

Article

Modélisation de la conservation par congélation de la viande de poulet hachée

M. Laabed^{1*}, N. Siabdallah² & D. Haddad³

¹ Laboratoire de sciences alimentaires (LSA), Université Batna-1, Batna, Algérie

² Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides (CRSTRA), Biskra, Algérie

³ Laboratoire de Physique Énergétique Appliquée (LPEA), Université Batna-2, Batna, Algérie

* Correspondance: laabedmohssen@gmail.com

Received : 30 November 2019

Accepted : 20 February 2020

Citation : Laabed, M.; Siabdallah, N.; Haddad, D. Modélisation de la conservation par congélation de la viande de poulet hachée. *Journal Algérien des Régions Arides* 2023, 15 (1) : 72–81

Publisher's Note: ASJP is an electronic publishing platform for Algerian scientific journals managed by CERIST, that is not responsible for the quality of content posted on ASJP.



Copyright: © 2022 by the CRSTRA. Algerian Journal of Arid Regions is licensed under a Creative Commons Attribution Non Commercial 4.0 (CC BY NC) license.

Résumé : L'objectif de ce travail est d'utiliser un modèle mathématique, pour résoudre en deux dimensions le problème de congélation d'une tranche de viande hachée de poulet, en forme de cercle plein, d'un rayon $R = 0.05$ m et d'une température initiale $T_0 = 293$ K. Cela dans une enceinte de congélation, à convection d'air et à une température $T_a = 253$ K. La structure est considérée poreuse. La caractérisation du profil biochimique du produit est précédée afin de déduire les propriétés thermo-physiques de l'aliment par des formules empiriques. Pour la résolution du modèle, nous avons utilisé la méthode des volumes finis et programmation sur fortran 90, prenant en considération les transferts d'énergie et de masse ainsi que le changement de phase dans l'aliment. Cependant, le modèle développé utilise comme variables dépendantes de la température : la chaleur massique apparente, la conductivité thermique effective et la masse volumique effective, avant et après la température initiale de congélation. Les résultats sont visualisés à l'aide de l'outil graphique Tecplot 360 et Origin 8. Les résultats obtenus ont montré l'effet du coefficient de transfert convectif ainsi que la conductivité thermique, sur la distribution de la température et le taux de perte en eau.

Mots clés : Conservation des aliments, modélisation, viande de poulet, congélation, transfert de chaleur et de masse.

1. Introduction

La conservation des aliments par congélation se produit selon plusieurs mécanismes, à des températures inférieures à 0°C , les taux de croissance des micro-organismes et la détérioration correspondante du produit due à l'activité microbienne sont considérablement réduits [1]. Pendant le stockage, les aliments sont souvent soumis à des fluctuations de la température ambiante. Les pertes de stockage dans des conditions de température fluctuantes peuvent être nettement supérieures à celles à des températures moyennes [2]. Dans la congélation des aliments, le transfert de chaleur est toujours accompagné par transfert de masse et celle-ci peut avoir des implications importantes [3].

Le recours à la méthode d'étude numérique permet de compenser les lacunes des méthodes expérimentales et de générer des données pour différentes conditions, lorsque plusieurs paramètres et facteurs ne peuvent pas être développés de manière expérimentale. La modélisation du transfert de chaleur et de masse implique des équations différentielles partielles complexes qui doivent être résolues par des méthodes numériques (méthodes de discrétisation), car les solutions analytiques n'existent pas. [4].

En revanche, ce processus demande une compréhension de la structure des aliments à étudier donc un classement de structure, par exemple dense ou poreuse. Mais aussi déterminer les phénomènes biophysiques et thermo-physiques qui se déroulent entre les différentes phases liquide, solide et gazeuse. Cependant, le changement de phase ne se produit presque jamais seul et d'autres phénomènes ont lieu en parallèle avec le transfert de chaleur. Le mouvement d'humidité se produit à l'échelle macro et au niveau cristallin

et cellulaire, une variation des pressions partielles, des contraintes complexes et déformations provoquent des fissures, changement de texture, et d'autres modifications qui affectent la qualité des aliments [3].

