

Enrichissement des produits céréaliers en fibres alimentaires : opportunités et contraintes technologiques

Della Valle G¹, Chiron H.¹, Saulnier L.¹

¹INRA, UR 1268 Biopolymères Interactions Assemblages (BIA), F-44316 Nantes

Correspondance Guy.della-valle@inra.fr, Luc.saulnier@inra.fr

Résumé

Les aliments céréaliers constituent la principale source d'énergie de notre alimentation et sont le principal fournisseur de fibres alimentaires dans le régime alimentaire occidental, toutefois les produits à base de grains entiers ne sont pas encore largement acceptés en dépit de leur intérêt nutritionnel. En effet, l'accroissement de la teneur en fibres dans les aliments céréaliers induit des conséquences néfastes sur le plan organoleptique, ce qui invite à réexaminer l'ensemble de la chaîne de leurs procédés d'élaboration. C'est ce qui est fait dans cet article, où est d'abord précisée la définition des fibres, en insistant sur la distinction fibres solubles et insolubles. Puis les différentes opérations des procédés sont revues en décrivant comment les mécanismes de modification de la pâte vont être affectés par l'addition de fibres. Les différents niveaux d'organisation de la matrice alimentaire sont évoqués et mis en évidence par les modifications des propriétés rhéologiques de la pâte, propriétés qui gouvernent l'élaboration de ces aliments et la texture finale. Outre une description des phénomènes physiques développés au cours de la panification, nous nous efforçons de proposer des moyens pour favoriser, en pratique, l'incorporation de fibres alimentaires en panification, et, dans tout autre procédé d'élaboration d'aliments céréaliers.

Mots-clés : Densité, Eau, Pain, Structure alvéolaire, Texture

Abstract: Fortifying cereal foods with dietary fibers : oportunities and technological challenges

Cereal foods are the largest source of energy in our diet and the main supplier of dietary fiber in the Western diet, but whole grain products are not yet widely accepted despite their nutritional interest. Indeed, the increase in fiber content in cereal foods has detrimental consequences on the organoleptic level, which calls for a re-examination of the whole chain of their manufacturing processes. In this article, the definition of fibers is first delineated, emphasizing the distinction between soluble and insoluble fibers. Then the various process operations are reviewed by describing how the dough modification mechanisms will be affected by the addition of fibers. The different levels of organization of the food matrix are evoked and highlighted by the changes in the rheological properties of the dough, i.e. the properties that govern the development of these foods and the final texture. In addition to describing the physical phenomena developed during breadmaking, we strive to propose ways to promote, in practice, the incorporation of dietary fiber into breadmaking, and, in any other process of developing cereal foods.

Keywords: Density, Water, Bread, Cellular structure, Texture

1. Introduction : aliments céréaliers, fibres et propriétés nutritionnelles

1.1 Les aliments céréaliers et enjeux nutritionnels

Les aliments céréaliers sont largement consommés sous diverses formes de par le monde, même s'ils ne forment sans doute plus la base de la pyramide alimentaire dans les pays occidentaux. En raison de leur structure alvéolaire, la matrice des aliments céréaliers (pain, biscuits, gâteaux, snacks extrudés, etc.) peut être envisagée comme une mousse solide, puisque leur densité est bien inférieure à celle de leurs composants. Ces différents niveaux d'organisation de la matière peuvent être illustrés, comme dans le cas du pain, de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique (Figure 1). Au niveau microscopique, elle peut être considérée comme un matériau composite, principalement constitué d'amidon, de protéines plus ou moins amorphes et agrégées, contenant plus ou moins de fibres alimentaires provenant de la partie externe de l'amande (produits à base de grains entiers) et/ou de l'albumen amylicé (farine blanche), mélangé à d'autres ingrédients (eau, matière grasse, sucres et autres fibres alimentaires).

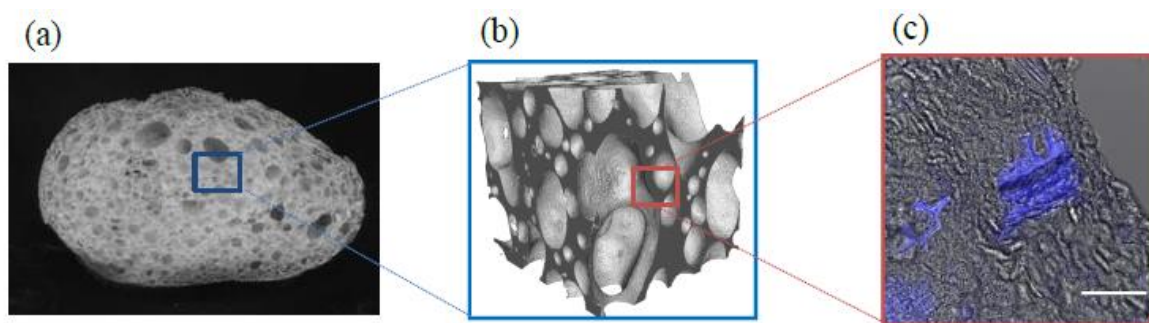


Figure 1 : Différents niveaux structuraux d'un aliment céréalier (mie de pain français): a) mie et croûte à l'échelle macroscopique (largeur \approx 10 cm); (b) image 3D de la structure cellulaire par micro-tomographie RX avec les parois en gris foncé et les alvéoles gazeuses en gris clair (ESRF, F38-Grenoble, vol 1 cm³); (c) morphologie composite imagée par microscopie optique (barre blanche = 100 μ m) du matériau de la paroi cellulaire avec des grains d'amidon aplatis sertis par le gluten - la coloration bleue montre la présence de fibres - et une cellule gazeuse en haut à droite. Toutes les images proviennent de l'INRA.

En raison de leur contenu en amidon et en protéines, les aliments céréaliers constituent la source d'énergie la plus importante de notre alimentation et leur fraction protéique apporte une large gamme d'acides aminés. Ces aliments sont déjà le principal fournisseur de fibres alimentaires dans le régime alimentaire occidental, bien que les produits à base de grains entiers ne soient pas encore largement acceptés, ni consommés, en dépit de leur teneur élevée en fibres alimentaires et en micronutriments.

En effet, l'accroissement de la teneur en fibres alimentaires dans les aliments céréaliers est considéré comme un bon moyen d'atteindre les recommandations de consommation de fibres chez l'adulte (25 à 30 g par jour, Bertrais et al., 2005). Or, avec le pain par exemple, il est bien connu que l'ajout de fibres alimentaires, notamment insolubles, conduit à une réduction du volume de la mie et donc à une densification du pain (Pomeranz et al., 1977). Ce phénomène de densification des pains enrichis en fibres fait appel à différents mécanismes, comme l'hydratation des fibres, leur impact direct sur le réseau de gluten et leur effet déstabilisant aux interfaces des alvéoles gazeuses, etc (Noort et al., 2010). Cependant, cet accroissement de la densité, s'il a un effet plutôt bénéfique sur le plan nutritionnel en diminuant l'index glycémique notamment (Saulnier et al., 2014), induit des conséquences néfastes sur le plan organoleptique : croûte moins croustillante, mie sombre, très ferme et plus sensible à l'émiettement. Ces constats invitent à réexaminer l'ensemble de la chaîne des procédés d'élaboration des aliments céréaliers.

