

Variétés Chifaa et Bounejmate : Caractérisation et Etude de leur effet sur la structure alvéolaire du pain par analyse d'image numérique

Salih Ghizlane ⁽¹⁾, Alami Randa ⁽²⁾, Imani Yasmina ⁽²⁾ et Jilal Abderrazek ⁽¹⁾

Ghizlane.salih@inra.ma

1 : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) : Avenue la victoire BP 415
Rabat.

2 : Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV) : Madinat Al Irfane, BP 6202
Rabat.

Résumé

La structure alvéolaire des produits de panification constitue un des facteurs que la profession cherche à maîtriser. L'objectif de ce travail est d'élucider l'effet de cet ajout à travers l'évaluation de la structure alvéolaire du pain par analyse d'image. La variété d'orge à grains nus « Chifaa » et la variété d'avoine à grains nus « Bounejmate » ont été utilisées à cet effet. Le travail consiste à une caractérisation des critères physico-chimiques des deux variétés suivi de la constitution des mélanges à partir d'une farine commerciale de blé tendre et des farines complètes d'orge et d'avoine, respectivement, comme suit ; (100% blé), (orge ou avoine/blé) : (10/90), (20/80) et (30/70). Sept pains (6 pains mélanges et le pain contrôle) ont été fabriqués à l'aide d'une machine à pain. Des tranches des pains obtenus ont subies par la suite une analyse d'image pour les critères suivants (développement de la mie, aire total des alvéoles, % d'alvéoles dans la mie, nombre d'alvéoles). Les résultats ont montré une variabilité dans la composition des variétés utilisées, en effet la variété « Chifaa » est marquée par une forte teneur en β -glucane (7,9%) et la variété « Bounejmate » est marquée par une forte teneur en protéine (17,6%) et en lipides (10,4%). L'ajout d'avoine a induit une diminution de 44.7% du développement de la mie à partir de 10% d'ajout alors que l'orge n'a montré un effet similaire qu'à partir de 30% d'ajout. En outre, l'orge à 30% d'ajout a montré plus d'effet négatif sur les alvéoles de la mie qui diminuent jusqu'à disparition de la majorité.

Mot clé : pain composite, orge, avoine, structure alvéolaire, analyse d'image.

Chifaa and Bounejmate varieties: Characterization and study of their effect on the alveolar structure of bread by digital image analysis

Abstract

The alveolar structure of bread products is one of the factors that the bakery industry seeks to control. The objective of this work is to elucidate the effect of this parameter through the evaluation of the alveolar structure of bread by image analysis. The naked barley variety "Chifaa" and the naked oat variety "Bounejmate" were used for this purpose. The work consists on the characterisation of the physical and chemical criteria regarding these two varieties followed by the constitution of mixtures from a commercial flour of soft wheat and complete flours of barley and oat, respectively, as follows: (100% wheat), (barley or oats/wheat) : (10/90), (20/80) and (30/70). Seven loaves of bread (6 mixed loaves and the control loaf) were made using a bread machine. Slices of the obtained loaves were then analysed by image analysis for the following criteria (crumb development, total area of the alveoli, % alveoli in the crumb, number of alveoli). The results showed variability in the composition of the studied varieties. The variety "Chifaa" is marked by a high content of β -glucan (7.9%) and the variety "Bounejmate" is marked by a high content of protein (17.6%) and fat (10.4%). The addition of oat induced a 44.7% decrease in crumb development from 10% addition, whereas barley showed a similar effect at 30% addition. Moreover, barley at 30% addition had more negative effect on the crumb alveoli which decrease until disappearance of the majority.

Keywords: composite bread, barley, oat, alveolar structure, image analysis.

الصنف شفاء وبونجمات: تحديد خصائصهما ودراسة تأثيرهما على الهيكل الخلوي للخبز المركب عن طريق تحليل الصور الرقمية

