



**HAL**  
open science

## Modélisation Mécanique de la friabilité du blé

Vincent Topin, Frédéric Mabillet, Abdelkrim Sadoudi, Jean-Yves Delenne,  
Farhang Radjai

► **To cite this version:**

Vincent Topin, Frédéric Mabillet, Abdelkrim Sadoudi, Jean-Yves Delenne, Farhang Radjai. Modélisation Mécanique de la friabilité du blé. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360484

**HAL Id: hal-03360484**

**<https://hal.science/hal-03360484>**

Submitted on 30 Sep 2021

**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.

# MODELISATION MECANIQUE DE LA FRIABILITE DU BLE

Vincent Topin, Jean-Yves Delenne & Farhang Radjaï

LMGC UMR CNRS  
Université Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 5  
topin@lmgc.univ-montp2.fr

Abdelkrim Sadoudi & Frédéric Mabilie

IATE, UMR ENSAM - INRA Montpellier, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1

## Résumé :

*Nous introduisons dans cet article un modèle granulaire cohésif de l'albumen de blé prenant en compte à la fois les granules d'amidon et une phase continue correspondant à la matrice protéique. La cohésion de la texture est gouvernée par l'adhérence entre l'amidon et la protéine, reflétant la nature biochimique de l'interface, et par la teneur en protéine qui assure la connectivité entre les granules. Nous présentons ici une étude paramétrique de la rigidité, de la résistance à la rupture et des régimes de fissuration en traction simple. Nous montrons que les données relatives à l'endommagement des granules d'amidon, en tant que descripteur de la friabilité, peuvent être mises à l'échelle avec une ténacité relative tenant compte à la fois de l'adhérence entre amidon et protéine et de la quantité de protéine. Cette ténacité apparaît alors comme un paramètre de contrôle gouvernant la transition des comportements de type "soft" à "hard". Ce paramètre combine la quantité de protéine et l'adhérence entre la protéine et les granules d'amidon, deux propriétés majeures généralement avancées pour expliquer la friabilité du blé.*

## Abstract :

*We introduce a cohesive granular model of the wheat endosperm involving a discrete phase composed of starch granules, a continuous phase representing the protein matrix and pores. The cohesion of the texture is governed by adherence between starch and protein, reflecting the biochemical nature of the interface, and the protein content that controls the connectivity between starch granules. We present a detailed parametric study of the stiffness, yield strength and regimes of crack propagation under tensile loading. We then show that starch damage, as a descriptor of wheat hardness, scales with the relative toughness between the starch and the starch-protein interface. The toughness appears therefore to be the control parameter governing transition from 'soft' to 'hard' behaviour. Interestingly, this parameter combines the starch-protein adherence with protein content, two major quantities often assumed to underly wheat hardness.*

## Mots-clefs :

**Matériau granulaire cohésif, albumen de blé, cimentation, friabilité, modèle sur réseau, fissuration.**

## 1 Introduction

L'albumen est le principal constituant du grain de blé (environ 80% en masse). Il est composé essentiellement de granules d'amidon (environ 70% en volume), reliés entre eux par l'intermédiaire d'une matrice protéique laissant place à des pores (voir Fig. 1) (Pomeranz (1988); Atwell (2001)). Il est séparé du germe et de l'enveloppe du grain lors de la mouture, processus qui permet de réduire les grains de blé à l'état de farine ou de semoule.

La variabilité de la dureté du blé est un aspect important dans la détermination de la qualité des farines et de leur sélection dans l'industrie alimentaire. Les classifications commerciales

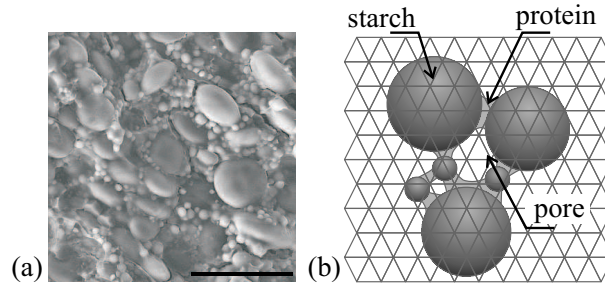


FIG. 1 – (a) Vue au microscope électronique de l’albumen de blé. Le segment représente  $50 \mu m$ . (b) Représentation des particules d’amidon, de la matrice protéique et des pores sur un réseau triangulaire.