En effet, cette chaîne joue un rôle majeur dans la mise à disposition aux consommateurs, d'aliments céréaliers possédant de hautes qualités sensorielles et nutritionnelles. Elle englobe une séquence d'opérations allant de la récolte du grain à la production de farine, qui résulte d'un compromis entre la nécessité d'éviter la contamination et le souci de valoriser tous les composants des couches externes des grains.

Du point de vue technologique, il existe six types de farines panifiables, depuis les plus raffinées (type 45, c'est-à-dire qui contient moins de 0,5% de cendres) jusqu'aux farines complètes (type 150, taux de cendres > 1,4%), qui contiennent des quantités de fibres croissantes. Les farines utilisées pour le pain courant et le pain traditionnel français sont la T55 et la T65; ces deux farines ont une valeur boulangère optimale conduisant à des pains aérés, caractérisés par des mies blanches ou crème. Cette teinte de mie s'explique par la faible teneur en enveloppes du grain de blé. En général, les pains de type campagne sont fabriqués avec des farines T80, et les pains complets avec les farines T150.

Dans ce qui suit, nous nous focaliserons sur les procédés de transformation de la farine en un produit alimentaire à base de céréales, et sur l'impact de l'incorporation de fibres alimentaires, à chaque étape. En effet, ces procédés modifient non seulement les propriétés physico-chimiques des composants alimentaires, mais créent également la structure de l'aliment. La connaissance des deux caractéristiques, composition et structure de la matrice alimentaire, est nécessaire pour comprendre leur lien avec les propriétés de l'aliment, en intégrant les interactions des composants à différents niveaux d'organisation de la matière, de l'échelle moléculaire à macroscopique.

1.2 Les fibres alimentaires : définition et action

La définition du concept de « fibres » varie suivant le domaine où cette notion est utilisée : nutritionnel, végétal, physique, chimique. Les fibres alimentaires sont les résidus de la partie comestible des produits végétaux qui ne sont pas absorbés dans l'intestin grêle. Elles sont principalement issues des parois des cellules végétales, mais comprennent également des oligosaccharides (fructanes) présents à hauteur d'environ 2% dans le grain de blé.

Les parois cellulaires et leurs polysaccharides représentent 12-14% du grain de blé (4-6% de la farine blanche). Ce sont les principaux composants des fibres alimentaires, qui ont des effets bénéfiques majeurs sur la santé humaine et des effets technologiques importants sur l'utilisation finale des grains de céréales. Le grain de céréale est un organe complexe constitué de plusieurs tissus. En fonction de leur tissu d'origine, les polysaccharides de la paroi cellulaire présentent différentes fonctionnalités (solubilité, viscosité, propriétés gélifiantes, capacités de rétention d'eau, etc.) qui ont un impact sur la transformation des aliments. Les parois cellulaires de l'endosperme amylicé (farines blanches) sont minces et hydrophiles et sont principalement formées d'arabinoxylanes (AX, également appelés pentosanes). Malgré leur faible proportion dans la farine blanche (2 à 3%), les AX ont une influence marquée sur les propriétés des aliments à base de céréales. Ils se présentent sous forme de fractions extractibles à l'eau (EE-AX) créant une viscosité élevée, ainsi que de fractions non extractibles à l'eau (NEE-AX) aux capacités de rétention d'eau élevées. La teneur en AX de la farine (blanche) de blé présente une grande variabilité, principalement modulable par la génétique. Les parois cellulaires épaisses et hydrophobes des tissus externes du grain (sons) renferment la plus grande partie des fibres (75%) constituées de cellulose et d'arabinoxylanes, présents sous forme insoluble.

Ces composants jouent de multiples rôles: en interagissant avec l'eau, le réseau de gluten et l'amidon, ils affectent les propriétés rhéologiques de la pâte, la croissance et la stabilisation des bulles de gaz ainsi que le volume final et la structure cellulaire de l'aliment. La consistance de pâtes préparées à partir d'une farine incorporant des fibres insolubles, isolées de l'albumen ou des sons et caractérisées par différentes valeurs de capacité de rétention d'eau, est corrélée à la quantité d'eau retenue par les fibres, et non seulement à la quantité de fibres (Bonnand-Ducasse et al., 2010). Par ailleurs, en

affaiblissant le réseau de gluten et en déstabilisant la rétention gazeuse, la présence de fibres insolubles conduit à une réduction du volume de la mie, avec un effet d'autant plus important que la taille des particules est faible (Noort et al., 2010). En modifiant la rhéologie de la pâte, l'incorporation de fibres insolubles à une farine blanche, tout comme l'utilisation de farine complète, conduisent donc à des pains plus denses. A ces effets sur le volume de la mie s'ajoutent une croûte moins croustillante, une mie sombre, ferme, qui s'émiette plus facilement.

Ces inconvénients limitent l'acceptabilité de pains à teneur accrue en fibres. En Europe du Nord, la fabrication de pains - dits de mie - souvent cuits en moules métalliques et riches en fibres peut être améliorée en adaptant la conduite de pétrissage (hydratation préalable des fibres, incorporation différée) et en recourant à une conduite de fermentation au levain. Cependant, en France, la fabrication de pains croustillants, de type baguette, riches en fibres est encore peu développée et encore moins maîtrisée. Il existe donc un véritable enjeu pour comprendre les mécanismes d'action des fibres au cours de l'élaboration de cet aliment, en particulier sur les propriétés rhéologiques et l'alvéolation de la pâte, l'aspect extérieur et la texture finale du pain.

L'équilibre entre EE-AX et NEE-AX de l'albumen (farine blanche) peut être modifié en utilisant une endoxylanase, enzyme qui solubilise les AX de la fraction insoluble, qui agissent alors comme un hydrocolloïde épaississant, et favorisent un volume important de la mie (Courtin et Delcour, 2002). L'endoxylanase diminue également la quantité d'eau liée à la matrice insoluble en solubilisant la fraction NEE-AX. Cependant, une telle modulation n'est pas aussi efficace avec les sons de blé, qui sont essentiellement formés de la partie externe des grains de céréales, un assemblage de divers tissus isolés par l'industrie de la minoterie. Dans ces tissus, les parois cellulaires formées principalement de cellulose et de xylanes, contiennent également de la lignine, et sont très faiblement dégradées par les endoxylanases utilisées en panification. Le son peut absorber et piéger l'eau, au sein de sa matrice poreuse, et gonfler et donc affecter la transformation des céréales, mais ses propriétés de liaison à l'eau sont moindres que celles des parois cellulaires provenant de l'albumen amylicé.

