

Cuisson d'une pâte céréalière par chauffage ohmique : mise en place d'un modèle numérique et validation expérimentale.

Timothée GALLY¹, Olivier ROUAUD^{1*}, Vanessa JURY¹, Alain LE-BAIL¹

¹ONIRIS - GEPEA (UMR CNRS 6144), Site de la Géraudière CS 82225, 44322 Nantes cedex 3

*(auteur correspondant : olivier.rouaud@oniris-nantes.fr)

Résumé – Les caractéristiques thermophysiques d'une pâte céréalière dégazée ont été déterminées. Un modèle numérique simple de transfert de chaleur a été développé et validé expérimentalement à l'aide d'une cellule de chauffage ohmique. Les pertes de chaleur et l'influence des conditions aux limites sur l'hétérogénéité de la répartition de température ont été étudiées.

Nomenclature

A	rendement du procédé
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
h	coefficient de convection thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$
I	intensité, A
I_H	indice d'hétérogénéité
L	distance entre les électrodes, m
m	masse, kg
P	puissance, W
\dot{q}	terme source, $W.m^{-3}$
\dot{Q}	pertes de chaleur, $W.m^{-2}.K^{-1}$
R	résistance, Ω
S	surface des électrodes, m^2
t	temps, s
T	température, K
V	volume de la cellule, m^3

Symboles grecs

ε	émissivité
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
σ	conductivité électrique, $S.m^{-1}$; constante de Stefan-Boltzmann, $5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-1}$

Indices et exposants

a	dans l'air
amb	ambiante
app	apparente
h	huile
i	immergée dans l'huile
m	moyenne
S	surface

1. Introduction

Le chauffage ohmique (CO), aussi connu sous le nom de chauffage par effet Joule, est un procédé qui consiste à générer de la chaleur par le passage d'un courant électrique au-travers d'un matériau utilisé comme une résistance électrique. Son principe est basé sur la loi de Joule. Ses principaux avantages sont une montée en température uniforme et rapide, l'absence d'inertie thermique après extinction de l'alimentation électrique, et un rendement de conversion électricité-chaleur important [1].

Plusieurs travaux ont montré l'importance d'une bonne isolation thermique pour limiter les gradients de température et favoriser une montée en température homogène dans tout le produit [2], [3]. Les résultats numériques et expérimentaux montrent que les gradients de température sont dus (i) aux transferts vers l'extérieur par convection naturelle (ii) à l'hétérogénéité de la conductivité électrique dans le produit et (iii) aux électrodes dont la forte conductivité électrique et thermique limitent l'échauffement du produit à leur contact, d'autant plus si leur épaisseur est importante.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique simple pour mieux comprendre le procédé de CO et l'appliquer à un produit de type pâte céréalière pour sa validation. La répartition des températures au sein du produit sous différentes configurations sera étudiée.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le système de chauffage ohmique

Le montage expérimental présenté en Figure 1 est constitué d'une source d'alimentation (Rototransfo Dereix SA Paris R212, 0-220 V), de deux multimètres (AOIP MN 5128 monté en ampèremètre et Fluke 45 en voltmètre), d'un acquiiseur de données (AOIP DATALOG 20) et d'un ordinateur. La cellule ohmique a été faite à partir d'un cylindre de polypropylène d'un diamètre interne de 29 mm et externe de 32 mm, et d'une longueur de 98 mm. Les électrodes en titane ont une épaisseur de 2 mm et un diamètre de 28 mm. Elles sont maintenues dans deux bouchons en polyoxyméthylène de 20 mm d'épaisseur, laissant un espace entre elles de 78,7 mm. Trois perforations permettent d'adapter des thermocouples type K, isolés électriquement par des gaines de Teflon. Les perforations sont situées au centre (T2), à 5 mm d'une électrode (T3), et à 8 mm de l'autre électrode (T2). Tous les essais ont été réalisés sous une tension de 50 V à 50 Hz.

