



HAL
open science

Propriété de la pâte à cake pendant le battage et la cuisson – Effet des interactions physico-chimiques des constituants

Nesrin Hesso, C. Loisel, Sylvie Chevallier, Catherine Garnier, Patricia Le Bail,
Alain Le-Bail

► To cite this version:

Nesrin Hesso, C. Loisel, Sylvie Chevallier, Catherine Garnier, Patricia Le Bail, et al.. Propriété de la pâte à cake pendant le battage et la cuisson – Effet des interactions physico-chimiques des constituants. Industries Alimentaires et Agricoles, 2016. hal-02353183v2

HAL Id: hal-02353183

<https://hal.science/hal-02353183v2>

Submitted on 7 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Congélation de produits alimentaires : amélioration de la cristallisation par applications de micro-ondes.

Michel Havet, Mathieu Sadot, Piyush Jha, Sylvie Chevallier, Vanessa Jury, Sébastien Curet, Olivier Rouaud, Alain Le-Bail

ONIRIS, GEPEA, CNRS, Université de Nantes, Rue de la Géraudière – CS 82225, 44322 Cedex 3 Nantes, France

[*micHEL.havet@oniris-nantes.fr](mailto:micHEL.havet@oniris-nantes.fr)

[*alain.lebail@oniris-nantes.fr](mailto:alain.lebail@oniris-nantes.fr)

Résumé

La qualité d'un produit congelé est liée à la cristallisation ; en règle générale, plus la taille des cristaux de glace est petite, meilleure sera la qualité du produit. Un procédé innovant a été évalué dans le cadre du projet européen (FREEZEWAVE). Une assistance micro-ondes (2450 MHz) a été utilisée pour perturber le changement d'état de l'eau. Sur un prototype de laboratoire, les expériences ont confirmé que, quels que soient le mode d'application des micro-ondes et les paramètres du procédé, on observe une réduction de la taille des cristaux. Cet impact positif a été obtenu sur diverses matrices alimentaires, dont des pommes de terre. Un modèle de prédiction a par ailleurs permis de qualifier ces cinétiques. Deux concepts sont avancés pour expliquer ces effets bénéfiques.

Mots clés : congélation; micro-ondes ; cristaux de glace ; tomographie

Freezing of foods: improvement of crystallization by microwave assistance

Abstract

FREEZEWAVE project (SUSFOOD ERA-net project 2015 – 2018) concerns the MAF process: Microwave Assisted Freezing, or freezing with the assistance of low energy microwaves (2450 MHz). FREEZEWAVE aimed at developing a slow freezing rate process while reducing the freeze damage thanks to smaller ice crystals. Different food categories have been considered; sauce, meat, fish, fruits, vegetables and model food. The main objective was to assess the effect of microwaves on the size of ice crystals and the quality of frozen foods. The results confirmed the efficiency of MAF to reduce the size of ice crystals. The reduction was in the range of 10 to 20%. Two concepts are proposed to explain the observed reduction of the size of ice crystals in frozen systems using MAF. The “NITOM” concept (Nucleation Induced by Temperature Oscillation caused by Microwaves) is supported by a theory based on the impact of a fluctuating temperature on secondary nucleation during MAF freezing. A second concept called “NIMIW” (Nucleation Induced by constant or pulsed MicroWaves power) based on constant power emission is supported by the impact of MW on hydrogen bonds between water molecules, which may affect water clusters during freezing.

