

Modélisation multi-physique de la cuisson du pain: simulation numérique et enseignements technologiques

D.Grenier ¹, T.Lucas ¹, C.Doursat ², D.Flick ², G.Trystram ²

¹CEMAGREF, Food Process Engineering Research Unit, RENNES (France)

²AGRO PARIS TECH, Joint Research Unit Food Process Engineering MASSY (France)

1 Objectif

Les travaux de modélisation s'inscrivent dans un programme de recherche Européen : Le projet Fresh-Bake. Ce projet a pour objectif général d'améliorer la qualité nutritionnelle des pains surgelés industriels et de réduire la consommation énergétique à leur fabrication (écotechnologies) par rapport à la technologie du pain précuit. Le Cemagref contribuera principalement au deuxième objectif en collaboration avec trois autres partenaires académiques (TTZ, Bremerhaven, Allemagne, Université de Zagreb, Croatie, ENITIAA, Nantes, France).

Les alternatives environnementales à la technologie du pain précuit sont connues (pâtes pré-fermentées congelées, pâtes prêtes-à-cuire) mais donnent en pratique des produits de moindre qualité (volume final plus faible, mie très hétérogène). Les recherches contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes d'expansion à l'échelle des bulles et des transports de matière et de chaleur, intervenant aux étapes de fermentation, cuisson et refroidissement. L'ensemble des connaissances acquises servira aussi à proposer de nouvelles solutions techniques pour maîtriser l'alvéolage des pâtes pré-fermentées surgelées.

Pour ce faire une modélisation en 1D dimension des phénomènes de transport à la fois de chaleur et de matière a été développée. Les simulations numériques sont effectuées sous Matlab.

2 Matériels et Méthodes

Le simulateur permet d'étudier l'influence des paramètres moteurs à l'expansion lors de la cuisson du pain (cinétiques de vaporisation et d'expansion des gaz), et les paramètres freins à cette expansion (rupture des films de pâte sous un différentiel de pression et rigidification de ces mêmes films suite aux modifications thermiques des macromolécules – amidon et protéines). Ces derniers sont transcrits dans le modèle par l'introduction des plages de température pour l'ouverture des pores, T_{kg} , et pour la rigidification des films, T_{η} .

La porosité finale est le résultat d'un équilibre local entre les forces de pression et les forces visqueuses. A l'échelle de la bulle, la mécanique introduite dans le modèle établit le lien entre la contrainte visqueuse et la variation de vitesse dans la direction du déplacement par l'intermédiaire de la viscosité. Les paramètres liés à la constitution de la pâte et à sa géométrie sont étudiés et les paramètres de l'environnement modifiés. Dans chacun des cas, une analyse des mécanismes de formation des bulles et de l'impact du choix des valeurs sur la hauteur atteinte en fin de cuisson et sur la répartition de la porosité est réalisée.

3 Résultats et discussion

3.1 Par rapport à la connaissance des mécanismes de formation des bulles

Les forces motrices (vaporisation des gaz) et freins (rupture des films et échappement des gaz, augmentation de la viscosité des films de pâte) de l'expansion sont pilotées par la température. Or le procédé de cuisson génère un traitement thermique hétérogène du pain (la surface chauffe plus vite que le cœur) et donc étale l'occurrence des forces freins dans l'espace et dans le temps. De ces décalages spatio-temporels résultent trois dynamiques distinctes d'expansion, en périphérie à proximité de l'ambiance du four (partie supérieure), dans la mie à cœur et en partie inférieure.

Si la croûte se met en place bien avant que la température de gélatinisation de l'amidon n'ait été atteinte à cœur, sa faible déformabilité créera une contrainte supplémentaire et modifiera l'équilibre local des forces d'expansion des bulles. Les gaz vaporisés dans les bulles à cœur qui sont encore fermées se traduiront par une forte augmentation de pression interne. A l'opposé, il existe une zone entre la surface supérieure et le cœur, où les pores sont ouverts (force de pression faible) et non rigidifiées (force visqueuse faible). L'expansion des bulles à cœur se fera au détriment de cette région mécaniquement la plus faible, qui se fera comprimer. La porosité locale dans le pain dépend d'une compétition entre le transport thermique à cœur (pour atteindre le plus rapidement possible la gélatinisation de l'amidon à cœur) et la formation de la croûte.

Deux pistes se dégagent pour le pilotage de la cuisson. La première consiste à gérer au mieux le couplage des transitions mécaniques. La seconde mène vers des méthodes de cuisson qui favorisent une bonne expansion avant la formation de la croûte, soit par le contrôle de l'apparition de la croûte, soit par l'amélioration de l'expansion des bulles en début de cuisson.

3.2 Par rapport à la conduite technologique de la cuisson

- **Simulation d'une amélioration des caractéristiques mécaniques de la pâte**

Afin d'illustrer une rupture des films de pâte plus ou moins tardive, les positions relatives des T_{kg} et T_{η} a été modifié. Dans le cas d'une cuisson classique, les leviers d'action du procédé sur les valeurs de la perméabilité et de la viscosité sont essentiellement le pétrissage, la qualité du mélange améliorant-farine et dans une moindre mesure la teneur en eau. La position relative de T_{kg} et T_{η} a une influence à la fois sur la hauteur et sur la porosité.

Deux configurations ont été étudiées :

- 1) Rigidification survenant avant l'ouverture des pores,
- 2) Rigidification survenant après l'ouverture des pores (correspondant à une pâte dans laquelle le réseau de gluten est mal formé au début de la cuisson)

L'idéal serait d'avoir T_{kg} proche ou légèrement supérieure à T_{η} et T_{η} assez faible de façon à favoriser une mie à la fois développée et homogène.

- **Modification de l'environnement : exemple de la pression extérieure**

L'objectif est ici d'imposer en début de cuisson une pression atmosphérique inférieure à la pression atmosphérique initiale et de la maintenir tant que la pâte n'est pas totalement transformée en mie (gélatinisation de l'amidon terminée). En effet la différence de pression locale et de l'ambiance permet au dégagement gazeux de plus ou moins s'exprimer. Les pressions engendrées lors des simulations sont très faibles (\ll kPa). Il est raisonnable de penser qu'une dépression, même légère, puisse engendrer un gain de hauteur significatif et une augmentation de la porosité, globale et locale. Les variations de pression à imposer dans l'environnement de cuisson des pâtons doivent être lentes de façon à ne pas endommager la structure alvéolaire et provoquer la rupture de films. Deux conditions à la limite supérieure basées sur des exponentielles décroissantes ont été testées. Une diminution de la pression extérieure de 0.5 % et 10% entraîne une élévation de la hauteur totale finale de 4 % et 15 % respectivement.