2. Les procédés d'élaboration

Pour générer la structure alvéolaire caractéristique des aliments céréaliers, à partir de la farine et d'autres ingrédients, la transformation des céréales englobe un large éventail d'opérations (Figure 2). Deux grands types d'opérations peuvent être principalement distingués: celles mettant en oeuvre la formation de la pâte (ou d'un milieu fondu, dans le cas de l'extrusion) et celles modifiant la pâte ainsi formée, y compris l'alvéolation. La cuisson- extrusion est spécifique car elle inclut toutes les opérations - à l'exception de la fermentation - dans une opération unique qui effectue le mélange, la mise en forme et l'alvéolation par expansion en un temps caractéristique très court, inférieur à 1 min.

L'effet de l'addition de fibres, sous forme de sons de blé blanc, sur le comportement de la pâte a été étudié à chaque étape du procédé. Cette fraction de la mouture du blé, riche en fibres insolubles, a été sélectionnée sur des critères technologiques et nutritionnels. Une variété de blé blanc, ayant une plus faible pigmentation des enveloppes du grain, a également été choisie pour atténuer la coloration brune de la mie de pain. Ces sons ont été testés pour deux granulométries (gros : sons écailles ; fine : sons micronisés) afin de mettre en évidence les valeurs limites de sons de blé pour obtenir un pain acceptable (Le Bleis et al., 2015). La solution d'un mélange de sons - dits « écailles » - et micronisés a ainsi été retenue car l'incorporation unique de sons écailles conduisait à l'obtention d'un produit proche d'un pain complet tandis que l'incorporation exclusive de sons micronisés pénalisait la stabilité de la pâte pendant la fermentation. Nous avons donc ajouté env. 9% de sons de blé à de la farine (T55), teneur nécessaire pour atteindre l'allégation « riche en fibres », sous forme d'un mélange 50/50 de sons micronisés et sons écailles, ainsi que 3% de poudre de gluten vital, à l'instar des pratiques meunières usuelles. Cet ajout a pour but obtenir un réseau de gluten cohésif, condition *sine qua non* à l'élaboration d'un pain suffisamment expansé.

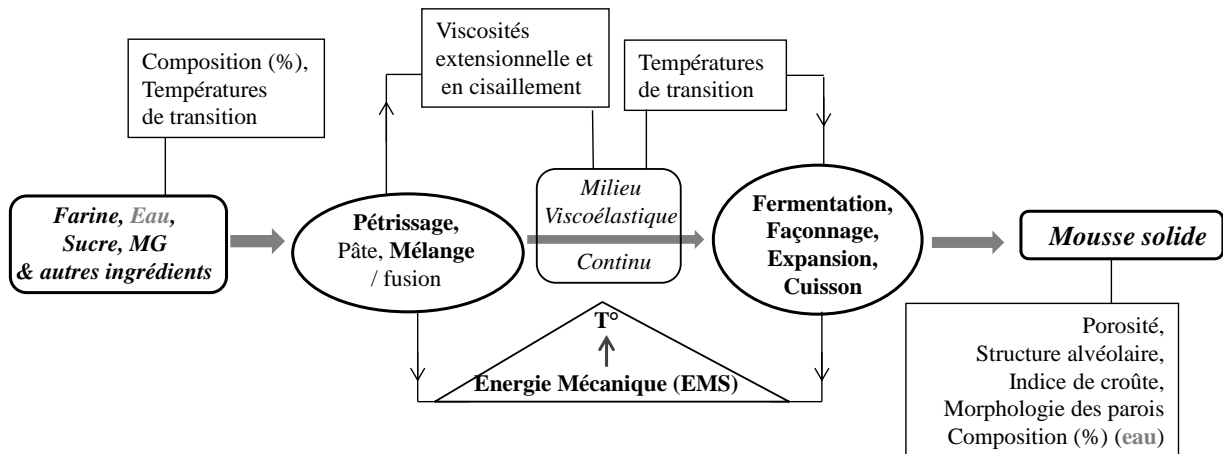


Figure 2 : Représentation systématique de l'élaboration d'aliments céréaliers à partir de farine de blé: (a) avec les principaux états du produit (rectangles arrondis), les opérations (ellipses), les variables opérationnelles (dans le triangle; la flèche entre SME et T illustre la dissipation d'énergie, en particulier dans le cas de l'extrusion) et les caractéristiques du produit (rectangles). L'extrusion intègre les deux séquences d'opérations alors que, dans le processus de panification, la seconde implique au moins trois opérations. Les flèches larges indiquent le flux de matière, alors que les fines signifient «... influence...»; (adapté de Della Valle et al., 2019).

Lors du **pétrissage**, première opération de panification, les ingrédients sont d'abord homogénéisés, ce qui conduit à la répartition de l'eau dans les constituants de la farine, puis le réseau de gluten est tissé, ce qui promeut les propriétés d'extension de la pâte, puis la rétention et la stabilisation des cellules gazeuse. Une quantité importante d'air (fraction de porosité ou volume d'air $\geq 0,1$) est piégée pendant le mélange, puis la formation de bulles se poursuit, par fermentation pendant le repos. Après texturation du réseau de gluten, lors du pétrissage, les boulangers observent des phénomènes de collant, accrus en présence de fibres, qui pénalisent l'aptitude de la pâte à la transformation. La composition biochimique des fibres externes et la taille des particules des fibres (sons grossiers ou d'environ 300 μm) contribuent à ce défaut. L'incorporation de poudre de gluten vital pour compenser l'effet de dilution des protéines endogènes et le recours à des associations d'activités enzymatiques pour limiter la perte de volume des pains riches en fibres sont fréquents.

La structure alvéolaire de la pâte de farine de blé est produite pendant la **fermentation**, alors que la porosité de la pâte croît de 0,1 à environ 0,7, et n'est pas significativement modifiée lors de la cuisson. La porosité finale de la pâte en fin de fermentation peut être modifiée en scarifiant sa surface avant cuisson au four, pour la maintenir proche de 0,5 pour les petits pains croustillants, alors qu'elle peut atteindre 0,8 pour les pains à « hamburgers ». Au cours de la levée, la structure alvéolaire devient moins homogène et la pâte fermentée peut être envisagée comme un milieu triphasique avec des cellules de gaz connexes séparées par des films liquides, et enchâssées dans un réseau amidon-gluten. Après pétrissage et repos, le façonnage peut induire une diminution de la porosité, par expulsion de gaz, ce qui modifiera la structure alvéolaire. Lors de cette étape de mise en forme, si les rouleaux du laminoirs sont plus serrés la structure alvéolaire sera plus homogène.

En dépit d'une capacité de production gazeuse supérieure au témoin, ces pâtes enrichies en fibres présentent une faible rétention gazeuse, associée à un déficit de stabilité très préoccupant lors de l'enfournement. A l'échelle macroscopique, l'évolution de la pâte durant la fermentation peut être suivie, par caméra vidéo et l'analyse des images ainsi acquises montre que si la porosité de deux pâtes, l'une standard et l'autre additionnée de fibres, suit sensiblement la même cinétique, en revanche, l'évolution des rapports de forme suggère que le pâton contenant des fibres perd sa stabilité plus rapidement et irréversiblement, comme en atteste sa forme finale (Figure 3).

