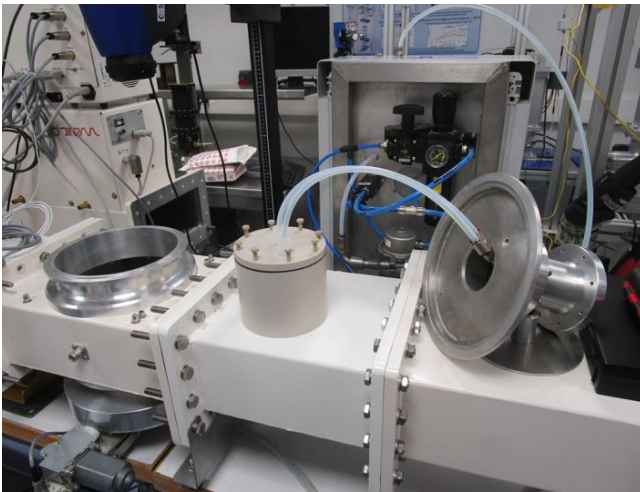




ACCOMPAGNER
LE MODÈLE AGROALIMENTAIRE
DE DEMAIN

Résultats de recherche 2025



Development of a microwave heating treatment as a substitute for the classical retort sterilization process

***Développement d'un traitement de
chauffage par micro-ondes comme
substitut au procédé classique de
stérilisation en autoclave***

*Thèse présentée et soutenue à Oniris VetAgroBio Nantes,
le 10 décembre 2025
Unité de recherche : GEPEA UMR CNRS 6144*

Projet STERIWAVE

Sadhan Jyoti DUTTA

Avec le soutien de : ANRT - CIFRE

CTCPA Avignon
Service Documentation
449, av. Clément Ader - BP 21203
84911 AVIGNON CEDEX 9
Tél. : 04 90 84 17 09 - doc@ctcpa.org

Établissement reconnu d'utilité publique par
arrêté ministériel du 11 octobre 1950.
Le CTCPA est qualifié Institut Technique Agro-
Industriel par le Ministère de l'Agriculture par
arrêté du 22 décembre 2022.

Mai 2026

CONTEXTE ET ENJEUX, OBJECTIFS

Ce travail de thèse porte sur l'étude d'un procédé de **traitement thermique par micro-ondes comme alternative au procédé de stérilisation en autoclave**.

L'étude s'intéresse au comportement thermo-mécanique des emballages alimentaires sous diverses contraintes extérieures.

Dans la littérature scientifique, le procédé de stérilisation classique en autoclave demeure efficace pour garantir la sécurité microbiologique des denrées alimentaires, cependant ce procédé implique l'usage d'un fluide caloporteur (vapeur d'eau principalement) utilisé pour assurer le traitement thermique d'un produit alimentaire ainsi que le maintien de la contrepression externe.

Le chauffage par micro-ondes, caractérisé par un chauffage volumique, permet de dégrader directement l'énergie électromagnétique de l'onde au sein du produit et dispose d'une faible inertie thermique comparé au chauffage conventionnel.

Toutefois, la mise en œuvre de cette technologie doit intégrer en amont une compréhension détaillée des transferts de chaleur au sein des produits traités ainsi qu'une maîtrise de l'augmentation de la pression interne dans le contenant compte tenu de ses caractéristiques mécaniques.

L'objectif principal de cette thèse est de caractériser ces différentes interactions, à partir d'approches expérimentales et numériques.

Le projet STERIWAVE a reçu le soutien technique et financier de l'ANRT.

RÉSULTATS

La première partie de la thèse s'intéresse au procédé de stérilisation conventionnelle appliqué à des cylindres métalliques rigides remplis d'un aliment modèle dont la teneur en eau est fixée, la purée de pommes de terre.

