

## ANALYSE ET MODÉLISATION DE LA RÉACTIVITÉ AU COURS DE LA CUISSON D'UN PRODUIT MODÈLE MIMÉTIQUE D'UN PRODUIT CÉRÉALIER DE TYPE GÉNOISE

Thèse de Jeehyun LEE<sup>1</sup>

Analyse de Gérard CUVELIER<sup>2</sup>

Directrice de thèse : Catherine **BONAZZI**, directrice de recherche INRAE, directrice de l'UMR 782 SAYFOOD AgroParisTech-INRAE

Co-encadrantes : Barbara **REGA** et Stéphanie **ROUX**, maîtres de conférences AgroParisTech

La qualité des produits alimentaires transformés repose sur la maîtrise des opérations qui les construisent. Comprendre l'interdépendance des phénomènes physiques et chimiques qui se produisent lors de leur élaboration est un atout majeur pour en piloter la qualité en gérant au mieux les interactions formulation/procédés. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'interviennent des traitements thermiques comme c'est le cas pour les produits céréaliers cuits. Le traitement de cuisson, outre son action majeure sur la structure et la texture du produit, est à l'origine du développement recherché des composés de son arôme et de sa couleur. Des composés potentiellement toxiques peuvent alors également se développer dans le cas de traitements mal maîtrisés.

C'est dans ce contexte que se situe le travail de doctorat de Jeehyun LEE.

De nombreux travaux avaient jusque-là porté sur les mécanismes réactionnels pouvant se produire lors d'un traitement thermique, mais le plus souvent menés en milieu liquide.

Ici, Jeehyun Lee a construit son étude sur deux idées fortes : disposer d'un modèle physique, non réactif mais réaliste, du point de vue de sa structure proche d'un produit réel, la génoise, et suivre, sur ce support modèle, le développement au cours de la cuisson de deux voies réactionnelles typiques pour ce genre de produit – la caramélisation et la réaction de Maillard – en les opérant à partir de réactants simples, précurseurs de ces réactions, respectivement le glucose et un mélange glucose-leucine.

Le manuscrit commence pour cela par un état de l'art très détaillé et particulièrement bien orienté vers l'étude qu'elle va mener ensuite dans sa thèse.

Une première partie présente la génoise comme modèle réel de référence et les phénomènes physiques et chimiques qui se produisent dans ce type de produit céréalier sous l'effet des phénomènes de transfert lors de la cuisson. Un état des connaissances sur les réactions de

---

<sup>1</sup> Thèse de l'Université Paris-Saclay préparée à l'Université Paris-Sud et AgroParisTech – École Doctorale n° 581 – Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement, Santé (ABIES).  
Spécialité de doctorat, Génie des aliments, soutenue le 16/12/2019

<sup>2</sup> Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section 8 « Alimentation humaine »

caramélisation et de Maillard est présenté : ce sont ces deux voies de réactions qui seront étudiées ensuite au plan expérimental.

Une deuxième partie porte sur différents marqueurs réactionnels de ces deux réactions et les voies de leur formation et de leur dégradation. Ceci permet à l'auteure, à partir de ces données de la littérature, de présenter un schéma réactionnel global des mécanismes de transformation se produisant à partir du glucose et de la leucine, selon les réactions de caramélisation ou de Maillard.

A partir de là, la stratégie se dessine dans la mesure où le produit modèle fournit un support neutre qui permet de limiter les réactants initiaux mis en œuvre pour construire un schéma réactionnel réaliste (c'est-à-dire suffisamment complet pour se rapprocher de la complexité du milieu réel) et observable à partir de marqueurs réactionnels qui peuvent être suivis de façon quantitative au cours de la cuisson, et qui présentent en outre l'intérêt de discriminer les différentes voies réactionnelles.

Parallèlement, le four utilisé, spécifiquement instrumenté, va permettre de suivre précisément les conditions de la cuisson, gradients thermiques et teneur en eau dans le produit, et de réaliser des prélèvements cinétiques en vue de l'analyse chimique des marqueurs de réactions.

Une partie « matériels et méthodes » décrit la composition des génoises modèles étudiées, le four instrumenté et les conditions de cuisson, ainsi que l'ensemble des mesures permettant le suivi de l'évolution de la cuisson du produit et des réactions qui se développent. Les mesures analytiques, nombreuses, sont réalisées d'une part sur des génoises prélevées en cours de cuisson afin de suivre l'évolution des marqueurs de réactions dans le produit et d'autre part par piégeage direct des marqueurs volatils sur les vapeurs de cuisson.