Dans ce travail nous avons procédé à la résolution d'un modèle mathématique qui repose sur l'équation de la chaleur ainsi que la loi de transfert de masse dite la loi de Fick. Le calcul numérique réalisé à l'aide d'un langage programmer avec le code fortran 90, et afficher les résultats. Pour cela une caractérisation quantitative du profile biochimique (Tableau 1) a été faite pour calculer les propriétés thermo-physiques (Tableau 2).

Deux cas d'étude sont possibles, le premier cas est l'étude de l'aliment seul, le deuxième cas l'étude dans l'enceinte de réfrigération, prenant compte de la circulation d'air et la répartition de la température.

À cet effet, l'effet du coefficient de transfert par convection, et la conductivité de l'aliment, sur l'évolution de température et le taux de perte par les deux phénomènes évaporation et sublimation ont été pris en considération, et ils sont pris comme indicateur de changement de la qualité. Une attention a été donnée à la première phase de congélation, là où le taux de perte par évaporation est important.

Nous avons simulé les conditions de congélation en prenant compte des données variables de la conductivité, la chaleur massique et la masse volumique, durant le processus.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractérisation biochimique de la viande de poulet

La caractérisation et le dosage des éléments biochimiques est effectuée selon le guide (Food Analysis Laboratory Manual) [5]

1. Taux d'humidité.
2. Dosage des cendres brutes.
3. Dosage des protéines par la méthode Kjeldahl.
4. Dosage des lipides totaux par la méthode de soxhelet.

Les taux résultants sont utilisés pour la déduction des paramètres thermo physiques selon les formules empiriques proposées par Bazinet (2011) .[6].

2.2. Étude numérique

Les équations qui gouvernent lors du processus de congélation sont l'équation de la chaleur pour le transfert de chaleur et la loi de Fick (2) dans le cas du transfert de masse. L'énergie thermique est également transmise par la substance diffusante, ce qui nécessite l'ajout d'un deuxième terme de transport, exprimé avec l'enthalpie H_w aboutissant à la forme de l'équation de transport de chaleur (1).

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \nabla(H_w \cdot j_w) \quad (1)$$

Où H : l'enthalpie de la fraction solide, j_w : le flux massique et H_w : l'enthalpie de la fraction liquide diffusante, K : est la conductivité thermique.

$$j_w = -\rho D \nabla W \quad (2)$$

Où ρ : est la masse volumique de viande de poulet Kg.m^{-3} , D : la diffusivité du liquide et W : taux de la fraction liquide.

2.2.1. Modèle physique

L'étude porte sur la configuration d'un système de congélation à air pulsé. La situation physique indiquée dans la figure (1) considère le compartiment en fonctionnement, la température de l'air est de 253 K (-20°C), celle la viande de poulet hachée est de 293 K ($T_0 = +25^{\circ}\text{C}$).