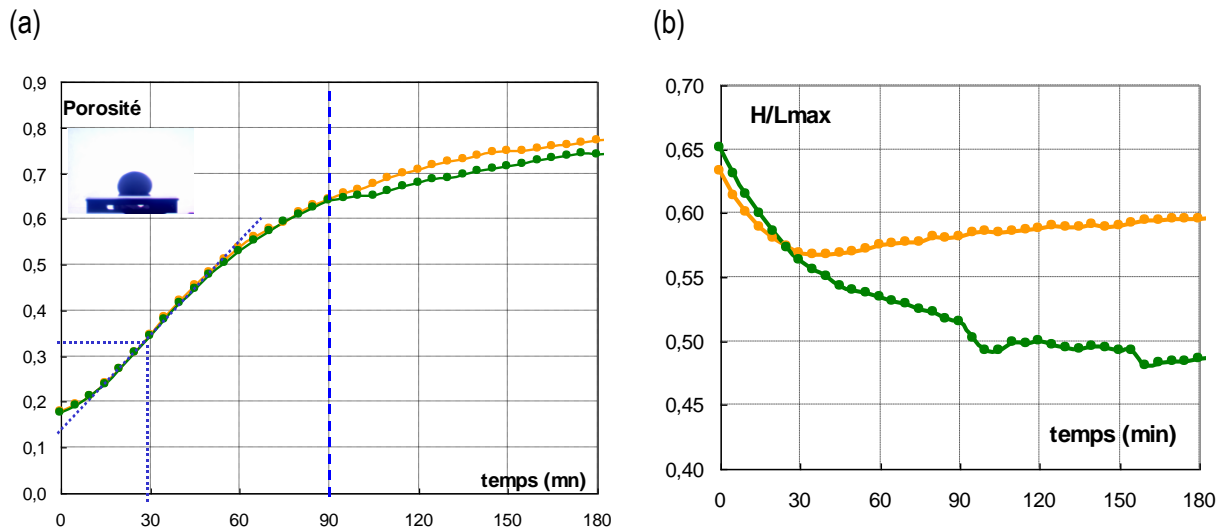


Figure 3: Evolution en cours de fermentation (a) de la porosité et (b) du rapport de forme, ou stabilité d'un pâton (●, pâte 1), (●, pâte 2, additionnée de fibres) selon le protocole mis au point et validé par Shehzad et al. (2010).

L'analyse des pratiques boulangères montre que pour limiter cette perte de stabilité, ou de « force », le professionnel met au four la pâte enrichie en fibres de façon plus précoce que son homologue standard, pain courant ou de tradition; il en résulte donc, comme le montrent les cinétiques de porosité, une densité plus élevée que celle d'une pâte standard, et qui va se répercuter sur le produit final, après cuisson. En outre, la cuisson d'un pain de densité plus élevée étant plus lente (Rouillé et al., 2010), il peut en résulter une sur-cuisson de la croûte. De plus, l'effondrement de la pâte peut être interprété par une modification de la structure alvéolaire en présence de fibres, soit par limitation du mouvement ascendant des bulles de gaz produites pendant la fermentation, soit à une coalescence accrue des bulles, les fibres déstabilisant les films liquides interfaciaux, ce qui conduit à une alvéolation plus grossière. Ces deux hypothèses font appel au rôle des propriétés rhéologiques de la pâte et à leur modification lorsqu'elles sont additionnées de fibres.

Durant la cuisson, les pains riches en fibres ne s'expansent pas autant que les pains blancs, certains présentent un affaissement de la section transversale très pénalisant sur la structure de mie. Enfin l'enrichissement en sons de blé s'accompagne d'une coloration excessive de la croûte.

En ce qui concerne la pâte à **biscuits**, le pétrissage joue un rôle similaire à celui qu'il a pour la pâte à pain. Cependant, il est effectué de manière moins intensive et les farines utilisées ont une teneur en protéines plus faible et un niveau de dégradation de l'amidon plus élevé. La «pâte dure» laminée est la plus hydratée et nécessite un développement minimal du réseau de gluten afin de former une feuille de pâte sur laquelle les morceaux de pâte à biscuits seront coupés. Un excès de développement du réseau de gluten peut augmenter le risque de fissuration du biscuit. Les propriétés de la pâte à biscuit sont principalement affectées par les opérations de façonnage, telles que le laminage, la coupe ou le moulage. La structure cellulaire des biscuits est obtenue pendant la cuisson grâce à la production de gaz par les poudres à lever; ce qui conduit à une densité plus élevée que dans le cas du pain, mais une structure alvéolaire fine et homogène. L'addition de sons de blé accroît la perception de dureté du biscuit, et ce d'autant plus que la taille des sons est faible (Sozer et al., 2014), mais ces inconvénients peuvent être réduits par une hydratation adaptée, en prenant en compte la capacité de rétention d'eau des fibres, quelle que soit leur origine (Villeméjane et al., 2013).

Au cours de l'**extrusion**, la farine est transformée en une masse d'amidon fondu (Figure 2), une matrice continue dans laquelle les macromolécules peuvent être dégradées à cause du cisaillement. La

structure alvéolaire est créée par expansion du fondu à la sortie de l'extrudeuse. L'expansion est une succession de mécanismes se déroulant sur des échelles de temps très courtes, quelques fractions de secondes : les bulles se créent dans la masse d'amidon fondue et grossissent avant de fusionner, à mesure que la masse fondue s'effondre, ou se figent quand l'amidon devient vitreux, ce qui conduit à des structures alvéolaires très hétérogènes. L'incorporation de fibres alimentaires dans les produits extrudés conduit souvent à une moindre expansion et à des textures moins prisées par les consommateurs. Néanmoins, l'addition de fibres solubles conduit à une expansion plus élevée et affecte donc moins la densité des produits extrudés que les fibres insolubles (Robin et al., 2012). Ces différences peuvent être expliquées par leurs interactions avec l'amidon, et par les différences d'absorption de l'eau mais aussi par des transformations physicochimiques. En effet, l'extrusion de fibres provoque un accroissement de leur solubilité, en raison du cisaillement intense (Ralet et al., 1990) et permet donc d'accroître l'expansion des aliments extrudés enrichis en fibres, et d'améliorer leur texture.

2. Propriétés rhéologiques

La qualité de la farine de blé est principalement perçue à partir des propriétés rhéologiques de la pâte qu'elle va former. C'est pour cette raison qu'ont été développées des méthodes de mesure empiriques, telles que le farinographe® et l'extensographe® (Brabender), l'alvéographe® et le rhéofermentomètre® (Chopin), effectuées dans des conditions censées imiter le procédé. Cependant, leurs résultats sont purement comparatifs et ne peuvent être interprétés directement, car ces tests impliquent différents modes de contrainte, non contrôlés, et ne peuvent pas conduire à une détermination pertinente et robuste des propriétés rhéologiques. Par conséquent, malgré leur popularité, la comparaison entre les résultats obtenus par ces méthodes et leur utilisation pour prédire les performances de farines est difficile, et ce d'autant plus quand il s'agit de déterminer l'impact de l'addition de fibres, en panification notamment.