غزلان صالح، راندا العالمي، إيماني ياسمين، عبد الرزاق جلال

ملخص

الهيكل الخلوي لمنتجات الخبز هو أحد العوامل الذي يسعى مهنيي المخازن التحكم فيها. الهدف من هذه الدراسة توضيح تأثير هذه الإضافة من خلال تقييم الهيكل الخلوي للخبز عن طريق تحليل الصور الرقمية. استخدم لهذا الغرض صنف (الشفاء) من حبوب الشعير العاري وصنف (بونجمات) من حبوب الشوفان العاري. ويرتكز العمل على تحديد المعايير الفيزيائية والكيميائية للصنفين يليه دراسة خليط من دقيق القمح التجاري ودقيق الشعير والشوفان الكاملين، على النحو التالي: (100% القمح)، وخليط الشعير أو الشوفان/القمح: (90/10)، و(80/20)، و(70/30). الخبز انجاز تم السبعة (6 خبز مختلطة وخبز شاهد) باستخدام آلة الخبز. تمت دراسة شرائح الخبز الناتج عن ذلك عن طريق تحليل الصور الرقمية وفقاً للمعايير التالية (طول الشريحة، إجمالي مساحة الألفيولي، نسبة الألفيولي في الشريحة، وعدد الألفيولي). أظهرت النتائج اختلافاً في تكوين الأصناف المستخدمة، والواقع أن صنف (الشفاء) يتميز بنسبة عالية من البيتاغلوكان (7.9%)، كما تميز الصنف بونجمات بنسبة عالية من البروتين (17.6%) والدهون (10.4%). أدت إضافة الشوفان إلى انخفاض بنسبة 44.7% في طول الشريحة عند إضافة 10% في حين أظهر الشعير تأثير مماثل عند إضافة 30%. وخاصة أنه كان لإضافة 30% من الشعير تأثير سلبي أكبر على عدد الألفيولي التي انخفضت إلى أن اختفت غالبية الخلايا.

الكلمات المفتاحية: الخبز المركب، الشعير، الشوفان، الهيكل الخلوي، تحليل الصور الرقمية.

Introduction

Le pain est l'un des produits qui devraient être pris en considération car c'est un aliment qui contribue significativement au rééquilibrage de la ration alimentaire vers une consommation plus importante en composés bioactifs (polyphénols, fibres soluble et insoluble). Toutefois, l'utilisation croissante et excessive des farines blanches a conduit à une baisse de la qualité nutritionnelle par rapport au pain élaboré avec des céréales complètes. Changer sa composition semble être une méthode efficace pour améliorer l'alimentation (Spiteri et Soler, 2018). Néanmoins, de telles modifications dans les aliments peuvent également avoir un impact sur l'acceptation des produits reformulés en raison des changements dans la saveur, la texture et d'autres attributs (Almeida, Chang et Steel, 2013).

L'augmentation de la teneur en β -glucane de céréales dans les pains est une stratégie visant à améliorer leur qualité nutritionnelle. Les β -glucanes des céréales sont connus pour leur capacité à réduire les taux de glucose postprandial et la réponse à l'insuline, ainsi que les taux de cholestérol sérique (Brennan et Cleary, 2005). Des études (Ekström et al, 2017) ont montré que les β -glucanes contenues dans le pain ont réduit l'indice glycémique de 32 à 37 % par rapport au pain de référence (pain blanc). La forte teneur en β -glucane de l'orge (2,5 à 11,3 %) et de l'avoine (2,2 à 7,8 %) comparativement au blé (0, à 1,4 %) a rendu ces deux céréales de plus en plus intéressantes pour la production de pain (Rui-Ling et al, 2012).

Les variétés d'orge et d'avoine à grains nus, présentent un phénotype distinct dans lequel l'enveloppe recouvrant les grains est séparée par battage lors de la récolte (Kaizheng Zhang et al, 2019). Ce type de grain présente une valeur alimentaire et économique plus intéressante pour les agriculteurs, les transformateurs et le consommateur. En effet, dépourvus de leur enveloppe les grains occupent moins d'espace de stockage ce qui réduit le coût de celui-ci ainsi que le coût d'expédition pour les agriculteurs et les transformateurs (Vernon, 2011). Les grains nus ne nécessitent pas le décorticage, ce qui réduit également le coût énergétique dans les sites de transformations. Les variétés à grains nus présentent l'opportunité de développement de produits spécifiques et encouragent les investisseurs sachant qu'ils n'auront pas besoin d'être équiper de matériel coûteux pour le décorticage et le triage. Sur le plan alimentaire, l'absence de l'opération de triage permet de conserver l'intégrité du grain et donc de préserver au maximum son contenu nutritionnel (Shaveta, 2019). L'orge à grain nu est riches en β -glucane, en acides aminées et en fibres alimentaires totales par rapport à ses types vêtus (Kaizheng Zhang et al, 2019, Shaveta, 2019) et présente une plus grande énergie digestible (Shaveta, 2019). L'incorporation des fibres dans le pain modifie la mise en œuvre des procédés technologiques (consistance de la pâte) et la texture des produits finaux (alvéolée, croustillant, volume du pain ...). Cet impact sur la texture peut entraîner une moindre acceptabilité des produits par le consommateur. Ainsi, la reformulation des aliments ne peut produire les effets souhaités que si les produits dont la composition a été modifiée répondent aux attentes du consommateur (De Steur et al, 2010). L'étude de l'effet des mélanges de farine de blé avec la farine d'avoine et la farine d'orge a été élucidée à travers des analyses rhéologiques de la pâte et/ou des tests sensoriels du produit fini. La structure alvéolaire du pain est un facteur important et joue un rôle considérable dans l'acceptation des produits de panification, son évaluation se base le plus souvent sur des tests qualitatifs et subjectifs. L'objectif du présent travail est

de (1) caractériser et valoriser deux variétés INRA à grains nus d'orge et d'avoine en panification et (2) étudier l'effet des mélanges (blé/orge) et (blé/avoine) sur la qualité du pain à travers l'analyse quantitative de sa structure alvéolaire par analyse d'image numérique.