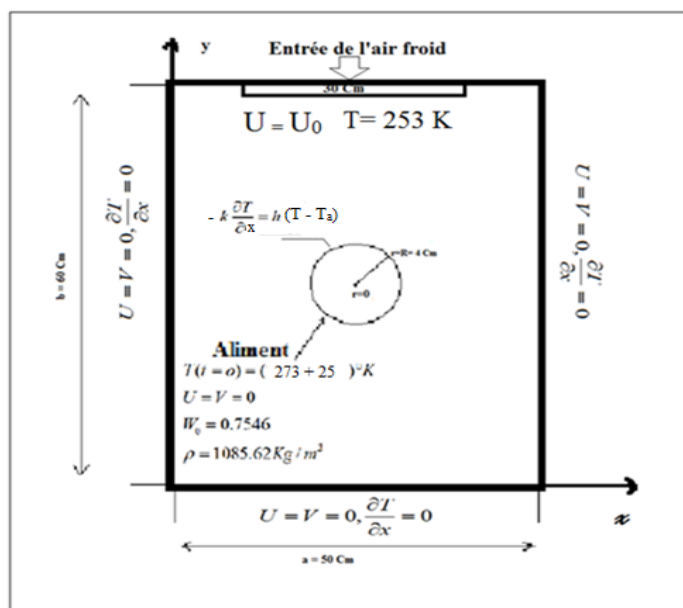


Figure 1. Situation physique.

2.2.2. Présentation du domaine

L'aliment simulé est représenté en deux dimensions (2-D), sous la forme d'un cercle plein disque (Figure 2), d'un rayon $R = 0.05$ m. Mais nous avons pris en considération qu'un quart du cercle (quadrant) (figure 3), cela pour minimiser le temps de calcul. Le maillage utilisé pour la simulation du transfert de chaleur et de masse est construit selon des coordonnées polaires à l'aide d'un programme sur fortran 90, L'écoulement est axisymétrique donc invariant selon l'angle (θ), les extrémités selon $\theta = 0$ et $\theta = 90$ du quadrant de l'aliment sont supposé adiabatiques, le transfert ne se manifeste qu'au côté surface en contact de l'air du réfrigérateur, par convection.

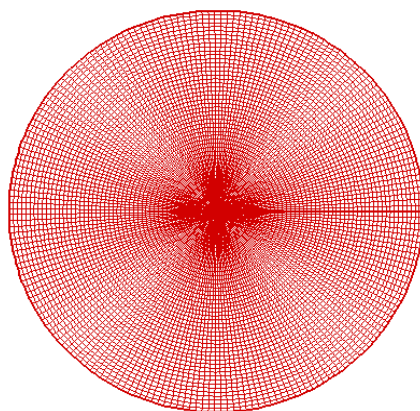


Figure 2. Représentation en cercle avec maillage 2-D de l'aliment.

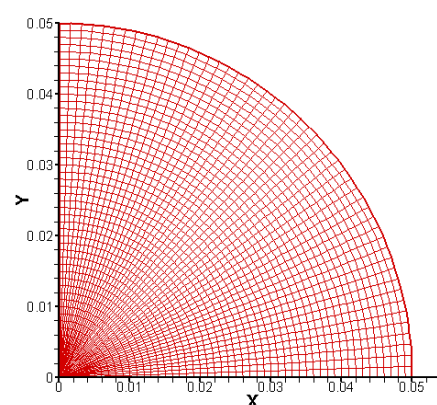


Figure 3. Représentation en Quadrant avec maillage 2-D de l'aliment.

- La chaleur est conduite vers la surface est équilibré par la convection, l'évaporation et la sublimation, dans ce cas le terme radiation est négligé :

. Si la température de l'aliment T est supérieure à la température de congélation T_i ($T > T_i$) on doit prendre en considération la chaleur latente d'évaporation de l'eau

$$-k(W, W_{air}, T) \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r,R} = h(T_s - T_a) - \lambda_v k_g (P_s - P_a) \quad (3)$$

On met : W : fraction d'eau dans l'aliment et W_{air} : taux d'humidité de l'air, avec T_s : température à la surface de l'aliment, k_g est le coefficient de transfert de masse ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), P_s : pression partielle de l'eau à la surface des aliments et P_a : la pression partielle de l'eau dans les alentours, λ_v : chaleur latente d'évaporation de l'eau ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$), h : coefficient de convection de l'air.

. Si la température de l'aliment est inférieure à la température de congélation ($T < T_i$) on prend en considération la chaleur latente de sublimation.

$$-k(W, W_{air}, T) \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r,R} = h(T_s - T_a) - \lambda_{sbl} k_g (P_s - P_a) \quad (4)$$

Avec : λ_{sbl} : chaleur latente de sublimation.

