|  |
| --- |
| OFFRE DE THESEContrat doctoral de 36 moisEtude Expérimentale et mumérique du refroidissement et du stockage de la châtaigne : lien entre l’itinéraire thermique et la qualité |



*L’Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement (INRAE) est un établissement public de recherche né de la fusion de l’Inra et d’Irstea et rassemblant une communauté de travail de 12 000 personnes et 268 unités de recherche, de service et expérimentales, implantées dans 18 centres sur toute la France. INRAE se positionne parmi les tous premiers leaders mondiaux en sciences agricoles et alimentaires, en sciences du végétal et de l’animal. Ses recherches visent à construire des solutions pour des agricultures multiperformantes, une alimentation de qualité et une gestion durable des ressources et des écosystèmes.*

**RESUME DE L’OFFRE DE THESE**

**Laboratoire d’accueil :** l’unité de recherche FRISE "Génie des procédés FRIgorifiques pour la Sécurité alimentaire et l’Environnement de l’INRAE (<https://frise.jouy.hub.inrae.fr/>) localisée sur le site d'Antony (92), qui développe des activités de recherche finalisée portant sur la production et l’utilisation du froid, et ce, dans l’objectif d’assurer la maîtrise des températures des produits alimentaires au niveau des équipements frigorifiques de la chaîne du froid

### Partenariat : Ce travail sera réalisé dans le cadre du projet « Réduction des pourritures de la châtaigne au verger et après récolte (CROC - Chestnut fruit ROt Control) » mené en étroite collaboration avec des industriels et des centres de recherches, en particulier le Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes - CTIFL.

**VOTRE MISSION ET VOS ACTIVITÉS**

**◾ Contexte et enjeux du projet de thèse** :

.

La FAO estime que chaque année, environ un tiers de tous les aliments produits dans le monde pour la consommation humaine sont perdus ou gaspillés (FAO, 2013) avec de grands effets économiques, sociaux et environnementaux (Ndraha et al. 2018, Göransson, 2018). La châtaigneraie fruitière française est un marqueur de l’identité, des paysages et de l’économie de plusieurs départements et régions (Ardèche, Cévennes, Limousin...) avec les productions sous signes de qualité (Agriculture Biologique, AOP, IGP, Label Rouge). Depuis plusieurs décennies la production de châtaignes baisse inexorablement, la France ne produit plus qu’environ 9 000 tonnes de châtaignes contre 80 000 tonnes en 1965 et doit importer plus de 20 000 tonnes par an. Cette problématique de baisse de la production est liée principalement aux problèmes sanitaires en verger et en post-récolte, engendrant des pertes conséquentes de plus de 50 %. Depuis le début des années 2000, une recrudescence des pourritures sur fruits a été observée dans plusieurs pays européens et ont conduit à l’identification du nouvel agent pathogène : Gnomoniopsis castaneae (Visentin et al., 2012). Bien que les symptômes puissent s’exprimer sur l’arbre, l’impact de la maladie se mesure principalement dans les fruits après la récolte, au cours des différentes étapes de conditionnement, de conservation, puis chez le consommateur, engendrant une déception et limitant l’acte de réachat. La filière est en attente de solutions rapides pour réduire les pertes liées à des pourritures et sollicite les acteurs de la recherche par l'intermédiaire des différentes organisations professionnelles.

La température et l’humidité sont les facteurs les plus importants à prendre en considération pour garantir la qualité d'un produit tout au long de la chaîne du froid. Le défi consiste à obtenir un refroidissement et stockage uniforme des fruits dans l'ensemble de la cargaison avec des valeurs optimales pour la température et l'humidité relative (HR). La distribution de l'air est d'une importance primordiale à prendre en considération pour assurer le niveau et l'uniformité du refroidissement entre les volumes de stockage et au sein d'un même volume (Moureh et al. 2009, Wu et Defraeye 2018). Il est à souligner que l'hétérogénéité du refroidissement est fortement affectée par la conception des emballages et leur configuration d’empilement. Dans le cas des châtaignes, différents types d'emballages peuvent être utilisés (palox, sacs/filet, caisses, etc.), chacun présentant des configurations géométriques spécifiques. Par ailleurs, un refroidissement insuffisant ne permet pas d’évacuer efficacement la chaleur générée par la respiration des fruits, ce qui peut entraîner une élévation locale de la température des produits pendant leur stockage..

**◾ Objectifs de projet de thèse :**

Dans le cadre du projet CROC et en collaboration avec le CTIFL, cette thèse a pour objectif de développer un modèle global capable de prédire l’évolution de la température et de la qualité des produits, d’abord durant le refroidissement et le stockage, puis tout au long de la chaîne post-récolte. Ce modèle global permettra d’identifier des conditions de stockage optimal pour limiter les pertes

**◾ Démarche scientifique :**

La démarche scientifique s'appuiera sur la mise en œuvre d'outils numériques et expérimentaux visant à caractériser et à prédire l’évolution de température, d’humidité et de qualité au sein d'un volume de châtaignes fraiches.