Matériel et méthode

Mouture et Caractéristiques physiques des deux variétés

Poids spécifique

Le poids spécifique ou poids à l'hectolitre qui représente la masse en kg d'un hectolitre de grains a été mesuré trois fois pour chaque variété à l'aide d'un Nilemalitre suivant la norme marocaine 08.1.203.

Taille des grains et poids de mille grains

Le poids de mille grains a été obtenu à l'aide du logiciel « GrainScan ». GrainScan est un logiciel développé par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Les résultats sont exportés en fichier Excel et traités. La méthode est précise, non destructive et rapide (Whan et al, 2014).

Mouture

Les grains sont broyés au moyen d'un moulin de laboratoire de type Brabender. Les moutures obtenues sont des farines complètes résultantes du broyage du grain entier.

Caractérisation physico-chimique des farines d'orge et d'avoine :

La caractérisation physico-chimique de la farine d'orge a porté sur les critères suivants : protéine (Méthode Kjeldahl), matière sèche (AACC, 1990), taux de cendre (AACC 08-12.01), Zinc et fer par spectroscopie d'absorption atomique, matière grasse (AOAC 922.06.). La détermination de la teneur en β -glucane est effectuée à l'aide du Megazyme Kit en se référant à : AACC METHOD 32-23.

Détermination des taux de polyphénols totaux

La méthode d'extraction a été réalisée suivant le protocole décrit par (Zielinski & Kozłowska, 2000). Les polyphénols totaux ont été quantifiés par la méthode spectrophotométrique Folin-Ciocalteu expliquée par Paras et Hardeep (2010). Les résultats sont exprimés en mg équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche.

Détermination des composés flavonoïdes totaux (CFT)

La quantification des flavonoïdes a été effectuée par la méthode de Zhishen et al, (1999) avec le trichlorure d'aluminium. 1ml de l'extrait préparé a été mélangé avec 1ml de $AlCl_3$ (2%). la lecture a été faite par spectrophotométrie à 490 nm. Les résultats sont exprimés en mg équivalent de quercétine/g de matière sèche (mg EQ/ g MS).

Préparation du pain

Les pains ont été préparés à l'aide des mélanges blé/orge et blé/avoine dont les proportions : (90/10, 80/20 et 70/30). Les mélanges de farine à différentes proportions ont servi à la formulation de 3 pains d'orge et 3 pains d'avoine en plus d'un pain témoin de 100% blé tendre. Le pain a été préparé à l'aide d'une machine à pain de type « Moulinex home bread baguette » en utilisant le programme « pain complet » pour les farines de mélange et le programme « pain blanc » pour le pain témoin.

Etude de la structure alvéolaire par analyse d'image numérique

Les pains préparés sont découpés en tranche. Les images d'une tranche de chaque mélange ont été acquises à l'aide d'un scanner connecté à l'ordinateur. La luminosité et le contraste ont été réglés automatiquement pour tous les échantillons. L'échelle a été fixée au millimètre. Après le recadrage, les images ont été prétraitées et converties en type 8 bits. Les propriétés suivantes des mies ont été extraites, suivant le protocole proposé par Esteller et Lannes, (2005), et calculées en utilisant le logiciel ImageJ : nombre d'alvéoles ; aire totale de la mie (mm²) ; aire totale des alvéoles (mm²), pourcentage d'alvéoles dans la mie. et Les données ont été présentées sous forme des moyennes accompagnées par leurs écart-types.

Résultats et discussion

Caractéristiques des grains et farines d'orge et d'avoine

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques des farines (orge et avoine) utilisées

Farine	Poids spécifique	PMG	Protéine %	β-glucane	Cendre	polyphénols	flavonoïdes	Matière grasse
Variété d'orge « Chifaa »	81.36	42	13.4%	7.9	2.6%	543.35	60.24	4.5
Variété d'avoine « Bounejmate »	59.41	30.1	17.94	2.5	1.8	560.7	128.03	10.41

Le tableau 1 résume les critères physico-chimiques mesurés pour les deux variétés « Chifaa » et « Bounejmate ».