La diffusivité D de la masse vers la surface est équilibrée par l'évaporation et la sublimation :

$$-D(T) \rho \left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_{r,R} = k(T_s - T_a) - (P_s - P_a) \quad (5)$$

R est le rayon, $r = \frac{1}{2} R$

$$W_{l,eq} = (W_0 - W_b) \frac{T_f - T_0}{T - T_0} \quad (6)$$

$W_{l,eq}$: Fraction liquidus à l'équilibre, W_0 : fraction liquidus initial, W_b : Fraction eau liée et T_f : Température finale.

2.2.4. Modélisation du phénomène

Lors de l'écriture de l'algorithme on doit prendre en considération la discontinuité du phénomène due au changement de phase.

$$\rho C p_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k_{eff} \nabla T) \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla (D_{liquide} \nabla T) \quad (8)$$

Pour se rapprocher du phénomène réel on doit calculer le terme de conduction effectif équation (9) ainsi que le terme diffusion effectif équation (10) et cela à chaque variation de température, dont les paramètres $C_{p_{eff}}$, k_{eff} et $D_{liquide}$ dépendent du changement de phase et de la présence ou non de la glace ainsi que la variation de pression partielle de la vapeur d'eau de l'air entourant l'aliment et de l'aliment lui-même.

Dans la zone liquidus on aura :

$$k_{liquidus} = \left[\frac{\phi_g}{\tau} \right] \left[\frac{\lambda_{vl} W_w a_w}{R_g T} \right] \left[\frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}} \frac{dP_{liq}}{dT} \right] \quad (9)$$

$$D_{liquidus} = \left[\frac{\phi_g}{\tau} \right] \left[\frac{D_{vl} W_{liq} a_{liq}}{R_g T} \right] \left[\frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_{liq} P_{liq}} \frac{dP_{liq}}{dT} \right] \quad (10)$$

λ_{vl} : L'enthalpie de vaporisation

$$\lambda_{vl} = H_{vapeur} - H_{liq}.$$

R_g : Constante des gaz parfait.

$\Rightarrow$ Dans la zone solidus présence de glace :

$$k_{solidus-eff} = k + \left[\frac{\phi_g}{\tau} \right] \left[\frac{\lambda_{sub} W_{glace} a_{glace}}{R_g T} \right] \left[\frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{glace}} \frac{dP_{glace}}{dT} \right] \quad (11)$$

$$D_{solidus-eff} = \left[\frac{\phi_g}{\tau} \right] \left[\frac{D_{sub} W_{glace} a_{glace}}{R_g T} \right] \left[\frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{glace}} \frac{dP_{glace}}{dT} \right] \quad (12)$$

λ_{sub} : enthalpie de sublimation

Lorsque la glace est présente, la situation est plus compliquée car il y a trois phases en équilibre. En raison des changements locaux de température et d'humidité, les quantités de vapeur d'eau, d'eau liquide et de glace peuvent tous changer. [7].

En équilibre en doit tenir compte de mettre :

$$W = W_{eq} = (W_0 - W_{liée}) \frac{T_f - T_0}{T - T_0} \quad (13)$$

$$a_w = \frac{P_{glace}(T_f)}{P_{liquide}(T_f)} \quad (14)$$

Ces équations de transport sont résolues par la méthode numérique des volumes finis utilisant un schéma de pas de temps explicite.

3. Résultats

3.1. Composition et propriétés thermo-physiques

La composition biochimique de notre produit est représentée dans le Tableau 1. On constate une matrice riche en eau d'environ 75%, un taux de protéines de 21.39%, qui décrit un modèle d'interface eau-protéines à un comportement thermique caractéristique des interfaces eau-hydrophile.

Tableau 1. Données sur la composition biochimique pour la viande de poulet de chair.