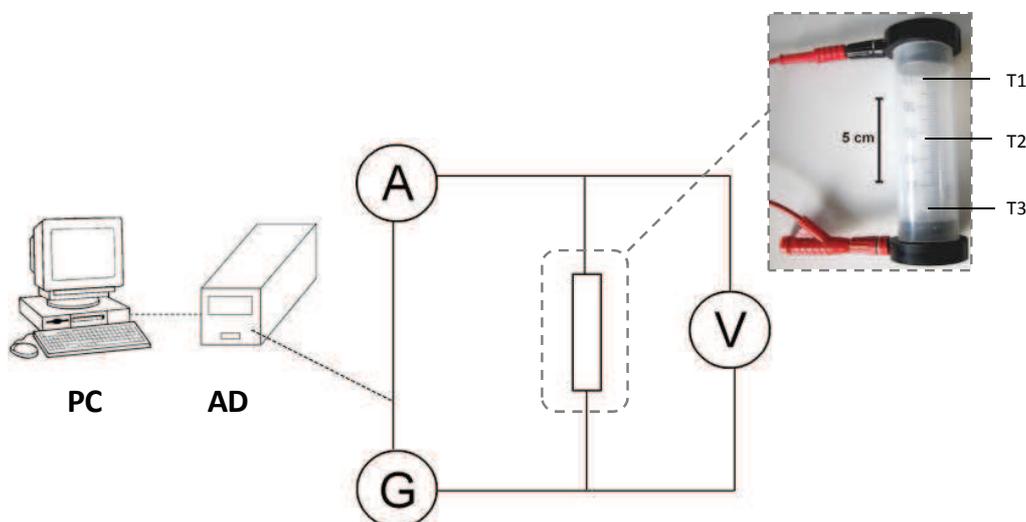


Figure 1 : système expérimental de chauffage ohmique. (PC) ordinateur, (AD) acquiiseur de données, (A) ampèremètre, (G) autotransformateur, (V) voltmètre, (T1, T2, T3) positionnement des thermocouples.

2.2. Caractéristiques des échantillons

Le produit modèle utilisé est une pâte céréalière dégazée (absence de ferments) de type pain de mie. Des échantillons ont été préparés avec différents teneurs en sel (2 et 0,5 fois la masse de sel référence) pour la validation du modèle numérique. Les propriétés thermophysiques de la pâte ont été déterminées expérimentalement. La conductivité électrique a été calculée par l'enregistrement au cours du temps des variables tension, intensité et températures, par application de l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{L \times I}{S \times U} \quad (1)$$

La masse volumique a été déterminée par méthode densimétrique [4], et la conductivité thermique par la méthode du fil chaud [5]. La capacité thermique a été déterminée par microcalorimétrie (micro DSC III SETARAM, Caluire – FRANCE) à une vitesse de montée en température de $1,2^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, de 20 à 115°C .

2.3. Développement du modèle

Les propriétés thermophysiques ont été introduites dans le modèle numérique par interpolation linéaire entre les points expérimentaux. Le modèle a été réalisé sous *Comsol Multiphysics 5.2*. La distribution du potentiel électrique et la conductivité électrique génèrent une certaine quantité de chaleur dans le produit, donnée par le terme source dans l'équation suivante :

$$\dot{q} = \sigma |\nabla V|^2 \quad (2)$$

où $|\nabla V|$ représente le champ électrique en $V.m^{-1}$. En batch (approche quasi-statique), la distribution du potentiel électrique au sein du produit peut être calculée en utilisant l'équation de Laplace suivante :

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (3)$$

La masse volumique du produit est estimée constante en fonction de la température (volume maintenu constant dans la cellule). Le transfert de chaleur se détermine par l'équation de la chaleur en régime instationnaire, à laquelle est ajouté le terme source (2) et un rendement A prenant également en compte les incertitudes de mesure :

$$\rho_{app} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + A \dot{q} \quad (4)$$

On suppose que la majeure partie des pertes de chaleur par rayonnement et convection ont lieu par le cylindre en contact avec le produit, pour une température ambiante mesurée de 21°C. Elles sont calculées selon l'équation suivante :

$$\dot{Q} = h(T_{amb} - T_s) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_s^4) \quad (5)$$

avec h le coefficient de convection thermique en $W.m^{-2}.K^{-1}$ estimé à partir d'une corrélation établie pour une paroi verticale et un régime laminaire (nombre de Rayleigh inférieur à 10^9), et ε l'émissivité du matériau estimée à 0,9.

