont conservés tels qu'ils existent dans les structures natives mais leur accessibilité est améliorée (par la destruction des structures à l'échelle supérieure (cellulaire) qui assurait une compartimentation de ces constituants).

Références bibliographiques

- Amrein T.M., Gränicher P., Arrigon E., Amadò R., 2003. In vitro digestibility and colonic fermentability of aleurone isolated from wheat bran. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technology* 36, 451-460.
- Antoine C., Castellon J., Toureille A., Rouau X., Dissado L., 2004a. Comparison of constitutive wheat bran tissues by dielectric spectroscopy and effect of their moisture content. *Polymer International* 53, 2169-2177.
- Antoine C., Lullien-Pellerin V., Abecassis J., Rouau X., 2002. Intérêt nutritionnel de la couche à aleurone du grain de blé. *Sciences des Aliments* 22, 545-556.
- Antoine C., Peyron S., Lullien-Pellerin V., Abecassis J., Rouau X., 2004b. Wheat bran tissue fractionation using biochemical markers. *Journal of Cereal Science* 39, 387-393.
- Bohm A., Bogoni C., Behrens R., Otto T., 2003. Method for the extraction of aleurone from bran. US Patent application publication US 2003/0175384.
- Bohm A., Kratzer A., 2005. Method for isolating aleurone particles. US Patent application publication US 2005/0103907.
- 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. *Journal of Cereal Science* 47, 245-251.
- Desvignes C., Lullien-Pellerin V., 2010. Method for treating grains of wheat with a view of preparing them for fractionation. WO 2010/055248 A1.
- Desvignes C., Olive C., Lapiere C., Rouau X., Pollet B., Lullien-Pellerin V., 2006. Effects of calcium chloride treatments on wheat grain peroxidase activity and outer layer mechanical properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, 1596-1603.

- Delcour J. A., Rouau X., Courtin C. M., Poutanen K., Ranieri R., 2012. Technologies for enhanced exploitation of the health promoting potential of cereals. *Trends in Food Science and Technology*, (in press).
- Dexter J.E., Wood P.J., 1996. Recent applications of debranning of wheat before milling. *Trends in Food Science & Technology* 7, 35-41.
- Fincher G.B., Stone B.A., 1986. Cell walls and their components in cereal grain technology. *Advances in Cereal Science and Technology* 8, 207-295.
- Glenn G.M., Johnston R.K., 1992. Moisture dependant changes in the mechanical properties of isolated wheat bran. *Journal of Cereal Science* 15, 223-236.
- Haros M., Rosell C.M., Benedito C., 2002. Improvement of Flour Quality through Carbohydrases Treatment during Wheat Tempering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 4126-4130.
- Hemery Y.M., Anson N.M., Havenaar R., Haenen G., Noort M.W.J., Rouau X., 2010a. Dry-fractionation of wheat bran increases the bioaccessibility of phenolic acids in breads made from processed bran fractions. *Food Research International* 43, 1429-1438.
- Hemery Y., Chaurand M., Holopainen U., Lampi A.M., Lehtinen P., Piironen V., Sadoudi A., Rouau X., 2011a. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding. *Journal of Cereal Science* 53, 1-8.
- Hemery Y., Holopainen U., Lampi A.M., Lehtinen P., Nurmi T., Piironen V., Edelmann M., Rouau X., 2011b. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science* 53, 9-18.
- Hemery Y., Lullien-Pellerin V., Rouau X., Abecassis J., Samson M.F., Aman P., von Reding W., Spoerndli C., Barron C., 2009a. Biochemical markers : efficient tools for the assessment of wheat grain tissue proportions in milling fractions. *Journal of Cereal Science* 49, 55-64.
- Hemery Y.M., Mabilite F., Martelli M.R., Rouau X., 2010b. Influence of water content and negative temperatures on the mechanical properties of wheat bran and its constitutive layers. *Journal of Food Engineering*, 98, (3), 360-369.
- Hemery Y., Rouau X., Dragan C., Bilici M., Beleca R., Dascalescu L., 2009b. Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content. *Journal of Food Engineering* 93, 114-124.
- Hemery Y., Rouau X., Lullien-Pellerin V., Barron C., Abecassis J., 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science* 46, 327-347.
- Jones J. A., 2006. Grain-based foods and health. *Cereal Foods World*, 51, (3), 108-113.
- Mabilite F., Gril J., Abecassis J., 2001. Mechanical properties of wheat seed coats. *Cereal Chemistry* 78, 231-235.
- Moore J., Cheng Z., Su L., Yu L., 2006. Effects of Solid-State Enzymatic Treatments on the Antioxidant Properties of Wheat Bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 9032-9045.
- Nyström L., Paasonen A., Lampi A.-M., Piironen V., 2007. Total plant sterols, steryl ferulates and steryl glycosides in milling fractions of wheat and rye. *Journal of Cereal Science* 45, 106-115.
- Ordaz-Ortiz J.J., Devaux M.F., Saulnier L., 2005. Classification of wheat varieties based on structural features of arabinoxylans as revealed by endoxylanase treatment of flour and grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, 8349-8356.
- Ostlund R.E., Racette S.B., Okeke A., Stenson W.F., 2002. Phytosterols that are naturally present in commercial corn oil significantly reduce cholesterol absorption in humans. *American Journal of Clinical Nutrition* 75, 1000-1004.
- Parker M.L., Ng A., Waldron K.W., 2005. The phenolic acid and polysaccharide composition of cell walls of bran layers of mature wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Avalon) grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 2539-2547.
- Pomeranz Y., 1988. Chemical composition of kernel structures. In *Wheat : Chemistry and Technology*, Pomeranz, Y., Ed. AACC: St Paul, Vol. 4, pp 97-158.

Rhodes D.I., Sadek M., Stone B.A., 2002. Hydroxycinnamic acids in walls of wheat aleurone cells. *Journal of Cereal Science* 36, 67-81.

Rios G., Pinson-Gadais L., Abecassis J., Zakhia-Rozis N., Lullien-Pellerin V., 2009. Assessment of dehulling efficiency to reduce deoxynivalenol and Fusarium level in durum wheat grains. *Journal of Cereal Science* 49, 387-392.

Rouau X., Abecassis J., Barron C., Chaurand M., Devaux M. F., Hemery Y., Lullien-Pellerin V., Martelli M. R., Samson M. F., 2008. De nouveaux procédés pour exploiter le potentiel nutritionnel des céréales. Le projet intégré HEALTHGRAIN. *Industrie des Céréales*, 158, 3-8.

Stone B. A., Minifie J. 1988. Recovery of aleurone cells from wheat bran. US patent 4,746,073.

Surget A., Barron C., 2005. Histologie du grain de blé. *Industrie des Céréales* 145, 3-7.