habituelles différencient le blé tendre (soft et hard) du blé dur (durum). Alors que les blés soft nécessitent moins d’énergie à la mouture et produisent des farines fines constituées de petits agrégats, les blés de type hard et durum sont réduits à des agrégats plus volumineux et occasionnent un plus grand nombre de granules d’amidon endommagés (Pomeranz (1988); Atwell (2001)). En pratique, la dureté du grain de blé correspond plus à une description empirique de la distribution de la granulométrie des agrégats après mouture qu’à une propriété mécanique du grain. Cependant, il est généralement admis que la dureté est une conséquence de l’adhérence entre les granules d’amidon et la matrice protéique (Glenn and Johnston (1992)) ce qui se traduit d’un point de vue génétique par la présence et la nature de protéines appelées puroindolines (Morris (2002)). D’autre part, la dureté est aussi fonction de la teneur en protéine dans l’albumen. Cette dernière est une caractéristique liée principalement aux conditions de culture et se reflète dans une propriété optique du grain : la vitrosité.

Dans cet article, nous introduisons pour la première fois un modèle de l’albumen de blé prenant en compte les particules d’amidon, la matrice continue de protéine et les pores. La discrétisation de ces phases en éléments linéaires portés par un réseau permet d’initier la rupture d’une manière simple. Le comportement et la rupture de ce milieu dépendent des propriétés des phases et de leurs interfaces. Nous nous intéressons notamment à l’influence de deux paramètres majeurs pour la cohésion de l’albumen de blé : 1) l’adhérence entre les phases ; 2) la fraction volumique de la matrice protéique. Nous montrons la dépendance du module élastique et de la résistance à la rupture par rapport à ces deux paramètres. Une étude paramétrique sera également présentée sur l’endommagement des particules d’amidon en fonction de ces paramètres. Un résultat essentiel de cette étude est la mise en évidence d’un seuil d’endommagement des particules d’amidon qui se met à l’échelle avec une grandeur homogène à une ténacité combinant la quantité de protéine à l’adhérence à l’interface entre la matrice et les particules.

## 2 Description du modèle numérique

L’albumen de blé peut être considéré comme un matériau granulaire composé de particules d’amidon reliés les unes aux autres par la matrice protéique. Dans ce cadre, le passage des interactions microscopiques aux propriétés macroscopiques du milieu est intimement lié à la nature granulaire de l’albumen. L’objectif est de prendre en compte simultanément une phase continue et des particules discrètes, en permettant la rupture dans chacune de ces deux phases et de leurs interfaces. A cette fin, nous avons utilisé un modèle de discrétisation sur réseau. Ce type de modèle a été souvent utilisé en mécanique statistique de la rupture (Roux (1990); Herrmann and Roux (1990)), et appliqué pour étudier la fissuration du béton, des céramiques ou encore des sols (Schlangen and Garboczi (1997); Delaplace et al. (1996)). L’espace est discrétisé par