La variété d'orge « chifaa » est la plus importante en termes de teneur en β-glucane (7.9%). Selon Zhang et al (2019), le contenu en β-glucane dans le grain d'orge sans enveloppe (hulless barley) est compris entre 3.66% et 8.62% alors qu'elle est comprise entre 1.8% et 7.5% pour le grain vêtu selon Liu., 2010. La variété « Chifaa » dépasse les variétés à grains vêtus et elle enregistre une teneur parmi les plus élevées pour les types à grain nus.

La variété « Bounejmate » est très riche en matière grasse (10.4%). Pour l'avoine cette teneur varie en général entre 2 et 11.8% (Zhou et al, 1999) jusqu'à 18% dans quelques lignées d'avoine (Liu., 2010). La fraction lipidique du grain d'avoine détermine en grande partie son contenu énergétique et a un impact significatif sur l'équilibre nutritionnel. En revanche, la teneur élevée des lipides dans l'avoine est responsable du rancissement oxydatif représentant ainsi un facteur limitant pour l'entreposage et la manutention des produits d'avoine (Ekstrand et al, 1993). La transformation d'avoine

alimentaire est généralement précédée par un traitement thermique visant à inactiver les lipases (Zhou et al, 1999). Tandis que l'orge présente des teneurs minimales et ne nécessite, par conséquent, aucun traitement préalable.

Les teneurs en protéines de la variété « Bounejmate » sont relativement élevées (17.94%) et elles sont incluses dans la fourchette des valeurs citées dans la littérature (12 à 24%) (Liu., 2010).

Pour les polyphénols, les valeurs enregistrées pour notre cas (543 µgEAG/g pour « chifaa » et 560 µgEAG/g pour « Bounejmate ») sont relativement faibles par rapport à la littérature qui cite des valeurs plus élevées pour l'avoine allant jusqu'à 795 µgEAG/g (Shah et al, 2016), et 1009 µgEAG/g (Alfieri et Redaelli., 2015). Ceci pourrait être expliqué par l'utilisation des méthodes d'extraction distinctes. Pour l'orge les valeurs de la littérature varient jusqu'à 1670 µgEAG/g (Gordana Šimić, 2017). Ces résultats variables sur les quantités de nutriments peuvent être dus aux cultivars, mais aussi aux méthodes et conditions d'analyse (Lullien-Pellerin, 2014).

Le poids à l'hectolitre est l'un des critères de classement des grains. La littérature enregistre des poids spécifiques allant jusqu'à 56(Kg/hl) pour l'avoine à grain vêtu et jusqu'à 72 (Kg/hl) pour l'avoine à grain nu (Akpakouma, 2012). Pour l'orge, la variété « chifaa » est celle qui présente un poids spécifique en parfaite corrélation avec la littérature (Baik et Ullrich, 2008).

Analyse d'image numérique des pains composites par le logiciel ImagJ

Sept pains sont réalisés pour cette étude : un pain témoin/ contrôle à base de 100% de blé tendre, 3 pains avec le mélange Blé/ Orge dans un rapport 90/10, 80/20, 70/30, successivement et 3 pains avec le mélange Blé/ Avoine avec les mêmes rapports (figure 1).



Légende 1 : pain (blé/d'orge), de droite à gauche ; (100%,0%), (90%, 10%), (80%, 20%) et (70%,



Légende 2 : pain (blé / d'avoine), de droite à gauche ; (100%,0%), (90%, 10%), (80%, 20%) et (70%,

Figure 1 : pains à base d'orge et d'avoine et le pain témoin (100% blé)

L'observation visuelle des pains réalisés à partir des différents mélanges (figure 2) : Orge/ Blé tendre et Avoine/ Blé tendre permet de dresser quelques constats. En effet, le pain de blé tendre se caractérise par une couleur claire qui devient, de plus en plus foncée et de plus en plus compact avec l'ajout progressif de l'orge ou de l'avoine. Cette couleur foncée est plus intense dans le cas de l'incorporation de l'orge que de l'avoine. Nous constatons également que les pains perdent progressivement leur forme, avec l'ajout progressif de la farine complète de l'orge ou de l'avoine.

