



HAL
open science

Déstructuration orale de pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel et impact sur l'index glycémique

Fabien F. Le Bleis, Ludivine Billy, Luc Saulnier, Guy G. Della Valle

► To cite this version:

Fabien F. Le Bleis, Ludivine Billy, Luc Saulnier, Guy G. Della Valle. Déstructuration orale de pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel et impact sur l'index glycémique. *Innovations Agronomiques*, 2014, 36, pp.97-110. 10.17180/x993-ys65 . hal-02637285

HAL Id: hal-02637285

<https://hal.inrae.fr/hal-02637285v1>

Submitted on 27 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Déstructuration orale et acceptabilité de pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel

Le Bleis F.^{1,2}, Billy L.², Saulnier L.¹, Della Valle G.¹

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

² Food Development, Conseils en Innovation Alimentaire, F-44316 Nantes

Correspondance : fabien.le-bleis@food-development.fr ; guy.della-valle@nantes.inra.fr

Résumé

Deux méthodes de mesure ont été développées pour évaluer la fragmentation et la viscosité du pain en cours de mastication. Appliquées à un panel d'individus et de pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel, elles permettent de déterminer l'état de déstructuration du bol, et après mesure de son hydratation, sa modélisation grâce à un coefficient de plastification de l'amidon. La fragmentation favorise l'absorption progressive de la salive par les particules, permettant ainsi leur agglomération et la cohésion du bol alimentaire. L'état de déstructuration dépend de la texture du pain, et permet d'expliquer la diminution de l'index glycémique quand la densité augmente, par une moindre accessibilité de l'amidon aux enzymes de digestion. Le suivi en temps réel des stimulations sensorielles a montré que la perception du sel peut être compensée par la présence de levain, sans modifier l'acceptabilité du produit par les consommateurs. Enfin, l'intensité de perception salée serait liée à l'état de déstructuration du bol alimentaire, via la surface d'échange entre le produit et la salive.

Mots-clés : texture, rhéologie, imagerie, particules, amidon, levain, pain.

Abstract: Oral breakdown and consumers acceptance of breads enriched with dietary fibres and reduced salt content

We have developed two methods to assess the fragmentation and the viscosity of bread during chewing. By applying those to a panel of individuals and fiber-enriched breads with reduced salt content, the state of destructure of the bolus is determined, and, after measuring its hydration, is modeled, thanks to a coefficient of starch plasticization. The increasing fragmentation promotes saliva absorption by the particles, thereby the agglomeration and cohesion of the bolus. The state of destructure depends on bread texture, and allows to explain glycemic index decrease when density increases, by a lower accessibility of the starch to digestive enzymes. Furthermore, by following sensory stimulating on real time, we show that salty perception can be balanced by sourdough addition, without modifying consumer acceptance. Finally, the intensity of salty perception may be related to the state of destructure of the bolus, through the area of contact between the product and the saliva.

Keywords: texture, rheology, imaging, particles, starch, sourdough, bread.

Introduction

En France, le pain représente environ les deux tiers de la consommation de produits céréaliers (Bertrais *et al.*, 2005) avec une différence importante de consommation, pour les adultes, entre les hommes (133 à 153 g/j) et les femmes (84 à 97 g/j) (Observatoire du pain, 2011). Cet aliment possède une structure complexe qui influence le devenir des nutriments dans le tube digestif. Par exemple, il a été montré qu'une densité croissante des pains conduit à une diminution de leur index glycémique (IG) (Burton et

Lightowler, 2006 ; Buffière *et al.*, 2013), et ceci indépendamment de leur teneur en fibres alimentaires (Saulnier *et al.*, 2014) (Figure 1). Deux hypothèses sont proposées pour expliquer ce résultat : (1) l'amidon des pains denses est moins déstructuré en raison de transferts thermiques moins intenses lors de la cuisson de pâtes de plus faible porosité (Rouillé *et al.*, 2010) ; (2) la texture, plus ferme, des pains plus denses, conduit à une moindre déstructuration du bol alimentaire lors de la mastication et donc à une vidange gastrique ralentie (Bonhorst et Singh, 2013) et un accroissement global du temps de transit dans le tube digestif. Rappelons que des régimes alimentaires riches en aliments à IG élevé augmenteraient le risque de développer des maladies chroniques liées au style de vie (Chiu *et al.*, 2011) et que l'efficacité de la consommation d'aliments à faible IG pour la prévention du diabète et la régulation de la glycémie est clairement établie (Livesey *et al.*, 2008). L'abaissement de l'IG du pain entraîne donc une amélioration de ses propriétés nutritionnelles.

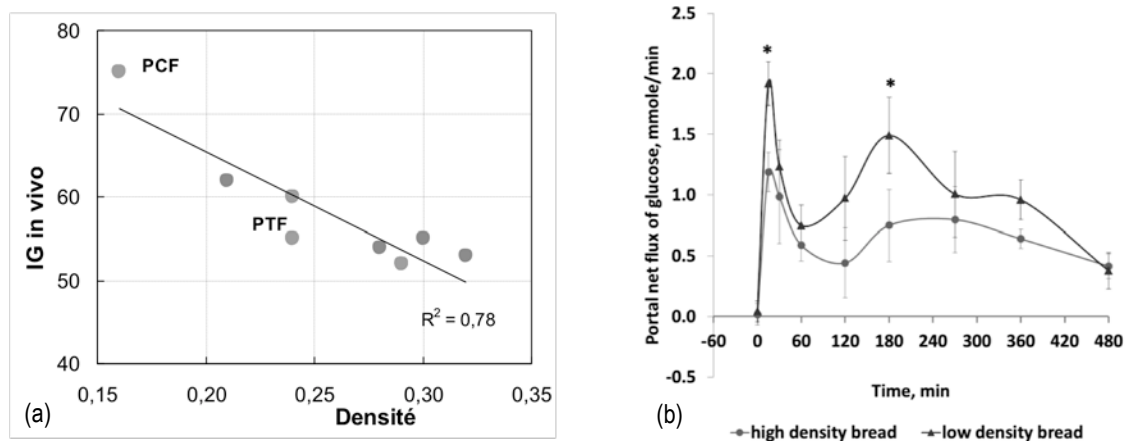


Figure 1 : Variations (a) de l'index glycémique *in vivo* de pains, avec ou sans addition de fibres, en fonction de leur densité (PCF: Pain Courant ; PTF : Pain de Tradition Française), et (b) concentration en glucose dans le plasma sanguin de la veine porte de mini-porcs (n=5) recevant un repas complet incluant des pains de densité différente (d'après Saulnier *et al.*, 2014 et Buffière *et al.*, 2013).

Néanmoins, l'accroissement de la teneur en fibres alimentaires des pains est considéré comme un bon moyen d'atteindre les recommandations de consommation de fibres chez l'adulte (25 à 30 g par jour, Hercberg, 2012). Or, l'ajout de fibres alimentaires, notamment insolubles, conduit à une réduction du volume de la mie et à une densification du pain, depuis longtemps établie (Pomeranz *et al.*, 1977). Les mécanismes de densification de pains enrichis en fibres font appel tant aux propriétés d'hydratation des fibres qu'à leur impact direct sur le réseau de gluten, voire à leur effet déstabilisant aux interfaces des alvéoles gazeuses de la pâte (Noort *et al.*, 2010a). Cependant, cet accroissement de la densité, s'il a un effet plutôt bénéfique sur le plan nutritionnel, induit des conséquences néfastes sur le plan organoleptique, telles qu'une croûte moins croustillante ainsi qu'une mie sombre, ferme et plus sensible à l'émiettement.

