

Thèse de doctorat

Compréhension et modélisation des réactions de brunissement au cours du séchage et du stockage des poudres laitières, de la goutte à l'échelle semi-industrielle

Contexte et objectif

Beaucoup de denrées alimentaires sont transformées en poudres car cette forme sèche leur confère une durée de vie allongée tout en facilitant leur stockage et transport par réduction de la teneur en eau et du volume des produits. La filière laitière est tout particulièrement concernée, avec 12 millions de tonnes de poudres laitières produites annuellement à l'échelle globale, permettant le report des produits laitiers de 1 à 3 ans. Ces poudres sont obtenues par une succession d'opérations unitaires thermiques (traitement thermique, concentration, séchage) qui, compte tenu de la composition complexe des matrices laitières (eau, matière grasse, protéines, minéraux), sont à l'origine des réactions chimiques induites par la chaleur (réactions de Maillard, caramélisation et dénaturation/agrégation des protéines). Ces réactions altèrent la qualité d'origine des produits et se poursuivent à l'état sec au cours du vieillissement, durant le stockage et le transport. Parmi elles, le brunissement non enzymatique résultant principalement des réactions de Maillard est un phénomène particulièrement indésirable, car il altère considérablement les propriétés nutritionnelles, sensorielles et fonctionnelles des poudres [1]. Il est donc primordial de comprendre les mécanismes à l'origine de ces évolutions afin de prédire la durée de vie d'une poudre, d'autant plus dans un contexte de changement climatique et de mondialisation des échanges où il n'est pas rare que ces produits soient exposés à des températures supérieures ou égales à 60 °C sur plusieurs semaines [2].

La tâche n'est pas aisée dû au manque des connaissances sur les réactions de brunissement dans les produits laitiers secs. Quelques travaux ont été conduits sur des systèmes modèles liquides, certains proposant des modèles cinétiques [3], mais les résultats ne sont pas directement transposables aux poudres, la mobilité des précurseurs en milieu liquide étant très supérieure à celle observée dans un milieu en cours de changement d'état puis solide. Sur le plan mécanistique, peu d'études existent. Les travaux cinétiques de Miao et Roos [4, 5] sur des systèmes modèles séchés par atomisation ont montré que les vitesses de réactions des réactions de brunissement non-enzymatique au cours du stockage augmentent à la fois avec la teneur en eau et la température, soulignant que la température de transition vitreuse ne constitue pas le seul absolu pour la cinétique réactionnelle. Norwood et al. (2017) [6] ont souligné l'impact de la teneur en lactose sur le brunissement et la dénaturation des protéines au cours du stockage à faible activité de l'eau, tandis que Paul et al. (2022) [7] ont montré que le

brunissement au cours du stockage à forte activité de l'eau était indépendant de la teneur en lactose, étant plutôt déterminé par le niveau initial de protéines alcoylées.

Le stockage ne débute pas à partir d'un état initial arbitraire, mais d'une résultante des dynamiques réactionnelles ayant eu lieu au cours du séchage par atomisation et qui restent très largement méconnues [8]. Les rares travaux disponibles ont suivi la couleur et des marqueurs globaux lors du séchage à l'échelle pilote de lait écrémé et de systèmes modèles lactose:isolat de protéines sériques [9], puis modélisé les cinétiques correspondantes dans des conditions simulées [10], sans que les voies réactionnelles envisagées soient élucidées. L'accès à la mesure est en effet particulièrement difficile : i) temps de séchage court ($\approx 4-5$ s), ii) distribution non uniforme des particules et iii) caractère fermé de la chambre de séchage rendent difficile la quantification de la température et de la teneur en eau en un temps et une position donnés. Ainsi, les réactions ayant lieu au cours du séchage par atomisation ont souvent été approximées par une simple réaction d'ordre 1, alors que la réaction de Maillard est une cascade de multiples réactions élémentaires et entre en compétition avec la caramélisation et la dénaturation/agrégation des protéines.

Une difficulté supplémentaire est propre aux matrices sèches : la mobilité moléculaire des précurseurs évolue continuellement au cours du séchage, où les gouttes subissent une transition sol-gel d'une solution homogène à une matrice solide non uniforme, puis d'un état vitreux à un état caoutchoutique au cours du stockage. Ces transitions de phase ont une influence considérable sur la réactivité [11].

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de comprendre les mécanismes réactionnels responsables du brunissement non enzymatique des poudres laitières au cours du séchage par atomisation et du stockage, en faisant croître progressivement la complexité, de l'échelle de la goutte à l'échelle semi-industrielle. Le travail identifiera l'influence de la température et de la teneur en eau sur les cinétiques réactionnelles, puis construira et validera des modèles cinétiques multi-réponses permettant la prédiction de l'intensité du brunissement au cours du stockage.

Missions

La personne recrutée sera chargée de :

- i) Étude des dynamiques réactionnelles au cours du séchage simulé
 - mise en place et utilisation des dispositifs miniaturisés permettant l'observation des dynamiques réactionnelles sous température et humidité contrôlées ;
 - suivi en ligne et hors ligne des marqueurs réactionnels, puis modélisation cinétique ;
- ii) Étude des dynamiques réactionnelles au cours du séchage et du stockage à l'échelle pilote
 - séchage par atomisation de poudres modèles en faisant varier les paramètres du procédé afin d'en déterminer l'influence ;
 - détermination des marqueurs réactionnels avant et après séchage et des propriétés physico-chimiques ;
 - développement d'un modèle de prédiction du brunissement et d'un modèle cinétique multi-réponse tenant en compte de la teneur en eau pendant le stockage ;

- iii) Validation des modèles à l'échelle semi-industrielle
 - production de poudres laitières réelles et stockage sous conditions contrôlées ;
 - validation des modèles cinétiques et du modèle de prédiction du brunissement.