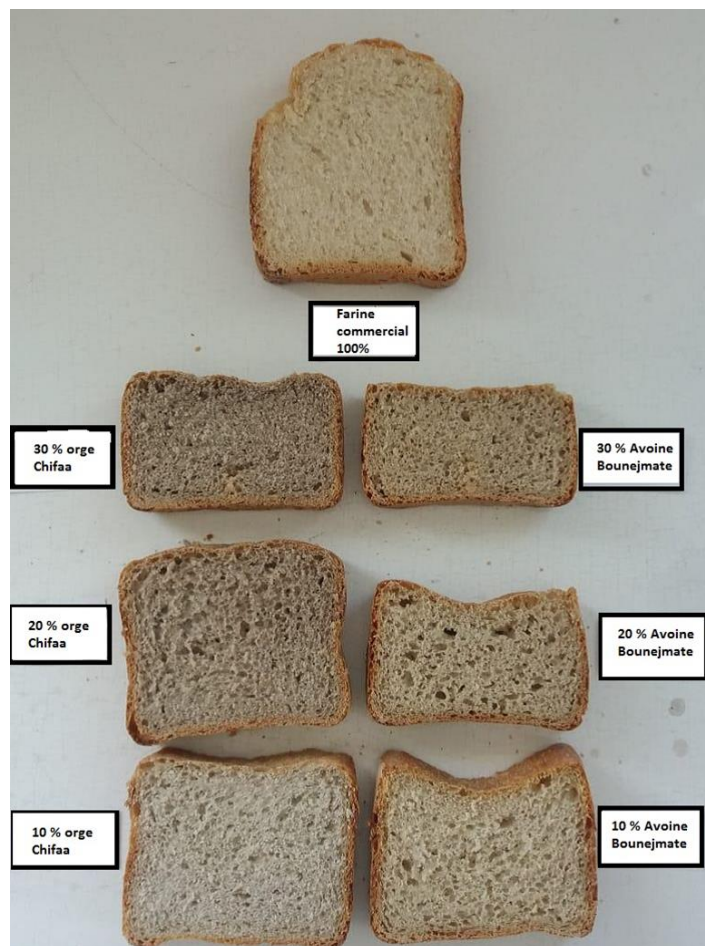


Figure 2 : Tranches des pains composites et du pain témoin ; pain d'orge (à gauche), pain d'avoine (à droite), pain témoin (en sommet)

Afin de mieux élucider l'effet des ajouts sur le développement du pain ainsi que sur la texture de la mie, les sept tranches de pain ont été numérisées. La figure (3) illustre les images en 8 bits traitées par la technique de tresholding par défaut. Cette dernière montre une figure de base construite à partir de cercles en noir représentant les alvéoles. La mie (à droite) correspond au pain à base de blé tendre. A gauche, se trouvent, du bas vers le haut, les mies préparées avec différents pourcentages de farine complète d'orge allant de 10, 20 à 30 %. De la même façon, nous avons procédé pour les tranches de pain d'avoine.

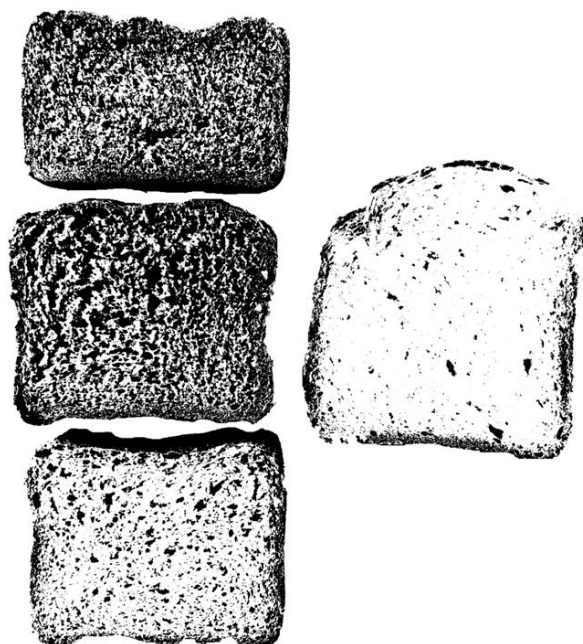


Figure 3 : Image en 8 bits traitées par la technique de tresholding par défaut pour les pains à base de mélange orge/ blé comparés au pain témoin

Le tableau (2) présente les données extraites du logiciel ImageJ après traitement des images. Les paramètres analysés sont : le développement de la mie, le nombre d'alvéoles et leur moyenne, le pourcentage de l'aire des alvéoles par rapport à l'aire totale.

Tableau 2 : Données calculées par le logiciel ImageJ après traitement de l'ensemble des images

	Développement (cm)	Nombre Alvéoles	Moyenne Alvéoles	Aire totale des alvéoles	% aire des alvéoles
30% Avoine	5,3	764	0,805	615,19	31,5
20% Avoine	6	600	1,346	807,38	33,99
10% Avoine	6,8	629	1,338	841,74	36,42
Farine témoin	12,3	853	1,614	1376,8	36,24
10% Orge	8,3	757	1,13	858,8	36,16
20% Orge	8,7	483	1,88	912	33,55
30% Orge	7,1	530	0,165	874,8	4,08

La substitution de la farine de blé par l'orge ou l'avoine entraîne une diminution significative du volume par rapport au pain témoin. En effet, une réduction de 44.7% du volume du pain témoin est obtenue après ajout de 10% de la farine d'avoine. La panification de l'avoine a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont confirmé ses caractéristiques médiocres pour la panification même à faible concentration (10%). Des études (Flander et al, 2007 ; Hutnner et al, 2012 ; Renzetti et al, 2010) ont

suggérer plusieurs stratégies et méthodes afin d'améliorer la qualité technologique du pain à base d'avoine.