Un autoclave pilote, équipé d'un système d'injection de vapeur et d'un dispositif de régulation de pression, a été instrumenté pour enregistrer les températures et pressions à plusieurs endroits au sein des contenants métalliques, notamment dans l'espace de tête et à différentes profondeurs au sein du produit alimentaire.

Une modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics® afin de prédire les champs de température au sein du produit et modéliser les phénomènes de convection naturelle dans l'espace de tête au cours d'un cycle complet de chauffage, maintien à température cible et refroidissement.

L'analyse combinée a mis en évidence deux contributions à la pressurisation interne de l'emballage: l'expansion de l'air sec et la génération de vapeur d'eau au cours du procédé.

La pression partielle d'air sec est prépondérante au début du chauffage, lorsque la température de la zone de tête augmente rapidement, tandis que la pression de vapeur contribue de manière significative à l'augmentation de la pression totale pendant la majeure partie du cycle de stérilisation.

Un autre résultat important concerne la sensibilité aux conditions aux limites au niveau des parois du récipient. L'étude de sensibilité du modèle au coefficient de transfert par convection met en évidence des variations notables des vitesses de chauffage et des gradients de température au sein du produit corrélés à la variation de la pression interne dans l'emballage.

La deuxième partie du travail a consisté à évaluer les performances d'un emballage souple en polypropylène (PP) thermocollé en surface supérieure avec un film mince du même matériau.

La géométrie du contenant correspond parfaitement au format utilisé pour les emballages des plats préparés cuisinés en barquette.

L'étude a débuté par des expériences d'injection d'air au sein de la barquette sans produit alimentaire, afin d'analyser les effets de la pressurisation sur le déplacement géométrique du film supérieur.

Une source d'air comprimé et un petit orifice d'entrée ont permis d'injecter l'air à différents débits au sein de la barquette, tandis que la forme de la barquette et la courbure du film évoluaient librement. Une caméra à haute résolution a capturé des images à fréquence fixe. L'analyse d'images, basée sur la détection de contours et le suivi de pixels, a permis de convertir les séquences en champs de déplacement du film supérieur au cours du temps, en se concentrant sur la hauteur de la déformation centrale et sur la zone de scellage.

La rupture est survenue à des pressions d'environ 45 mbar, généralement initiée près des bords ou des coins de la barquette. Des simulations numériques ont complété ces observations.

Une modélisation de type CFD couplée à la mécanique des structures a été réalisée, considérant un écoulement laminaire compressible d'air dans le volume de la barquette et un film supérieur déformable. Les charges de pression exercées par le fluide sur le film supérieur ont été simulées.

Les résultats numériques montrent la formation d'un dôme en surface supérieure de la barquette et ont permis de quantifier la force appliquée en dynamique sur la surface du film liée à l'expansion de l'air dans la barquette.

Les simulations numériques ont montré que la réponse mécanique du film en polypropylène variait selon la configuration expérimentale. Lors de l'injection d'air, la force appliquée à la surface du film supérieur variait entre 187 N et 284 N, correspondant à des contraintes maximales de Von Mises comprises entre $2,1 \times 10^5$ et $3,4 \times 10^5$ N/m² concentrées au centre du film, tandis que des contraintes plus faibles de $1,6 \times 10^5$ à $2,6 \times 10^5$ N/m² apparaissaient aux coins.

Lors du traitement thermique des barquettes vides, la contrainte maximale a diminué à environ $8,8 \times 10^4$ N/m² et s'est située principalement le long des grands côtés, où la plupart des ruptures de film ont été observées expérimentalement.

Pour les barquettes contenant de la purée de pomme de terre, les contraintes les plus élevées, d'environ $2,0 \times 10^5$ N/m², se sont concentrées près des coins, en accord avec les observations expérimentales.

Bien que ces contraintes soient demeurées inférieures à la limite d'élasticité du polypropylène ($25\text{--}40 \times 10^6$ N/m²), la rupture observée a été possiblement due à un ramollissement local de la zone de scellage lors du chauffage et à des effets possibles de concentration de contraintes près des coins.