Tout d’abord, un dispositif expérimental sera développé pour caractériser le comportement thermique d’un volume de produit lors du refroidissement et du stockage. Différents types d'emballages (palox, sacs, caisses) seront disposés à diverses positions dans une chambre froide à Frise, afin d’étudier l’influence de la géométrie des emballages ainsi que celle de leur positionnement par rapport au soufflage d’air froid. Plusieurs capteurs (thermocouples, hygromètres) seront placés dans l’air et au sein des produits permettront de suivi l’évolution de température et d’humidité. Des pesées et des mesures de coefficient d’échange et de consommation énergétique sont également envisagées. Des simulations de mécanique de fluide (CFD) pour mieux comprendre le comportement de l’écoulement et du transfert thermique/hydrique dans certaines configurations géométriques peuvent être également réalisées. Les données obtenues permettront de caractériser la cinétique de refroidissement ainsi que les pertes de masse du produit en fonction du type d'emballage, de la vitesse d’air, de la température de consigne, du positionnement du produit dans l’emballage et de celui de l’emballage dans la chambre froide. Un modèle thermique simplifié sera développé grâce à ces données. Ce modèle sera validé par des données des mesures de terrain réalisées dans la même période.

Le deuxième objectif de la thèse consiste à caractériser la chaleur de respiration des châtaignes, un paramètre important pour expliquer le comportement thermique de ce produit. Des méthodes de type calorimètre thermique couplé avec une caractérisation de la composition des gaz produits et consommés par la respiration (CO2, O2, C2H4) seront étudiées et adaptées pour la châtaigne. Les mesures de la chaleur de respiration seront effectuées à différents niveaux de température et à plusieurs reprises au cours du stockage, afin d’évaluer l’effet du vieillissement. Par ailleurs, les modèles de qualité (pertes en eau, pourriture) des produits seront développés à partir de données fournies par le CTIFL. Ces modèles seront intégrés avec le modèle thermique simplifié qui permettra d’évaluer l’impact des conditions logistiques sur la qualité des produits.

Le dernier volet de la thèse visera à étendre le modèle thermique – qualité développé sur l’ensemble des étapes du circuit logistique. Le(a) doctorant(e) pourrait s’appuyer sur plusieurs outils de modélisation de la chaîne du froid disponibles à Frise. Le nouvel outil développé par la thèse permettra de simuler diverses conditions logistiques et de conditionnement pour proposer des pratiques optimales à mettre en œuvre pour limiter des pertes de produit.

**◾ Questions scientifiques :**

* Quel est l’influence du **type de packaging** (palox, sacs, caisse…) sur l’efficacité du refroidissement ?
* L’**hétérogénéité** (température, humidité 🡪 qualité) est-elle forte lors du refroidissement et du stockage ? Lien avec la position du produit dans le conditionnement (au-dessus, latéral, au fond, au milieu) et la position du packaging dans la chambre froide (près du soufflage, dans un coin, près de la porte) ?
* Quel est l’impact de la **chaleur de respiration** sur la température et la qualité du produit : peut-elle entraîner une hausse de la température pendant le stockage ? Comment caractériser cette chaleur de respiration ? effet du vieillissement et de la température de stockage ?
* Quels sont les **scénarios d’optimisation** pour minimiser les pertes de qualité et les impacts environnementaux & la consommation d’énergi

**◾ Description détaillé du travail et calendrier :**

**Tâche 1 : Etude bibliographique (M1 - M6)**

Une étude bibliographique approfondie sera réalisée afin de faire un état de l'art complet sur les avancées scientifiques décrites précédemment.

*Livrable :* synthèse bibliographique

**Tâche 2 : Caractérisation du comportement thermique (& HR) des différents packaging (M2 – M15)**

2.1 Etude expérimentale du stockage de châtaignes dans une chambre froide

* Dispositif : une chambre froide chargée de produits, plusieurs types d’emballage (palox, sacs, caisses,… à déterminer avec le CTIFL) seront utilisés
* Conditions : variation de température de consigne et vitesse de soufflage
* Instrumentation & mesure : plusieurs capteurs (température, HR) pour chaque emballage et dans l’air, mesure des coefficients d’échange, perte de masse, consommation énergétique

2.2 Analyse

* Etablir des bilans thermiques et massiques d’un volume de stockage de produits en vue de développer un modèle simplifié
* Simulation aéraulique (CFD) si besoin pour mieux comprendre le comportement de l’écoulement et du transfert thermique/hydrique dans certaines configurations à définir

*Livrable* :