Keywords: Freezing, microwave, ice crystals, tomography

Contexte

Parmi les procédés de conservation des produits alimentaires, la surgélation est particulièrement intéressante car elle a l'avantage de mieux préserver les qualités organoleptiques et nutritionnelles des aliments. La qualité d'un produit congelé est liée à la taille des cristaux de glace. Selon Delgado et Sun (2001), elle est généralement meilleure lorsque les cristaux formés sont de faible dimension. Comme énoncé par Devine et al. (1996) puis Chourot et al. (2003), les procédés de congélation rapides engendrent de plus petits cristaux mais sont énergivores et donc coûteux. Dans leurs revues, Xanthakis et al (2014) puis Jha et al. (2017) et Dalvi-isfahan et al. (2017) indiquent qu'améliorer la qualité des produits sans augmenter les coûts énergétiques est envisageable avec des procédés de rupture tels que la congélation avec assistance de champs électriques ou encore électromagnétiques. Cette approche peut paraître paradoxale dans la mesure où l'on apporte une énergie volumique qui va se dissiper en chaleur et qu'il va donc falloir la combattre. Néanmoins, des expériences antérieures ont montré un effet positif sur la cristallisation. Hanyu et al. (1992) ont observé la formation de plus petits cristaux dans de la rétine de calamar grâce à l'utilisation de micro-ondes à 2,45 GHz. Plus récemment, Xanthakis et al. (2017) ont mis en évidence une réduction de la taille de cristaux dans la viande de porc lorsque la congélation était assistée par micro-ondes. Cependant il n'y a pas de véritables consensus quant à l'explication de ces résultats. C'est dans ce contexte qu'a été mené le projet Européen FREEZEWAVE (FP7-ERA-Net SUSFOOD) qui s'intéresse à l'impact d'une assistance micro-ondes pendant la congélation sur la taille des cristaux de glace. Le projet coordonné par Alain Le Bail (UMR GEPEA, ONIRIS) réunissait des partenaires suédois (RISE), allemands

(TTZ) et un équipementier français (SAIREM). Deux thèses ont été réalisées au cours du projet, celle de M. Sadot (2018) s'appliquant à analyser les phénomènes physiques et à modéliser ce procédé ; et celle de P. K. Jha (2018) s'attachant à analyser les effets du procédé sur la qualité de produits. Nous évoquerons brièvement les résultats de cette seconde thèse. Comme elle vient de recevoir le prix Marcel Loncin 2018, cette thèse fera l'objet d'un article spécifique.

Développement d'un prototype au laboratoire

Nous avons conçu un prototype au laboratoire pour permettre de congeler des produits avec assistance de micro-ondes. Pour générer celles-ci, un générateur de type « état solide » de la société SAIREM a été utilisé à la fréquence de 2450 MHz sur une plage de puissance de 1 à 50 W. En aval de ce générateur, un dispositif permettait de fixer le mode d'application des micro-ondes : soit en continu, soit de manière discontinue sous la forme de créneaux de puissance. Plusieurs rapports cycliques (ratio de la durée d'exposition aux micro-ondes sur la durée de la période) ont été étudiés sur une période de 30 s (Figure 1). La durée des créneaux peut varier de 0 s (congélation conventionnelle) à 30 s (micro-ondes en continu).

Ces micro-ondes sont ensuite guidées au choix vers deux types de cavité :

- un guide d'ondes WR 340 dimensionné pour que les micro-ondes se propagent en mode fondamental TE₁₀. Dans cet applicateur, le produit à congeler est soumis à un flux d'azote gazeux à -40 °C (Figure 2).
- une cavité multi-modes de type micro-ondes ménager. Dans ce cas le produit est congelé par de l'air.

L'intérêt du monomode, où les caractéristiques de l'onde incidente sont parfaitement connues, est de permettre la réalisation de cinétiques dans des conditions maîtrisées. C'est la configuration idéale pour analyser les interactions onde-matière et mieux les comprendre par l'apport de la simulation numérique.

L'intérêt du multi-modes est de permettre de travailler sur des quantités de produits plus importantes. Cependant, la répétabilité des expériences est plus délicate.