Il est important de préciser que le modèle développé dans cette étude ne vise pas à représenter explicitement le contact mécanique entre le film et la barquette ni les mécanismes locaux de rupture du joint de scellage.

Cet ensemble d'expériences et de simulations a constitué une première étape pour mieux comprendre les pressions internes maximales admissibles jusqu'à la rupture expérimentale du film. Le modèle se concentre sur la prédiction du comportement global du système, en particulier la déformation du film, ainsi que l'évolution de la pression et de la température à l'intérieur de la barquette.

Le chauffage de la barquette a ensuite été introduit en conservant la même géométrie et le même protocole de scellage du film afin d'étudier l'influence de la température sur le comportement mécanique des barquettes.

Le chauffage dans un four dont la température était programmée depuis l'ambiance pour atteindre 121 °C a conduit à une rupture plus précoce de la zone de scellage comparé aux expériences menées avec injection d'air.

La rupture est survenue à des pressions internes inférieures à 10 mbar et à des températures inférieures à 60 °C au sein de la barquette. L'exposition de la barquette à la chaleur accélère le processus de rupture du film.

Les expériences ont été complétées par des simulations numériques visant à analyser l'évolution couplée de la pression et du déplacement du film lors du chauffage de la barquette.

Afin d'étudier l'effet d'une contrainte mécanique externe sur la déformation et le comportement à la rupture des barquettes, un dispositif expérimental a été développé.

Il se composait d'une plaque rigide en polyétheréthercétone (PEEK) placée en contact avec le film supérieur et reliée à un capteur de force permettant d'appliquer une précharge verticale et de mesurer la force résultante générée par la pressurisation interne. La présence de cette contrainte mécanique a augmenté la résistance de la barquette lors des essais d'injection d'air.

Par rapport à la configuration sans contrainte, où la rupture survenait après environ 90 secondes pour une pression interne de 42 à 46 mbar, les barquettes sous contention ont présenté une rupture légèrement retardée, survenant après environ 60 à 80 secondes mais à des pressions internes nettement plus élevées, de l'ordre de 100 à 129 mbar (forces appliquées sur le film comprises entre 110 et 130 N).

Lors des traitements thermiques des barquettes, la rupture s'est produite plus tard (540 secondes pour les barquettes vides et 770 secondes pour celles contenant de la purée de pomme de terre) et à des pressions internes plus faibles (8 à 9 mbar).

Lorsque la contrainte mécanique était appliquée pendant le chauffage (5 N, 20 N, 40 N), les pressions de rupture augmentaient légèrement tandis que les temps de rupture restaient comparables.

Dans la suite de l'étude, un procédé de chauffage par micro-ondes du produit alimentaire dans la barquette a été mis en place. L'objectif était d'évaluer expérimentalement l'évolution de la température et de la pression dans l'emballage sous chauffage micro-ondes et d'évaluer expérimentalement le phénomène de rupture de la zone de scellage suivant différents modes opératoires.

Les expériences de chauffage par micro-ondes ont été réalisées à la fréquence de 915 MHz avec une cavité monomode instrumentée et reliée à un générateur micro-ondes de type « état solide ».

Les barquettes contenant de la purée de pommes de terre ont été étudiées selon trois configurations.

- (i) sans contrainte mécanique, permettant la déformation libre du film,
- (ii) avec une précharge appliquée via une plaque de PEEK en surface supérieure et reliée à un capteur de force, et
- (iii) avec une déformation nulle où la barquette était maintenue entre deux plaques rigides limitant totalement son mouvement vertical.

Les températures ont été mesurées par des capteurs embarqués au centre de l'aliment et dans l'espace de tête de la barquette.

La pression dans l'espace de tête a aussi été enregistrée au cours du temps. Pour une puissance micro-ondes incidente de 200 W, les expériences ont montré que la pression interne dans l'espace de tête augmentait progressivement pendant le chauffage par micro-ondes, atteignant environ 50 mbar juste avant la rupture.