En outre, le pain représente le principal contributeur à l'apport total en sel de la population française (24 à 30 % des apports quotidiens). Une réduction progressive de la teneur en sel de tous les pains, « artisanaux » ou « industriels », d'environ 5 % par an a été proposée pour atteindre à l'échéance de 5 ans (2015), 18 g de sel ajouté par kg de farine. En 2011, la moyenne nationale se situait encore à 19,4 g de sel/kg de farine. Pour rappel, la consommation totale de sel en France est en moyenne de 10 g/j chez les hommes et 8 g/jour chez les femmes alors que les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé sont de 5 g/j (ANSES, 2012). En réduisant la teneur en sel, il est possible que la saveur globale du pain, qui gouverne la réponse sensorielle des consommateurs, soit également pénalisée. L'absence de sel dans le pain est clairement identifiée par les consommateurs qui jugent le produit comme fade (Lynch *et al.*, 2009). Plusieurs méthodes de réduction de la teneur en sel dans le pain ont donc été proposées pour compenser cet effet : (1) une réduction progressive jusqu'à un seuil limite d'acceptabilité (Girgis *et al.*, 2003) ; (2) une distribution hétérogène du sel dans la pâte à pain qui

en augmente la perception salée (Noort *et al.*, 2010b) ; (3) l'encapsulation du sel à fine granulométrie qui permettrait de créer des contrastes de concentration salée (Noort *et al.*, 2012) ; (4) l'utilisation de substituts de sel à l'instar du plus connu le chlorure de potassium à associer à des exhausteurs de goût ou des arômes pour en masquer l'arrière-goût métallique ; (5) l'utilisation d'ingrédients aromatiques (levains, arômes naturels, extraits de levure, épices, etc.) pour compenser la perte de saveur salée (Nasri *et al.*, 2013) ; (6) la modulation de la texture du pain qui aurait une influence sur la libération et la perception du sel en bouche (Panouillé *et al.*, 2014).

Pour pouvoir améliorer significativement les propriétés nutritionnelles du pain en accroissant sa teneur en fibres et en diminuant celle en sel, il convient donc d'envisager des modifications de composition, via notamment l'ajout de sons de blé et de levain dont nous décrivons l'impact sur la texture, dans un premier temps. A cet égard, il n'existe pas à notre connaissance d'étude de l'impact de l'addition de fibres sur l'ensemble des étapes du processus de panification. Ensuite, il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes de déstructuration du pain en bouche ainsi que l'évolution des perceptions sensorielles au cours de sa consommation. Pour étudier ces mécanismes, deux méthodes d'évaluation des propriétés physiques du bol alimentaire au cours de la mastication ont été mises au point, l'une par analyse d'images pour déterminer la distribution de taille des particules du bol, la seconde par rhéométrie capillaire pour déterminer sa viscosité apparente. Après en avoir décrit leur principe, nous montrons comment ces méthodes ont été appliquées à un panel d'individus pour des pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel. Enfin, nous décrivons les évolutions de perceptions sensorielles (sel, levain, texture, etc.) des individus au cours de la consommation du pain, et ceci afin d'envisager de les relier à l'état de déstructuration du bol alimentaire.

1. Elaboration de pains enrichis en fibres et à teneur en sel réduite

La composition de base du pain est simple (eau, farine, levure ou levain, sel), mais la conduite du procédé d'élaboration et la variété des farines utilisées, conduisent à une large gamme de produits de panification, caractérisés par leur structure alvéolaire. Cette structure résulte de l'aptitude de la fraction majeure des protéines de la farine de blé tendre (gluten), à former, lors du pétrissage, un réseau qui peut retenir le CO₂ produit lors de la fermentation par le levain ou la levure. Les produits obtenus ont une densité variant de 0,1 à 0,4 et leur texture dépend de l'alvéolage de la mie et de l'épaisseur de la croûte (Della Valle *et al.*, 2014). Cette structure est élaborée au cours d'un processus comprenant quatre étapes principales : le pétrissage, au cours duquel la farine est hydratée et le réseau de gluten formé, la fermentation pendant laquelle le volume de la pâte peut tripler, le façonnage, qui définit le format du pain, et enfin, la cuisson, qui fige la structure alvéolaire de la mie et forme la croûte. A noter que le façonnage est suivi d'une seconde fermentation qui accroît la rétention gazeuse et la stabilité de la pâte avant enfournement. L'agencement de ces opérations, leur durée, ainsi que les conditions opératoires relèvent du savoir-faire du boulanger.

Une première étape de notre travail a consisté en l'étude de l'effet de l'addition de fibres, sous forme de sons de blé blanc, sur les propriétés rhéologiques de la pâte à chaque étape du procédé. La sélection de cette fraction de la mouture du blé, riche en fibres insolubles, a été réalisée 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 avec deux granulométries (grossière : sons écaillés ; fine : sons micronisés). Les résultats ont mis en évidence les valeurs limites de sons de blé pour obtenir un pain acceptable. Ils ont également souligné l'importance de la densité sur les propriétés de texture (Figure 2a) et confirmé les mécanismes de densification proposés et le moindre effet technologique de la réduction de sel (Le Bleis *et al.*, 2014).

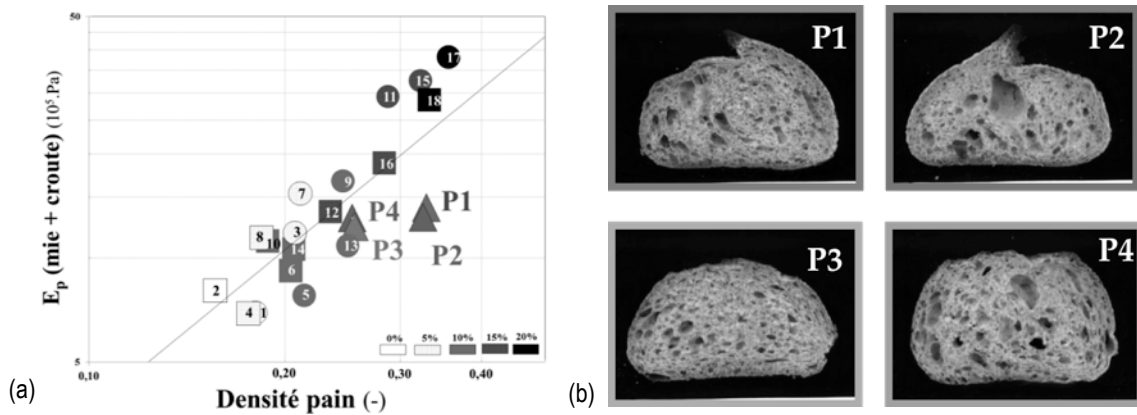


Figure 2 : Caractéristiques des pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel : (a) variations de la fermeté (mie+croûte) en fonction de la densité des pains (Δ : P1 à P4), les autres symboles correspondent à des pains obtenus par addition de différentes teneurs en sons de blé (\square 0 à \bullet , 20%) (Le Bleis, 2014) ; (b) alvéolage des pains sélectionnés.

La solution d'un mélange de sons écaillés et micronisés a ainsi été retenue car l'incorporation unique de sons écaillés conduisait à l'obtention d'un produit proche d'un pain complet (hors objectif du projet) tandis que l'incorporation exclusive de sons micronisés accroissait trop fortement la viscosité élongationnelle de la pâte et défavorisait sa stabilité pendant la fermentation. Nous avons donc ajouté 9,2% 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 écaillés, ainsi que 3% de poudre de gluten vital (pour renforcer le réseau protéique). Nous avons également réduit la teneur en sel à 1,4% au lieu de 1,8% (base farine) et ajouté du levain (acétique ou lactique) aux pains à teneur réduite en sel. Quatre pains ont ainsi été testés, dont les caractéristiques figurent au Tableau 1 et l'aspect est illustré en Figure 2b.

Tableau 1 : Caractéristiques des quatre pains enrichis en fibres par addition de sons de blé (9,2%)

Composition	P1	P2	P3	P4
% Sel *	1,8	1,4	1,8	1,4
Levain	sans	LA	sans	LB
Densité	0,34	0,33	0,26	0,26

(* exprimé par rapport au poids de farine additionnée de sons) ; LA : levain acétique ; LB : levain lactique ; les valeurs de densité représentent la moyenne de trois répétitions avec un écart-type inférieur à 0,02.

