



HAL
open science

Les mécanismes de la rupture au cours du broyage de grains de blé dur.

David Bordeaux, Jean-Charles Bénézet, Ali Benhassaine

► **To cite this version:**

David Bordeaux, Jean-Charles Bénézet, Ali Benhassaine. Les mécanismes de la rupture au cours du broyage de grains de blé dur.. 2007. hal-00311859

HAL Id: hal-00311859

<https://hal.science/hal-00311859v1>

Preprint submitted on 21 Aug 2008

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.

Les mécanismes de la rupture au cours du broyage de grains de blé dur

David Bordeaux¹, Jean-Charles Bénézet², Ali Benhassaine²

¹SD-Tech S.A – 3, Rue de la bergerie 30100 ALES

²Ecole des Mines d'Alès – 6, Avenue de Clavières 30319 ALES cedex

Rapport de Recherche EMA- 2007

I- Introduction

Au cours de ce travail, l'analogie entre le grain de blé et un matériau modèle de type sandwich avec une structure centrale en nid d'abeille (appelée NIDA) a été réalisée. A partir de la structure de ce matériau modèle, les différents mécanismes de fragmentation ont été décrits en fonction du niveau de structuration. Cette étude repose essentiellement sur les différents fragments susceptibles d'être obtenus, en fonction des mécanismes de fragmentation et du niveau de structuration du matériau (grain de blé dur). Afin de pouvoir décrire convenablement les divers fragments issus de contraintes différentes, un certain nombre de broyeurs ont été utilisés : broyeur à boulets, broyeur à percussion, broyeur à meules et broyeur à cylindres. L'étude des différents fragments doit permettre de conclure sur les divers chemins et mécanismes de fragmentation des grains de blé dur. Pour mener ce travail, un blé dur de variété Ardente a été utilisé.

Les mécanismes de rupture peuvent être décomposés en mécanismes élémentaires selon le schéma présenté sur la **Figure 1**. La nature du mécanisme prépondérant lors du broyage dépendra du type de contrainte appliquée aux grains pour les rompre (BORDEAUX, 2002).

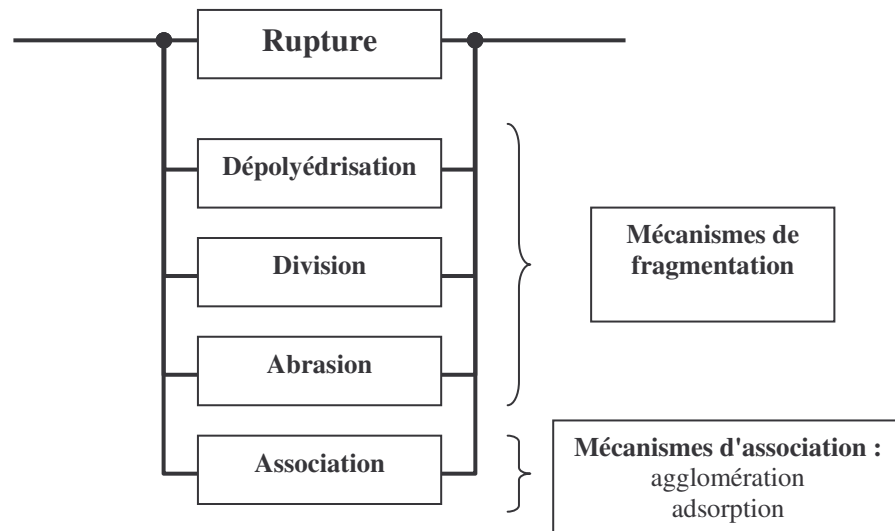


Figure 1 : Décomposition en sous ensembles des mécanismes de rupture

Ces différents mécanismes de fragmentations correspondent à des mécanismes de rupture connus lors d'un chargement statique de matériaux analogues et définis avec le vocable approprié au broyage (fragmentation par dépolyédrisation et par division). La liste des

mécanismes de fragmentation par fracturation a été complétée par un mécanisme classique rencontré lors du broyage des minéraux : le mécanisme d'abrasion.

En fonction des connaissances actuelles sur le broyage et sur le comportement mécanique de structures analogues, il est possible d'identifier dans le cas de la rupture de matériau structuré et fragile (cas du blé dur), trois mécanismes différents (**Figure 1**). Des mécanismes d'association (agglomération ou adsorption) peuvent être aussi ajoutés car ils peuvent perturber considérablement l'analyse des fragments.

II- Les mécanismes de fragmentation du matériau modèle

De nombreuses études ont été menées pour étudier le comportement mécanique d'un matériau composite de type sandwich en fonction des contraintes mécaniques exercées sur le matériau (BARREAU *et al.*, 2004, ASSARAR *et al.*, 2006). Les utilisations des structures sandwich se faisant dans le cadre de constructions mécaniques, les études de comportement ont été effectuées uniquement dans le cas de contraintes statiques (flexion trois points, compression, traction). Lors du broyage, les contraintes sont dynamiques, multiples et complexes. Par conséquent, les mécanismes observés sur la structure sandwich donnent une indication sur les mécanismes potentiels et attendus selon la complexité de la structure, mais ils ne sont nullement exhaustifs.

Lors de cette étude, des broyeurs de types très différents ont été utilisés afin d'obtenir des sollicitations mécaniques multiples (attrition, écrasement, cisaillement...). Le matériau modèle ainsi sollicité est susceptible de se fragmenter selon les trois mécanismes rencontrés dans un broyeur.

II-1 Mécanisme de fragmentation par fracturation

Pour le matériau modèle, en fonction du type de contraintes, de leur intensité et de la structuration du sandwich (force de cohésion à l'interface...), le comportement lors de la fragmentation peut être différent : soit la propagation de la fissure suit la structuration du matériau (délaminage, rupture par décohésion, ...) soit, elle ne suit pas la structure (rupture de traction du revêtement...).

