DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **03 juin 2022**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Madame EL MOUSSAOUI Malak**

Titre de la thèse : *« Modélisation de séchage de kishk en couche mince, influence de la méthode de séchage sur la qualité du produit final »*

Résumé

Le kishk est un produit laitier fermenté Libanais, mettant en jeu des techniques de fabrication artisanales et est produit par les unités de production dans les familles rurales, principalement dans la région de la Békaa. Il est très apprécié et largement consommé par le peuple Libanais. Le kishk possède une grande valeur nutritionnelle et constitue une bonne source d'énergie surtout en hiver. C'est un mélange de céréales (boulgour), de yaourt et de sel séché et moulu.

A ce jour-là, le séchage de kishk s'effectue en plein air, ce qui l'expose à tout type de contamination affectant ainsi la qualité du produit final. La durée du séchage traditionnel est régie par plusieurs facteurs et la teneur en eau finale du produit varie selon les producteurs de kishk. Ceci génère une modification importante des caractéristiques du produit final ce qui peut constituer un obstacle à une exportation et à une commercialisation appropriée. Par conséquent, il est nécessaire de substituer la méthode conventionnelle de séchage de kishk par une méthode propre et rapide permettant le contrôle des paramètres de séchage qui influencent la durée de séchage et aboutissent à un produit final uniforme de bonne qualité hygiénique et ayant des caractéristiques bien déterminées.

A cette fin, un système de séchage solaire à convection forcée a été proposé pour assurer un séchage propre, rapide et économique du kishk en profitant de l'énergie solaire qui est abondante au Liban. Dans le cadre de l'implémentation du séchoir solaire, une modélisation de l'ensemble de ses composants, y compris la chambre de séchage, fut nécessaire afin de l'optimiser énergétiquement.

Par conséquent, cette thèse se focalise sur l'enceinte de séchage qui est le point de départ de l'étude énergétique puisqu'elle contient le produit à sécher. Une modélisation du processus de séchage en couche mince du kishk a été effectuée et une étude paramétrique a été menée pour une meilleure compréhension de ce processus et une identification des paramètres influents. De ce fait, les bilans de masse et de chaleur, prenant en compte les phénomènes de désorption de l'eau et les transferts par diffusion dans l'épaisseur du produit (modèle 1D) associée à une variation de température et de teneur en eau dans le produit ont été établis. Les bilans de masse et de chaleur au niveau de l'air de séchage et à l'interface produit / air ont également été établis en considérant les transferts par convection de l'air de séchage à la surface du produit d'une part et de d'autre part par conduction et diffusion dans le produit.

En tant que facteurs limitants au processus de séchage, les coefficients de transferts de masse et de chaleur entre l'air et le produit ont été déterminés expérimentalement pour les trois vitesses d'air (3.8, 5.5, et 8 $m.s^{-1}$) retenues dans les tests de séchage du kishk. De même, les coefficients de diffusivité effective de l'eau dans le produit ont été évalués aux temps longs, en se basant sur les valeurs expérimentales de la teneur en eau réduite du kishk pour les trois vitesses de l'air de séchage précédemment mentionnées, pour trois températures d'air (323, 333, 341 K) et trois épaisseurs du produit (4, 8 et 13 mm). Ces coefficients de

diffusivité effective ont ensuite été utilisés pour établir un modèle empirique de diffusion de type Arrhenius dépendant de la vitesse de l'air de séchage, de la température et de l'épaisseur du produit.

Les équations bilans du modèle de séchage ont été résolues par le programme de simulation MATLAB en se référant à la méthode des éléments finis utilisant le solver 1D-PDE et en employant les valeurs expérimentales des coefficients de transfert de masse, de chaleur et de la diffusivité, déjà déterminées. La confrontation des données expérimentales avec les résultats de la simulation a révélé une bonne concordance, validant ainsi le modèle de séchage. L'étude paramétrique montre que la vitesse de séchage augmente lorsque l'épaisseur du produit diminue, et lorsque la température et la vitesse de l'air de séchage augmente. Une valeur limite de la vitesse d'air à partir de laquelle on observe l'effet inverse a été déterminée.

Afin d'évaluer l'effet de la méthode de séchage proposée sur le produit final, une étude de qualité a été effectuée en comparant le séchage convectif par air chaud (à 313 et 323 K) au séchage traditionnel et en se référant au séchage par lyophilisation vu comme une méthode de déshydratation aboutissant à des produits de haute qualité. Pour ce faire, des analyses physico-chimiques, comme la teneur en eau, le pH, l'acidité titrable, l'indice de peroxyde, l'indice d'acide, la teneur en métaux lourds (Cd, Pb, Zn, Fe et Cu), la colorimétrie et la granulométrie ont été réalisées. En outre, les propriétés de réhydratation de la poudre de kishk comme la mouillabilité, la pénétrabilité, la dispersibilité et la solubilité ont été évaluées. Des analyses microbiologiques énumérant les coliformes, S.aureus, les anaérobies sulfito-réducteurs, Listeria monocytogenes, Salmonella, les levures et les moisissures dans la poudre de kishk, ont été effectuées en complément. Enfin une analyse sensorielle évaluant les propriétés organoleptiques de la poudre de kishk comme la couleur, l'odeur, la consistance, la texture en bouche, le goût acide, l'amertume, l'arrière-goût et l'acceptabilité globale, a été réalisée. L'étude de qualité a montré de meilleures propriétés physico-chimiques et organoleptiques ainsi qu'une capacité supérieure de réhydratation de la poudre de kishk issue du séchage convectif à air chaud par comparaison avec le séchage solaire en plein air. Les résultats ont révélé aussi que le séchage convectif à air chaud est la méthode de séchage la plus rapide par comparaison avec les deux autres méthodes testées. Enfin, il s'est avéré qu'une augmentation de la température de l'air de séchage de 20 degrés réduit le temps de séchage de 20%.

Mots clés : Kishk, couche mince, séchage traditionnel, séchage convectif, modélisation, diffusivité effective, transfert de masse et de chaleur, qualité