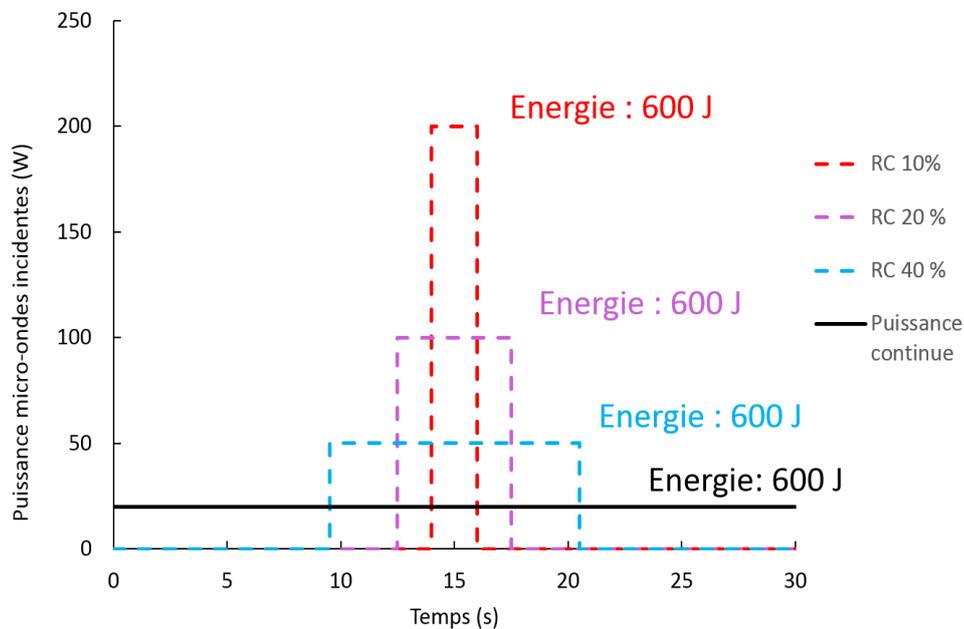


Figure 1 : Différents rapports cycliques permettant d'apporter la même énergie micro-ondes

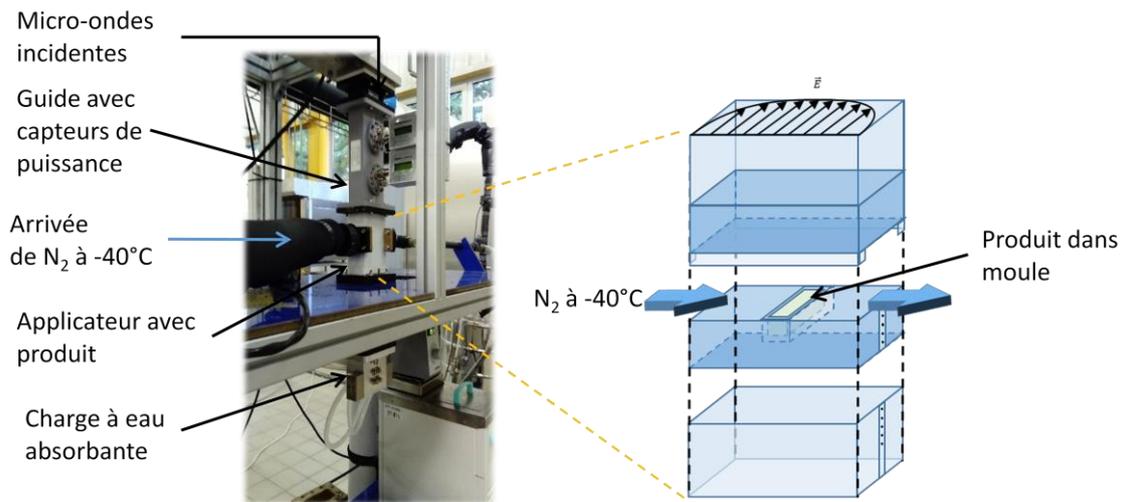
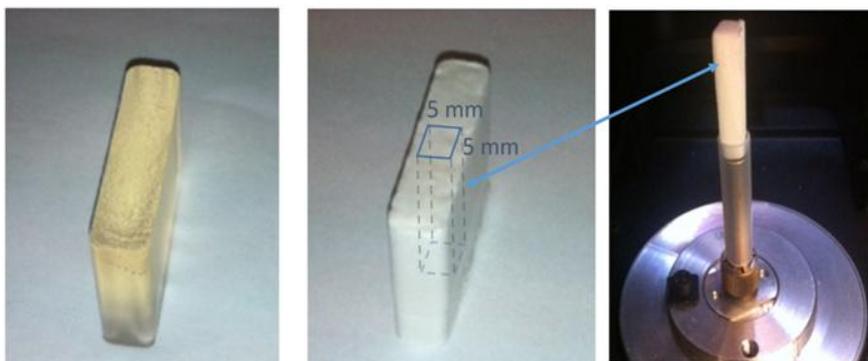


Figure 2 : Photo du prototype de congélation assistée par micro-ondes en guide monomode et schéma de l'applicateur.