La rhéologie est la science des déformations et des écoulements de la matière, elle vise à relier les propriétés d'écoulement du matériau avec sa structure et son comportement au cours du procédé, en déterminant des lois de comportement, également appelées modèles rhéologiques. Pour ce faire, des expériences sont effectuées en soumettant le produit étudié à des tests rhéologiques, classés en fonction du mode de déformation mis en oeuvre, de la variable imposée et de sa variation dans le temps. La contrainte σ peut être appliquée en cisaillement ou en extension, comme lors du pétrissage de la pâte ou de son façonnage, respectivement. Le matériau peut être soumis à une déformation donnée, il est alors nécessaire de mesurer la contrainte. Enfin, les variations dans le temps peuvent être périodiques (test dynamique ou oscillatoire) ou permanentes (test de fluage). Cette approche a été considérablement développée dans la science des polymères en général. Comme les polymères, lors de leur transformation, la pâte de farines de céréales est soumise à une large plage de valeurs de contrainte et de déformation, non seulement en cisaillement mais aussi, et c'est aussi important, en extension. Cependant, l'application de la rhéologie aux biopolymères et aux céréales et l'interprétation des résultats est moins simple que pour des matériaux polymères, en raison du nombre de composants, de leur variabilité, de leur sensibilité thermique, de leur comportement inattendu lié à une grande réactivité, etc.

Les mesures dynamiques sont difficiles à utiliser en pratique, car elles sont obtenues en faibles déformations, loin des conditions rencontrées dans le procédé. Cependant, en utilisant l'analyse thermo-mécanique dynamique (DMA), le comportement de la pâte pendant la cuisson peut être évalué en suivant les variations du module élastique E' avec la température. Les courbes $E'(T)$ présentent des formes similaires, quelle que soit la composition de la pâte, avec une valeur minimale (E'_{\min}) obtenue autour de 45 °C et une valeur maximale (E'_{\max}) proche de 70 °C. Le rapport (E'_{\max} / E'_{\min}) reflète

l'amplitude des modifications structurales, et, en premier lieu, l'agrégation des protéines de gluten (réticulation du réseau) (Rouillé et al., 2010).

Les résultats de mesures rhéologiques précises, effectuées en grandes déformations, sont liés au comportement de la pâte dans le procédé. Pour une farine de blé, lors du pétrissage, les variations de viscosité η en cisaillement reflètent le degré de réticulation du réseau de gluten. Cette propriété peut être déterminée par des tests de fluage en rhéométrie rotationnelle. Les résultats peuvent être représentés par une loi de puissance (Eq. 3.1), pour les valeurs de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ les plus élevées.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma} = Kc \cdot \dot{\gamma}^{n+1} \quad (3.1)$$

Kc est appelée consistance de la pâte et n son indice d'écoulement. En pratique, pour effectuer une mesure rhéologique de la pâte, il convient d'abord d'en préparer une quantité de quelques grammes grâce à de petits pétrins de laboratoire, comme le Mixograph®. La mesure continue du couple permet de déterminer le temps de formation du pic, qui reflète la vitesse d'obtention de la consistance optimale de la pâte (Gras et al., 2000). Ce pic très visible avec l'emploi de farines raffinées pauvres en fibres, reflète la formation du réseau de gluten. Lorsque des fibres sont ajoutées à la pâte, le temps de formation de ce pic diminue et ce d'autant plus que la quantité d'eau absorbée par les fibres est élevée (Figure 4).

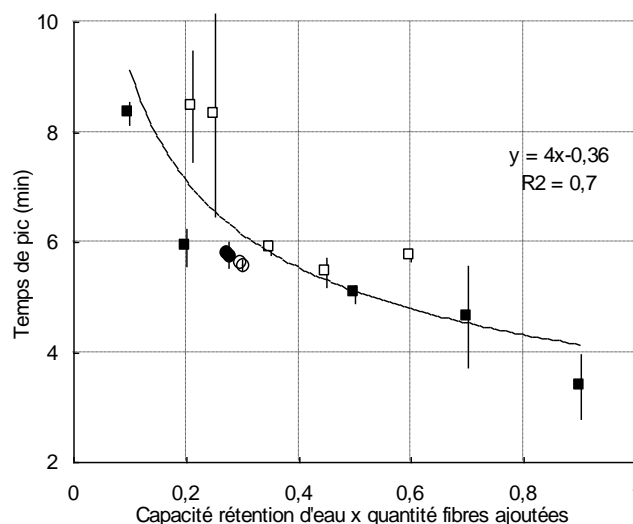


Figure 4 : Variations du temps d'obtention du pic de consistance de pâtes en fonction de la quantité théorique d'eau absorbée par les fibres, ajoutée en des quantités différentes pour des fibres de même type (symboles identiques) ou des fibres de nature et origine différentes (symboles différents). D'après Bonnard-Ducasse et al., (2010).

Ce résultat est interprété par l'absorption massive et rapide d'eau par les fibres, qui, une fois gonflées, accroissent la viscosité de la pâte. Ces hypothèses sont avérées par des mesures rhéologiques plus précises, comme des tests de fluage en cisaillement, réalisés sur un rhéomètre cône/plan, pour différentes valeurs de contrainte imposées ($\sigma=10\text{-}10^3$ Pa). Une fois le régime d'écoulement établi, la courbe de déformation mesurée en fonction du temps devient une droite dont la pente est la vitesse de

cisaillement $\dot{\gamma}$. Chaque test permet donc de déterminer un couple de valeurs (η , $\dot{\gamma}$), qui, une fois rassemblées, représente la courbe d'écoulement de la pâte (Figure 5). En pratique, cette mesure est délicate car, en raison de la réactivité des composants de la pâte, le régime d'écoulement permanent n'est véritablement atteint qu'au bout d'un temps élevé (> 1h).

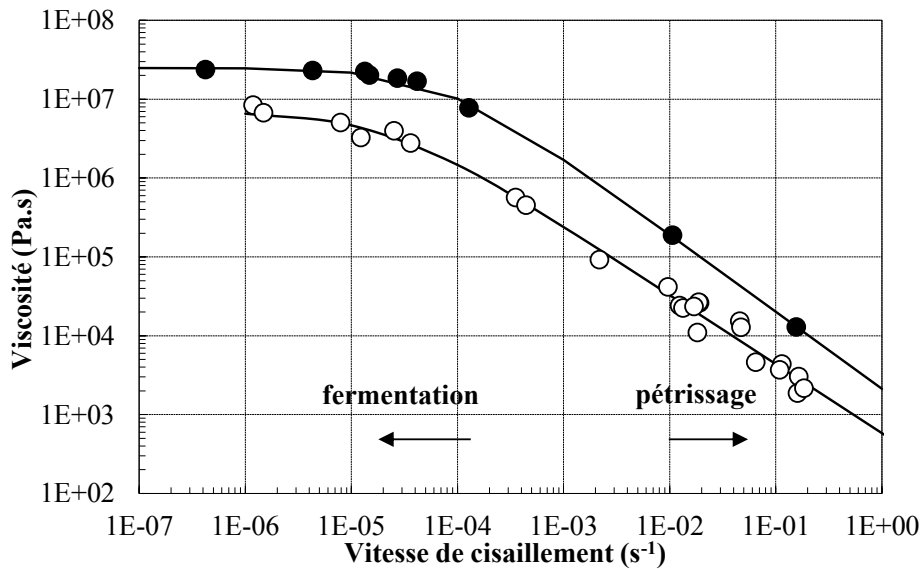


Figure 5: Courbes d'écoulement (viscosité en fonction de vitesse de cisaillement) pour une pâte de farine de blé

standard (O) ou contenant 9% de fibres (●). Les faibles vitesses ($\dot{\gamma} \leq 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) sont typiques des conditions régnant pendant les opérations de fermentation, alors que pour le pétrissage les vitesses sont plus élevées ($>10^{-2} \text{ s}^{-1}$), et la courbe peut être représentée par l'eq. 3.1. D'après Bonnard-Ducasse et al. (2010).