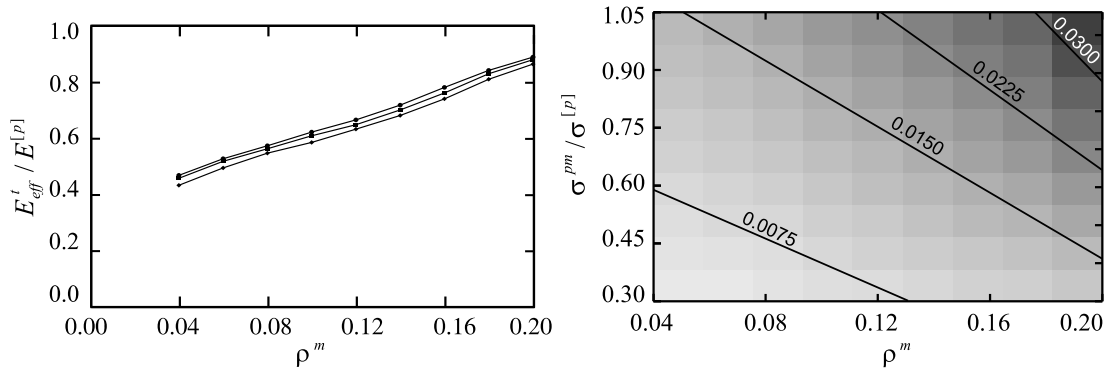


FIG. 2 – (a) Raideur effective  $E_{eff}^t$  en traction en fonction de la fraction volumique de matrice  $\rho^m$ . (b) Carte en niveau de gris de la contrainte en fonction de l’adhérence  $\sigma^{pm}$  entre la protéine et les granules d’amidon et de la teneur en protéine  $\rho^m$ .

une grille de noeuds, régulière ou non, connectés par des éléments 1D. Dans notre étude, nous avons utilisé des éléments élastiques fragiles afin de définir un réseau triangulaire régulier avec une longueur d’élément à l’équilibre  $a$  (Fig 1 (b)). Chaque élément appartenant à une phase  $\Phi$  est caractérisé par une raideur  $k^\Phi$  ainsi que par un seuil de rupture en force  $f^\Phi$ . On définit les paramètres  $\sigma^\Phi \equiv f^\Phi/a$  et  $E^\Phi \equiv k^\Phi/a$ , homogènes respectivement à une contrainte et un module d’élasticité en 2D.

Dans le cas des matériaux polyphasiques, chaque phase ainsi que ses frontières sont matérialisées par des éléments partageant les mêmes propriétés mécaniques. Malgré le fait que le réseau sous-jacent est régulier, le milieu est caractérisé par un désordre granulaire à l’échelle mesoscopique (comparé à la longueur du maillage). Les échantillons sont déformés sous des tests en traction ou compression simple en imposant des déplacements sur les bords supérieurs et inférieurs et en laissant libres les bords latéraux. L’état initial correspond à la configuration de référence et l’équilibre à chaque pas est déterminé en cherchant le minimum de l’énergie potentielle totale du système. Cette énergie est une fonction complexe du déplacement des noeuds et l’approche de son minimum implique l’utilisation d’une méthode itérative : la méthode des gradients conjugués. Effectuer cette minimisation à chaque pas de chargement revient alors à imposer au système une évolution quasi-statique. À chaque pas, tous les éléments excédant le seuil de rupture sont supprimés, cette opération ayant pour conséquence la fissuration du réseau. Des cycles de relaxation rendent possible la propagation des fissures à l’intérieur du même pas. Nous avons généré des échantillons bidisperses (voir Fig. 1 (a)) avec un rapport de taille de particule égal à quatre comme dans l’albumen de blé. L’ensemble de ces particules représente une fraction totale de 80 % de l’échantillon. Un assemblage de disques rigides est d’abord généré à l’aide d’un code de dynamique des contacts, afin d’en isoler une portion rectangulaire et de la superposer au réseau triangulaire. La matrice protéique est ensuite ajoutée sous la forme de ponts trapézoïdaux connectant les particules voisines suivant un critère de distance. En faisant varier l’épaisseur de ces ponts, on obtient des échantillons dont la fraction volumique de matrice  $\rho^m$  évolue de 4% (porosité élevée) à 20% (porosité réduite à zéro).

### 3 Etude paramétrique

Dans cette section, l’influence de la fraction volumique de matrice protéique et de l’adhésion de l’interface entre la matrice et les particules sur le comportement à la rupture de l’albumen est étudiée. Une des spécificités de l’albumen de blé est que ses constituants présentent des

