
CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE LA CUISSON DE PRODUITS PANIFIÉS ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE RUPTURE DE FILM DE PÂTE À PAIN

Thèse de Kossigan Bernard **DEDEY**¹

Analyse de Gérard **CUVELIER**²

Direction de thèse : Tiphaine **LUCAS**, chercheuse ICPEF, HDR, INRAE
Co-encadrant : David **GRENIER**, Ingénieur de Recherche INRAE

La qualité des produits alimentaires transformés repose sur la maîtrise de leur composition et des opérations qui les construisent. Comprendre l'évolution et l'interdépendance des phénomènes physiques et biochimiques qui se produisent lors de l'élaboration du produit est un atout majeur pour mieux les maîtriser. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'interviennent des traitements thermiques, comme c'est le cas pour les produits céréaliers cuits, et spécifiquement dans le cas du pain qui fait l'objet du travail de thèse de l'auteur. Le volume et la texture du pain sont intimement liées au développement de sa structure alvéolaire initiée au cours du processus de fermentation de la pâte et qui va largement se poursuivre au moment de la cuisson. L'évolution des propriétés mécaniques des films de pâte entre les alvéoles du pain, l'étirement et l'amincissement de ceux-ci, jusqu'à la rupture lors de l'expansion du produit sous l'effet des contraintes qui s'exercent à la cuisson du pain, est le phénomène majeur à l'origine de sa structure finale. Ces propriétés mécaniques et leur évolution sont étroitement dépendantes de la composition et de l'organisation de la pâte, notamment à travers les deux composants majoritaires qui la constituent, le réseau de gluten formé lors du pétrissage et les grains d'amidon, ainsi que de la teneur en eau.

La prédiction des caractéristiques de structure et de texture du pain s'appuie de longue date, au plan opérationnel, sur la détermination des propriétés rhéologiques des pâtes de farine. Ces caractérisations amont, bien qu'opérationnelles, restent toutefois éloignées, au plan expérimental, des phénomènes se produisant lors de la fermentation et de la cuisson et de leur compréhension. Les travaux, menés depuis plusieurs années selon une approche de type sciences des matériaux, couplant des dispositifs expérimentaux conçus dans des conditions proches de celles des procédés, les techniques d'investigation de la structure, la mesure des propriétés mécaniques et à la modélisation, permettent d'avancer dans la compréhension des phénomènes étudiés.

C'est dans ce contexte, et selon cette approche, que se situe le travail de doctorat de Kossigan Bernard **DEDEY**.

La visée de la thèse est d'apporter des éléments de compréhension des mécanismes impliqués dans la rupture mécanique des parois des alvéoles de la pâte à pain au cours de la cuisson, en les étudiant à l'échelle d'une paroi. Pour cela l'auteur a développé un dispositif expérimental instrumenté, permettant d'observer l'évolution d'un film de pâte dans un environnement contrôlé se rapprochant autant que possible des conditions réelles de cuisson (température, humidité et

¹ Thèse de l'Université de Rennes 1 – Ecole Doctorale n° 600 – *Ecologie, Géosciences, Agronomie et Alimentation*. Spécialité Statistiques/Modélisation en écologie, géosciences, agronomie et alimentation – Réalisée au sein de l'Équipe IRMFood de l'Unité de recherche INRAE OPAALE de Rennes et soutenue le 22/09/2021.

² Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section 8 « Alimentation humaine ».

la déformation mécanique). L'observation de l'évolution du film et de sa rupture à l'échelle choisie a pour but aussi de pouvoir tenir compte à terme du rôle des phénomènes physicochimiques se produisant au cours de la cuisson au niveau du grain d'amidon (gélatinisation de celui-ci), de la dénaturation du réseau de gluten et de la redistribution de l'eau. Une seconde approche a consisté à modéliser le comportement mécanique, d'un film de pâte réduit à la taille d'un grain d'amidon entouré d'un réseau de gluten, au moyen d'un modèle de type « éléments finis » de façon à localiser les endroits potentiels d'initiation de rupture du film.

Le corps du manuscrit se présente sous forme d'articles scientifiques rédigés en anglais. Les introductions et conclusions en permettent une lecture fluide.