Composition	Unité	Valeur par 100g
Eau	G	75,46
Protéines	G	21,39
Lipides totaux	G	3,08
Carbohydrates	G	0,00
Minéraux et vitamines	G	0,07

3.2. Phase de refroidissement (pré-congélation)

3.2.1. Champs de température dans l'aliment

Les deux Figures 4 et 5, représentent par simulation l'effet de variation des coefficients transferts de chaleur h_T dans l'enceinte de congélation sur la distribution de la température dans l'aliment et sa variation du centre vers la surface.

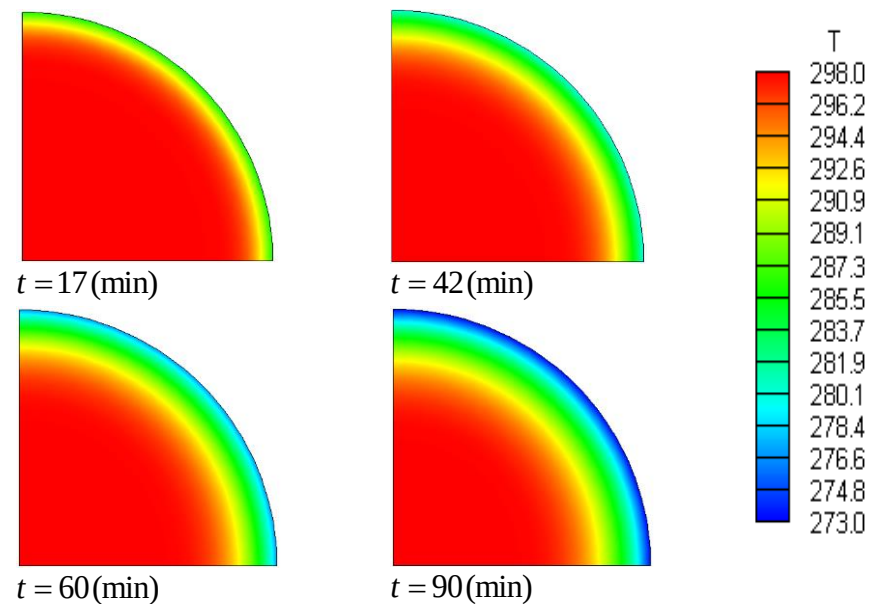


Figure 4. Champs température pour coefficient convectif $h_T=20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ avec une Conductivité faible (phase de refroidissement).

Dans notre cas le temps de congélation de la couche surfacique pour une température fixée à 253 K (-20°C), et un coefficient de transfert h fixe $h_T=20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, est estimé à 42 min, si on suggère dans notre modèle une conductivité faible de l'ordre de (0.351 W/m.k), mais il diminue à 17 min.