Pour l'orge, qui est également une céréale non panifiable, le volume du pain à également était affecté mais d'une manière moins importante en comparaison à l'avoine car à seulement 10% d'ajout une réduction de 32.5% a été obtenue. Ceci pourrait être expliqué par la présence du gluten dans l'orge contrairement à l'avoine qui est une céréale sans gluten.

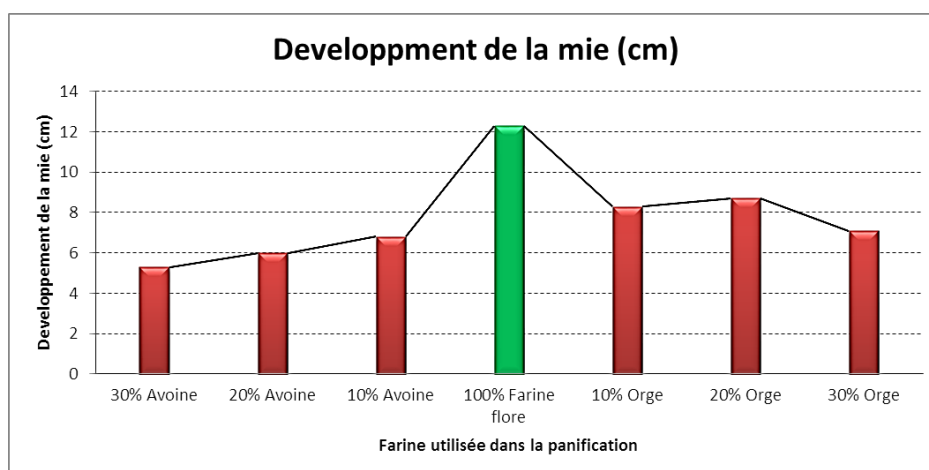


Figure 4 : Comparaison du développement de la mie des six tranches de pain issues des mélanges orge ou avoine/ blé comparés au pain témoin

Il a été remarqué que le développement du pain à 20% d'orge dépasse légèrement le pain à 10% d'orge, ceci est probablement dû à une baisse de l'activité fermentaire de la levure boulangère et donc le dégagement gazeux était moins important pour le pain à 10% d'orge (Figure 4).

Concernant la structure alvéolaire de la mie, l'ajout des deux types de farine induit une diminution de la taille des alvéoles et donne un pain de plus en plus dense. L'ajout de 30% de la farine d'orge induit ainsi une disparition de la majorité des alvéoles dans le pain donnant un pain dur et très dense. En effet le pourcentage d'air des alvéoles dans la mie est passé de 36.4% dans le pain témoin à seulement 4.08% dans le pain à 30% d'orge et 31.5% dans le pain à 30% d'avoine. Pour les ajouts de 10% et 20%, l'effet était moins prononcé qu'il soit pour le pain à l'orge ou le pain à l'avoine.

Ces résultats concordent avec les données de la littérature réalisées avec d'autres approches instrumentales (viscosimètre, texturomètre, ..) et sensorielles (panel). En effet, Flander et al. (2007) rapportent que les pains contenant 10% d'avoine avaient un meilleur volume et une meilleure texture par rapport aux pains contenant 15 à 20% d'avoine et qu'en dépassant ces quantités d'avoine, le pain composite résultant devient très dense, humide et collant. Des études ont tenté d'expliquer ce phénomène, d'après Noort et al. (2010) l'effet négatif de ces ajouts est attribué en grande partie à la présence des fibres alimentaires. En effet, les interactions entre les fibres et le gluten sont la principale cause de cet effet négatif, plutôt que la dilution du gluten. D'autre part, Majzoubi et al (2013) ont montré que la couleur de la croûte du pain devenait plus foncée avec l'augmentation de la teneur en fibre ce qui explique également nos résultats.

Pour le pain à base d'orge, une disparition quasi-totale des alvéoles est constatée quand le niveau d'ajout atteint 30%, ceci pourrait être expliqué par la forte présence du β -glucane dans la variété utilisée et qui contient un niveau parmi les plus élevés dans la céréale d'orge en générale. Plusieurs études (KUREK et al, 2015 ; Hager et al, 2012 ; Skendi et al, 2010) ont étudié l'effet de l'incorporation du β -glucane dans la formulation du pain à base de blé. Ces travaux ont tous montré des effets négatifs sur les propriétés technologiques du pain. En effet, la couleur de la mie des pains additionnés de β -glucane était plus foncée que celle des échantillons témoins. Les échantillons de pain additionnés de β -glucane présentaient un faible volume, une porosité réduite et une mie dure.