Développement de méthodes d'analyse de la qualité des produits

Le premier critère étudié est la taille des cristaux de glace, pour laquelle nous avons établi un protocole spécifique. Après une phase de lyophilisation du produit congelé, la taille des empreintes, laissées après sublimation des cristaux, est analysée par la micro-tomographie à rayons X (Skyscan1174v2, Bruker microCT, Kontich, Belgique) (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). D'autres analyses ont été réalisées par Jha (2018) pour les produits alimentaires congelées dans la cavité multi-modes.



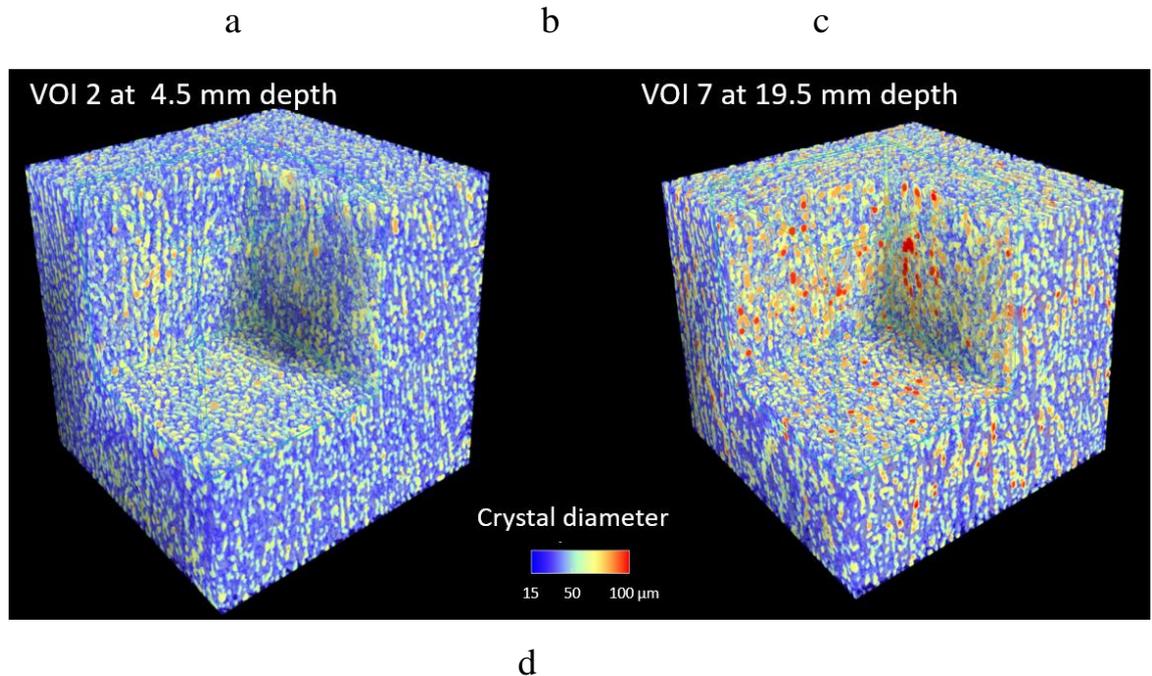


Figure 3 : Détermination de la taille des cristaux de glace par tomographie Rayons X. a) échantillon frais, b) échantillon lyophilisé, c) échantillon analysé, d) taille des cristaux dans 2 volumes d'intérêt

Analyse des interactions micro-ondes matière en cavité monomode

Dans le cas de la cavité monomode, nous avons congelé un gel de méthylcellulose dont les propriétés diélectriques et thermophysiques sont proches de celles des produits alimentaires, notamment de la viande. Les expériences ont été complétées par la simulation numérique pour aider à la compréhension des phénomènes physiques.

Nous avons simulé la congélation d'un produit soumis à un flux d'azote sur sa face supérieure et à des micro-ondes arrivant également par la face supérieure. Les équations de la chaleur avec changement d'état et de l'électromagnétisme ont été résolues à l'aide de Comsol Multiphysics ®. La résolution est d'autant plus complexe que les propriétés du produit sont liées au taux de glace qui évolue localement et au cours du temps.