De façon générale et quel que soit le niveau de structuration, il est possible de distinguer la fragmentation de chaque niveau n :

1. qui suit la structuration de niveau n
2. qui ne suit pas la structuration de niveau n

Les termes de "dépolyédrisation" (GARCIA, 1999) lorsque la fragmentation suit la structuration et de "dépolyédrisation de niveau n ", lorsque la fragmentation suit la structuration de niveau n seront utilisés.

Dans le cas contraire, lorsque la fragmentation ne suit pas la structuration de niveau n , le terme de "fracturation de niveau n " ou de "division de niveau n " sera employé.

Dans les deux cas, il s'agit de la fragmentation par fracturation, c'est à dire une fragmentation résultant du mode de contrainte qui provoque l'initiation et la propagation des fissures internes à la particule. Il existe des cas intermédiaires où lors de sa propagation la fissure suit partiellement la structuration de niveau n du matériau. On pourra parler de dépolyédrisation partielle, de division ou fracturation partielle, ou de dépolyédrisation et de division combinée.

II-2 Mécanisme d'abrasion

Au "cœur" des broyeurs, les frottements sont importants. Ces contraintes d'abrasion peuvent provoquer une érosion de la partie périphérique des particules. Le mécanisme d'abrasion donne naissance à des débris et à des particules de taille voisine des particules mères.

Pour un matériau complexe fortement structuré, les débris seront formés de fragments microscopiques des parties structurées. Chaque partie structurée représentera une proportion plus ou moins importante des débris en fonction de sa proportion initiale dans le matériau et de son aptitude à résister à l'abrasion. Les mécanismes d'abrasion sont présents dès les premiers temps du broyage et sont susceptibles d'éroder tous types de particules et ce, quelle que soit leur taille initiale. Les observations microscopiques permettront de connaître quelle est la structure du grain qui se trouve principalement érodée par abrasion.

III- Les mécanismes de fragmentation du grain de blé

III-1 Mécanisme de fragmentation par fracturation

La structuration du matériau mais aussi les caractéristiques des contraintes peuvent contrôler les mécanismes de broyage du matériau. Afin de connaître les chemins de fragmentation possibles, les grains de blé dur (« le matériau ») a été soumis à différents types de contraintes. Pour chaque broyage, des observations ont été réalisées à des temps ou à des rangs de broyage différents afin d'obtenir des informations fragmentographiques sur l'influence de l'intensité des broyages. Cette méthode de travail permet de confirmer les chemins de fragmentation pouvant exister pour ce matériau.

III-1-1 Le comportement du grain

Quel que soit le type de broyage, des fragments du grain de blé composés uniquement d'enveloppe, uniquement d'amande ou bien de fragments composés d'amande et d'enveloppe ont été observés. La dépolyédrisation entre les enveloppes (la peau) et l'amande du grain (l'âme) peut exister totalement (**Figure 2-1**) ou en partie (**Figure 2-2**), mais, elle n'est pas systématique (**Figure 2-3**). Pour chaque type de broyage, des fragments de l'amande périphérique avec et sans enveloppe sont retrouvés.