Afin de caractériser l'hétérogénéité de la répartition de température au sein du produit, un « indice d'hétérogénéité » IH a été défini selon l'équation suivante :

$$IH = \frac{\iiint \sqrt{(T - T_m)^2} dV}{VT_m} \quad (6)$$

Des simulations de chauffage externe par convection naturelle ($h = 7 W.m^{-2}.K^{-1}$) et par convection forcée ($h = 30 W.m^{-2}.K^{-1}$) en complément du CO ont été réalisées à 75 et 100°C. L' IH a été calculé pour étudier l'influence de ce chauffage sur la répartition de la température. Différentes configurations géométriques ont également été étudiées : (i) distance entre les électrodes multipliée et divisée par 1,2 ; (ii) épaisseur des électrodes multipliée et divisée par 5 ; et (iii) rayon des électrodes multiplié et divisé par 2.

L'indépendance du maillage sur les résultats a été vérifiée. Le pas de temps a été laissé au choix du logiciel, permettant une grande rapidité de calcul tout en conservant une assez bonne fidélité des résultats en comparaison à un calcul réalisé pour un pas de temps de 1 s. Le maillage retenu était constitué de 7 014 éléments (triangles) pour 28 950 degrés de liberté. Les résultats numériques et expérimentaux ont été comparés par le calcul de l'erreur relative moyenne.

3. Résultats et discussions

3.1. Propriétés thermophysiques

La conductivité électrique du produit en fonction de la température est intégrée au modèle. Son évolution est linéaire avec la température, comme pour la plupart des matériaux [6], sauf entre 60 et 75°C environ, lorsqu'a lieu la gélatinisation de l'amidon. La masse volumique du produit est de $1195,40 \pm 2,95 \text{ kg.m}^{-3}$. Sa conductivité thermique, pour un domaine de validité de 20 à 100°C, peut être calculée par :

$$\lambda(T) = 5,22 \times 10^{-2} \ln(T - 273,15) + 2,37 \times 10^{-1} \quad (7)$$

La capacité thermique varie de $2000 \pm 88 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 31°C à $2317 \pm 65 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 90°C.

3.2. Montées en température

Les montées en température du produit en trois positions pour une tension de 50 V sont présentées en Figure 2. La température augmente plus rapidement à cœur du produit, et la vitesse se réduit à proximité des électrodes. Cet écart de température est causé par les électrodes, et non par les pertes de chaleur par convection ou rayonnement vers l'extérieur. Du fait de la conductivité électrique importante du titane, les électrodes ne s'échauffent pas lors du passage du courant. Cependant, leur conductivité thermique importante entraîne une dissipation rapide de la chaleur du produit à leur contact. La montée en température du produit se fait de manière relativement linéaire. Pourtant, l'augmentation de la conductivité électrique avec la température devrait entraîner, par le terme source (2), une montée en température exponentielle. Cette évolution quasi-linéaire provient des pertes de chaleur vers l'extérieur.

3.3. Modélisation numérique

3.3.1. Rendement

L'ajout d'un rendement a été nécessaire pour que les températures expérimentales et prédites correspondent. Le rendement de conversion de l'énergie en CO est communément admis comme supérieur à 90% [7]. Cependant, des travaux ont déterminé des rendements bien inférieurs, de l'ordre de 0,7 à 0,9 environ [8]–[10]. Ces rendements peuvent avoir plusieurs causes, comme les réactions faradiques (production de matière plutôt que de chaleur), les pertes électriques le long des câbles, ou de possibles réactions endothermiques.