Un des résultats intéressants concerne la prédiction de la chaleur à différents endroits du produit au cours du temps. Elle est très dépendante des dimensions du produit et de ses propriétés qui évoluent fortement avec le taux de glace. Dans certains cas des phénomènes de résonance peuvent apparaître et engendrer plusieurs points chauds simultanément. Sur la figure 4, on note par exemple 5 points chauds au démarrage du procédé.

Le modèle est un outil précieux d'analyse qui a été validé par confrontation avec des expériences où la température était mesurée par des thermocouples gainés à 2 mm et 7 mm sous la surface (figure 4). Le modèle reproduit parfaitement les cinétiques expérimentales caractérisées par des fluctuations de température liées à l'apport d'énergie.

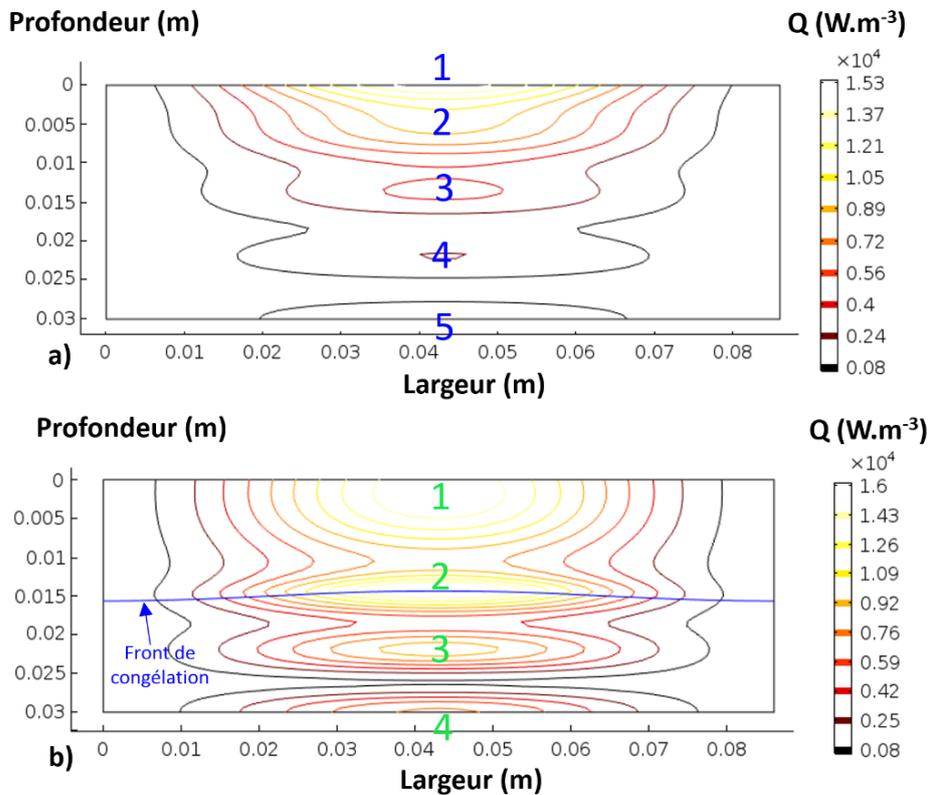


Figure 4 : Chaleur générée à deux instants du procédé et position du front de congélation.