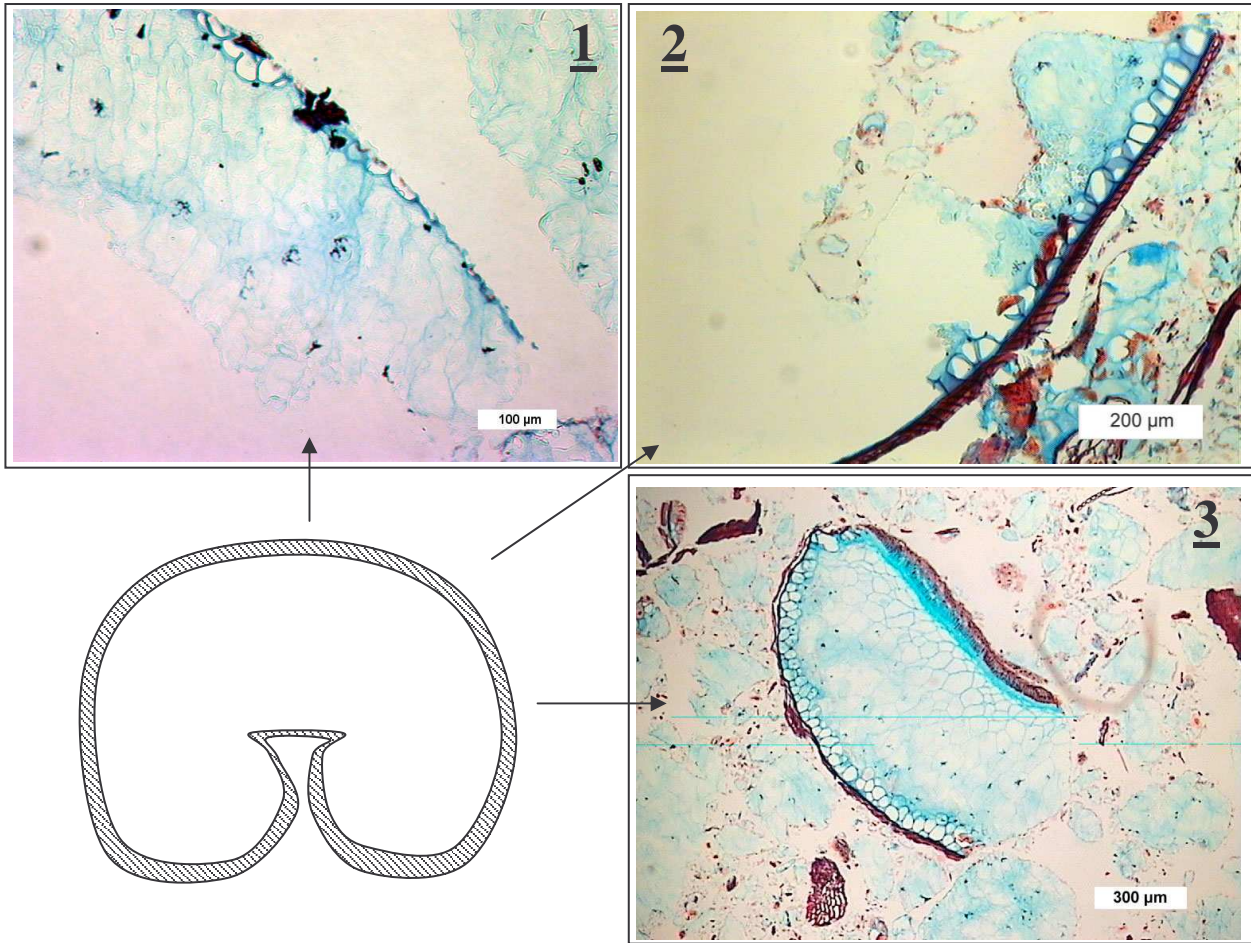


Figure 2 : Fragments du grain de blé dur. (1) dépolyédrisation (2) dépolyédrisation et division (3) division



Figure 3 : Initiation de la séparation entre l'albumen amylicé et les enveloppes du grain (broyage à boulets)

La liaison entre l'amande du grain et l'enveloppe du grain est forte (LEMPEREUR, 1997). La séparation entre ces tissus se fait avec difficultés. Une déformation et des arrachements importants au voisinage de cette zone peuvent apparaître avant qu'il y ait séparation entre les tissus (Figure 3). Les parois cellulaires de la couche à aleurone peuvent céder sous les contraintes permettant ainsi une libération des grains à aleurone (Figures 4 et 5). On trouve sur certains fragments de l'amande subaleuronique des restes de parois cellulaires de la couche à aleurone (Figure 2-1).

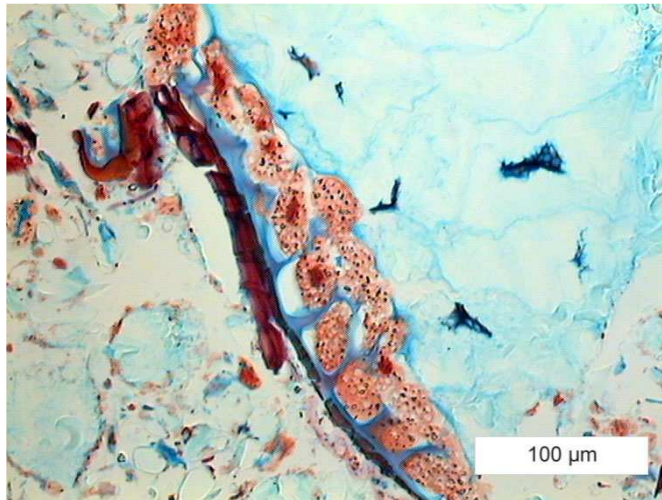


Figure 4 : Initiation de la séparation entre l'albumen amylicé et les enveloppes du grain. Libération des grains à aleurone (broyage à meules)

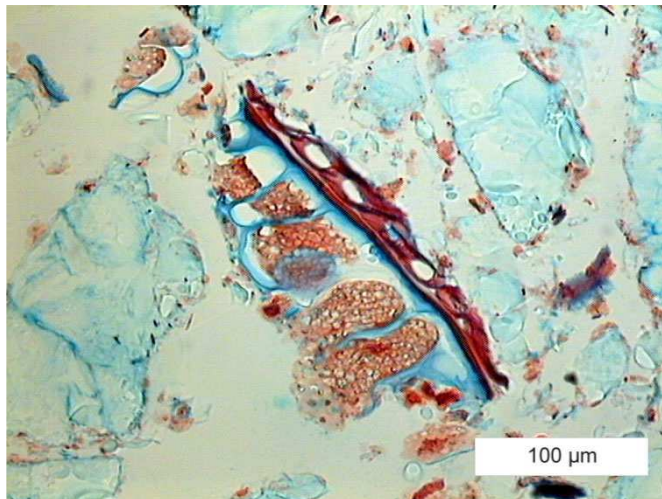


Figure 5 : Libération des grains à aleurone après séparation entre l'albumen amylicé et les enveloppes attenantes (broyage à boulets)

On observe que la séparation entre les enveloppes et l'amande apparaît souvent après un délaminage important de certaines enveloppes du grain. Les phénomènes de délaminage sont importants prouvant les faibles liaisons entre les différentes couches et la relative "solidité" de chaque couche. La dépolyédrisation entre les différentes couches d'enveloppes est un phénomène majoritaire quel que soit le type de broyeur.

Le mécanisme de division peut entraîner une division des cellules (**Figure 6**). Cela montre la cohésion importante entre les différentes cellules d'une même couche.

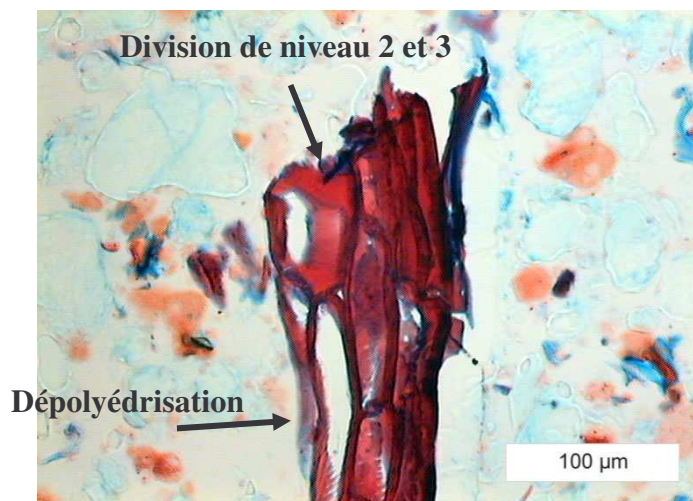


Figure 6 : Fragment de l'épicarpe après dépolyédrisation et division (broyage à percussion)

III-1-2 Le comportement des cellules

a) Les cellules des enveloppes

La dépolyédrisation ou la division des cellules des enveloppes peut se produire (Figure 7). Ces enveloppes représentant un faible pourcentage et un faible intérêt économique, ces mécanismes de fragmentation ne seront pas plus détaillés.