Une étude conduite en Jordanie par Ereifej et al (2006) sur le pain « Baladi » à base d'orge a montré que la farine d'orge pourrait être mélangée à la farine de blé pour fournir un pain acceptable pour le consommateur Jordanien à hauteur de 15 à 30%. Des portions supplémentaires de farine d'orge ont donné une couleur plus foncée et un pain plus dur de forme non uniforme (Ereifej et al, 2006). Nous avons constaté que l'intervalle des ajouts lors de cette étude dépasse 20% comme il a été suggéré dans la plupart des travaux y compris le présent travail. Ceci est expliqué par le fait que le pain « Baledi » relativement similaire au pain traditionnel marocain est un pain à volume réduit et de couleur légèrement brune.

Conclusion

Les méthodes d'évaluation de la qualité panifiable portent sur la rhéologie de la pâte ou sur le produit final ce qu'on appelle aussi test de panification. Le produit final, pain ou autre produit de boulangerie subit des séries de tests instrumentaux d'analyse de la texture et/ou des tests sensoriels à l'aide d'un panel expérimenté. Dans le présent travail, l'évaluation de la qualité du pain (produit final) est réalisée par l'analyse de la structure alvéolaire en quantifiant cette structure par l'analyse d'image digitale. Les résultats obtenus sont en harmonie avec les données de la littérature ayant utilisées des méthodes standards d'évaluation de la rhéologie de la pâte. D'après ce travail la technique de l'étude de la structure alvéolaire par analyse d'image numérique, présente un outil précieux pour l'étude de la pâte et du pain. Néanmoins des améliorations sont à apporter notamment au niveau de la prise d'image avec des outils à haute résolution ainsi que l'augmentation du nombre de tranches par produit afin d'améliorer la représentabilité.

Reconnaisances

Ce travail a été effectué au laboratoire de technologie de céréales par un support financier de l'INRA en collaboration avec l'IAV Hassan II.

Références bibliographiques

AACC International, Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, Methods: 44-15.02, 30-10.01, 08-01.01, 55-10 et 32.23.01. AACC International, Washington, DC, USA, 10th edition, 2000.

Akpakouma A. (2012). Specialty oats. Colloquium on alternative field crops with high economic potential. Pretty mountain. Quebec.

Alfieri M., and Redaelli R. (2015). Oat phenolic content and total antioxidant capacity during grain development. *Journal of Cereal Science*. 65. p. 05-13.

Baik B. K. and Ullrich S. E. (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, Volume 48, Issue 2. p. 233-242, ISSN 0733-5210, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.02.002>.

Brennan Charles S. and Cleary Louise J. (2017). The potential use of cereal (1→3, 1→4)-β-d-glucans as functional food ingredients. *Journal of Cereal Science*, Volume 42, Issue 1, Pages 1-13, ISSN 0733-5210. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.01.002>.

Burrows V.D. (2011). Hulless Oat Development, Applications, and Opportunities. In *American Associate of Cereal Chemists International, Oats (Second Edition)*, AACC International Press. p. 31-50, <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-64-9.50008-7>.

De Steur H., Gellynck X., Storozhenko S., Liqun G., Lambert W., Van Der Straeten D., and Viaene J. (2010). Willingness-to-accept and purchase genetically modified rice with high folate content in Shanxi Province, China. *Appetite*, Volume 54, Issue 1. p. 118-125, ISSN 0195 6663. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2009.09.017>. NM 08.1.203

Ekstrand B., Gangby I., Åkesson G., Stöllman U., Lingnert H., Dahl S. (1993). Lipase Activity and Development of Rancidity in Oats and Oat Products Related to Heat Treatment during Processing, *Journal of Cereal Science*, Volume 17, Issue 3. p. 247-254, ISSN 0733-5210,

Ekström L.M.N.K., Bok E.A.E.H., Sjöö M.E., Östman E.M. (2017). Oat β-glucan containing bread increases the glycaemic profile. *Journal of Functional Foods*, Volume 32. p. 106-111, ISSN 1756-4646, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.027>.

Ereifej K. I., M. A. Al-Mahasneh & T. M. Rababah. (2006). Effect of Barley Flour on Quality of Balady Bread. *International Journal of Food Properties*, 9:1. p. 39-49, DOI: 10.1080/10942910500471669 . <https://doi.org/10.1080/10942910500471669>

Esteller M. S., Lannes S. C. S. (2005). Complementary parameters of requirements to fixing identity and quality of bakery products. *Food Sci. Technol* 25 (4) <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400028>

Flander L., Salmenkallio-Marttila M., Suortti T., Autio K. (2007). Optimization of ingredients and baking process for improved wholemeal oat bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, Volume 40, Issue 5. p. 860-870, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.05.004>.