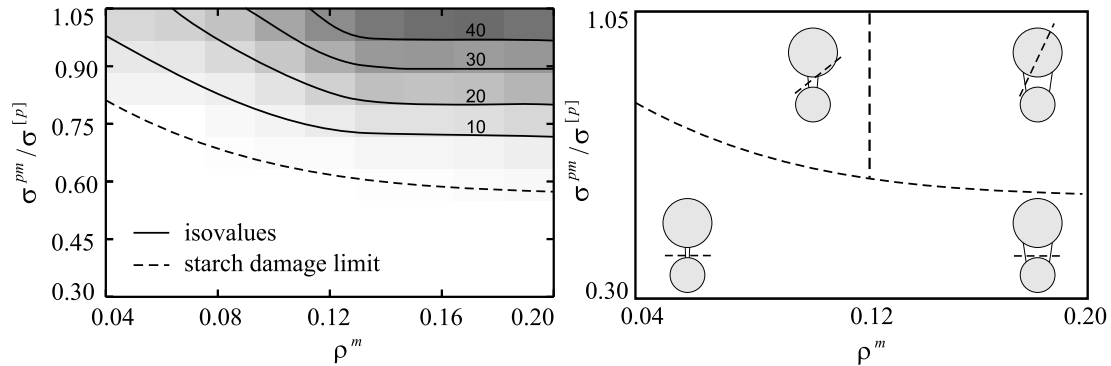


FIG. 3 – (a) Carte en niveau de gris de la fraction d'élément rompu dans la phase particulaire dans l'espace paramétrique. (b) Représentation schématique des régimes de rupture.

propriétés mécaniques similaires (Glenn and Johnston (1992)). Nous avons donc ici attribué les mêmes valeurs à la raideur et au seuil de rupture pour la phase protéique et amidon. La fraction volumique d'amidon a été fixée à 0,8 en 2D. Une étude paramétrique en traction est effectuée en faisant varier la quantité de protéine  $\rho^m$  de 0,04 à 0,2 et le paramètre d'adhésion à l'interface, correspondant au seuil de rupture  $\rho^m$  entre les particules et la matrice, de 0,3 à 1,05 fois celui des particules ( $\rho^p$ ). Tous les autres paramètres géométriques et mécaniques ont été fixés dans ce cadre, et la cohésion entre les particules a été maintenue nulle. L'adhérence entre la matrice protéique et les granules est donc la seule source de cohésion du matériau. Les zones entre particules peuvent être considérées comme des défauts ou des clivages naturels du matériau. Chaque échantillon contient près de 120000 éléments avec environ 500 granules, et chaque simulation a été répétée avec 3 configurations indépendantes.

Les valeurs des modules effectifs  $E_{eff}$  des différents échantillons sont reportées à la figure 2 (a) en fonction de  $\rho^m$ . Chacune des trois courbes correspond à une configuration indépendante. On observe que  $E_{eff}$  augmente linéairement avec  $\rho^m$ . Le module effectif dépend donc uniquement de la porosité du milieu ainsi que des zones non-cohésives (clivages) entre particules d'amidon.

La figure 2 (b) montre une carte en niveau de gris représentant la contrainte à la rupture  $\sigma_{eff}^t$  dans l'espace paramétrique ( $\rho^m, \sigma^{pm}$ ). On remarque que  $\sigma_{eff}^t$  augmente régulièrement avec les deux paramètres et que les isovaleurs sont des droites. Les échantillons peuvent donc s'avérer très résistants, autant à faible teneur en protéine pour des adhésions fortes aux interfaces, qu'à de hautes teneurs en protéine pour des interfaces faibles.

Dans les modèles sur réseau, il est classique de considérer le nombre d'éléments rompus comme une mesure de l'endommagement (Herrmann and Roux (1990)). Étant donné que dans les processus liés à la transformation du blé, le taux de granules d'amidon endommagés est un indicateur de la dureté du grain (Pomeranz (1988); Atwell (2001)), nous nous intéressons plus particulièrement ici la proportion  $n_b$  d'éléments rompus dans la phase particulaire par rapport au nombre total d'éléments rompus. La figure 3 (a) montre une carte en niveau de gris représentant  $n_b$  dans l'espace paramétrique. On remarque qu'au-dessous d'une frontière clairement définie (ligne en pointillés), il n'y a pas de granules d'amidon endommagés. Dans cette zone, la fissure se propage uniquement dans la protéine et à travers les pores. Au-delà de cette limite, les isovaleurs forment des lignes parallèles avec l'augmentation de  $n_b$ . Il est remarquable que ces lignes deviennent horizontales à partir d'une certaine quantité de matrice  $\rho^m = 0,12$ . Pour  $\rho^m > 0,12$ ,  $n_b$  est quasi-indépendant de  $\rho^m$ . Cette transition correspond à la percolation de la phase protéique, lorsque les granules deviennent entièrement prisonniers de la matrice. Au-