La comparaison des deux courbes montre bien que :

- La viscosité de la pâte contenant des fibres est largement plus élevée aux faibles vitesses, ce qui peut freiner l'ascension des bulles gazeuses lors de la fermentation, et donc favoriser la perte de stabilité de la pâte, comme observé lors de la fermentation (Figure 3b);
- La différence de viscosité s'amenuise aux valeurs plus élevées de la vitesse, ce qui est vérifié en pratique par des comportements assez proches lors du pétrissage des pâtes.

Les fibres ajoutées à la pâte se comportent donc, en première approche, comme des particules en suspension dans une matrice visqueuse; cependant, la présence de fibres modifie la formation du réseau de gluten, soit par absorption d'eau, soit par encombrement stérique. Pour permettre une formation du réseau de gluten malgré la présence de fibres absorbant l'eau préférentiellement, des mesures correctives (addition d'eau supplémentaire, pétrissage modulé) permettent de limiter les effets défavorables sur la texture du pain.

La viscosité élongationnelle, ou en extension, notée η_E , est la propriété qui se rapporte à la résistance de la pâte lors de la croissance de bulles de gaz pendant la fermentation. Elle a souvent été considérée comme une variable importante pour l'évaluation des performances de la farine en panification. Elle est déterminée par un test de compression uniaxiale dans des conditions lubrifiées (LSF, Chatraei et al., 1981). Bien que la pâte n'atteigne jamais l'état d'équilibre et se comporte davantage comme un solide mou que comme un liquide visqueux, les mesures de la contrainte σ , et de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_b$, permettent de déterminer la viscosité élongationnelle. Pour une déformation équi-biaxiale ϵ_b constante, une loi de puissance semblable à la deuxième partie de l'équation (3.1) peut être proposée:

$$\eta_E = K (\dot{\epsilon}_b)^{m-1} \quad (3.2)$$

où K et m sont des indices de consistance et d'écoulement, respectivement, définis pour une déformation constante.

Pour des pâtes pétries dans différentes conditions, ou enrichies en fibres soluble ou insolubles, les valeurs de K ainsi mesurées, et de (E'_{\max} / E'_{\min}) , déterminées en DMA, ont été normalisées par les valeurs de propriétés rhéologiques K_0 et $(E'_{\max} / E'_{\min})_0$ des pâtes standard, pour tenir compte des différentes origines de farine de blé. Une corrélation est ainsi établie entre la consistance normalisée et le rapport du module de stockage (E'_{\max} / E'_{\min}) normalisé. Ce résultat suggère que plus la viscosité d'élongation est grande, plus la pâte, à l'issue du pétrissage, est structurée (le réseau de gluten est réticulé) (Figure 6a).

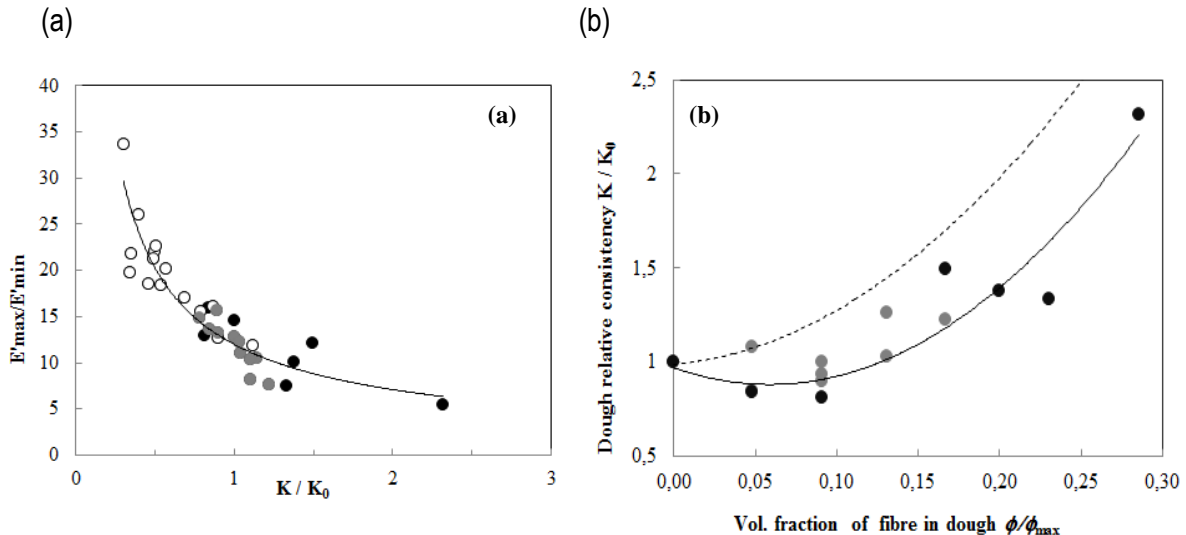


Figure 6 : Variations des propriétés rhéologiques de la pâte : (a) module (E'_{\max} / E'_{\min}) , faible déformation en fonction de la consistance élongationnelle normalisée K / K_0 ($r^2=0,84$), et (b) consistance élongationnelle normalisée K/K_0 en fonction de la fraction volumique relative de fibres dans la pâte ($r^2 = 0,86$). La ligne pointillée fait référence au modèle de suspension de sphères, avec une fraction volumique maximale d'empilement de 0,64. La pâte est préparée selon diverses conditions de pétrissage (O, données de (Shehzad et al., 2012)), avec différentes quantités de fibres insolubles (●, son de blé [Le Bleis et al., 2015]) et de fibres solubles (●, maltodextrines, pectines et inulines (Arufe-Vilas et al., 2018)). La consistance K est définie dans l'équation. (3.2), et K_0 est sa valeur pour la pâte de farine de blé initiale mélangée dans des conditions de pétrissage standard, comme indiqué dans les références mentionnées.

Par sa résistance à la croissance et à la coalescence des bulles, la viscosité élongationnelle contribue à stabiliser la pâte pendant la fermentation. Par conséquent, son augmentation avec l'ajout de fibres (Figure 6b), solubles ou insolubles, contribue probablement à l'augmentation de la densité des pains enrichis en fibres alimentaires.