Article 1 : Etude expérimentale du stockage de châtaignes

Outil excel – V1 Modèle thermique simplifié : cinétique de refroidissement & pertes de masse du produit en fonction d’emballage, vitesse d’air, température de consigne, positionnement du produit dans l’emballage et positionnement de l’emballage dans la chambre

Valider avec les mesures de terrain

**Tâche 3 : Modélisation de l’évolution de la qualité des châtaignes (M12 – M24)**

* 1. Caractérisation de la chaleur de respiration
* Dispositif : certaines méthodes les plus pertinentes identifiées par l’étude bibliographique (calorimètre thermique et/ou mesure de gaz) seront testées. Ce travail peut s’appuyer sur les études calorimétriques réalisées à Frise (projet Ematal et Emaris 2020 – 2025).
* Conditions : les mesures seront réalisées à différentes températures de stockage avec un suivi dans le temps pour voir l’impact du vieillissement de la châtaigne.
	1. Développement du modèle qualité avec le CTIFL
* Définition du plan expérimental conjointement avec le CTIFL : le plan expérimental devra être optimisé pour développer un modèle robuste tout en étant réaliste. Le doctorant peut être amené à se déplacer au CTIFL de Saint-Rémy de Provence pour assister lors des essais.
* Développent des modèles paramétriques pour prédire l’évolution des pourritures en fonction du temps et de la température : plusieurs modèles pourront être testés et comparés (log-logistique, Weibull, exponentiel, logit). D’autres approches basées sur des modèles spécifiques à la microbiologie pourront également être testées (e.g. Gompertz).
* Validation du modèle à partir de données réalisées dans des conditions dynamiques de température : le modèle ajusté sera validé avec un jeu de données indépendant en suivant la méthodologie décrite dans Duret et al. (2021)
	1. Intégrer les modèles de qualité avec modèle thermique

Le modèle paramétrique de développement des pourritures sera couplé avec les modèles thermiques. Ainsi l’impact de l’hétérogénéité des températures sur le développement des pourritures pendant le stockage et les autres étapes de la chaîne du froid sera pris en compte.

*Livrable* :

Article 2 : Chaleur de respiration

Article 3 : Couplage thermique + qualité

Outil excel V2 thermique + qualité

**Tâche 4 : Modélisation de l’itinéraire thermique (M20 – M30)**

Un modèle global intégrant l’histoire temps-température-humidité dans les différentes étapes du circuit logistique et relié au développement des pourritures sera développé. Ce modèle permettra de simuler des scénarios (température, HR, durée des étapes) pour identifier des conditions optimales pour limiter des pertes.

*Livrable* :

Article 4 : Comparaison des scénarios et identification des conditions optimales

Outil excel V3: itinéraire thermique & qualité + recommandations

**Tâche 5 : Valorisation et rédaction (M3-M36)**

Le travail réalisé sera valorisé à travers la participation à des congrès nationaux et/ou internationaux avec la production de communications. Des rapports intermédiaires seront rédigés mais surtout des publications dans des revues scientifiques avec comité de lecture tels que « International Journal of Refrigeration » ou « Journal of Food Engineering ». Un manuscrit sera préparé au cours des derniers mois de la thèse.

*Livrable* : Rédaction du manuscrit de thèse et des articles

**◾ Moyens mis à disposition**

L’unité Frise d’INRAE dispose de chambre froide permettant de contrôler l’aéraulique, la température et l’humidité qui seront mise à disposition du doctorant. Le(a) doctorant(e) bénéficiera en plus du soutien de l’équipe technique pour la mise en place du dispositif expérimental.

Les logiciels nécessaires (ANSYS FLUENT, Matlab, Python) ainsi que des ordinateurs de calculs seront également mis à disposition du doctorant pendant toute la durée de la thèse.

**LE PROFIL QUE NOUS RECHERCHONS**

◾ Formation : Ingénieur ou Master 2 en Génie des Procédés, Thermique, Mécanique des fluides

◾ Connaissances souhaitées : Bon niveau en anglais, autonomie, rigueur et capacité à travailler en équipe

◾ Aptitudes recherchées : Goût pour l’expérimentation et la modélisation (bilan thermique/massique, CFD)

Aisance rédactionnelle (en anglais et en français) et facilité d’expression orale

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  🡮 Modalités d’accueil◾ Unités : FRISE◾ Durée du contrat : 36 mois◾ Date de début souhaité : 1er octobre 2025◾ Rémunération INRAe : 2200 € brut mensuel |  |  🡮 Modalités pour postulerTransmettre un CV et une lettre de motivation à : **Hong-Minh HOANG,** **Tél : 0140966502,**  ◾ Par e-mail à : hong-minh.hoang@inrae.frDate limite pour postuler : 1er juillet 2025 |