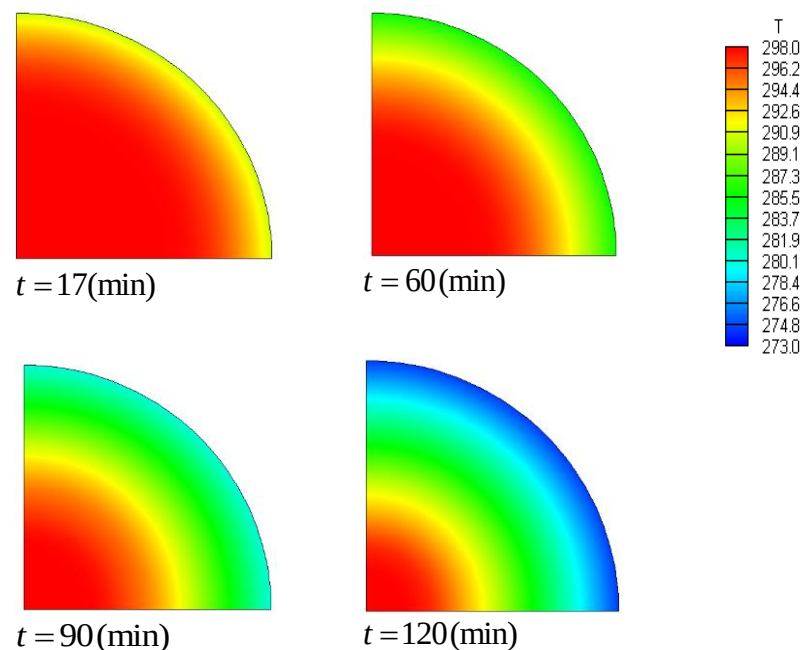


Figure 5. Champs température pour coefficient convectif $h_T=20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ avec une forte conductivité (phase de refroidissement).

Pour des valeurs de conductivités plus élevée (3.51 W/m.k), La conductivité et la distance entre la surface et le centre thermique de l'aliment, affectent significativement la durée de congélation.

3.2.2. Profile de température dans l'aliment

Les Figures 6 et 7 représentent les profils de température dans l'aliment durant le processus de refroidissement. Elles montrent la variation de la température à chaque point dans l'aliment pour un temps t déterminé.

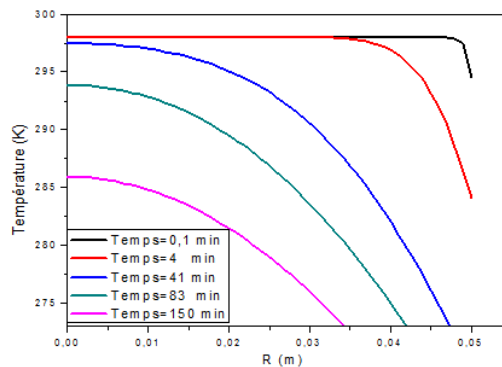


Figure 6. Profile de température avec une conductivité faible pour différents temps à $h_T = 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

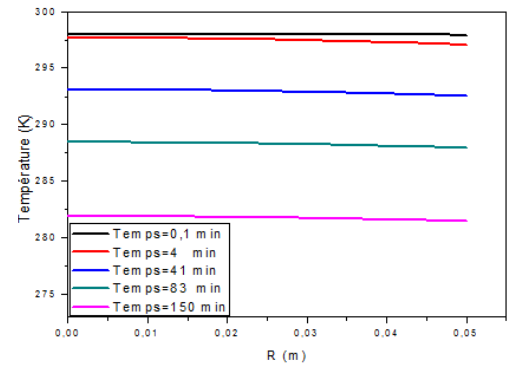


Figure 7. Profile de Température pour différents Temps à forte conductivité.

Dans notre modèle nous avons suggéré deux valeurs de conductivité thermique du produit une faible de $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ proche de celle des macroéléments organiques, contre une valeur plus forte supérieure à celle de l'eau pur ($0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) jusqu'à $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

3.2.3. Phase de congélation

La Figure 8 montre l'avancement du front de solidification calculé par le taux de propagation de la glace dont la teneur est mentionnée $W_{\text{Glacé}}$ dans le programme.

Le changement de phase liquide-solide de la teneur en eau dans l'aliment a lieu, quand la température de congélation est atteinte, dans notre cas ($T_f = 270.2 \text{ K}$), tout d'abord à la surface en contact avec l'air du congélateur. La région à teneur $W_{\text{Glacé}}$ plus élevée se déplace du haut vers le centre thermique de l'aliment au fil du temps, jusqu'à solidification complète exprimée dans le programme par $(W_{\text{Glacé}} + W_b)$, où W_b est la fraction d'eau liée non congelée.