En effet, sauf à examiner de près les mécanismes de formation de la croûte, le procédé de cuisson modifie peu la structure alvéolaire de la pâte établie après repos (Della Valle et al., 2014). Du point de vue de l'obtention d'une texture, il s'apparente donc plus à une opération où la structure initialement acquise est figée après franchissement de l'intervalle $[60, 75^\circ\text{C}]$ des températures de modification des constituants (réticulation du gluten, gonflement des grains d'amidon, Rouillé et al., 2010). La présence de fibres, encore une fois par leur capacité d'absorption d'eau, viendra éventuellement modifier légèrement les valeurs de ces températures, sans toutefois bouleverser les mécanismes de cuisson de la pâte.

3. Texture

La texture peut être définie comme la perception de propriétés mécaniques, soit par un instrument, soit par les sens (voir, entendre, toucher) et la sensation en bouche. De prime abord, cette propriété dépend

principalement de la teneur en eau (MC) et de la densité ou masse volumique (ρ^*), ce qui permet de distinguer quatre grandes familles d'aliments céréaliers illustrées par des exemples courants: snack ou pain plat extrudé (MC faible, ρ^* faible), pain (MC élevée, ρ^* faible), biscuit (MC faible, ρ^* élevé), nouilles cuites (MC élevée, ρ^* élevé). Plus précisément, les propriétés mécaniques des aliments à base de céréales sont fonction de leur densité, de leur structure alvéolaire et des propriétés intrinsèques des matériaux qui les constituent. Ces dernières dépendent de la morphologie du matériau constitutif et des propriétés de chaque composant.

La structure alvéolaire des pains est appréhendée par analyse des images de tranches obtenues au moyen d'un scanner. Les images sont analysées selon des opérations mathématiques dont le principe de base est de déterminer une courbe de type granulométrique, à partir des différents niveaux de gris représentant les alvéoles et les parois. Une analyse en composantes principales est ensuite effectuée sur les courbes granulométriques de chaque image de mie. Elle conduit à une carte de ressemblance qui permet de situer la texture visuelle des mies de pain (Figure 7). Cette carte montre que, pour des pains de même densité, des mies peuvent avoir une structure alvéolaire très différente, comme par exemple les pains 4 (Pain de Tradition Française) et 3 (Pain Courant Français dense). De plus, les pains contenant une plus grande quantité de fibres sont localisés vers le quart supérieur gauche, ce qui confirme que l'addition de fibres conduit à des mies caractérisées par un alvéolage à la fois plus grossier, avec des parois d'alvéoles plus épaisses, mais aussi plus homogène, ou régulier.

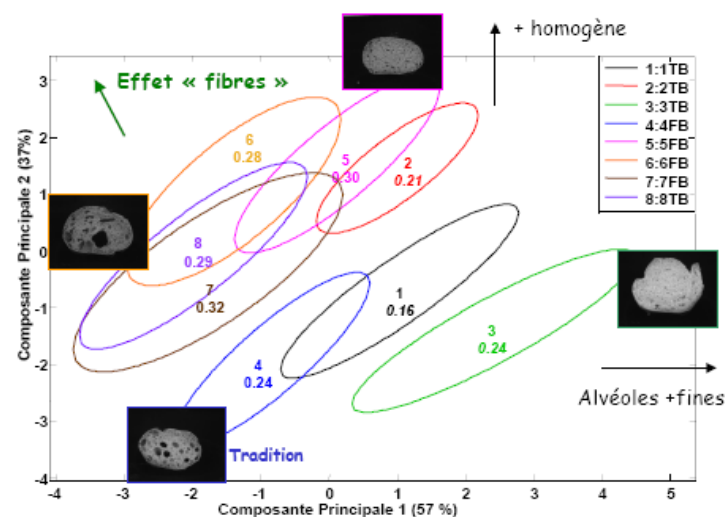


Figure 7 : Carte de ressemblance des images de mie de pains additionnés de fibres. Le chiffre ajouté à côté du n° du pain indique la valeur de sa masse volumique ρ^* (kg.m⁻³). L'axe horizontal (CP1) indique la finesse des alvéoles, alors que l'axe vertical indique plutôt l'homogénéité de leur distribution. Les ellipses contiennent l'ensemble des résultats obtenus pour des tranches d'un même pain. La méthode d'analyse d'images est présentée en détail par Lassoued et al. (2007).

Cette distinction visuelle étant quantifiée, l'appréciation de la texture est ensuite complétée par l'évaluation du comportement mécanique à l'aide d'un test mécanique. Ce test peut être de compression simple, s'il s'agit de la mie ou d'un morceau d'aliment de forme géométrique régulière. Il doit être adapté dans le cas de forme plus complexe, comme, par exemple, pour la croûte du pain, à l'aide du test de multi-indentation spécialement mis au point pour des objets à surface irrégulières, tels que les aliments solides (Chaunier et al., 2010). Il est alors possible d'accéder à la notion de contraste de texture (croûte croustillante vs mie moelleuse). Les valeurs de module apparent ainsi déterminées sont plus élevées pour les pains contenant des fibres, ce qui indique que ceux-ci ont des mies plus fermes mais aussi des croûtes plus dures (Figure 8).

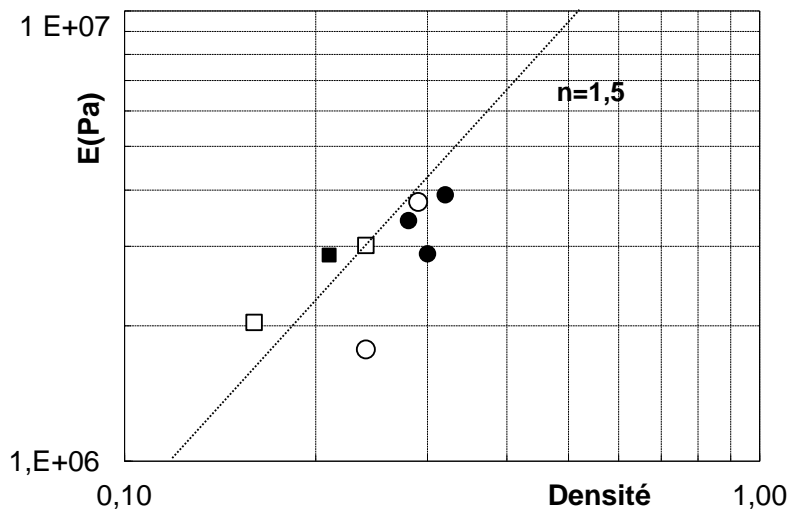


Figure 8 : Exemple de variations du module apparent E déterminé par test de multi-indentation des pains en fonction de leur masse volumique (kg.m^{-3}) : la droite en pointillés correspond au modèle des mousses solides. Les symboles remplis correspondent aux pains contenant des fibres

Les valeurs du module sont corrélées avec celles de la densité, même si, encore une fois, la densité seule n'explique pas toutes les variations de texture rencontrées; cette corrélation suivant une loi puissance est en adéquation avec le modèle des mousses solides (Gibson et Ashby, 1997). La dispersion des points (Figure 8) est attribuable à l'hétérogénéité du matériau aux échelles macroscopique (mie et croûte) et microscopique (parois solides contenant ou non des fibres), ainsi qu'au caractère approximatif du test de multi-indentation, par comparaison avec un test de compression simple. Quelle que soit leur interprétation, ces résultats confirment bien que l'addition de fibres atténue le contraste de texture des pains.