Les résultats sont présentés en plusieurs parties sous la forme d'articles pour publication. Le premier consiste en une validation du modèle physique mimétique de la génoise mis au point dans un travail précédent au sein de l'équipe. Les polymères dérivés de cellulose utilisés pour sa formulation permettent le développement de la structure alvéolée recherchée. Cette matrice est bien inerte vis-à-vis de réactions chimiques, elle reste parfaitement blanche à la cuisson. Par contre, supplémentée en glucose et leucine, s'enclenchent les réactions attendues sous l'effet de la température, jusqu'au brunissement. L'article décrit également la mise au point de la méthode de piégeage dynamique et de caractérisation (par désorption thermique : TD-GC-MS) des marqueurs réactionnels volatils qui se dégagent au cours de la cuisson. L'article suivant montre la fiabilité et la performance de cette méthode de piégeage – TD-GC-MS – pour un suivi quantitatif rapide des composés réactionnels. Les concentrations de dix marqueurs (pyrazines, acide acétique, composés furaniques) ont ainsi été suivies pour les formules modèles étudiées avec glucose ou glucose + leucine dans différentes conditions de cuisson.

Le dosage de composés extraits des génoises modèles, prélevées en cours de cuisson, vient compléter les données cinétiques obtenues sur les marqueurs volatils. L'ensemble permet de vérifier les hypothèses émises sur les différentes voies réactionnelles des réactions de caramélisation et de Maillard. Ces résultats sont présentés dans deux articles couplés.

Un chapitre traite ensuite du couplage possible des cinétiques des réactions chimiques suivies avec une modélisation des phénomènes de transferts de chaleur (températures) et de matière (teneur en eau) également suivis au cours de la cuisson. Deux modèles, preuves de concept, ont été établis qui démontrent le potentiel de la méthode déployée pour permettre une compréhension approfondie des phénomènes chimiques liés à la cuisson au sein de produits alimentaires solides comme les produits céréaliers de cuisson pris ici comme cible.

Au final, le travail de Jeehyun LEE est original à plus d'un titre : (i) la mise en œuvre d'un modèle physique mimétique réaliste, similaire à la structure des produits céréaliers de cuisson alvéolés, mais neutre du point de vue des réactions chimiques ; (ii) le choix d'étudier de façon spécifique certaines réactions (caramélisation et réactions de Maillard) après une analyse fouillée des données de la littérature sur ces réactions, permettant l'identification des mécanismes

réactionnels à suivre ; (iii) le développement de méthodes analytiques quantitatives permettant le suivi dynamique des produits de réactions en ligne en fonction des conditions de traitement, ainsi que le dosage de marqueurs réactionnels intermédiaires dans les produits. Les données recueillies ont ouvert à la possibilité d'un couplage aux modèles de transferts. Le travail expérimental réalisé pour cela a été considérable. Au-delà même des résultats obtenus, la thèse de J. LEE vaut largement aussi par l'approche méthodologique mise en œuvre. Elle montre tout l'intérêt de rester au plus près des conditions réelles dans lesquelles sont opérées les transformations étudiées pour en dégager des expérimentations simplifiées en milieu modèle, permettant un suivi réaliste de la dynamique des processus engagés. 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.

Cette approche scientifique se situe dans la ligne de ce que l'équipe d'accueil de la thèse (UMR GENIAL, maintenant SAYFOOD) développe depuis de nombreuses années dans le domaine du génie de la réaction. Jeehyun LEE a su apporter à la fois son regard de chimiste à une problématique difficile à aborder du fait de la complexité des mécanismes réactionnels impliqués, en même temps qu'une approche concrète du procédé de cuisson et de l'instrumentation associée, nécessaires au suivi analytique quantitatif des composés des réactions étudiées.

Ses travaux ont donné lieu à une bonne valorisation scientifique avec la publication de deux articles scientifiques dans des revues internationales ainsi que plusieurs communications orales ou affichées dans des congrès. Deux autres articles scientifiques sont en voie de soumission.

La qualité du travail doctoral de Jeehyun LEE mérite pleinement que celui-ci soit valorisé sur le site de l'Académie.

-----  
***Situation post-doctorale :***

Jeehyun LEE poursuit maintenant une carrière dans l'enseignement supérieur et la recherche : après un poste de Maître de Conférences en Génie des Procédés Alimentaires à AgroParisTech, elle a rejoint en janvier 2021 Agrocampus Ouest à Rennes en tant que Maître de Conférences en Génie des Procédés et mène ses recherches au sein de l'UMR STLO.