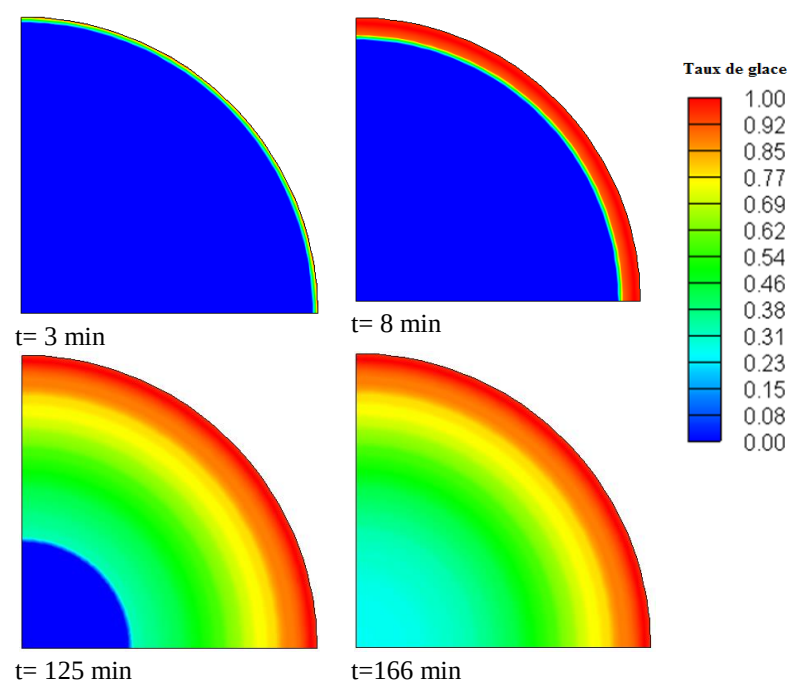


Figure 8. Déplacement du front mobile de congélation.

4. Discussion

4.1. Composition et propriétés thermo-physiques

Dans le Tableau 1 qui représente la composition du produit simulé qui sert à l'estimation des propriétés thermo-physiques nécessaires pour le calcul. En effet notre matrice reflète un profil riche en eau d'environ 75% avec une conductivité thermique de $0.6 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ à 20°C et $0.5 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ à des températures inférieures à 0°C qui aura des conséquences directes sur le temps de congélation et les transferts intra-produit. Un taux de protéines de 21.4% avec une conductivité thermique basse qui varie entre $0.1 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ et $0.2 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ qui forme une résistance de transfert des gradients de températures au sein de la structure.

4.2. Phase de refroidissement (pré-congélation)

4.2.1. Champs de température dans l'aliment

Les champs de températures dans les deux Figures 4 et 5, visualisent le transfert de chaleur dans la matrice étudiée. En premier temps l'équation du flux de chaleur est résolue pour chaque pas de temps dans la grille, qui s'étend sur produit entier, en même temps l'équation de transfert de masse est résolue en utilisant les résultats obtenus. la distribution de la température dans l'aliment est proportionnelle avec la valeur du coefficient de transfert de chaleur à la surface h_T .

La couche mince surfacique humide atteint une température de 253 K (-20°C), dans les premières minute du procédés environs 4 mn pour un coefficient de transfert h fixe $h_T = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ et des conductivités thermiques variables, elle n'est pas affecté par la conductivité thermique de la matrice cela est interprété par la nature de cette couche constituée en majeure partie d'eau. Mais une fois on dépasse la couche surfacique et si on suggère comme dans notre modèle une conductivité faible de l'ordre de (0.351 W/m.k), le refroidissement prend plus de temps pour atteindre le centre thermique.

Lorsque le point de congélation est atteint, la vapeur se condense en glace. [8]. Lorsque la glace est présente, elle existe sous forme d'une phase pure, contrairement à l'eau liquide qui se fait normalement contenir des solutés qui dépriment a_w , et donc la pression de vapeur du contenant de la glace (congelée) est la même que celle de la glace. [3].

Dans le temps on assiste à une congélation complète de l'aliment, due à une propagation du transfert et une extraction de la chaleur qui débute de la surface vers le centre de l'aliment. L'eau s'évapore des parties intérieures chaudes de l'aliment et diffuse vers l'extérieur. On constate que la durée de congélation n'est pas la même pour les deux cas, à cause des propriétés thermo physiques (conductivités) différentes imposées dans notre programme.