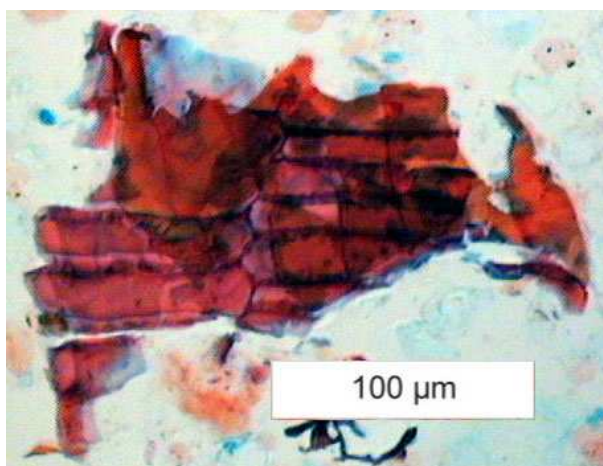


Figure 7 : Dépolyédrisation et division de cellules du mésocarpe (broyage à percussion)

b) Les cellules de l'albumen

Après fracturation du grain de blé, on obtient des fragments de l'amande composés de plusieurs cellules de l'albumen. Il existe deux types de fragments (Figure 8) :

1. Des fragments contenant des cellules divisées sur la périphérie (Figure 8-3),
2. Des fragments contenant des cellules divisées et des cellules entières sur la périphérie (Figures 8-1 et 8-2).

La coexistence de ces deux types de fragments confirme l'existence des deux mécanismes de fragmentation par fracturation : la division et la dépolyédrisation. Ce niveau de structuration

du grain joue un rôle important sur l'opération de broyage, puisqu'il peut influencer le chemin de fracturation quel que soit le type de broyage.

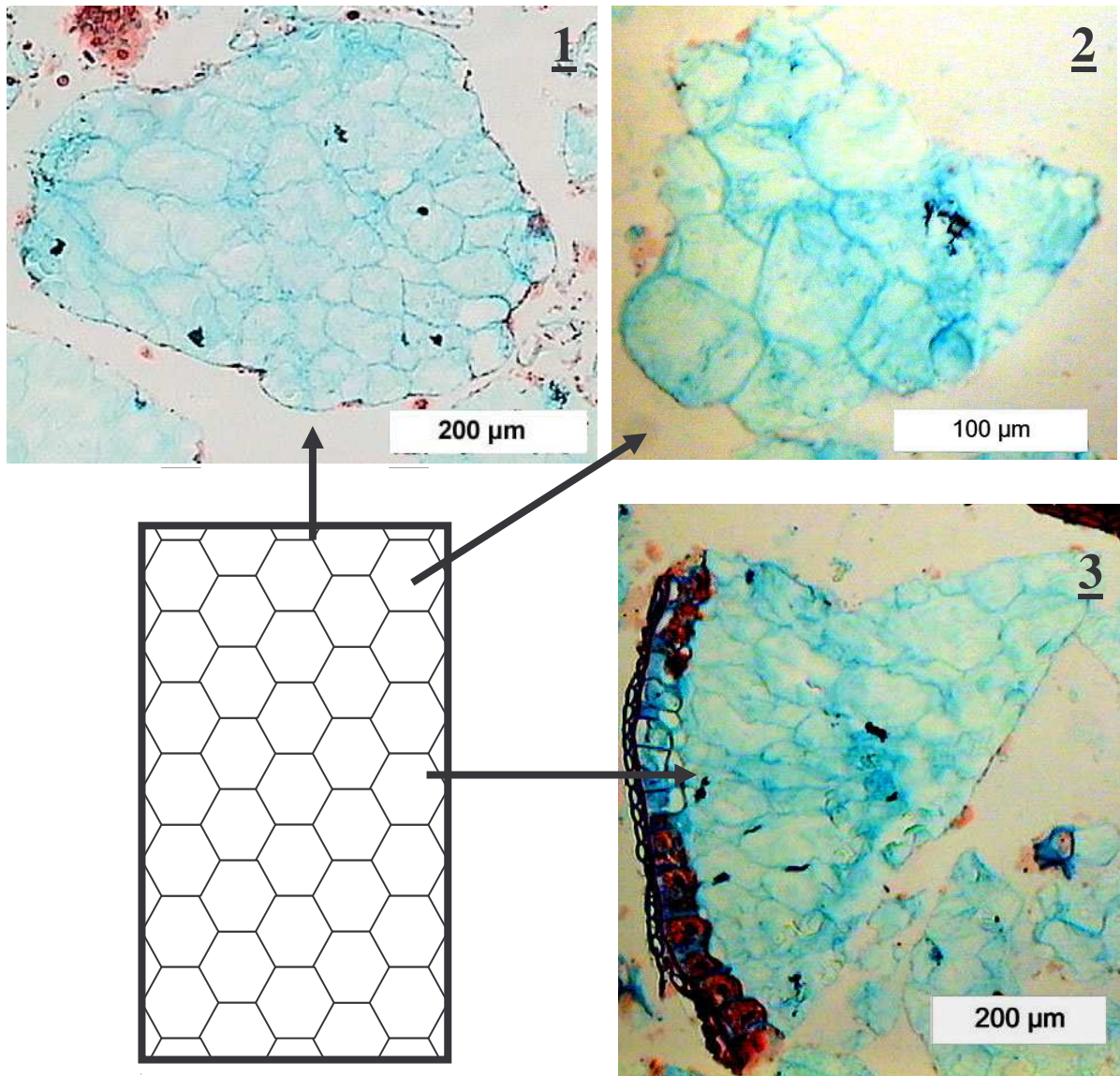


Figure 8 : Types de fragments composés de plusieurs cellules de l'albumen :
(1) et (2) dépolyédrisation et division, (3) division

La **Figure 9** montre l'initiation de la fracturation suivant la structuration. A la fin du processus de fragmentation, la séparation entre les deux cellules sera complète.