Rapport cyclique : 0,33

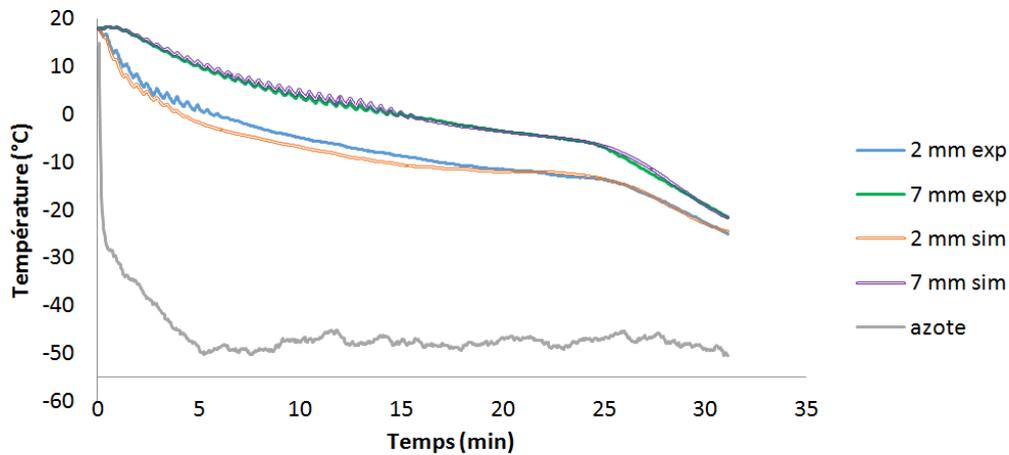


Figure 5 : Courbes de températures simulées et expérimentales en fonction du temps avec un rapport cyclique de 33% sur une période de 30 s.

Plusieurs expériences ont ensuite été réalisées pour analyser l'influence des différents paramètres du procédé sur le temps de congélation et la cristallisation. Nous ne présentons ici que celui où la puissance micro-ondes a été fixée à 1W et où plusieurs rapports cycliques ont été étudiés

La figure 6 montre le diamètre équivalent moyen des cristaux obtenus pour chaque modalité.

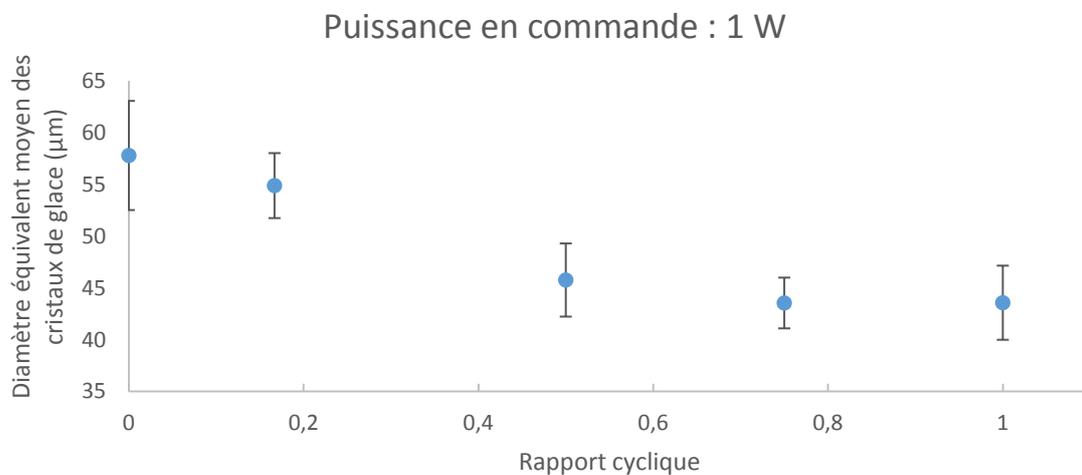


Figure 6 : Évolution du diamètre moyen des cristaux mesurés pour différents rapports cycliques (RC) à puissance fixe.

On observe bien un effet des micro-ondes sur la taille des cristaux de glace : ceux-ci sont plus petits pour les rapports cycliques les plus élevés. La réduction de la taille atteint jusqu'à 25% par rapport à la congélation conventionnelle (rapport cyclique nul). Il est donc possible d'affirmer que l'exposition aux micro-ondes pendant la congélation a un impact bénéfique sur la taille des cristaux, même lorsque ceux-ci sont appliqués en continu. Evidemment, comme indiqué sur la figure 7, ceci entraîne un accroissement du temps de congélation. Cet accroissement est d'autant plus marqué que l'échantillon était de petite taille.