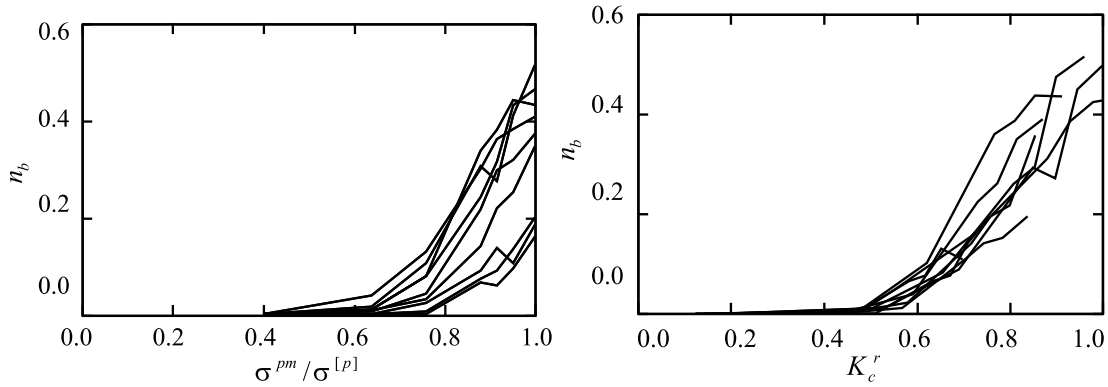


FIG. 4 – Fraction des éléments rompus dans la phase des particules : (a) en fonction de l’adhérence particule-matrice pour différentes valeurs de la fraction volumique de matrice. (b) en fonction de la ténacité relative.

delà de cette transition, l’augmentation de la quantité de protéine n’a aucune conséquence sur le nombre d’éléments rompus dans la phase amidon. Ces observations permettent de distinguer trois principaux régimes de fissuration (Fig. 3 (b)) : 1) En dessous de la limite d’endommagement des granules d’amidon, la fissure contourne les particules et se propage à travers les pores et l’interface entre l’amidon et la protéine. 2) Au-delà de cette limite et pour  $\rho^m < 0,12$  la fissure pénètre partiellement dans les granules depuis les ponts protéiques qui concentrent fortement les contraintes, ce qui mène à l’abrasion de la surface des granules. 3) Enfin, au-delà de cette limite et pour  $\rho^m > 0,12$  la fissure se propage aussi bien dans la protéine qu’à travers les granules.

L’endommagement des granules est contrôlé par une combinaison de la quantité de matrice et de l’adhérence entre la protéine et l’amidon. En mécanique de la rupture, la ténacité  $K_c \equiv \sqrt{EG_c}$  combine la rigidité  $E$  et l’énergie par unité de surface  $G_c$  nécessaire pour initier une fissure. Dans notre modèle, l’initiation d’une fissure est contrôlée par l’énergie élastique accumulée dans un élément à la rupture. Il est donc possible de définir un taux de dissipation  $G_c^\phi$  et une ténacité  $K_c^\phi$  associés aux éléments d’une phase ou d’une interface  $\phi$ . Nous définissons une ténacité relative  $K_c^r \equiv K_c^{pm}/K_c^p$  en rapportant la ténacité  $K_c^{pm}$  liée à l’interface entre les particules et la matrice à la ténacité  $K_c^p$  liée à la phase particulaire. La rigidité  $E_{eff}^t$  de nos échantillons étant corrélée linéairement avec la quantité de matrice (voir Fig. 2 (a)),  $K_c^r$  combine donc explicitement les deux paramètres de notre étude, la fraction volumique de matrice  $\rho^m$  et l’adhérence à l’interface  $\sigma^{pm}$ .