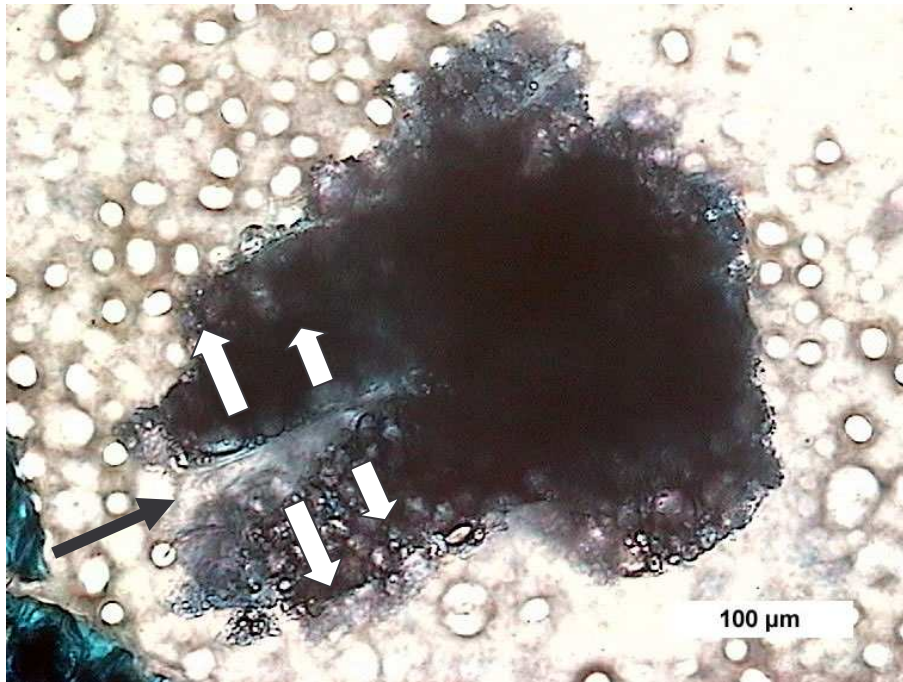


Figure 9 : Initiation d'une fragmentation par dépolyédrisation (broyage à boulets)

La dépolyédrisation des cellules de l'albumen a déjà été largement observé pour les farines de blé tendre. Certains ouvrages généraux traitant du blé (FEILLET, 2000) montrent que les farines de blé *hard* sont formées d'agrégats cellulaires.

Greer (GREER, 1951) a montré par coloration et étude fragmentographique que les blés tendres de qualité *hard* avaient tendance à se fracturer entre les cellules de l'albumen.

c) Le comportement de la matrice chargée

Quel que soit le type de broyage, des grains d'amidon entiers isolés (Figure 10) et des grains d'amidon fragmentés (Figure 11) sont observés. Ces deux types de particules formées de grains d'amidon prouvent que le mécanisme de fragmentation par division coexiste avec le mécanisme de fragmentation par dépolyédrisation.

Les deux familles naturelles de grains d'amidon (grains de type A et grains de type B) sont facilement identifiables (Figure 10). La structure des grains d'amidon est en grande partie respectée, prouvant ainsi que la fragmentation des cellules se fait principalement par dépolyédrisation de sa structure.

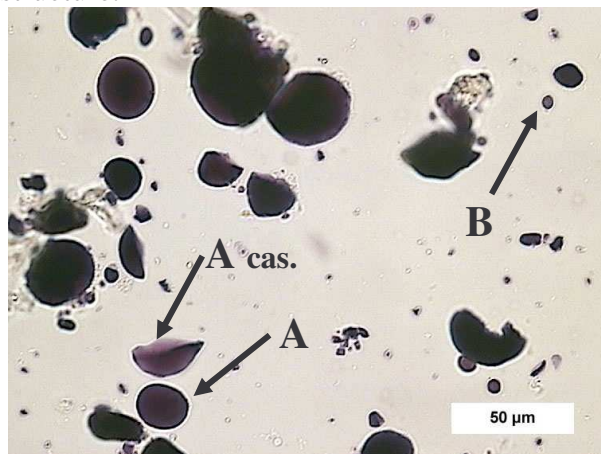


Figure 10 : Amidon de type A (A), amidon de type B (B) et amidon de type A fragmenté (A cas.) : Broyage à boulets (coloration au Lugol)



Figure 11 : Grains d'amidon de type B cassés lors de la fragmentation de la cellule (broyage à boulets)

Les grains d'amidon divisés sont présents dans toutes les fractions recueillies. Ainsi, quel que soit le type de contraintes mécaniques engendrées dans le réacteur de division, des grains d'amidon seront endommagés lors de la fragmentation du grain. Ce critère permet de caractériser le broyage par le taux d'endommagement de l'amidon.

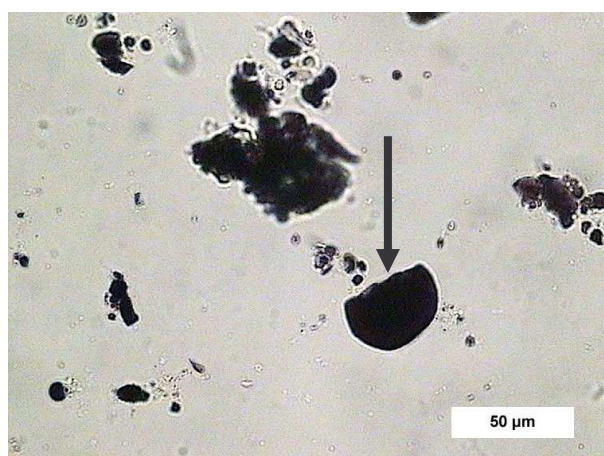


Figure 12 : Grain d'amidon de type A cassé (broyage à percussion)