Profil requis

Formation : Master 2/diplôme d'ingénieur ou équivalent en génie chimiques, génie des procédés, physique ou sciences des aliments

Compétences :

- Fort intérêt pour l'expérimentation en laboratoire (procédés, physico-chimie, techniques analytiques)
- Bases en modélisation et en programmation scientifique (Python, Matlab, R)
- Connaissances en génie des procédés (transferts de chaleur et de matière) et/ou en chimie des aliments

Aptitudes recherchées :

- Curiosité scientifique et prise d'initiative
- Autonomie, rigueur et bonnes capacités d'organisation et de travail en équipe
- Anglais courant (rédaction d'articles, présentations en conférences).

Environnement de travail

La personne recrutée exercera ses activités au sein de l'équipe Procédé-Structure-Fonctionnalité (PSF) de l'Unité Mixte de Recherche Science et Technologie du Lait et de l'Œuf (UMR STLO) (<https://stlo.rennes.hub.inrae.fr/>). Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet « Predicting the browning of dairy powders by kinetic modeling of Maillard reaction and caramelization during drying and storage (MARACAS) », financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre de l'Appel à Projets Générique (AAPG) 2025.

Le STLO a pour objectif de produire des connaissances sur les constituants du lait ou de l'œuf puis sur leur transformation en ingrédients ou produits finis pour l'alimentation humaine. En mobilisant des compétences en biochimie, physico-chimie, génie des procédés, physique, technologie et microbiologie, son objectif est de contribuer à une alimentation sûre, saine, bonne, respectueuse de l'environnement et des besoins des populations spécifiques.

Le STLO dispose d'équipements de pointe pour soutenir ses activités de recherche multidisciplinaires. La plateforme laitière offre des équipements pilotes avec des possibilités d'instrumentation avancée. L'unité possède également des outils performants pour les analyses chimiques, physiques et microbiologiques, spécifiquement adaptés aux produits laitiers. La personne recrutée bénéficiera pleinement de ces ressources pour mener à bien les missions demandées, sous l'encadrement de trois membres permanents : Romain Jeantet, Luca Lanotte et Jeehyun Lee. Elle travaillera par ailleurs en interaction étroite avec le post-doctorant recruté sur le projet.

Conditions d'accueil

Contrat : contrat doctoral de 36 mois

Rémunération : selon la grille en vigueur du contrat doctoral

Lieu : 65 rue de Saint Briec, 35000 Rennes

Date de début : à partir du 1^{er} janvier ou 1^{er} février 2027

Modalités de candidature

Dossier à envoyer avant le 4 octobre 2026 à jeehyun.lee@institut-agro.fr

- CV détaillé
- Lettre de motivation
- Relevé des notes des deux dernières années d'étude
- Lettres de recommandation.

[1] Phosanam, A., Chandrapala, J., Zisu, B., & Adhikari, B. (2021). Storage stability of powdered dairy ingredients: a review. *Drying Technology*, 39(11), 1529–1553. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1774891>

[2] Leinberger, D. (2006). Ocean container temperature and humidity study. *Dimensions*, 6.

[3] van Boekel, M. A. J. S. (2022). Kinetics of heat-induced changes in dairy products: Developments in data analysis and modelling techniques. *International Dairy Journal*, 126, 105187. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105187>

[4] Miao, S., & Roos, Y. H. (2004). Comparison of nonenzymatic browning kinetics in spray-dried and freeze-dried carbohydrate-based food model systems. *Journal of Food Science*, 69(7), 322-331

[5] Miao, S., & Roos, Y. H. (2006). Isothermal study of nonenzymatic browning kinetics in spray-dried and freeze-dried systems at different relative vapor pressure environments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(3), 182-194

[6] Norwood, E. A., Pezennec, S., Burgain, J., Briard-Bion, V., Schuck, P., Croguennec, T., Jeantet, R., & Le Floch-Fouéré, C. (2017). Crucial role of remaining lactose in whey protein isolate powders during storage. *Journal of Food Engineering*, 195, 206-216

[7] Paul, A., Gaiani, C., Cvetkovska, L., Paris, C., Alexander, M., Ray, C., Francius, G., El-Kirat-Chatel, S., & Burgain, J. (2022). Deciphering the impact of whey protein powder storage on protein state and powder stability. *Journal of Food Engineering*, 326, 111050

[8] Zhou, Z., & Langrish, T. (2021). A review of Maillard reactions in spray dryers. *Journal of Food Engineering*, 305, 110615. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110615>

[9] Zhou, Z., & Langrish, T. (2022). Color formation and Maillard reactions during the spray drying process of skim milk and model systems. *Journal of Food Process Engineering*, 45(1), e13936. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13936>

[10] Zhou, Z., & Langrish, T. (2024). Modeling Maillard reaction kinetics in spray dryers using both lumped- and distributed-parameter modeling approaches. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14599. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14599>

[11] Roos, Y., & Karel, M. (1991). Applying state diagrams to food processing and development. *Food Technology*, 45(12), 66, 68–71, 107.