

## OFFRE DE THESE

### Caractérisation d'un procédé de congélation à base d'hydrates pour la conservation de produits alimentaires

#### ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

Cette thèse se fera dans le cadre du projet ANR Foodhydrates (Hybrid ice/hydrate freezing of food products) qui a démarré au 1<sup>er</sup> janvier 2026. Le(la) doctorant(e) sera accueilli(e) au sein de l'unité de recherche Génie des procédés FRIGorifiques pour la Sécurité alimentaire et l'Environnement (FRISE) de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE). L'unité de recherche FRISE, localisée sur le site de l'INRAE d'Antony (92), 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 et de la qualité des produits alimentaires dans la chaîne du froid, tout en assurant un faible impact énergétique et environnemental.

#### MISSION ET ACTIVITÉS

##### ■ Problématique - enjeux scientifiques et technologiques

La congélation est utilisée pour conserver les produits sur de longues périodes en ralentissant les réactions de dégradation biochimique et en inhibant la croissance microbienne. Elle se caractérise par un changement d'état de l'eau, appelé cristallisation, qui passe d'une phase liquide et mobile à une phase solide et immobile sous forme de cristaux de glace à la suite de l'abaissement de la température. Les caractéristiques des cristaux de glace (taille, nombre, forme et localisation) sont définies au cours de la congélation. Cependant, ces caractéristiques évoluent souvent en cours de conservation notamment par la recristallisation qui se caractérise par une croissance des gros cristaux au dépens des petits cristaux. Or, des cristaux de grande taille sont susceptibles d'endommager les parois cellulaires des produits et ainsi donner lieu à une perte de qualité texturale, sensorielle et nutritionnelle (accélération des réactions biochimiques, exsudation, perte en nutriments). La réduction des dommages (pertes et gaspillages) liés à la congélation, notamment par les phénomènes de recristallisation, est donc un facteur clé de la conservation des produits alimentaires sur de longues périodes avec une qualité proche de celle des produits frais.

En présence d'eau et selon les conditions de température et de pression utilisées, certains gaz forment des clathrates d'hydrates qui sont des structures cristallines constituées de molécules d'eau liées entre elles par des liaisons hydrogène. Les hydrates sont donc des cristaux d'aspect comparable à ceux de la glace mais de taille inférieure et qui mobilisent de grandes quantités de molécules d'eau lors de leur formation. Dans les produits alimentaires, la formation d'hydrates pourrait ainsi contribuer à réduire la taille et le nombre de cristaux formés au cours du procédé de congélation (moins d'eau disponible) et ainsi permettre une meilleure préservation de la qualité des produits congelés. Par ailleurs, ces hydrates de gaz pourraient avoir d'autres impacts positifs sur le procédé de congélation : (i) limitation des phénomènes de recristallisation grâce à une morphologie des cristaux très stables dans le temps et une diffusion plus faible des molécules d'eau disponibles ; (ii) congélation complète des produits à des températures plus élevées que la température conventionnelle de congélation (-18 °C), avec potentiellement une économie d'énergie substantielle.

Toutefois, le potentiel des hydrates de gaz pour limiter la recristallisation de la glace, prévenir la dégradation de la qualité et réduire la consommation énergétique n'est pas encore pleinement compris et soulève plusieurs questions de recherche :

- Mécanismes : La formation d'hydrate préalable/postérieure à la congélation influence-t-elle sur les mécanismes de cristallisation, de migration de l'eau et de recristallisation mis en œuvre lors de la

congélation et de l'entreposage ? Quel effet selon le type de produits (poreux ou pas) ? Où se passe la formation des hydrates dans la matrice ? Existe-t-il un effet synergique entre la formation d'hydrates, la cristallisation de l'eau et la recristallisation de l'eau ?

- Propriétés : Quelles conditions opératoires pour optimiser les interactions entre les hydrates et la glace en vue d'obtenir un produit de meilleure qualité comparé à la congélation conventionnelle ? Existe-t-il un effet seuil lié à la fraction d'hydrates formée qui pourrait modifier le type d'interactions ?
- Scénarios : Dans quelle mesure la formation d'hydrates préalable à la congélation pourrait permettre une congélation complète à une température plus élevée que celle offerte par les procédés conventionnels de congélation ? Autrement dit, quel serait le scénario optimal pour le procédé de congélation : congélation totale d'eau, totale d'hydrates, partielle d'eau puis d'hydrates, partielle d'hydrates puis d'eau ...

Des investigations complémentaires sont nécessaires afin d'apporter des réponses à ces questions.

### ■ Objectifs de la thèse et méthodologie

Cette thèse vise à lever les verrous scientifiques liés au développement d'un procédé innovant de congélation hybride basé sur la formation d'hydrates et de glace. Elle a pour objectif d'évaluer de manière intégrée le potentiel de ce procédé en termes de préservation de la microstructure et de la qualité des produits alimentaires, ainsi que ses performances énergétiques et environnementales.

Le travail sera conduit dans un premier temps sur un produit modèle, avant d'être étendu à des produits réels sélectionnés selon des critères préalablement définis. Différents scénarios de congélation hybride seront explorés et comparés au procédé de congélation conventionnel. La méthodologie proposée s'appuiera sur l'utilisation d'un dispositif expérimental existant couplant l'analyse thermique différentielle (ATD) à la microtomographie à rayons X ( $\mu$ CT RX). Ce dispositif permettra de caractériser simultanément la cinétique de formation des hydrates et de la glace (via l'ATD) ainsi que leur morphologie et leur localisation au sein du produit (via la  $\mu$ CT RX). Il permettra également de quantifier les fractions d'hydrates et de glace formées, ainsi que les distributions de taille de cristaux correspondants. Les évolutions de la microstructure seront suivies par  $\mu$ CT RX en cours de stockage prolongé sous différentes conditions de température. En parallèle, les attributs de qualité des produits (texture, exsudat, perte en nutriments...) seront analysés. Enfin, les performances énergétiques du procédé seront évaluées à partir de l'analyse des consommations énergétiques et comparées à celles des procédés de congélation existants. L'impact carbone du procédé sera également estimé en intégrant à la fois les consommations énergétiques et les paramètres liés aux pertes et gaspillage alimentaires.

## PROFIL RECHERCHE

- Formation recommandée : M2 Recherche, Ingénieur ou équivalent en Génie des procédés ou Sciences pour l'ingénieur.
- Connaissances souhaitées : Phénomènes de transferts de matière et d'énergie ; Thermodynamique ; Approches expérimentales, de modélisation et simulation numérique (notamment avec les logiciels Matlab et Python); Bonne maîtrise de l'anglais (oral et écrit).
- Connaissance appréciée : Sciences des aliments ; Analyse d'image.
- Aptitudes recherchées : Goût pour l'expérimentation ; Autonomie ; Prise d'initiatives ; Travail en équipe ; Rigueur ; Capacité rédactionnelle ; Aisance à l'oral.

### ↳ Modalités d'accueil

- Unité: INRAE - FRISE, Antony
- Durée: 36 mois
- Date de début souhaité : 01/12/2026
- Rémunération : 2300 € brut mensuel

### ↳ Modalités pour postuler

- Transmettre un CV et une lettre de motivation à :  
[fatou-toutie.ndoye@inrae.fr](mailto:fatou-toutie.ndoye@inrae.fr)  
[pascal.clain@inrae.fr](mailto:pascal.clain@inrae.fr)  
[anthony.delahaye@inrae.fr](mailto:anthony.delahaye@inrae.fr)
- **Date limite de candidature : 30/05/2026**