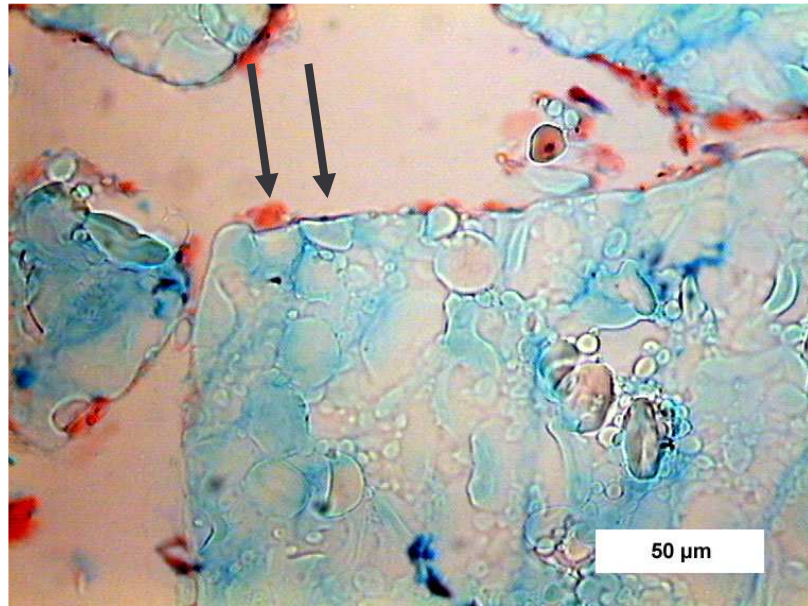


Figure 13 : Division de grains d'amidon de type A, lors de la fragmentation par division de plusieurs cellules (broyage à meules)

Les grains d'amidon fragmentés et isolés (**Figure 12**) peuvent provenir soit de la fragmentation finale de la cellule, soit de la fragmentation de la cellule à un niveau supérieur de structuration. Certains fragments d'amande possèdent en surface des grains d'amidon divisés (**Figure 13**). Précédemment, il a été montré que lors de la fragmentation par fracturation du grain de blé, il pouvait y avoir division des cellules. Il apparaît qu'à l'intérieur de ces cellules, il peut y avoir division des grains d'amidon. Ces observations montrent que dès les premiers temps de broyage, les grains d'amidon peuvent être endommagés par fracturation du grain. Ce mécanisme de division semble obligatoirement combiné au mécanisme de dépolyédrisation.

Cet endommagement par fracturation des grains d'amidon, dès les premiers temps de broyage, est connu. Après division d'un grain de blé dur en deux parties (afin d'en faire une observation microscopique), Hosenev (HOSENEY, 1998) montre un nombre important de grains d'amidon cassés.

La dépolyédrisation ou individualisation des grains d'amidon (FEILLET, 2000) est un mécanisme connu pour les grains de blé tendre. Ce mécanisme est convoité, car c'est à partir de cette population que l'on envisage des séparations (turboséparation ou séparation pneumatique) entre protéines et amidons. On cherche par exemple à enrichir les fractions en l'un des composés pour des applications alimentaires (GODON, 1998).

d) La fracturation des particules fines

Lors du broyage réalisé avec un broyeur à boulets, des grains d'amidon endommagés ayant une forme originale ont pu être observés (**Figure 14**). Ces grains d'amidon ont été écrasés. Autant lors de la fragmentation par division, les grains d'amidon divisés possèdent une fracture nette, autant dans ce cas, les lignes de fissuration sont mal définies et non abouties. Ce sont les contraintes de compression importantes dans les broyeurs à boulets qui sont responsables de cet endommagement des grains d'amidon (**Figure 15**). La fracturation a lieu par division, mais il y a, aussi, déformation de la structure.

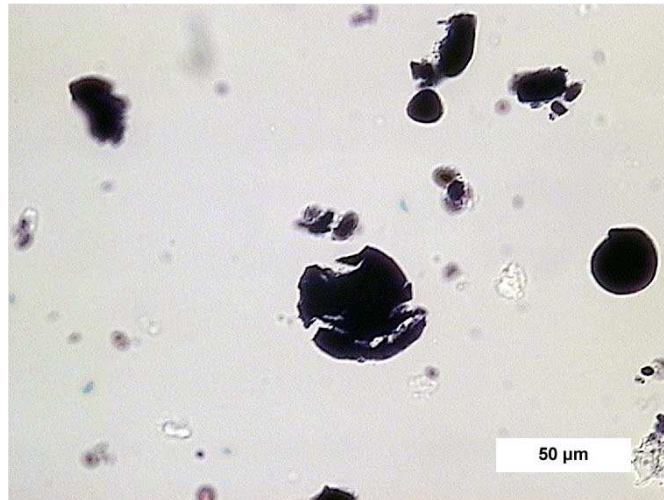


Figure 14 : Endommagement d'un grain d'amidon par écrasement (broyage à boulets)

Ce type d'endommagement des grains d'amidon est d'autant plus important que le diamètre des boulets est faible. L'importance de la taille des boulets est connue dans le domaine du broyage. Il existe un rapport de diamètre optimum entre particules à broyer et corps broyant. Plus, on diminue la taille des boulets plus, on favorise les mécanismes de fragmentation produisant des fines particules.