2. Méthodes d'évaluation des propriétés du pain en cours de mastication

Lors de la phase buccale, l'aliment est déstructuré par l'action conjointe de la mastication et de la salivation pour former un bol alimentaire et être dégluti. La déglutition doit être naturelle, facile et sans risques de dysphagie, ni douleurs orales. La compréhension des variables physiques qui déclenchent la déglutition du bol alimentaire a fait l'objet de nombreuses études (Chen, 2009), et de nombreux paramètres ont été proposés, tels que la force de cohésion du bol (Prinz et Lucas, 1995), les propriétés rhéologiques (Drago *et al.*, 2011), la taille de particules (Mishellany *et al.*, 2006), ou encore le taux d'insalivation du bol (Loret *et al.*, 2011).

L'évaluation de la déstructuration de pains au cours de la mastication n'est pas aisée, en raison du caractère hydrophile et viscoélastique du matériau. Pour des aliments fragiles tels que les céréales petit-déjeuner, la fragmentation en particules de petites tailles est déterminée par des méthodes de tamisage (van der Bilt et Fontijn-Tekamp, 2004 ; Peyron *et al.*, 2004) ou par analyse d'images (Yven *et al.*, 2010). Cependant, ces techniques dépendent de la texture du produit et ne sont pas adaptées à des

agglomérats de particules humides et molles comme celles des bols de pains. Par ailleurs, les méthodes fondamentales mises en œuvre pour évaluer les propriétés rhéologiques du bol alimentaire telles que sa viscosité, son comportement d'écoulement ou encore ses propriétés viscoélastique, sont bien définies (Blecker et Peyron, 2014). En général, ces tests s'appliquent à des matériaux continus, homogènes, isotropes, de forme régulière, soumis à de faibles déformations (1-3% maximum). Cependant, ces méthodes ne sont pas forcément adaptées à un produit ductile tel que le pain et ne permettent pas d'accéder aux conditions de déformation en cisaillement en bouche afin d'évaluer l'évolution de la viscosité du bol alimentaire au cours de la séquence de mastication.

Pour pallier à ces lacunes, deux méthodes ont été développées et d'abord appliquées à deux pains de texture différente, mastiqués selon différentes durées jusqu'à déglutition, par un sujet sain, aux caractéristiques physiologiques moyennes :

- Une viscosité apparente du bol alimentaire a été déterminée par **rhéométrie capillaire**, selon un principe explicité dans la Figure 3a, qui repose sur l'extrusion du bol à travers des filières de géométrie modifiée pour faire varier la vitesse de cisaillement dans un intervalle proche des conditions réelles de mastication et de déglutition (10 à 10^3 s^{-1} selon Shama et Sherman, 1973). Les bols de pains présentent un comportement rhéo-fluidifiant et leurs courbes d'écoulement (variations de la viscosité en fonction du cisaillement) permettent de définir un indice de consistance, noté K (correspondant à la viscosité apparente à 1 s^{-1}). Ces courbes s'ordonnent suivant l'avancement de la mastication jusqu'à atteindre des valeurs de viscosité environ 10 fois plus faibles que celle du pain non mastiqué, pour des consistances de l'ordre de 1 $Pa \cdot s^n$, soit 1000 fois la viscosité de l'eau (Figure 3b).

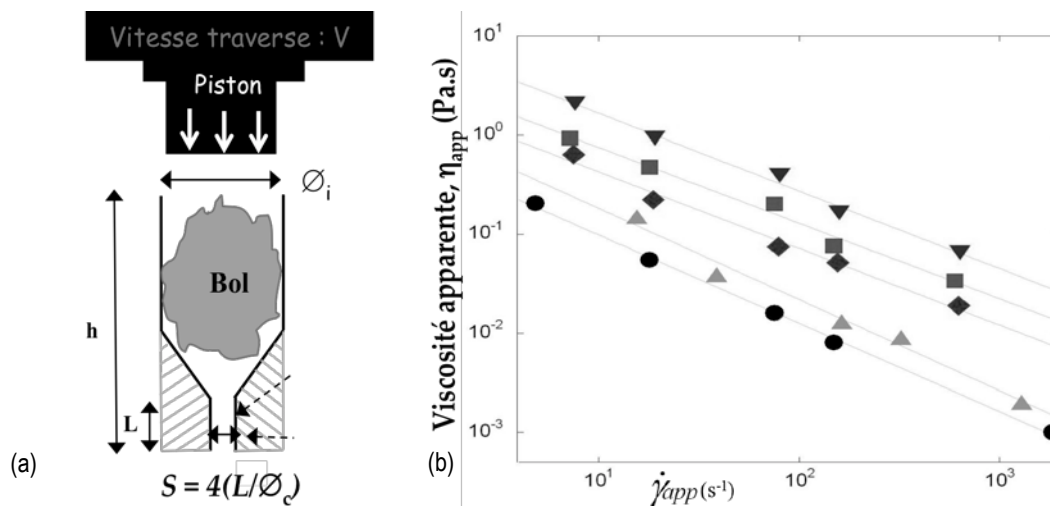


Figure 3 : Principe de la méthode de rhéométrie capillaire : (a) mesure de la force d'extrusion et (b) variations de la viscosité apparente déduite des mesures de force effectuées pour différentes vitesses V et dimensions de filière (\varnothing_c) (soit pour 5 vitesses de déformation apparente, $\dot{\gamma}_{app}$), aux différents cycles de mastication 0 (\blacktriangledown), 3 (\blacksquare), 6 (\blacklozenge), 12 (\blacktriangle) et SP (\bullet) (Le Bleis *et al.*, 2013).

- Une méthode par **analyses d'images** a été mise au point pour déterminer la distribution de taille de particules de pain après mastication. Un protocole expérimental basé sur l'agitation en milieu visqueux d'un échantillon de bol a permis de séparer les particules constitutives de cet agglomérat. Après acquisition des images à l'aide d'un système macroscopique, une procédure de traitement d'images basée sur des opérations de morphologie mathématique a permis de déterminer un paramètre caractérisant le degré de fragmentation du pain mastiqué par la largeur médiane de particules (d_{50}). On a ainsi montré que la mastication du pain conduit à sa fragmentation en un grand nombre de petites particules de taille moyenne de l'ordre de 1,5 mm au seuil de déglutition. Jalabert-Malbos *et al.* (2007) ont conclu que la taille de particules de différentes catégories d'aliments doit être inférieure à 2 mm pour que ceux-ci puissent être facilement avalés. Plus récemment, Peyron *et al.* (2011) ont trouvé par

une méthode de tamisage, que la taille médiane de particules de céréales petit-déjeuner, au seuil de déglutition, pour 20 sujets, a une valeur moyenne de 1,5 mm, proche des valeurs déterminées dans notre étude.

Les mesures de teneur en eau de chaque bol suggèrent que la salive plastifie le pain, et surtout l'amidon qui est son constituant majeur, par l'eau qu'elle contient qui accroît la teneur en eau du bol de plus de 10%, en valeur absolue) ; ce phénomène, déjà rencontré lors de l'extrusion de produits à base d'amidon, affecte majoritairement le comportement rhéologique du bol et serait donc essentiellement à l'origine de la diminution de sa consistance, sans que la fragmentation, ni même une hydrolyse enzymatique, ne semblent significatives. Nous avons mesuré, par rhéométrie capillaire, la viscosité des bols après mastication et stockage pendant 5 minutes à température ambiante. Aucune différence n'a été détectée entre ces deux temps de mesure, ce qui suggère que sur l'intervalle des temps de mastication (< 1 min) à 37°C, les effets hydrolytiques, liés à l' α -amylase salivaire sur le comportement rhéologique du bol alimentaire, sont négligeables. Ces interprétations ont été consolidées par la suite en appliquant ces méthodes pour un panel d'individus

3. Déstructuration orale des pains par un panel d'individus

L'objectif de cette étude était de quantifier l'état (ou les mécanismes) de déstructuration du pain en bouche en appliquant les méthodes présentées précédemment. Les pains P2, P3 et P4 (Figure 2b) ont ainsi été mastiqués par un panel de 20 juges dont les caractéristiques physiologiques (flux salivaire stimulé, efficacité masticatoire, temps de mastication avant déglutition, activité amylasique, etc.), contrôlées au préalable, variaient dans des rapports de 1 à 5. Les bols de pain ont été recueillis après trois périodes de mastication (1/3, 2/3 et SP : temps de déglutition).