Dans la configuration sans contrainte, la rupture s'est produite après environ 280 secondes, lorsque la température dans l'espace de tête atteignait environ 50 °C et que la température au centre de l'aliment restait inférieure à 60 °C.

En présence d'une contrainte mécanique de 80 N appliquée par la plaque de PEEK, la rupture est survenue à un temps similaire, entre 200 et 300 secondes, pour une température dans l'espace de tête d'environ 35 °C et une température centrale également inférieure à 60 °C. L'application de cette contrainte a augmenté la rigidité globale de la barquette et limité la déformation du film, mais la rupture s'est toujours produite au niveau de la zone de scellage.

La force mesurée au moment de la rupture, excluant la précharge initiale de 80 N appliquée par la plaque de PEEK, était d'environ 30 à 40 N.

Bien que la contrainte appliquée en surface supérieure ait réduit la déformation du film, le mécanisme de rupture est resté similaire à celui observé sans contrainte, avec une initiation localisée au niveau des bords de la zone de soudure.

Le comportement global sous chauffage par micro-ondes est resté comparable à celui observé lors du chauffage conventionnel, bien que la rupture se soit produite plus rapidement, soit environ 250 secondes sous chauffage par micro-ondes, contre 500 à 700 secondes lors du chauffage en étuve, que la barquette contienne ou non de la purée de pommes de terre. Cette différence s'explique par la cinétique de chauffage volumique propre au procédé micro-ondes, en contraste avec le transfert de chaleur plus lent de la surface vers le cœur du produit lors du chauffage conventionnel.

Un contenant rigide a ensuite été testé afin d'évaluer l'aptitude du produit à atteindre des températures de stérilisation tout en préservant l'intégrité de l'emballage.

À cette fin, un récipient cylindrique en PEEK a été conçu et instrumenté avec des passages étanches pour les mesures de pression et de température à l'aide de fibres optiques. Le PEEK a été choisi pour sa rigidité élevée, son excellente résistance thermique, lui permettant de supporter les pressions internes et les contraintes mécaniques pendant le chauffage. De plus le PEEK peut être assimilé à un matériau transparent sous micro-ondes compte tenu de son faible facteur de dissipation ($\tan \delta$).

Pour une puissance micro-ondes incidente de 400 W, le produit contenu au sein du cylindre en PEEK a atteint des températures supérieures à 118 °C (mesurées au centre du produit). La pression interne maximale au sein de l'espace de tête s'élevait à environ 0,8 bar lorsque la température se situait entre 115 °C et 121 °C, aussi bien au centre qu'au niveau des côtés du produit. Cette configuration a montré qu'un récipient en matériau polymère rigide peut être un bon candidat pour atteindre des conditions de stérilisation sous chauffage par micro-ondes.

Les systèmes de contention mécanique utilisés dans cette étude nécessitent encore des améliorations. La configuration avec plaque préchargée a permis de quantifier comment l'application d'une précharge modifie la déformation du film supérieur et la force liée à l'expansion du film sous l'effet de la pression interne dans l'emballage.

Le système avec maintien de la position du film, utilisé principalement dans l'étude sous micro-ondes, n'a pas empêché les déformations latérales de la barquette, ce qui suggère qu'une contention multidirectionnelle de la barquette serait nécessaire.

CONCLUSIONS

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce travail. La contribution de l'air sec à la pression interne totale, liée à l'expansion gazeuse et aux conditions aux limites thermiques appliquées aux parois, joue un rôle essentiel aussi bien dans le procédé en autoclave que sous chauffage par micro-ondes.

Cependant, son influence sur la structure de l'emballage diffère selon le procédé : dans l'autoclave, cette augmentation de pression est compensée par la contre-pression externe exercée par l'eau ou la vapeur, tandis que sous chauffage par micro-ondes, la dilatation de l'air exerce principalement une charge mécanique sur le film supérieur.