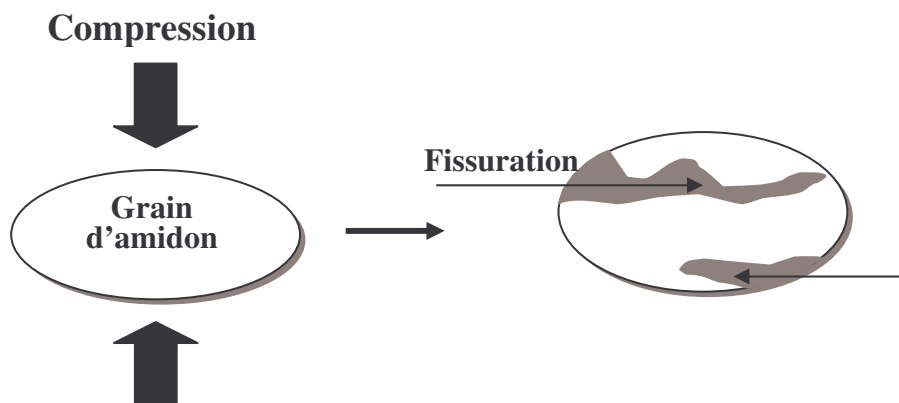


Figure 15 : Fracturation des grains d'amidon

Une fois libres, les grains d'amidon ou les fragments de grains peuvent donc subir des contraintes importantes pouvant endommager leur structure. Même si ce phénomène est visible uniquement sur les grains d'amidon, il est généralisable à toutes les particules. Toutes les particules subissent des contraintes similaires. En revanche, les effets qu'entraînent ces contraintes peuvent être différents. La proportion importante de fines particules dans les fractions issues de broyage à boulets montre que beaucoup de particules sont sensibles à ces contraintes ou aux contraintes d'abrasion.

La micronisation des poudres de blé grâce au broyeur à boulets est envisageable. Mais dans ce cas, toutes sélectivités basées sur les caractéristiques microstructurales du matériau est perdue. Ces mécanismes produisant des fines particules sont donc un handicap pour une bonne séparation des différents constituants du blé, tout comme la taille micronique des particules. En effet, la séparation des particules dans le domaine micronique est difficile et coûteuse.

Ce mécanisme de fragmentation est principalement observé dans des broyeurs à boulets (BORDEAUX *et al.*, 2006). Mais, il peut exister de façon minoritaire dans les autres broyeurs (broyeur à meules par exemple).

III-2 Mécanisme d'abrasion

Dès les premiers temps du broyage, de fines particules sont observées. Leur proportion augmente au cours du temps ou du rang de broyage. Ces particules sont le résultat des mécanismes de fragmentation et des mécanismes d'abrasion. Comme pour le broyage de minéraux, les contraintes d'abrasion produisent de fines particules. Ces particules sont constituées de tous types de fragments du grain. Ainsi, on trouve des débris : de parois cellulaires (enveloppes et amande), d'amidon, de protéines...engendrés par le processus de fragmentation par abrasion ou par les mécanismes de fragmentation.

IV- Conclusion

Après avoir décrit les différents mécanismes de broyage envisageables, leur validation a été effectuée par une étude fragmentographique. Deux mécanismes de fragmentation ont pu être répertoriés :

- ◆ La fragmentation par fracturation (division ou dépolyédrisation),
- ◆ La fragmentation par abrasion.

L'étude fragmentographique globale a permis de confirmer l'existence d'une liaison forte entre les enveloppes et l'albumen amylicé. En revanche, la cohésion entre les différentes couches d'enveloppe est plus faible ce qui permet une dépolyédrisation importante de ces tissus.

L'étude de la structuration a révélé des différences de comportement entre les différentes régions de l'albumen amylicé. Plus on se rapproche de la zone centrale, plus la fragmentation par dépolyédrisation est facilitée. Les caractéristiques du matériau changent entre la zone subaleuronique et la zone centrale : la taille des grains d'amidon, la quantité de protéines, l'épaisseur des parois cellulaires.... L'influence sur la fragmentation de ces différents paramètres variétaux a déjà été largement prouvée (LARKIN *et al.*, 1952, MARES *et al.*, 1973, FORNAL *et al.*, 1999). Dans le cas de cette étude, il a été démontré que les variations des caractéristiques des constituants (proportion, taille, cohésion...) peuvent jouer un rôle déterminant sur le mode de fragmentation (dépolyédrisation ou division). Les grains d'amidon peuvent « sortir » intacts de la structure quel que soit le type de contrainte, même s'il existe un endommagement des grains d'amidon dû à la fragmentation par fracturation du grain. Une fois libre, un second type d'endommagement des grains d'amidon peut apparaître. Cet endommagement est visible lors du broyage à boulets ou à meules. Il est dû à des contraintes de compression (écrasement) importantes. Les mécanismes de fragmentation sont combinés. Il peut y avoir une dépolyédrisation à un niveau de structuration sur un fragment de grain constitué d'enveloppes et d'amande avant qu'il y ait eu dépolyédrisation à un autre niveau de structuration, entre les enveloppes et l'amande. Les mécanismes sont simultanés et non découplables. Les chemins de fragmentation sont pour chaque broyeur, empruntés dans des proportions différentes. Les différents chemins de fragmentation ont été répertoriés sur la **Figure 16**. Ce graphe dépend de la structuration du matériau. La constitution, la composition, les liens entre les différents tissus sont autant de paramètres pouvant influencer les mécanismes de fragmentation.