Les résultats confirment la décroissance de la consistance des bols de pains au cours de leur mastication dans un rapport de 3 à 1 (Figure 4a). On remarque également que cet indice apparaît plus élevé pour le pain initialement plus dense (P2). Ce résultat montre bien l'effet de la texture de l'aliment sur sa déstructuration en bouche, comme pour de la viande (Mioche *et al.*, 2003), ou encore du fromage (Drago *et al.*, 2011). Certes, les différences de consistance avant déglutition des pains, pour chaque juge, sont assez faibles (environ 0,5 Pa.sⁿ) pour véritablement contredire le concept d'homéostasie rhéologique (Lentle et Janssen, 2008).

Ce concept suggère en effet que, pour un même individu, les mécanismes qui gouvernent les différentes étapes de digestion d'un aliment, et, en particulier sa déglutition, sont contrôlés par ses propriétés rhéologiques.

Cependant, rapportées à la valeur initiale de consistance des pains, K_0 (P2 = 7,3 Pa.s^{0.3} ; P3 = 11,3 Pa.s^{0.3} ; P4 = 9,9 Pa.s^{0.3}), les différentes valeurs de K/K_0 suggèrent une différence significative d'état de déstructuration. Celle-ci pourrait expliquer les valeurs d'index glycémique plus faibles de pains de densité plus élevée (Burton et Lightowler, 2006 ; Saulnier *et al.*, 2014) : moins le pain serait déstructuré en arrivant dans l'estomac, moins l'amidon serait accessible aux enzymes de digestion. Quelles que soient les différences, liées aux individus ou à l'aliment, au moment de la déglutition, le bol alimentaire formerait un agrégat de particules de pains enduites de salive assurant sa cohésion et limitant sa déstructuration.

En outre ces résultats confirment le rôle plastifiant de l'eau, qui peut être modélisé (équation 1) pour chaque individu i , par la relation, indépendante du type de pain j , et illustrée en Figure 4b :

$$(1) K_i = K_{0j} \cdot \exp(-\alpha_i \cdot \Delta WC)$$

où K_i est la consistance du bol mesurée en cours de mastication pour l'individu i , K_{0j} la consistance initiale du pain j , ΔWC l'accroissement de teneur en eau du bol et α_i le coefficient de plastification. Les valeurs de α_i varient de 12 à 29 selon les individus, alors que celles obtenues pour l'amidon fondu en cours d'extrusion varient de 10 à 15 (Della Valle *et al.*, 1996). L'amplitude de cet intervalle de variation

suggère que d'autres phénomènes ont également une influence telle que la composition salivaire des individus et/ou leur dynamique masticatoire.

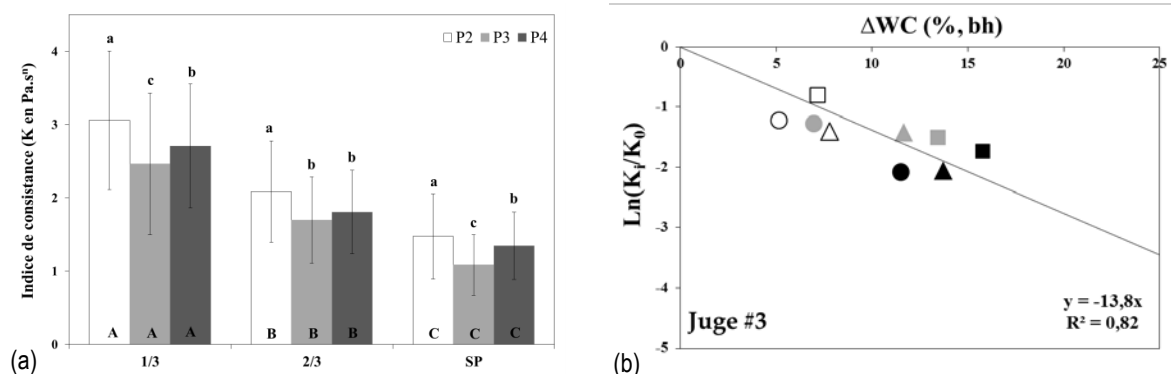


Figure 4 : (a) Variation de l'indice de consistance (K) des bols évalué par rhéométrie capillaire aux différents temps de mastication des trois pains (□ : P2 ■ : P3 ■ : P4 ; 17 juges) et (b) Variations de l'état de consistance (K/K₀) avec le taux d'hydratation (ΔWC) des bols au cours de la mastication des pains P2 (●), P3 (■) et P4 (▲). Le gradient de couleur indique les différents cycles de mastication (blanc : 1/3 ; gris : 2/3 ; noir : SP).

La fragmentation a également été évaluée, à l'aide de la méthode d'analyse d'images, par la taille médiane des particules du bol (d₅₀). Au niveau du panel, les valeurs de d₅₀ diminuent significativement au cours de la séquence de mastication des trois pains (Figure 5a). On observe une tendance décroissante avec une dispersion des points, plutôt liée à la différence inter-individuelle. Après 10 secondes de mastication, l'échantillon est réduit en fragments ayant une largeur médiane 4 à 10 fois plus petite (entre 2 et 5 mm).

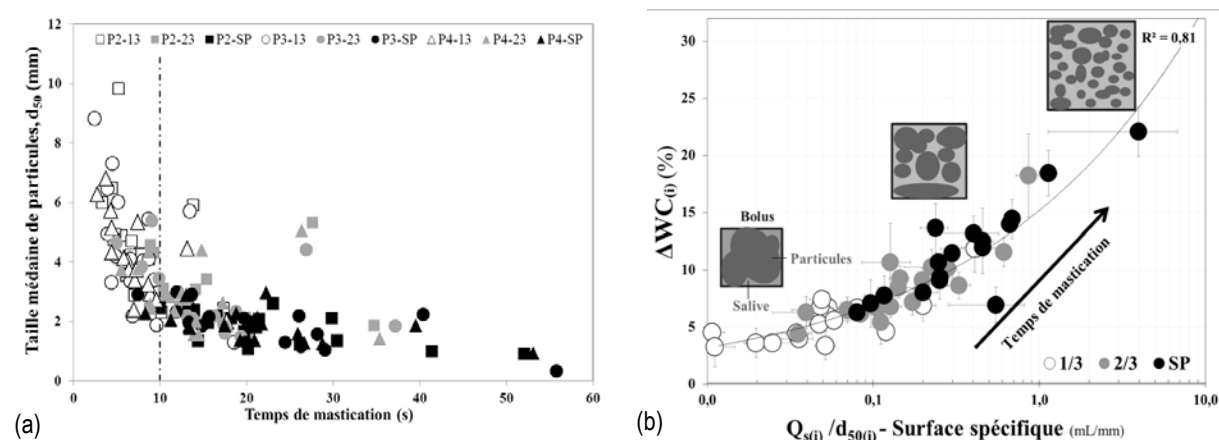


Figure 5 : (a) Variation de la taille médiane de particules (d₅₀) au cours de la mastication des 3 pains (P2: □ ; P3: ○ ; P4: △ ; 17 juges) et (b) Relation entre de l'accroissement du taux d'hydratation du bol et la quantité théorique de salive en bouche rapportée à la taille médiane de particules au cours de la mastication. Le gradient de couleur indique l'évolution du temps de mastication : blanc : 1/3 ; gris : 2/3 ; noir : SP) (Le Bleis, 2014).

Ce résultat montre que la fragmentation du pain s'opère au cours des premiers cycles de mastication. Au niveau individuel, les variabilités de taille de particules sont très importantes (d'un facteur de 3,5 à 4) à chaque niveau de mastication. A déglutition, la largeur médiane de particules se situe entre $0,7 \pm 0,5$ mm et $2,6 \pm 0,4$ mm, tous pains confondus (moyenne : $1,8 \pm 0,5$ mm). Aucune différence significative de taille moyenne de particules, à chaque cycle de mastication, n'apparaît entre les pains, ce qui suggère que la texture du pain n'influence pas le degré de fragmentation. Quelques études (Mishellany *et al.*, 2006 ; Peyron *et al.*, 2004) ont suggéré que la taille des particules d'un bol alimentaire au moment de la déglutition est identique pour un type d'aliment donné, pour un panel d'individus aux stratégies masticatoires différentes.