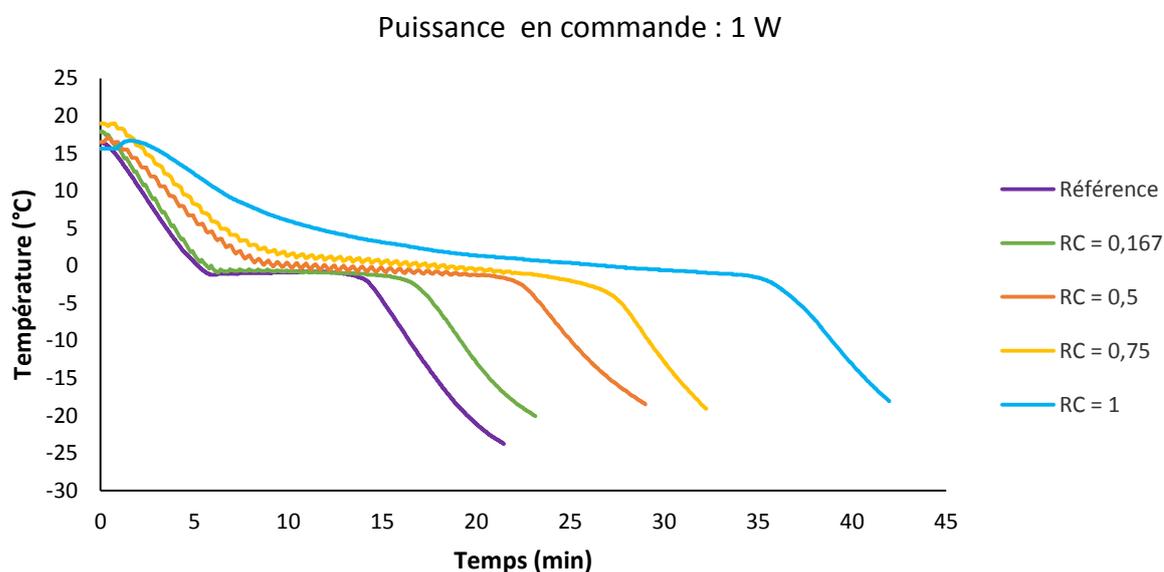


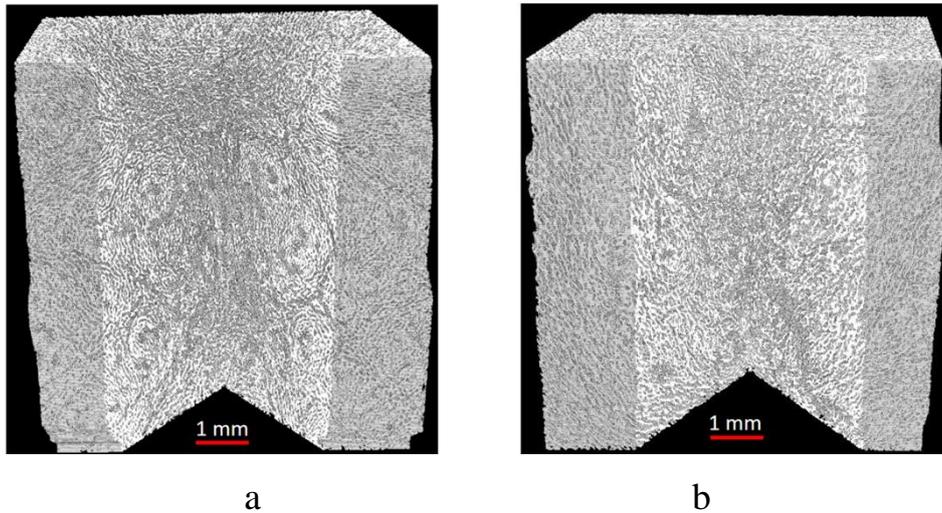
Figure 7 : Évolution de la température en fonction du temps pour différents rapports cycliques (RC) à puissance fixe.

D'autres expériences ont été menées avec des puissances différentes pour limiter l'apport d'énergie. Elles ont confirmé le bénéfice de l'assistance micro-ondes avec un optimum de rapport cyclique autour de 0,33.

Qualité des produits congelés en cavité multi-modes

L'impact de l'application des micro-ondes sur le temps de congélation et sur différents attributs de la qualité (microstructure, texture, exsudats et couleur) de la pomme et de la pomme de terre a été réalisé par Jha (2018). La puissance micro-ondes constante (167 W/kg de produits) et une puissance micro-ondes en créneaux (500 et 667 W/kg avec une largeur d'impulsion de 10 s et un intervalle d'impulsions de 20s, correspondent à une puissance moyenne de 166 et 222 W/kg pendant la congélation.