La figure 4 (a) représente la fraction  $n_b$  des éléments rompus dans la phase particulaire en fonction de  $\sigma^{pm}/\sigma^p$  pour plusieurs valeurs de  $\rho^m$ . Ces courbes sont équivalentes aux différentes abscisses de la carte en niveau de gris de la figure 3 (a). Dans la figure 4 (b), nous avons tracé les mêmes données en fonction de la ténacité relative  $K_c^r$ . On remarque que tous les points se regroupent sur une seule courbe avec une variabilité liée aux fluctuations entre les échantillons. Il est remarquable qu’en dessous d’une ténacité caractéristique  $K_c^r \simeq 0,5$  aucun granule n’est endommagé. Au-delà de ce point, la fraction d’éléments rompus augmente avec  $K_c^r$ . Cette ténacité caractéristique correspond à la transition d’un régime où les fissures sont défléchies dans l’interface particule-matrice, à un régime où elles peuvent pénétrer à l’intérieur des particules.

Ces résultats permettent de préciser les rôles spécifiques des deux paramètres souvent évoqués pour expliquer la dureté du grain de blé : l’adhérence entre les granules d’amidon et la

matrice protéique, et la teneur en protéine. En combinant ces deux paramètres, la ténacité relative fournit une description permettant de relier les propriétés de fracture du grain (le taux d'endommagement des granules) avec la texture granulaire de l'albumen de blé. Cette information est essentielle en vue de la classification des différents blés et suggère que la ténacité gouverne la transition entre blés hard et soft.

#### 4 Conclusion

Dans ce travail, une méthodologie est proposée pour étudier les propriétés de résistance et la friabilité de l'albumen de blé en fonction de deux paramètres : la quantité de matrice protéique et la nature de l'interface entre les particules d'amidon et la protéine. Le modèle numérique sur réseau permet de discrétiser simultanément les particules et la matrice et intègre de manière simple la possibilité de fissuration dans chaque phase par la rupture des éléments du réseau. Une étude paramétrique a permis de quantifier l'influence de la fraction volumique de protéine et de l'adhésion entre l'amidon et la protéine. On remarque que l'élasticité du matériau évolue linéairement avec la quantité de matrice, alors que la contrainte à la rupture est contrôlée par une combinaison des deux paramètres. L'observation de la fraction d'éléments rompus dans la phase amidon, en tant qu'indicateur de la dureté du grain, suggère qu'il existe une transition entre les comportements soft et hard contrôlée par une grandeur unique. Cette grandeur, homogène à une ténacité, combine la quantité de matrice et la nature de l'interface. Cette étude s'applique également aux matériaux granulaires cimentés comme béton ou certains conglomerats. L'étude de la transmission des contraintes dans différents régimes permet de mettre en évidence le rôle majeur de la percolation des particules sur les propriétés de rupture de ces matériaux (Topin et al. (2007)).

#### Références

- Pomeranz, Y. 1988 Wheat : Chemistry and technology. AACC, St Paul USA.
- Atwell, W. 2001 Wheat Flour.. AACC, St Paul USA.
- Delaplace, A., Pijaudier-Cabot, G., Roux, S. 1996 Progressive damage in discrete models and consequences on continuum modelling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **44** 99-136
- Glenn, G. and Johnston, R. 1992 Mechanical properties of starch, protein and endosperm and their relationship to hardness in wheat. *Food Structure* **11** 187-199
- Herrmann, H. J. and Roux, S. 1990. Statistical Models for Fracture in Disordered Media. North Holland, Amsterdam.
- Morris, C. 2002 Puroindolines : the molecular genetic basis of wheat grain hardness. *Plant Molecular Biology* **48** 633-647
- Roux, S. 1990 Continuum and discrete description of elasticity and other rheological behavior. *Statistical Models for Fracture in Disordered Media* pp 87-114, North Holland, Amsterdam.
- Schlengen, E. and Garboczi, E. J. 1997 Fracture simulations of concrete using lattice models : Computational aspects. *Engineering Fracture Mechanics* **57** 319-332
- Topin, V., Delenne, J.-Y., Radjai, F., Brendel, L., and Mabilie, F. 2007 Strength and fracture of cemented granular matter. *submitted*