Un coefficient a donc été intégré au terme source (4), prenant en compte ce rendement ainsi que les diverses incertitudes de mesures expérimentales. Ce coefficient a été calculé par minimisation de la somme des écarts quadratiques entre les températures expérimentales et prédites pour les trois positions au sein du produit, à l'aide d'un script d'optimisation sous *Comsol with Matlab* (Matlab 7.10.0). Sa valeur était de 0,8063 ; cela signifie que dans nos conditions expérimentales, 81% de l'énergie électrique environ sont utilisés pour produire de la chaleur, ce qui correspond aux rendements cités préalablement.

3.3.2. Validation du modèle

Dans le but de vérifier l'exactitude du terme A , deux échantillons avec des teneurs en sel différentes ont été utilisés pour induire une conductivité électrique différente (vitesse de montée en température différente), et comparer les résultats expérimentaux et numériques. Les températures expérimentales et prédites à cœur du produit pour les différentes teneurs en

sel sont représentées en Figure 3. Les résultats prédits sont en accord avec les résultats expérimentaux ; les erreurs relatives moyennes calculées sont comprises entre 2,27 et 4,22%.

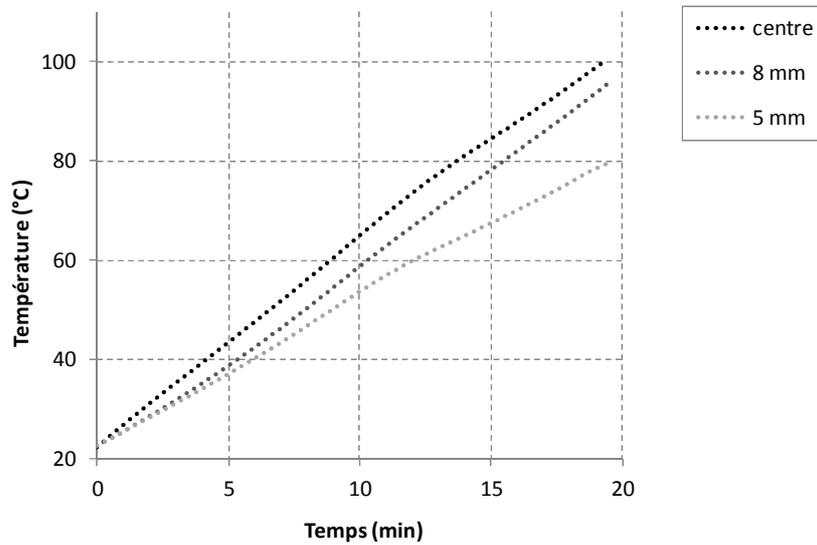


Figure 2 : montée en température du produit selon la position (centre du produit, 5 mm d'une électrode, 8 mm d'une électrode)

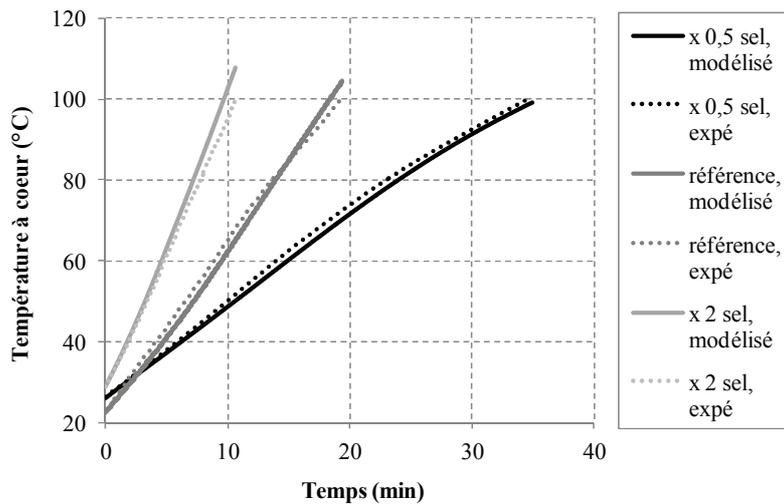


Figure 3 : validation du modèle numérique ; montée en température à cœur du produit pour différentes teneurs en sel