La quantité théorique de salive produite en cours de mastication, $Q_{s(i)}$ peut être approchée, pour chaque individu i , par le produit du flux salivaire par le temps de mastication. A déglutition, Q_s varie de 0,2 mL à 2,3 mL avec une moyenne de 0,7 mL ($\pm 0,5$) au niveau du panel. Ce résultat est en accord avec ceux de Müller *et al.* (2010) qui estiment le volume de salive présent en bouche à déglutition entre 0,4 et 1,7 mL. Le rapport $Q_{s(i)}/d_{50}$ est un indicateur de la quantité de salive absorbée par les particules de pain. La corrélation entre ΔWC et $Q_{s(i)}/d_{50}$ (Figure 5b) montre bien que la réduction de taille de particules favorise l'absorption de l'eau de la salive, ce qui s'explique par l'augmentation de la surface de contact. La combinaison de cette corrélation avec l'équation (1) fait bien apparaître les contributions respectives de l'individu et de l'aliment dans la déstructuration de ce dernier en cours de la mastication (équation 2) :

$$(2) K_i/K_{0j} = \exp[-\alpha_i \cdot \alpha' \cdot (Q_s/d_{50})^x]$$

avec α' : coefficient d'absorption de salive (1,52 mm^{-2x} avec $x=0,34$), d_{50} : largeur médiane de particules (mm) et Q_s : volume de salive en bouche (mL). Le rapport K/K_0 permet ainsi de définir l'état de déstructuration du bol. Les valeurs de α_i sont différentes selon les juges, ce qui confirme les résultats obtenus pour des céréales petit-déjeuner (Loret *et al.*, 2011 ; Peyron *et al.*, 2011) et du pain (Panouillé *et al.*, 2014) qui montrent que l'état du bol, évalué en faibles déformations par rhéométrie oscillatoire, évolue différemment pour chaque individu.

En outre, les valeurs de α_i ne sont pas corrélées avec la teneur en α -amylase salivaire, pourtant susceptible de diminuer la viscosité d'aliments à base d'amidon (Engelen *et al.*, 2003). Cette absence d'effet peut être attribuée au temps de contact de l'enzyme avec le pain pendant la mastication (< 1min), trop faible pour garantir son accessibilité au substrat. Ces variations proviendraient donc d'autres caractéristiques physiologiques non évaluées dans ce travail, telles que la dynamique masticatoire des individus, à savoir les forces générées par les mandibules, accessibles par électromyographie, et/ou la concentration en mucine, responsable de la viscosité salivaire. En effet, la capacité de lubrification et de plastification de la salive a été mise en évidence par des mesures tribologiques, et reliée à la forte proportion d'eau et à la présence de glycoprotéines salivaires (mucine, notamment) (Bongaerts, Rossetti et Stokes, 2007). Enfin, les différences individuelles de consistance au moment de la déglutition ne signifient pas que la viscosité soit différente ; puisque le produit est non Newtonien, elles dépendent de la vitesse de cisaillement, déterminée par le mouvement du pharynx.

Pour étudier la déstructuration du pain en bouche, nous avons donc mis au point et validé deux méthodes instrumentales d'évaluation des propriétés physiques du pain en cours de mastication : l'une par analyse d'images pour déterminer les distributions granulométriques des particules du bol alimentaire, la seconde par rhéométrie capillaire pour mesurer la viscosité apparente du bol. L'application de ces méthodes à un panel de juges et à des pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel, nous a permis de définir l'état de déstructuration de ces pains lors de la mastication, et de conclure que deux facteurs majeurs de variation ont une incidence sur cet état de déstructuration : les propriétés physiologiques de chaque juge et la texture des pains.

4. Perceptions sensorielles du pain au cours de la mastication

L'objectif de cette étude était d'évaluer les perceptions de texture et de saveur des pains enrichis en fibres, à teneur en sel variable en présence ou non de levain (Tableau 1). Pour connaître l'évolution de ces propriétés sensorielles, deux méthodes temporelles ont été mises en œuvre : la Dominance Temporelle des Sensations (DTS) et le Temps-Intensité (TI). Un panel de 19 personnes a été recruté, formé à ces méthodes, et sélectionné pour participer aux séances d'évaluation.

4.1 Dominance Temporelle des Sensations

Cette méthode permet d'enregistrer plusieurs attributs sensoriels simultanément au cours du temps en une seule évaluation et d'obtenir des séquences de sensations pour des produits complexes. Contrairement au profil sensoriel, la DTS inclut une dimension temporelle. Il s'agit d'une méthode qualitative (le juge doit choisir la perception dominante) et temporelle (ce choix peut évoluer au cours de la dégustation). Onze attributs ont été sélectionnés suite à une génération de descripteurs réalisée, au préalable, lors de séances collectives d'entraînement. Parmi ces attributs, sept font référence aux perceptions liées à la texture du bol (souple, ferme, dense, aéré, pâteux, sec, inclusions), et quatre à celles liées aux saveurs (céréales, fade, salé, levain). L'ensemble de ces attributs est affiché simultanément sur un écran. Lorsque le juge met un échantillon de mie en bouche, il doit sélectionner l'attribut qu'il perçoit comme dominant. Quand cette perception dominante diminue, il sélectionne le nouvel attribut dominant, et ce, jusqu'à l'absence de sensation en bouche. Pour chaque dégustation, l'ordinateur enregistre le temps écoulé, et le nom des attributs sélectionnés à un temps donné. L'observation des courbes DTS des différents pains (Figure 6) permet de savoir, à chaque instant de la consommation, quels attributs ont significativement attiré l'attention des juges, en observant les courbes au-delà du niveau de significativité ($\alpha=5\%$).

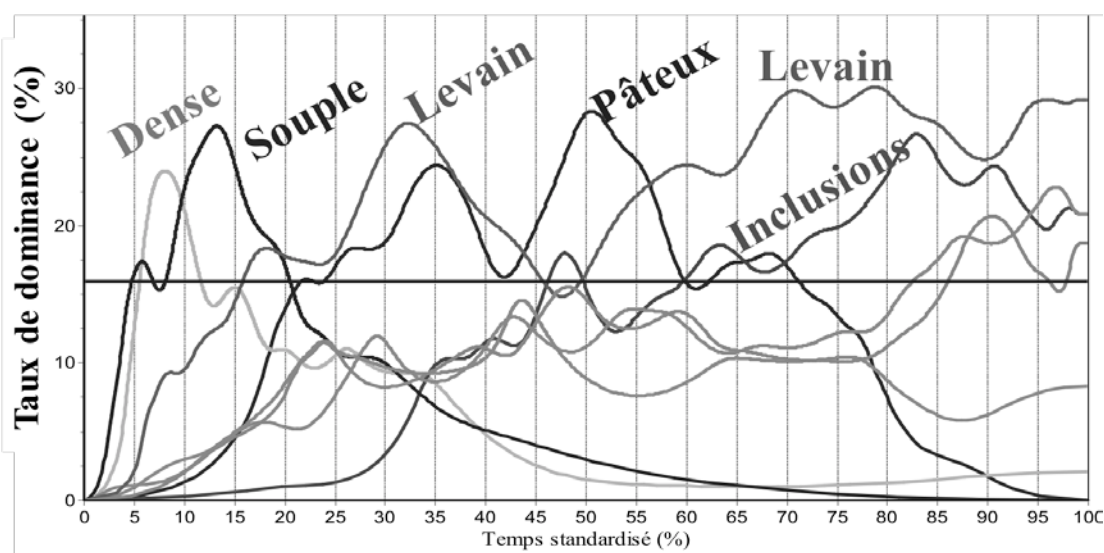


Figure 6 : Exemple d'évolution du taux de dominance de 8 attributs évalués par un panel de 16 juges en fonction du temps standardisé pour P2. La ligne horizontale noire indique le niveau de significativité au seuil $\alpha=5\%$; les attributs dont la courbe est au-dessus de cette ligne sont considérés comme significativement dominants.