4.2.2. Profile de température dans l'aliment

Les profils de température dans les figures 6 et 7 montrent que la variation de la conductivité thermique de l'aliment a une influence sur le temps et la manière de l'extraction de la température, de la surface vers le centre thermique.

Plus la valeur de la conductivité est importante plus les températures de la surface et le centre de l'aliment se rapprochent, qui fait que les deux point rejoignent la température de congélation pour de petites différence de temps, dans notre cas un début de congélation pour une température de $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ est obtenu à un temps de $t = 4\text{ min}$ pour la valeur de conductivité maximale, de ce fait un refroidissement et congélation meilleur, par contre dans le cas des données de conductivité (k) calculé, le point cryogénique à la surface sera atteint après 25 min.

4.3. Phase de congélation

Dans la Figure 8, on remarque la présence des deux phases en même temps dans les régions de rencontre, avec un avancement de la fraction glace, expliquer par un échange de chaleur entre les deux phases liquide et solide au niveau de ces régions. Cependant la phase liquide dans l'aliment perd sa chaleur en contact avec la phase solide, qui a son tour gagne une quantité de chaleur et la cède à la couche adjacente plus froide, cela se répète jusqu'au niveau de la couche surfacique qui l'échange avec l'air ambiant. Les propriétés thermo-physiques telles que la chaleur spécifique et la conductivité thermique présentent des changements soudains autour du point de congélation, conduisant à une équation aux dérivées partielles hautement non linéaire [3].

5. Conclusion

Notre travail consiste à utiliser un modèle transitoire convection-diffusion de chaleur et de masse selon le model enthalpique proposé par le professeur Q .T .Pham [3], pour prédire la perte de poids et les champs de températures dans l'aliment. Cela est réalisé en utilisant la méthode des volumes finis avec une programmation sur fortran, une grille maillée pour un quart de cercle afin de minimiser le temps de calcul, et un pas de temps d'une seconde. L'effet des coefficients de transfert est étudié le long des parois de l'aliment, en plus la perte de poids lors du processus de refroidissement du produit a été calculée.

L'effet du coefficient de transfert (h) est visible, un gain de temps de 106 min et une récupération de 15% de perte en humidité sont constatés, pour une variation (h) de $8\text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$ à $20\text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$. Enfin, cette approche nous a permis d'avoir des données, de visualiser et de prédire le déroulement du processus, en utilisant juste le tableau de composition chimique, les formules empiriques et un modèle mathématique. Cela permet d'économiser le temps et le matériel, et offre une meilleure compréhension et une vue d'ensemble du processus réel, avant toute intervention.

References

1. Singh, R.P. and D.R. Heldman, *Introduction to food engineering*. 2001: Gulf Professional Publishing.
2. Kilcast, D. and P. Subramaniam, *Food and beverage stability and shelf life*. 2011: Elsevier.

3. Pham, Q.T., *Food freezing and thawing calculations*. 2014: Springer.
4. Cepeda, J., et al., *Heat and mass transfer modeling for microbial food safety applications in the meat industry: a review*. Food Engineering Reviews, 2013. 5(2): p. 57-76.
5. Nielsen, S.S., *Food analysis laboratory manual*. 2010: Springer.
6. Bazinet, L. and F. Castaigne, *Concepts de génie alimentaire: Procédés associés et applications à la conservation des aliments*. 2011: Tec et Doc.
7. Lemuel, M.D. and T.M.T. Ngoc, *Effects of meat shape and size, freezing method and thawing temperature on the drip loss of beef brisket and the protein content of its thaw exudates*. 2016.
8. Hamdami, N., J.-Y. Monteau, and A. Le Bail, *Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix*. International journal of refrigeration, 2004. 27(6): p. 595-603.