Contrairement au cas précédent, dans de telles conditions le procédé n'a guère affecté le temps de congélation, il a permis d'obtenir une microstructure supérieure par rapport à l'échantillon témoin, avec une réduction significative (environ 15 à 20% en dimension) de la taille moyenne des cristaux dans les échantillons de pomme et de pomme de terre. La figure 8 montre dans le cas de la pomme de terre que, avec assistance micro-ondes, les cristaux sont de plus petite taille. Nous avons observé une moindre perte de matière par exsudation et une réduction plus faible de la fermeté et de la valeur du module de Young par rapport à l'échantillon témoin. La condition de micro-ondes pulsées à 667 W/kg (rapport cyclique de 0,33) a donné le meilleur résultat en termes de réduction de la taille des cristaux de glace et conservation des autres paramètres de qualité.



*Figure 8 : Comparaison par tomographie Rayon X de deux volumes de pomme de terre congelée (zones grisées : cristaux plus gros)
a) sans micro-ondes b) avec assistance micro-ondes. (Jha, 2018)*

Conclusion

L'impact des micro-ondes sur la cristallisation a été clairement bénéfique dans toutes les expériences menées, avec une réduction de la taille des cristaux de l'ordre de 15 à 20%. La modélisation a permis d'analyser les interactions onde matière et sera utile pour les étapes de dimensionnement d'un procédé continu. Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer cet effet bénéfique : la rotation des molécules d'eau aux abords des cristaux, induite par les micro-ondes, pourrait perturber la croissance des cristaux de glace ; les oscillations de températures dues aux créneaux de puissance micro-ondes pourraient entraîner une fonte partielle des cristaux et engendrer une nucléation secondaire accrue. Dans les deux cas, cela engendrerait un plus grand nombre de cristaux de plus petites tailles.

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Agence Française de la Recherche dans le cadre du projet FREEZEWAVE (SUSFOOD - ERANET, SE: 2014-1925, FR: ANR-14-SUSF-0001). Les auteurs remercient Christophe COUEDEL pour son aide technique.

Références

J.M. Chourot, H. Macchi, L. Fournaison, J. Guilpart, Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes, *Energy Convers. Manag.* 44 (2003) 559–571.

M. Dalvi-isfahan, N. Hamdami, E. Xanthakis, A. Le-Bail, Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves , electric and magnetic fields, *J. Food Eng.* 195 (2017) 222–234.

A.E. Delgado, D.-W. Sun, Heat and mass transfer models for predicting freezing processes – a review, *J. Food Eng.* 47 (2001) 157–174.

C.E. Devine, R.G. Bell, S. Lovatt, B.B. Chrystall, Red Meat, in: L.E. Jeremiah (Ed.), *Freez. Eff. Food Qual.*, Marcel Dek, New York, 1996: pp. 51–83.

Y. Hanyu, M. Ichikawa, G. Matsumoto, An Improved Cryofixation Method - Cryoquenching Of Small Tissue Blocks During Microwave Irradiation, *J. Microsc.* 165 (1992) 255–271.

P. K. Jha 'Étude de l'effet des radiations électromagnétiques pendant la congélation sur la structure de glace et la qualité des tissus des fruits et légumes. Thèse de l'Université Bretagne Loire, 9 novembre 2018

M. Sadot 'Études numérique et expérimentale d'un procédé de congélation assistée par micro-ondes'. Thèse de l'Université Bretagne Loire, 24 septembre 2018.

M. Sadot, S. Curet, O. Rouaud, A. Le-Bail, M. Havet, 'Numerical Modelling of an Innovative Microwave Assisted Freezing Process'. *International Journal of Refrigeration* Vol. 80, 66-76, 2017.

E. Xanthakis, A. Le-Bail, M. Havet, Freezing Combined with Electrical and Magnetic Disturbances, in: D.W. Sun (Ed.), *Emerg. Technol. Food Process.*, Second Ed, Elsevier Ltd, 2014: pp. 563–579.

E. Xanthakis, A. Le-Bail, H. Ramaswamy, Development of an innovative microwave assisted food freezing process, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 26 (2014) 176–181.