L'étude bibliographique, publiée par ailleurs et dont Kossigan Bernard DEDEY est co-auteur, constitue une entrée en matière adaptée et suffisamment développée au travail lui-même. Elle permet au lecteur une immersion directe et précise au cœur du sujet. La composition et la microstructure de la pâte à pain sont tout d'abord présentées, ainsi que l'évolution physicochimique du produit et de ses composants au cours des différentes étapes de son élaboration jusqu'à la cuisson. L'accent est mis sur la structure alvéolaire et les propriétés des parois entourant les bulles de gaz. Les propriétés mécaniques et les modèles utilisés pour décrire le comportement à la cuisson des deux constituants majeurs de la pâte, réseau de gluten et amidon, seuls puis en interaction au sein de la matrice, sont ensuite passés en revue. Un dernier chapitre s'attache plus spécifiquement aux propriétés à la rupture des parois, aux mécanismes qui y conduisent ainsi qu'aux tests expérimentaux qui permettent d'approcher ces comportements.

Les résultats du travail sont présentés en deux grandes parties, l'une portant sur le dispositif expérimental original développé au cours de la thèse, l'autre présentant la modélisation du comportement mécanique d'un film en extension.

La conception et le développement du dispositif expérimental constitue un apport majeur du travail. Ce dispositif reprend le principe de déformation d'un film de pâte par soufflage de l'Alvéographe de Chopin (aujourd'hui Alvéolab®), universellement utilisé pour la caractérisation du potentiel des farines en panification, mais en le transposant dans une cellule qui permet de réaliser la déformation du film également par soufflage, mais dans des conditions contrôlées pouvant se rapprocher de celles de la cuisson. Grâce à son étanchéité, le système permet ainsi de caractériser le comportement de la pâte jusqu'à 70°C dans une ambiance gazeuse réaliste. L'auteur a consacré une grande partie de son travail à la validation nécessaire des conditions de fonctionnement du dispositif, et notamment de l'homogénéité thermique au sein de la cellule au cours de l'expérimentation. Le système d'injection permet de déformer le film de pâte à des vitesses faibles (10^{-3} s^{-1} - 10^{-4} s^{-1}) programmables. Le couplage à un système d'observation directe du film à l'aide d'un vidéoscope et d'analyse d'image permet de suivre son évolution et d'estimer/valider les vitesses de déformations réelles au sommet de la bulle de pâte. Une solide analyse critique des courbes contrainte-déformation obtenues a été menée. L'importance est soulignée de la maîtrise de l'épaisseur initiale du film de pâte et de son évolution au cours de la déformation, pour une estimation correcte des paramètres mécaniques jusqu'à la rupture.

Le travail de modélisation a été conduit selon une approche de type « éléments finis ». Le modèle micromécanique visco-hyperélastique de Maxwell généralisé à une branche a été retenu pour prédire le comportement du film de pâte en extension. Il permet de prendre en compte les caractères visqueux et élastique de la pâte et de les modéliser aux grandes déformations. Le modèle développé prend en compte les interactions réseau de gluten et amidon en une couche mince dans des conditions (valeur des modèles mécaniques) estimées de teneur en eau. Les simulations réalisées pour la modélisation des propriétés mécaniques du film et la localisation de sa rupture ont mis en évidence l'importance de considérer la nature des interactions gluten-amidon (caractère cohésif) et ceci en fonction de l'évolution de la fraction volumique du grain

d'amidon et de la proportion de gluten entourant le grain. Le couplage modélisation – expérimentation reste à faire.

Le travail expérimental réalisé par l'auteur est considérable, que ce soit pour le développement du dispositif expérimental et la validation de ses conditions d'utilisation ou pour l'approche modélisation des propriétés mécaniques d'un film de pâte.

L'approche scientifique, couplant élaboration d'un dispositif expérimental instrumenté et modélisation pour l'étude d'un système complexe dans des conditions proches du réel, se situe dans la ligne de ce que développent les équipes qui travaillent dans le domaine du génie des procédés alimentaires aujourd'hui. La maîtrise de la qualité des produits et des couplages formulation/procédé gagne à ce type d'approche, même si celle-ci est conséquente au plan expérimental. Kossigan Bernard DEDEY y a contribué de façon significative.

Ses travaux ont donné lieu à une très bonne valorisation scientifique : cinq articles sont publiés ou en préparation, ainsi qu'un brevet portant sur le dispositif expérimental développé et plusieurs communications dans des congrès internationaux.

Le sujet traité et la qualité du travail doctoral de Kossigan Bernard DEDEY méritent pleinement que celui-ci soit valorisé sur le site de l'Académie.