La Figure 7 représente les séquences sensorielles des attributs perçus comme dominants au cours de la consommation des quatre pains. Elle montre que les pains à 1,8 % de sel (P1, P3) sont jugés plus salés que les pains avec levain (P2 et P4). Pour ces derniers, l'attribut levain masquerait majoritairement les autres attributs. Toutefois, cette tendance est plus forte pour P2, qui présente une acidité beaucoup plus marquée que P4, dont le levain est plus doux, avec des notes céréalières. Il est donc possible que les juges aient bien perçu les arômes de ce levain, sans pour autant les avoir associés à l'attribut levain lors de la mesure, mais plutôt à l'attribut céréales.

Par ailleurs, les pains les plus denses (P1 et P2) sont perçus comme tels, en début de mastication. P1 et P2 sont également jugés pâteux au cours de la séquence de consommation contrairement à P3 et P4. Ces résultats sont en accord avec les différences d'indice de consistance (K) mesurées par rhéométrie capillaire (Figure 4) qui indiquent que P2, plus dense, a une viscosité de bol plus élevée au cours de la séquence de mastication que les autres pains (P3 et P4). Ainsi, ces résultats de DTS mettent en avant que les perceptions de la saveur du pain, et dans une moindre mesure, de sa texture, sont influencées par sa composition et sa densité.

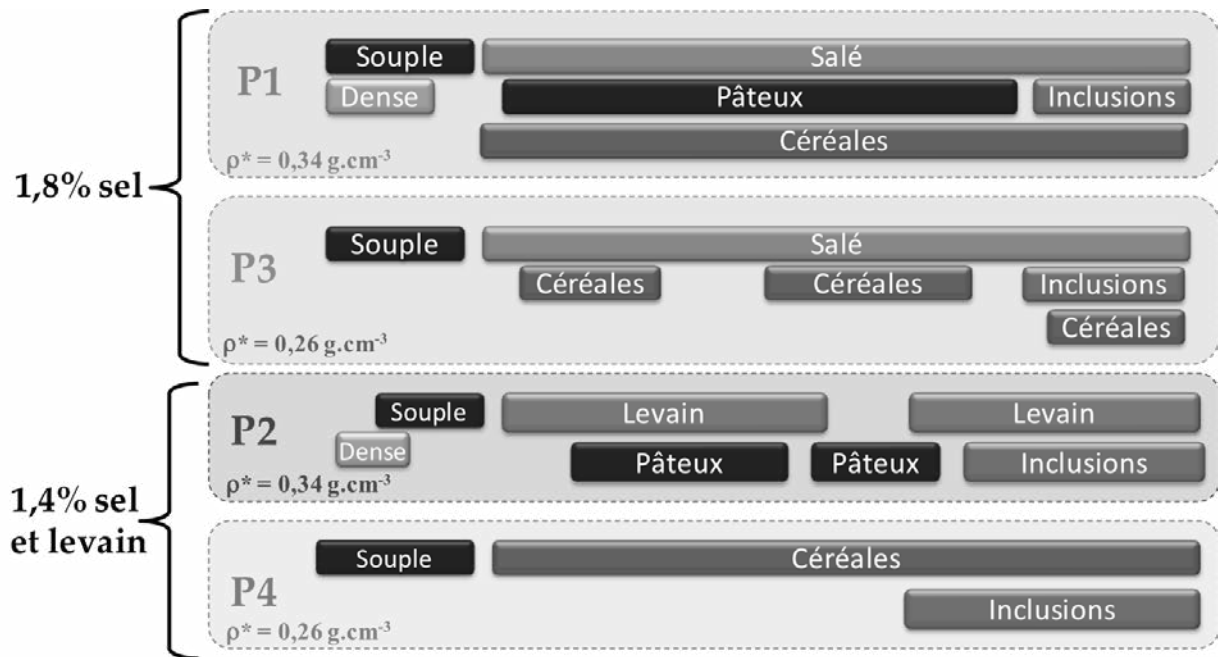


Figure 7 : Schématisation des séquences sensorielles des quatre pains obtenues par la méthode de Dominance Temporelle des Sensations (16 juges).

4.2 Temps-Intensité

Les attributs salé et levain étant les plus largement perçus par les juges en DTS, nous avons suivi l'évolution de l'intensité de perception de ces deux attributs par la méthode Temps-Intensité. Elle consiste à noter l'intensité d'une sensation perçue tout au long de la dégustation d'un produit. Pour chaque pain, le juge clique sur la borne gauche d'une échelle horizontale non structurée (borne correspondant à l'absence de sensation) lors de la mise en bouche du produit (Figure 8a), puis fait glisser le curseur sur l'échelle au fur et à mesure que l'intensité de la sensation (salée ou levain) évolue en bouche jusqu'à la fin de la perception.

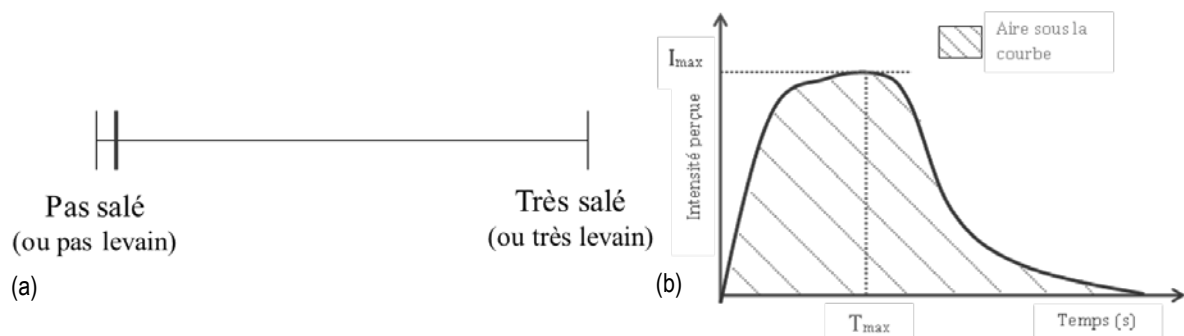


Figure 8 : La méthode Temps-Intensité : (a) échelle de notation et (b) exemple d'une courbe TI et des paramètres extraits.

Pour chaque pain, trois valeurs caractéristiques peuvent être extraites des courbes TI (Figure 8b), à savoir : I_{max} (intensité maximale atteinte au cours de la mesure) ; T_{max} (temps au bout duquel l'intensité maximale est atteinte) ; l'aire sous la courbe (quantité totale perçue lors de la dégustation). La Figure 9 représente les valeurs I_{max} obtenues à l'échelle du panel pour les quatre pains selon les attributs salé et levain :

- Les valeurs d' I_{max} de perception du sel des pains P1 et P3 sont significativement supérieures à celles de P2 et P4, ce qui suggère que la réduction du sel est perçue de manière significative entre 1,8% et 1,4% de sel (Figure 9a). Deux mécanismes pourraient expliquer cette diminution de la perception salée : (1) puisque la quantité de sodium libérée de la matrice est plus élevée pour les pains

à 1,8% (Le Bleis, 2014), les juges perçoivent plus aisément le sel, dissout dans la salive et transporté jusqu'aux récepteurs gustatifs ; (2) un état de déstructuration du pain plus prononcé favoriserait également la perception salée en raison d'un plus grand étalement du bol en bouche. En effet, au cours de la mastication, le bol va développer une plus grande surface d'échange au niveau de la surface des muqueuses, favorisant ainsi un transfert de matière (celui du sel, notamment) du produit vers les récepteurs gustatifs, et augmentant ainsi la perception salée.

