

THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602

Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes

Spécialité : Energétique – Thermique - Combustion

Par

Raoul OUAMBO TOBOU

Modélisation, expérimentation et commande intelligente de systèmes de séchage solaire agroalimentaire à air chaud : de la configuration autonome à l'intégration d'un stockage thermique thermocline par air.

Thèse présentée et soutenue à Douala, le 19/10/2026

Unité de recherche : Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (UMR 6607 CNRS)

Rapporteurs avant soutenance :

Nolwenn LE-PIERRES
Armand FOPAH-LELE

Professeure, LOCIE, Université Savoie Mont Blanc
Professor, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Buea

Composition du Jury :

Président :

Examinateur : Alexis KUITCHE
Examinateur : Jean Luc NSOUANDELE

Professeur, LETA, Université de Ngaoundéré
Professeur, LEN, Université de Douala

Directeur de thèse : Yilin FAN
Directeur de thèse : Frédéric LONTSI
Co-directeur de thèse : Jérôme SOTO
Co-encadrant de thèse : Nicolas BAUDIN

Directeur de Recherche CNRS (HDR), LTEN, Nantes Université
Professeur, LEN, Institut Ucac-Icam de Douala
Maitre des conférences (HDR), LTEN, Icam de Nantes
Maitre des conférences, LTEN, Nantes Université

Titre : Modélisation, expérimentation et commande intelligente de systèmes de séchage solaire agroalimentaire à air chaud : de la configuration autonome à l'intégration d'un stockage thermique thermocline par air.

Mots clés : Séchage solaire, stockage de chaleur, garnissage, commande et control, apprentissage par renforcement

Résumé : En Afrique subsaharienne, les pertes post-récolte en fruits et légumes atteignent près de 50 %. Par conséquent, compte tenu de son vaste potentiel solaire, le déploiement à grande échelle de solutions de séchage solaire dans cette région est crucial pour atteindre les objectifs de développement durable. Ce travail de thèse a étudié la solution de séchage solaire à air chaud (SHAD) couplée à un stockage d'énergie thermique sensible à lit de garnissage à air (SPBTES). Dans la première partie, un modèle numérique de séchoir est développé, couvrant les mécanismes de transfert de masse et de chaleur à la fois à l'échelle du produit et à celle du séchoir. Cela a conduit au développement et à la validation expérimentale d'un nouvel algorithme de commande sans modèle (model-free) pour le séchage solaire à air chaud, présentant des performances améliorées par rapport à l'approche traditionnelle de régulation de la température de séchage. Ensuite, la modélisation et la validation expérimentale d'un système SPBTES ont été réalisées,

avec un accent particulier sur la phase de repos, où la diffusion thermique et la convection naturelle affectent fortement la qualité du stockage de la chaleur. Sur la base des résultats précédents, une configuration de séchage SHAD couplée à un système SPBTES et dotée d'un contrôle actif des flux d'énergie thermique est proposée dans la troisième partie. Un code de simulation numérique a ensuite été développé et utilisé pour pré-entraîner des agents d'intelligence artificielle basés sur l'apprentissage par renforcement profond (DRL), capables d'ajuster dynamiquement les flux d'énergie thermique pour atteindre des objectifs de séchage optimaux. Enfin, en s'appuyant sur ces contrôleurs de processus entraînés, un "agent IA de conception" a été développé pour déterminer les dimensions optimales du système en fonction d'exigences de séchage spécifiques et d'un vecteur de décision multi-objectif englobant des critères énergétiques, financiers et environnementaux.

Title: Modelling, experimentation and intelligent control of solar hot air food drying systems: from standalone configuration to air-based thermocline heat storage integration.

Keywords: Solar drying, heat storage, thermocline, process control, reinforcement learning

Abstract: In Sub-Saharan Africa, post-harvest losses for fruits and vegetables reach nearly 50%. Consequently, given its vast solar potential, the large-scale deployment of solar drying solutions in that region is critical for achieving Sustainable Development Goals. This PhD work has studied the solar hot air-drying (SHAD) solution coupled to an air-based sensible packed-bed thermal energy storage (SPBTES). In the first part, a numerical dryer model is developed, covering the mass and heat transport mechanisms at both the product and dryer scales. This led to the development and experimental validation of a novel model-free Maximum Drying Rate Tracking SHAD control algorithm that presented improved performances as compared to the traditional drying temperature regulation approach. Next, the modeling and experimental validation a SPBTES system was performed, with a focus on the standby

phase, where heat diffusion and natural convection strongly affect the heat storage quality. Based on the previous results, in the third part, a SHAD coupled to a SPBTES configuration and featuring an active thermal energy flux control is proposed. A numerical simulation code was then developed and used to pre-train Deep Reinforcement Learning (DRL) AI-based agents, capable of dynamically adjusting the thermal energy fluxes for optimal drying goals. Finally, building upon these trained process controllers, a "Design AI agent" was developed to determine optimal system dimensions based on specific drying requirements and a multi-objective decision vector encompassing energetic, financial, and environmental criteria.