Conclusion

L'ajout de fibres alimentaires à la farine de blé est une voie couramment envisagée pour accroître la teneur en fibres de notre prise alimentaire. De nombreux travaux ont montré l'amélioration des propriétés nutritionnelles qui pouvait en être attendue, mais aussi la perte de propriétés sensorielles, sans toutefois en fournir d'explication précise. Nous avons tenté de montrer comment peuvent être caractérisées les modifications du produit final par une évaluation de sa texture, mais aussi, comment sont affectées, par l'addition de fibres, les différentes étapes du processus d'élaboration, tout en nous efforçant de confronter les résultats avec la réalité professionnelle; à cette fin, des expérimentations peuvent être mises en œuvre pour reproduire ces opérations à l'échelle du laboratoire et souligner l'importance du phénomène d'alvéolation.

C'est à cette étape que les observations par micro-tomographie RX ont été précieuses pour proposer des mécanismes et mettre en évidence les variables qui les contrôlent, à l'instar d'autres domaines de la physique consacrés aux mousses solides. Enfin, des mesures rhéologiques précises permettent de souligner l'accroissement de la viscosité de la pâte, à l'instar d'une suspension de particules dont la fraction solide est accrue. Outre un ensemble d'explications des phénomènes physiques développés au cours de la panification, ces approches permettent également de proposer des moyens pour favoriser, en pratique, l'incorporation de fibres alimentaires en panification. L'enjeu est d'autant plus important en France, où, pour des raisons culturelles, la baguette croustillante est peu compatible avec l'utilisation de quantités importantes de fibres.

Les opérations de transformation sont différentes pour des produits tels que les biscuits, les produits de grignotage extrudés, mais les mécanismes de génération de la texture seront affectés par l'addition de fibres de la même façon que pour le pain. Enfin, en ce qui concerne les matières premières, nous n'avons pas traité de sources de céréales autres que le blé, ni d'autres ingrédients (par exemple, le sucre, les matières grasses, etc.), parce que nous sommes convaincus que l'approche décrite ici, peut s'appliquer à un large éventail de recettes et de composants. Enfin, rappelons qu'une exploitation plus complète des grains (utilisation de grains entiers), peut contribuer à une alimentation plus saine, en favorisant l'accroissement de la consommation de fibres alimentaires et de micronutriments, tout en faisant face aux défis du développement durable.

Références bibliographiques.

- Arufe-Vilas S., Auzeloux-Savary I., Chiron H., Doré J., Saulnier L., Della Valle G., 2017. Processing & rheological properties of wheat flour dough and bread containing high levels of soluble fibres blends. *Food Research International* 97, 123-132.
- Bertrais S., Castetbon K., Deheeger M., Hercberg S., Rolland Cachera M.-F., Savanovitch C., 2005. Situation et évolution des apports alimentaires de la population en France, 1997-2003, in, Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice (Fra).
- Bonnand-Ducasse M., Della Valle G., Lefebvre J., Saulnier L., 2010. Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties. *Journal of Cereal Science* 52, 200-206.
- Chatraei S.H., Macosko C.W., Winter H.H., 1981 Lubricated squeezing flow: a new biaxial extensional rheometer. *Journal of Rheology* 25, 433-443.
- Chaunier L., Chiron H., Della Valle G., Rouaud O., Rzigue A., Shehzad A., 2014. Assessment of French bread texture by a multi-indentation test. *Journal of Food Engineering* 122, 92-98
- Courtin C., Delcour J., 2002. Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread-making. *Journal of Cereal Science* 35, 225-243.
- Della Valle, G., Chiron H., Cicerelli L., Kansou K., Katina K., Ndiaye A., Whitworth M., Poutanen K., 2014. Basic knowledge models for the design of bread texture. *Trends in Food Science and Technology*, 36, 5-14
- Della Valle G., Chiron H., Le-Bail A., Saulnier L., 2019. Food structure development in cereal and snack products. In F. Styropoulos, A. Lazidis, I.T. Norton (Eds) "Handbook on food structure development". RSC, London
- Gibson L.J., Ashby M.F., 1997. Cellular solids, structure and properties. Cambridge Press University.
- Gras P.W., Carpenter H.C., Anderssen R.S., 2000. Modelling the developmental rheology of wheat flour dough using extension tests. *Journal of Cereal Science*, 31, 1-13.
- Lassoued N., Babin P., Della Valle G., Devaux M.F., Réguerre A.L., 2007. Granulometry of bread crumb grain: contributions of 2D and 3D image analysis at different scale. *Food Research International* 40, 1087-1097
- Le Bleis F., Chaunier L., Chiron H., Della Valle G., Saulnier L., 2015. Processing wheat flour dough and French bread enriched with wheat bran. *Journal of Cereal Science* 65, 167-174.
- Noort M.W.J., van Haaster D., Hemery Y., Schols H.A., Hamer R.J., 2010. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality - Evidence for fibre-protein interactions. *Journal of Cereal Science* 52, 59-64
- Pomeranz Y., Shogren M.D., Finney K.F., Bechtel D.B., 1977. Fiber in breadmaking – Effects on functional properties. *Cereal Chemistry* 54, 25-41
- Ralet M.C., Thibault J.F., Della-Valle G., 1990. Influence of extrusion-cooking on the physico-chemical properties of wheat bran. *Journal of Cereal Science* 11, 249-259
- Robin F., Schuchmann H.P., Palzer S., 2012. Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology* 28, 23-32

Rouillé J., Chiron H., Colonna P., Della Valle G., Lourdin D., 2010. Dough/crumb transition during French bread baking. *Journal of Cereal Science* 52,161-169

Saulnier L., Micard V., Della Valle G., 2014. Structure du pain et index glycémique. *Cahiers de nutrition et diététique*, 49, 61-66.

Shehzad A., Chiron H., Della Valle G., Kansou K., Ndiaye A., Réguerre A.L., 2010. Porosity and stability of bread dough determined by video image analysis for different compositions and mixing conditions. *Food Research International* 43, 1999-2005.

Sozer N, Cicerelli L., Heiniö R-L., Poutanen K., 2014. Effect of wheat bran addition on in vitro starch digestibility, physicomechanical and sensory properties of biscuits. *Journal of Cereal Science* 60,105-113

Villemejeane C., Roussel P., Berland S., Aymard P., Michon C., 2013. Technological and sensory tools to characterize the consistency and performance of fibre-enriched biscuit doughs. *Journal of Cereal Science* 57,551-559

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).