Hager A.S., Ryan L.A.M., Schwab C., Michael G. Ganzle M.G., O'Doherty J.V. and Arendt Elke K. (2011). Influence of the soluble fibres inulin and oat β -glucan on quality of dough and bread. *Eur Food Res Technol* 232. p. 405–413 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1409-1>.

Kurek, M. A., Wyrwisz, J., Piwińska, M., and Wierzbicka, A. (2015). Influence of the wheat flour extraction degree in the quality of bread made with high proportions of β -glucan. *Food Science and Technology*, 35. p. 273-278.

Liu Y. (2010). B-glucan effects on pasting properties and potential health benefits of flours from different oat lines. *Graduate Theses and Dissertations*. 11303. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/11303>.

Lullien-Pellerin V. (2014). Phytomicro nutrients in cereal grains: an overview from genetics through processing to the consumer. 42. p. 139-152.

Majzoobi M., Farahnaky A., Nematollahi Z., Mohamadi Hashemi M., Taghipour Ardakani M., (2013). Effect of different levels and particle sizes of wheat bran on the quality of flat bread. *Journal of agricultural science and technology (JAST)*, [online] 15(1). p.115-123. Available: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=283845>.

Paras S., and Hardeep S.G. (2010). Antioxidant and polyphenol oxidase activity of germinated barley and its milling fractions. *Food Chemistry*. 120(3). p. 673-678

Renzetti S., C.M. Courtin, J.A. Delcour, E.K. Arendt. (2010). Oxidative and proteolytic enzyme preparations as promising improvers for oat bread formulations: Rheological, biochemical and microstructural background, *Food Chemistry*, Volume 119, Issue 4. p. 1465-1473, ISSN 0308 8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.028>.

Rouillé J., G. Della Valle, M. F. Devaux, D. Marion, L. Dubreil. (2005). French Bread Loaf Volume Variations and Digital Image Analysis of Crumb Grain Changes Induced by the Minor Components of Wheat Flour. *Volume 82, Issue 1*. p. 20-27. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0020>

Shah A., Masoodi F.A., Gani A., and Ashwar B.A. (2016). Newly released oat varieties of himalayan region -Techno-functional, rheological, and nutraceutical properties of flour. *Food Science and Technology*. 70. p. 111-118

Shaveta S., Kaur H., and Kaur S. (2019). Hulless barley: A new era of research for food purposes. *Journal of Cereal Research* 11(2). P.:114-124 doi.org/10.25174/2249-4065/2019/83719

Shen RL., Dang XY., Dong JL. and Hu XZ. (2012). Effects of Oat β Glucan and Barley β -Glucan on Fecal Characteristics, Intestinal Microflora, and Intestinal Bacterial Metabolites in Rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60 (45). p. 301-308 DOI: 10.1021/jf302824h

Šimić G., Horvat D., Dvojčević K., Abičić I., Viljevac Vuletić M., Tucak M. and Lalić A. (2017). Evaluation of total phenolic content and antioxidant activity of malting and hulless barley grain and malt extracts . *Czech J. Food Sci.*, 35. p. 73-78.

Skendi A., Biliaderis C.G., Papageorgiou M., and Izydorczyk M.S. (2010). Effects of two barley β -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties. *Food Chemistry*, Volume 119, Issue 3. p. 1159-1167, ISSN 0308-8146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.030>.

Spiteri M and Soler LG. (2018), Food reformulation and nutritional quality of food consumption: an analysis based on households panel data in France. *Eur J Clin Nutr* 72. p. 228–235.

Whan, A. P., Smith, A. B., Cavanagh, C. R., Ral, J. P. F., Shaw, L. M., Howitt, C. A., & Bischof, L. (2014). GrainScan: a low cost, fast method for grain size and colour measurements. *Plant methods*, 10 (1). p. 1-10. doi.org/10.1186/1746-4811-10-23

Zhang K., Yang J., Qiao Z., Cao X., Luo Q., Zhao J., Wang F. and Zhang W. (2019). Assessment of β -glucans, phenols, flavor and volatile profiles of hulless barley wine originating from highland areas of China. *Food Chemistry*. Volume 293. p. 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.053>.

Zhishen J., Mengcheng T. and Jianming W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals, *Food Chemistry*, ISSN 0308 8146, [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2).

Zhou X., Jellen E. N. and Murphy J. P. (1999). Progenitor Germplasm of Domesticated Hexaploid Oat. *Crop science*, Volume 39, Issue 4. p. 1208-1214 <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900040042x>

Zielinski H and Kozłowska H. (2000). Antioxidant Activity and Total Phenolics in Selected Cereal Grains and Their Different Morphological Fractions, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48(6). p. 2008-2016.