La résistance mécanique de la zone de scellage demeure le facteur déterminant contrôlant le seuil de rupture, car elle dépend directement des sollicitations thermiques et mécaniques appliquées pendant le procédé. La cinétique de rupture du film observée sous chauffage micro-ondes reste similaire à celle obtenue lors du chauffage conventionnel, la génération de pression interne constituant dans les deux cas le facteur dominant conduisant à la défaillance de la zone de scellage.

La méthodologie expérimentale et numérique développée dans ce travail constitue un cadre pour l'analyse des performances des emballages soumis à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées.

L'intégration de la dynamique des fluides numérique (CFD) couplée à la mécanique des structures permet l'analyse simultanée des champs de température, de pression et de déformation au sein des matériaux considérés.

Les résultats apportent des informations quantitatives et qualitatives sur l'évolution des températures, des pressions et le développement des champs de contraintes en surface dans le film.

Dans l'ensemble, cette thèse fournit une base scientifique pour le développement de dispositifs plus performants permettant d'atteindre des températures cibles pour la stérilisation thermique sous micro-ondes. Les résultats montrent que l'intégrité structurelle des emballages alimentaires est liée à la distribution de la pression interne dans le produit et doit prendre en considération la transmission multidirectionnelle des contraintes à l'intérieur de la structure.



ACCOMPAGNER
LE MODÈLE AGROALIMENTAIRE
DE DEMAIN

SIÈGE SOCIAL

CTCPA

44, rue d'Alésia
TSA 31444
75158 PARIS CEDEX 14
Tél. : +33 1 53 91 44 00 - paris@ctcpa.org

SITES

CTCPA - Nord-Est/ Île-de-France

41 avenue Paul Claudel,
80480 DURY-LES-AMIENS
Tél. : 03 22 53 23 00 - amiens@ctcpa.org

CTCPA - Sud-Est

Site Agroparc
449 Avenue Clément Ader, BP21203,
84911 AVIGNON CEDEX 9
Tél. : 04 90 84 17 09 - avignon@ctcpa.org

CTCPA - Sud-Ouest

ZAC du Mouliot, 2 allée Dominique Serres,
32000 AUCH
Tél. : 05 62 60 63 63 - auch@ctcpa.org

CTCPA - Ouest

64, rue de la Géraudière, BP 62241,
44322 NANTES CEDEX
Tél. : 02 40 40 47 41 - nantes@ctcpa.org

CTCPA - Dijon

Cité internationale de la Gastronomie
16 Rue de l'Hôpital, 21000 Dijon
Tél. : +33 7 57 08 46 97 - clucet@ctcpa.org

ANTENNES

CTCPA - Mont-de-Marsan

Agrocampus
1003 allée Jean d'Arcet, 40280 HAUT-MAUCO
Tél. : 06 34 14 49 24 - vmoret@ctcpa.org

DIRECTION MISSIONS D'INTERET GENERAL ET DIRECTION DE LA TRANSITION INDUSTRIELLE

Site Agroparc
449 Avenue Clément Ader, BP 21203
84911 AVIGNON CEDEX 9
Tél. : 04 90 84 17 09 - doc@ctcpa.org

DIRECTION RECHERCHE

Technopôle Alimentec, Rue Henri de Boissieu
01000 BOURG-EN-BRESSE
Tél. : 04 74 45 52 35 - bourg@ctcpa.org

LABORATOIRE EMBALLAGE

Technopôle Alimentec, Rue Henri de Boissieu,
01000 BOURG-EN-BRESSE
Tél. : 04 74 45 52 35 - bourg@ctcpa.org

LABORATOIRE MICROBIOLOGIE ET QUALITE NUTRITIONNELLE

Site Agroparc
449 Avenue Clément Ader, BP21203,
84911 AVIGNON CEDEX 9
Tél. : 04 90 84 17 09 - avignon@ctcpa.org