- Les valeurs d' I_{\max} de perception du levain des pains en contenant (P2 et P4) sont supérieures à celles des pains n'en contenant pas (P1 et P3) (Figure 9b). Alors que pour ces deux derniers pains, I_{\max} devrait être nulle, sa valeur moyenne est comprise entre $2,1 \pm 1,6$ (P1) et $1,8 \pm 1,3$ (P3). Ce résultat suggère que d'autres notes aromatiques (notamment céréales) peuvent être confondues avec celles du levain par certains juges (60%). La Figure 9b montre également que la perception du levain est plus élevée pour P2. Le caractère acétique du levain utilisé dans P2 engendrerait un goût plus agressif et aigre qui se traduit par une perception significativement plus prononcée. Le levain utilisé dans P4 étant plus doux (levain lactique), l'intensité de sa perception est significativement plus faible en comparaison à P2, mais non différente du pain sans levain (P1). Ce résultat suggère que le levain lactique du P4, est soit en proportion trop faible dans la recette et/ou associé à la saveur céréale comme suggéré par les résultats du DTS (Figure 7).

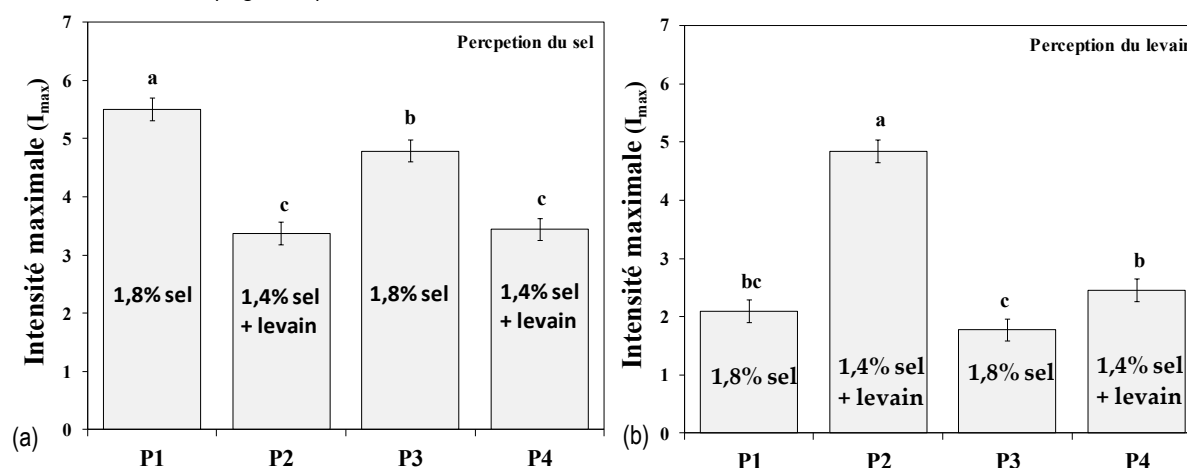


Figure 9 : Valeurs d'intensité maximale de perception (I_{\max}) du salée (a) et du levain (b) à partir d'un panel, respectivement de 15 et 16 juges, et pour les quatre pains : P1, P2, P3, P4 (méthode du Temps-Intensité). L'ordre croissant des lettres indique les différences pour chaque variable, des valeurs les plus élevées aux plus faibles. Les écarts-types correspondent aux intervalles de confiance du test SNK ($\alpha=5\%$).

5. Acceptabilité sensorielle de pains

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'appréciation du goût global des quatre pains (format baguette) en se basant sur un test de notation hédonique à partir d'un panel de 100 consommateurs (75% de femmes et 25% d'hommes âgés de 17 à 54 ans). La Figure 10 montre que l'appréciation du goût global des pains P1, P2 et P3 n'est pas différente. Les notes se situent en moyenne à 5,5 sur 10. En comparaison aux tests hédoniques (appréciation du goût global) réalisés sur différentes baguettes de compositions (fibres, levain) et textures variées (Martin *et al.*, 2008) (Figure 10), nos résultats sont similaires à celui de la baguette courante. Dans l'étude de Martin *et al.* (2008), les préférences des consommateurs s'orientaient pour les baguettes de type tradition (notes supérieures à 6 sur 10). On observe que la note d'appréciation attribuée à P4 (7/10) se situe dans cette catégorie. Par ailleurs, les juges ont également montré une préférence pour des baguettes denses, moelleuses et présentant une croûte importante.

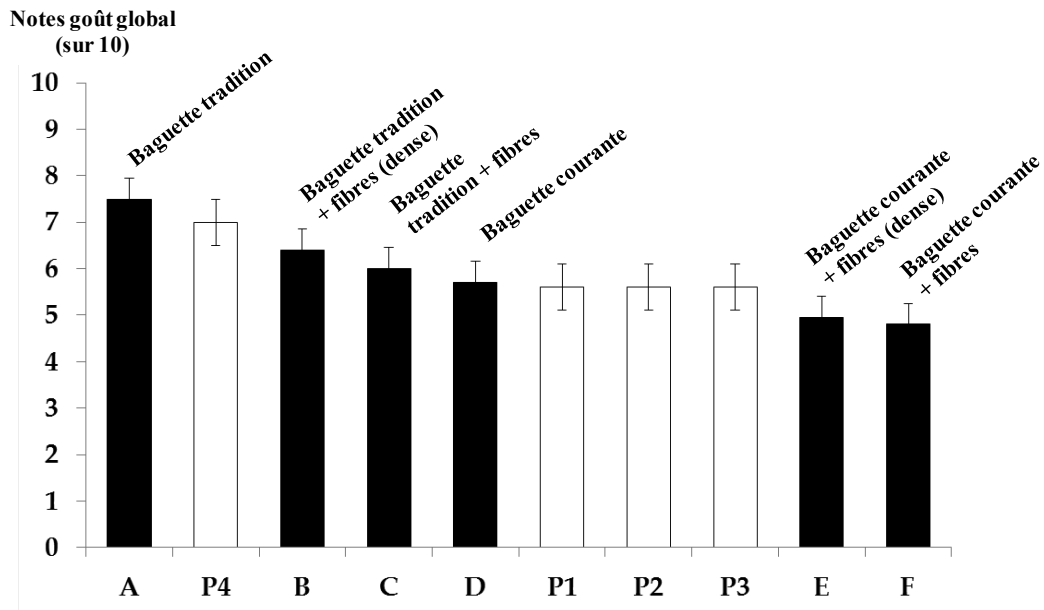


Figure 10 : Notes moyennes de l'appréciation du goût global des quatre pains de l'étude (□) obtenues auprès de 100 consommateurs et comparées aux notes de l'étude de Martin *et al.* (2008) sur différentes baguettes française (■) auprès de 128 consommateurs. Les barres d'erreur représentent l'écart-type du test SNK ($\alpha=5\%$).

L'ensemble des résultats de cette étude sensorielle indique que l'acceptabilité sensorielle de pains enrichis en fibres n'est pas modifiée par la réduction de la teneur en sel à 1,4%, et que le levain pourrait être une alternative intéressante pour améliorer la qualité sensorielle de la baguette française à teneur réduite en sel.

Conclusion

Ces travaux ont d'abord montré qu'il est possible d'améliorer les propriétés nutritionnelles du pain, en accroissant sa teneur en fibres et en diminuant celle en sel, via notamment l'ajout de sons de blé et de levain. L'impact sur la texture de ces modifications obéit à un mécanisme général de densification. La mise au point de deux méthodes d'évaluation des propriétés physiques du bol alimentaire au cours de la mastication, l'une pour déterminer sa viscosité apparente, l'autre la distribution de tailles des particules du bol, a permis de mieux comprendre les mécanismes de déstructuration du pain en bouche. En effet, appliquées à un panel d'individus pour des pains enrichis en fibres et à teneur réduite en sel, elles conduisent à des résultats qui mettent en exergue l'importance de la plastification de l'amidon par l'eau de la salive et contribuent à expliquer la diminution de l'index glycémique du pain avec l'accroissement de sa densité. Enfin, le suivi des perceptions sensorielles (sel, levain...) permet d'envisager de relier ces perceptions à l'état de déstructuration du bol alimentaire. Outre la meilleure connaissance du devenir du pain dans le tube digestif, ces travaux ouvrent des perspectives pour optimiser les profils nutritionnel et sensoriel des pains français.

Références bibliographiques

ANSES, 2012. Avis relatif au suivi des teneurs en sel des principaux vecteurs entre 2003 et 2011 et simulation des impacts sur les apports en sel de la population française.