3.3.3. Pertes de chaleur

Après validation du modèle, celui-ci a été utilisé pour se rendre compte de la répartition de température au sein du produit. La Figure 4 montre la montée en température modélisée d'une pâte de référence soumise ou non à des pertes de chaleur vers l'extérieur. La montée en température du produit soumis à des flux convectifs et radiatifs vers l'extérieur se fait de manière quasi-linéaire, de la même façon que les résultats expérimentaux obtenus en Figure 2. A l'inverse, un produit parfaitement isolé thermiquement a une montée en température d'allure exponentielle, ce qui confirme l'hypothèse que l'aspect linéaire obtenu expérimentalement est dû aux pertes de chaleur. Lorsque les flux de chaleur radiatifs et convectifs sont équivalents à la puissance fournie, la montée en température perd son aspect linéaire pour atteindre un palier.

La Figure 5 représente les répartitions de température au sein du même produit pour les deux mêmes conditions que précédemment. Malgré une isolation thermique parfaite, les gradients de température le long de l'axe z sont toujours présents, tandis que les gradients de température initialement présents le long des axes x et y disparaissent. Les pertes n'ont donc plus lieu par les parois, mais au contact des électrodes. L'isolation thermique permet d'obtenir des températures finales supérieures, mais ne réduit pas l'écart de température entre le point le plus froid au contact des électrodes et le point le plus chaud à cœur du produit.

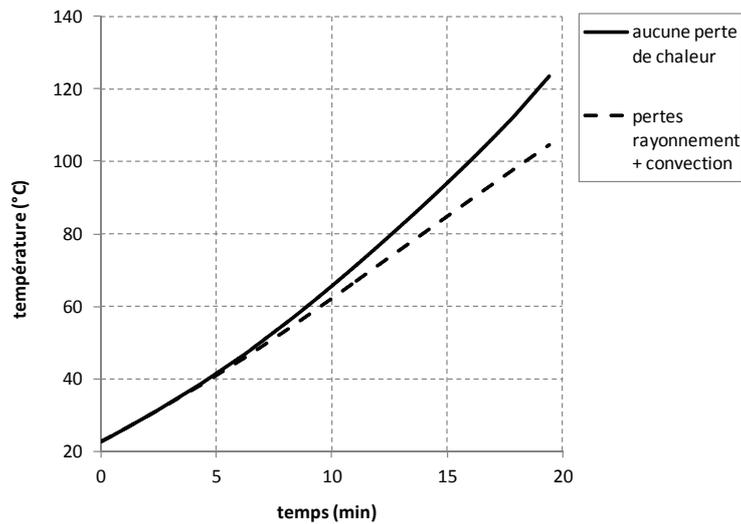


Figure 4 : modélisation de la montée en température de la pâte référence pour une cellule ohmique parfaitement isolée, et une cellule cédant de la chaleur par convection et rayonnement