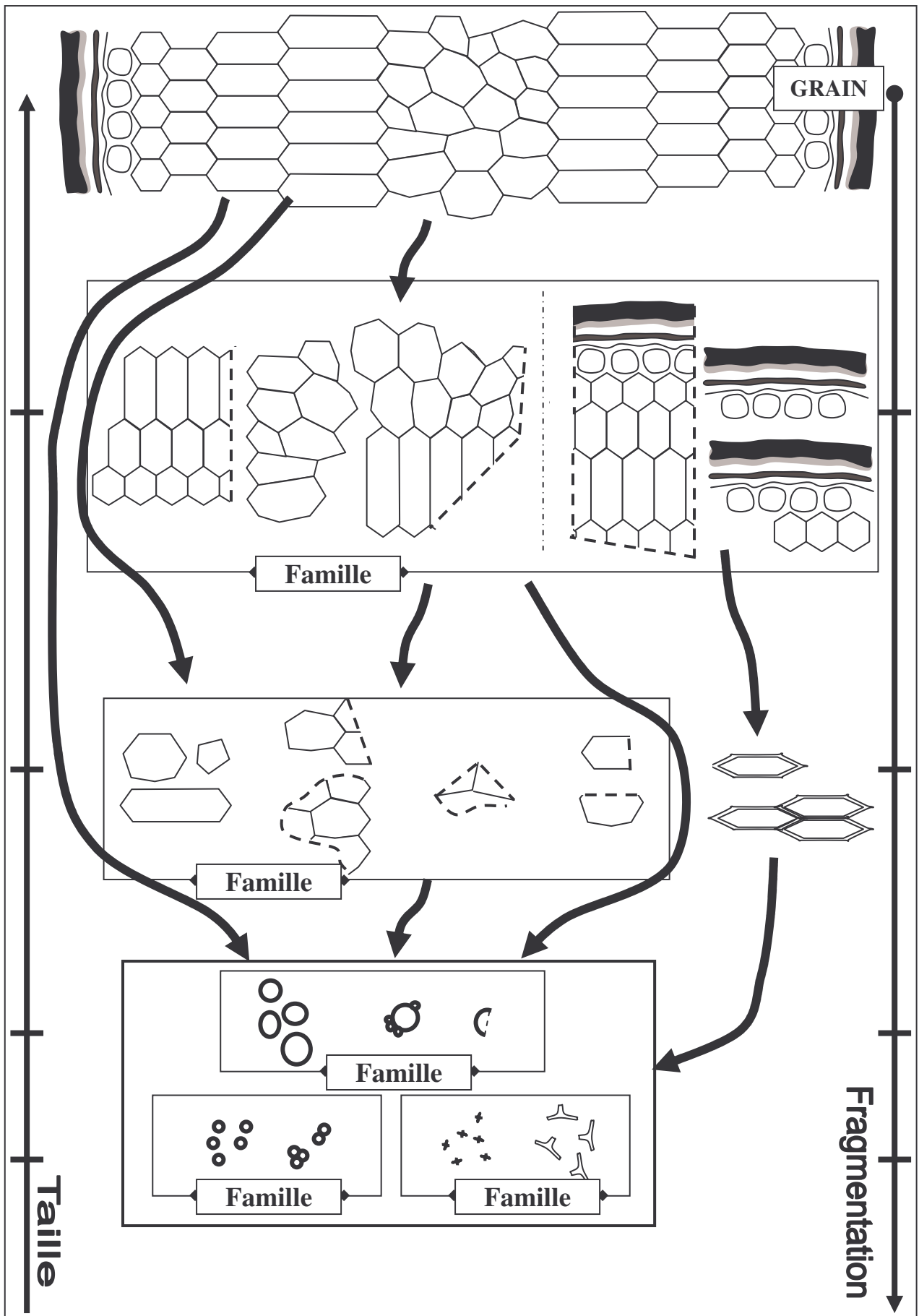


Figure 16 : Chemins de fragmentation et familles de particules associées

Pour les différents types de broyages, des particules semblables sont retrouvées prouvant ainsi que des mécanismes de fragmentation similaire apparaissent au sein de chaque broyeur. Mais l'importance du mécanisme (c'est-à-dire la proportion de chaque famille) n'a pas été traitée dans cet article. Le chemin de fragmentation peut exister pour chaque broyeur mais dans des proportions différentes. C'est ce qui a été montré dans un article précédent (BORDEAUX *et al.*, 2006) concernant uniquement le broyage des grains de blé par des broyeurs à boulets (un broyeur de laboratoire et un broyeur industriel).

Références bibliographiques

- ASSARAR M., EL MAHI A., KHAWAR FAROOQ M., BERTHELOT J.M., 2006. *Comportement en flexion des poutres en matériaux sandwich*, Mécanique et Industries, 6, 589-593
- BARREAU J.J., GUEDRA DEGEORGES D., 2004. *Structures en matériaux composites*, Techniques de l'Ingénieur, traité Conception et production, BM 5080
- BORDEAUX D., 2002. *Modélisation des systèmes complexes par décomposition en sous-ensembles. Application au broyage de blé dur*, Thèse de l'Université de Montpellier II
- BORDEAUX D., BENEZET J.C., BENHASSAINE A., 2006 *Etude systémique du blé dur par un broyeur à boulets*, Industrie des Céréales, à paraître
- FEILLET P., 2000. *Le grain de blé : composition et utilisation*, Ed ; Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 308 p., 2-7380-0896-8
- FORNAL J., JELINSKY T., SADOWSKA J., QUATTRUCCI E., 1999. *Comparison of endosperm microstructure of wheat and durum wheat using digital image analysis*, Int. Agrophysics, vol. 13, p. 215-220
- GARCIA E., 1999. *Approche expérimentale et corrélations dans les systèmes complexes : modes de broyages et réactivités du ciment alumineux fondu*, Thèse de l'Ecole des Mines d'Alès
- GODON B., WILLM C., 1998. *Les industries de première transformation des céréales*, Tech. & Dc. Lavoisier, Paris, 2nd Ed., 656 p., 2-85206-687-4
- GREER E. N., HINTON J. J., JONES C.R., KENT N. L., 1951. *The occurrence of endosperm cells in wheat flour*, Cereal Chem., vol. 28, p. 58-67
- HOSENEY R. C., 1998. *Principles of cereal*, 2nd Ed., American Association of Cereal Chemists, Inc., 378 p., 0-913250-79-1
- LARKIN R. A., MAC MASTERS M. M., MAJEL M., RIST C. E., 1952. *Relation of endosperm cell walls thickness to the milling quality of seven Pacific Northwest wheats*, Cereal Chem., vol. 29, p. 407-413
- LEMPEREUR I., 1997. *Bases physico-chimiques du fractionnement et de la fragmentation des grains de blé dur (Triticum durum Desf.) par voie sèche*, Thèse de l'Université de Montpellier II
- MARES D. J., STONES B. A., 1973. *Studies on wheat endosperm. I. Chemical composition and ultrastructure of the cell walls*, Aust. J. biol. Sci., vol. 26, p. 793-812