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 (France).

- Blecker C., Peyron M.-A., 2014. La texture des aliments : de l'évaluation à la mastication. In : C. Lavelle (Ed.). « Science culinaire », Belin, Paris.
- Bongaerts J.H.H., Rossetti D., Stokes J.R., 2007. The lubricating properties of human whole saliva. *Tribology Letters* 27 (3), 277–287.
- Bornhorst G., Singh R.P., 2013. Kinetics of in Vitro Bread Bolus Digestion with Varying Oral and Gastric Digestion Parameters. *Food Biophysics* 8, 50-59.
- Buffière C., Chiron H., Peyron M.A., Sébédio J.L., Della Valle G., Rémond D., 2013. Influence of bread density on the kinetics of glucose absorption and insulin secretion in the context of a complete meal. Poster, Dream project International Conference “From model foods to food models”, Nantes, June 24-26, 2013.
- Burton P., Lightowler H.J., 2006. Influence of bread volume on glycaemic response and satiety. *British Journal of Nutrition* 96, 877-882.
- Chen J., 2009. Food oral processing - A review. *Food Hydrocolloids* 23 (1), 1-25.
- Chiu C.J., Liu S., Willett W.C., Wolever T.M.S., Brand-Miller J.C., Barclay A.W., Taylor A., 2011. Informing food choices and health outcomes by use of the dietary glycemic index. *Nutrition Reviews* 69, 231-242.
- Della Valle G., Babin P., Bonnand-Ducasse M., Chaunier L., Chiron H., Dendievel R., Reguerre A. L., Salvo L., Saulnier L., 2014. Le pain: une histoire de bulles et de fibres. In : C. Lavelle (Ed.). « Science culinaire », Belin, Paris.
- Della Valle G., Colonna P., Patria A., Vergnes B., 1996. Influence of amylose content on the viscous behavior of low hydrated molten starches. *Journal of Rheology* 40, 347-362.
- Drago S.R., Panouillé M., Saint-Eve A., Neyraud E., Feron G., Souchon I., 2011. Relationships between saliva and food bolus properties from model dairy products. *Food Hydrocolloids* 25 (4), 659-667.
- Engelen L., de Wijk R.A., Prinz J.F., van der Bilt A., Bosman F., 2003. The relation between saliva flow after different stimulations and the perception of flavor and texture attributes in custard desserts. *Physiology & Behavior* 78 (1), 165-169.
- Girgis S., Neal B., Prescott J., Prendergast J., Dumbrell S., Turner C., Woodward M., 2003. A one-quarter reduction in the salt content of bread can be made without detection. *European Journal of Clinical Nutrition* 57 (4), 616-620.
- Hercberg S., 2012. Etude NutriNet-santé 2012. Résultats sur les apports de fibres. Conférence de presse.
- Jalabert-Malbos M.L., Mishellany-Dutour A., Woda A., Peyron M.-A., 2007. Particle size distribution in the food bolus after mastication of natural foods. *Food Quality and Preference* 18 (5), 803-812.
- Le Bleis F., Chaunier L., Della Valle G., Panouillé M., Réguerre A.-L., 2013. Physical assessment of bread destructure during chewing. *Food Research International* 50, 308-317.
- Le Bleis F., 2014. Elaboration et déstructuration orale de pains enrichis en fibres alimentaires et à teneur réduite en sel. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, France.
- Le Bleis F., Chaunier L., Chiron H., Réguerre A.-L., Della Valle G., 2014. Comment intégrer dans le procédé de panification les modifications de propriétés rhéologiques de la pâte dues à l'incorporation de fibres alimentaires ? *Rhéologie*, 2014. Sous presse.
- Lentle R.G., Janssen P.W.M., 2008. Physical characteristics of digesta and their influence on flow and mixing in the mammalian intestine: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 178, 673-690.
- Livesey G., Taylor R., Hulshof T., Howlett J., 2008. Glycemic response and health - asystematic review and meta-analysis: relations between dietary glycemic properties and health outcomes. *The American Journal of Clinical Nutrition* 87, 258S-268S.
- Loret C., Walter M., Pineau N., Peyron M.-A., Hartmann C., Martin N., 2011. Physical and related sensory properties of a swallowable bolus. *Physiology & Behavior* 104 (5), 855-864.
- Lynch E.J., Dal Bello F., Sheehan E.M., Cashman K.D., Arendt E.K., 2009. Fundamental studies on the reduction of salt on dough and bread characteristics. *Food Research International* 42 (7), 885-891.

- Martin C., Courcoux P., Chiron H., Issanchou S., 2008. Caractéristiques sensorielles clés de l'acceptabilité d'un pain de type baguette française. *Industries des Céréales* 159, 6-19.
- Mioche L., Bourdiol P., Monier S., 2003. Chewing behaviour and bolus formation during mastication of meat with different textures. *Archives of Oral Biology* 48 (3), 193-200.
- Mishellany A., Woda A., Labas R., Peyron M.-A., 2006. The Challenge of Mastication: Preparing a Bolus Suitable for Deglutition. *Dysphagia* 21 (2), 87-94.
- Müller K., Figueroa C., Martínez C., Medel M., Obreque E., Peña-Neira A., Morales-Bozo I., Toledo H., López-Solis R.O., 2010. Measurement of saliva volume in the mouth of members of a trained sensory panel using a beetroot (*Beta vulgaris*) extract. *Food Quality and Preference* 21 (5), 569-574.
- Nasri N., Septier C., Beno N., Salles C., Thomas-Danguin T., 2013. Enhancing salty taste through odour-taste-taste interactions: Influence of odour intensity and salty tastants' nature. *Food Quality and Preference* 28, 134-140.
- Noort M.W.J., Bult J.H.F., Stieger M., 2012. Saltiness enhancement by taste contrast in bread prepared with encapsulated salt. *Journal of Cereal Science* 55 (2), 218-225.
- Noort M.W.J., Bult J.H.F., Stieger M., Hamer R.J., 2010b. Saltiness enhancement in bread by inhomogeneous spatial distribution of sodium chloride. *Journal of Cereal Science* 52 (3), 378-386.
- Noort M.W.J., van Haaster D., Hemery Y., Schols H.A., Hamer R.J., 2010a. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality - Evidence for fibre-protein interactions. *Journal of Cereal Science* 52, 59-64.
- Observatoire du pain, 2011. Derniers résultats du volet « pain » de l'enquête Crédoc Comportements et consommation alimentaires des Français 2010.
- Panouillé M., Saint-Eve A., Déléris I., Le Bleis F., Souchon I., 2014. Oral processing and bolus properties drive the dynamics of salty and texture perceptions of bread. *Food Research International* 62, 238-246.
- Peyron M.-A., Gierczynski I., Hartmann C., Loret C., Dardevet D., Martin N., Woda A., 2011. Role of Physical Bolus Properties as Sensory Inputs in the Trigger of Swallowing. *PLoS One*, e21167 (6).
- Peyron M.-A., Mishellany A., Woda A., 2004. Particle Size Distribution of Food Boluses after Mastication of Six Natural Foods. *Journal of Dental Research* 83 (7), 578-582.
- Pomeranz Y., Shogrem M.D., Finnley K.F., Bechtel D.B., 1977. Fiber in breadmaking - effects on functional properties. *Cereal Chemistry* 54 (1):24-51.
- Prinz J.F., Lucas P.W., 1995. Swallow thresholds in human mastication. *Archives of Oral Biology* 40(5), 401 - 403.
- 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 & Diététique* 49, 61-66.
- Shama F., Parkinson C., Sherman P., 1973. Identification of stimuli controlling the sensory evaluation of viscosity I. Non-oral Methods. *Journal of Texture Studies* 4 (1), 102-110.
- van der Bilt A., Fontijn-Tekamp F.A., 2004. Comparison of single and multiple sieve methods for the determination of masticatory performance. *Archives of Oral Biology* 49 (2), 155-160.
- Yven C., Guessasma S., Chaunier L., Della Valle G., Salles C., 2010. The role of mechanical properties of brittle airy foods on the masticatory performance. *Journal of Food Engineering* 101 (1), 85-91.