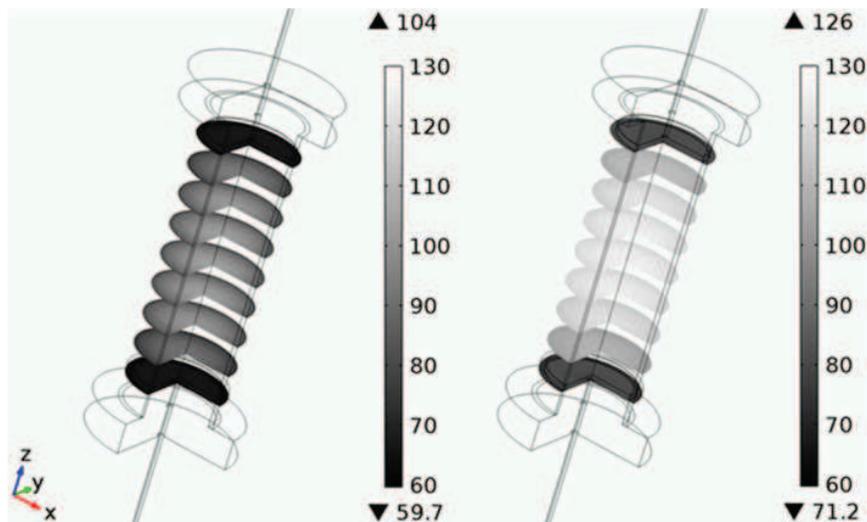


Figure 5 : répartition de température de la pâte référence pour une cellule soumise (gauche) ou non (droite) à des pertes convectives et radiatives vers l'extérieur

3.3.4. Influence des conditions aux limites

Le terme IH a été calculé en fonction du temps pour les différents scénarios, en Figure 6. Il augmente au cours du temps de chauffage, partant de 0 (homogénéité de la répartition de température à $t = 0$ s). Un chauffage externe de la cellule par convection forcée a peu d'impact sur la répartition finale de la température : il permet de réduire légèrement l'hétérogénéité de la répartition de température en fin de chauffage, mais entraîne un gradient

de température important en début de chauffage, le produit en périphérie de la cellule s'échauffant plus vite.

L' IH a également été déterminé pour différentes configurations de cellule. Ses valeurs en fin de chauffage sont présentées en Figure 7. Lorsque la distance entre les électrodes augmente, la répartition de la température est plus homogène dans le produit. Cela vient probablement du fait que le champ électrique plus faible induit une montée en température moins rapide, et donc des pertes vers l'extérieur moins importantes. Aussi, le ratio produit au contact des électrodes/produit total est plus faible, limitant les pertes dues aux électrodes. La diminution du rayon des électrodes améliore également la répartition de la température : le champ électrique reste le même (distance entre les électrodes identique) donc la montée en température est la même, mais la surface du produit en contact avec les électrodes et la paroi du cylindre est plus faible, limitant les pertes. L'influence de l'épaisseur des électrodes a déjà été étudiée expérimentalement par Zell *et al.* [2], montrant que des électrodes plus épaisses entraînaient une montée en température à leur surface plus faible. Cela s'observe ici par la diminution de l' IH lorsque l'épaisseur des électrodes est divisée par 5. La première et dernière valeur représentent respectivement l'association des trois configurations pour l'obtention du meilleur scénario (faible hétérogénéité de répartition des températures), et du pire scénario (forte hétérogénéité).

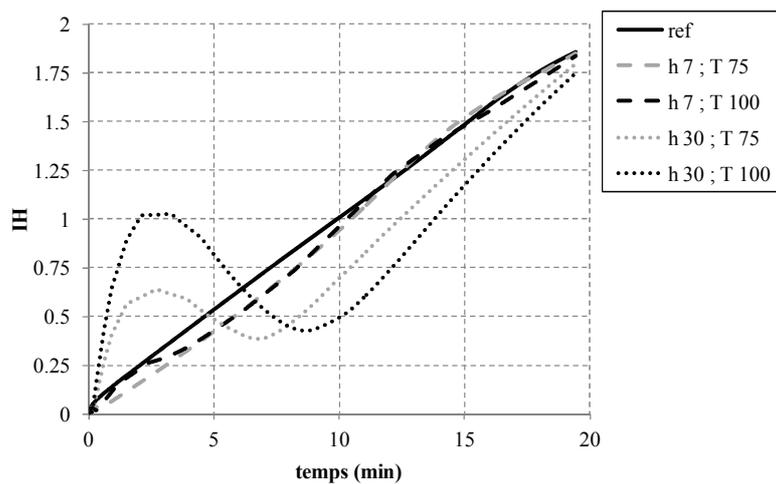


Figure 6 : évolution de l' IH au cours du temps en fonction de différents scénarios de chauffage externe. h : coefficient de convection en $W.m^{-2}.K^{-1}$; T : température en $^{\circ}C$

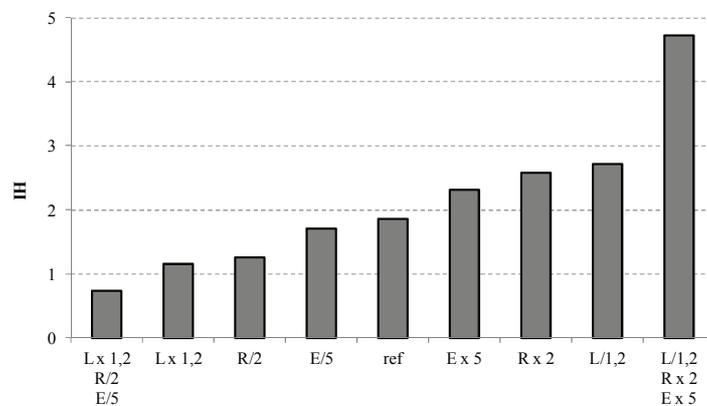


Figure 7 : IH calculé pour différentes configurations de cellule. L : longueur, R : rayon, E : épaisseur, ref : référence.

4. Conclusion et perspectives

Un prototype de laboratoire puis un modèle numérique simple ont été développés pour étudier la montée en température par CO d'une pâte à pain non fermentée. Le rendement du procédé a été déterminé par modélisation. Les gradients de température sur l'axe vertical s'expliquent par la configuration des électrodes, tandis que ceux présents sur les axes transversaux s'expliquent par les pertes de chaleur vers l'extérieur. L'homogénéité de la température dans le produit peut être améliorée en optimisant la configuration de la cellule.

Le modèle sera amélioré en y intégrant les transferts de masse et flux évaporatoires. Il sera par la suite utilisé pour décrire le comportement d'un produit de type pain de mie soumis à une cuisson par CO.

Références

- [1] M. Sakr and S. Liu, 'A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH)', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 262–269, 2014.
- [2] M. Zell, J. G. Lyng, D. J. Morgan, and D. A. Cronin, 'Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food', *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, pp. 128–134, 2011.
- [3] F. Marra, M. Zell, J. G. Lyng, D. J. Morgan, and D. a. Cronin, 'Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food', *J. Food Eng.*, vol. 91, no. 1, pp. 56–63, 2009.
- [4] J. Baker and M. Mize, 'Gas occlusion during dough mixing', *Cereal Chem*, vol. 23, pp. 39–51, 1946.
- [5] V. Jury, J.-Y. Monteau, J. Comiti, and A. Le-Bail, 'Determination and prediction of thermal conductivity of frozen part baked bread during thawing and baking', *Food Res. Int.*, vol. 40, pp. 874–882, 2007.
- [6] S. Palaniappan and S. Sastry, 'Electrical conductivities of selected solid foods during Ohmic heating', *J. Food Process Eng.*, vol. 14, pp. 221–236, 1991.
- [7] R. Ruan, X. Ye, P. Chen, C. J. Doona, and I. Taub, 'Ohmic heating', *Therm. Technol. Food Process.*, pp. 241–265, 2001.
- [8] D. de Halleux, G. Piette, M.-L. Buteau, and M. Dostie, 'Ohmic cooking of processed meats: Energy evaluation and food safety considerations', *Can. Biosyst. Eng.*, vol. 47, pp. 41–47, 2005.
- [9] H. Bozkurt and F. Icier, 'Exergetic performance analysis of ohmic cooking process', *J. Food Eng.*, vol. 100, no. 4, pp. 688–695, 2010.
- [10] X. Ye, R. Ruan, P. Chen, and C. Doona, 'Simulation and verification of ohmic heating in static heater using MRI temperature mapping', *Leb. Wiss Technol Food Sci Technol.*, vol. 37, pp. 49–58, 2004.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Anthony OGÉ et Luc GUIHARD pour les montages techniques de ce travail.