

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BATNA 1

INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES ET AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE

MÈMOIRE

Présenté Pour l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité

Génie des procédés alimentaires

Réalisé par

LAABED Mohssen

MODÉLISATION BIDIMENSIONNELLE DES TRANSFERTS COUPLÉS CHALEUR ET MASSE LORS DE LA CONGÈLATION D'UN ALIMENT

Soutenu le : 21 juin 2017

Président	ZITOUNI Bariza	Professeur	Université Batna 1
Rapporteur	HADDAD Djamel	MCA	Université Batna 2
Examineur	BENMOUSSA Houcine	Professeur	Université Batna 2
Examineur	AOUACHRIA Zeroual	Professeur	Université Batna 1

Année universitaire : 2016/2017

Remerciements

Toute ma gratitude au Dr. HADDAD Djamel, mon directeur de recherche, pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordé pour l'élaboration de ce modeste travail. Mes vifs remerciements au Professeur ZITOUNI Bariza, d'avoir accepté de présider ce jury, ainsi qu'aux efforts et l'intérêt porté aux étudiants de magister Génie des procédés alimentaires. Mes remerciements vont également aux ; Professeur BENMOUSSA Hocine et Professeur AOUACHRIA Zeroual d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Je remercie Dr NOUI Yacine, Mr. ABDEDDAIM Mohamed, et Dr DJOUIMAA Sihem pour leurs conseils judicieux.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, mon défunt beau père M. Derradji Djouimaa, à mon épouse, mes chers enfants Mohamed Mehdi et Oueis.

Sommaire

Remerciement

Liste des figures et des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale 1

Chapitre I : Congélation des aliments

Introduction	5
I.1. Phases du processus de congélation	5
I.2. La vitesse de congélation	8
I.3. La durée de congélation	11
I.4. Changement de phase lors de la congélation	12
I.4.1. Equilibres des phases	13
I.4.2. Phénomène de cristallisation	14
I.4.2.1. La surfusion	15
I.4.2.2. la nucléation	16
I.4.2.2.1. La nucléation primaire	16
I.4.2.2.1. La nucléation secondaire	16
I.4.2.2. La croissance des cristaux	17
I.5. Propriétés thermo physique des aliments lors de la congélation	18
I.5.1. Point de congélation	18
I.5.2. La fraction de glace	20
I.5.3. La chaleur	21
I.5.3.1. La chaleur massique	21
I.5.3.2. La chaleur latente	23
I.5.4. La masse volumique	23
I.5.5. La conductivité thermique	25
I.5.6. La diffusivité thermique	25
Conclusion	30

Chapitre II : Modélisation des transferts de chaleur et de masse lors de la congélation d'un aliment

Introduction	29
II.1. Aspect théorique des modèles de transfert couplés	

lors de la congélation des aliments	29
II.1.1. Cas des aliments à structure dense	31
II.1.2. Cas des aliments à structure poreuse	34
II.2. Coefficients de transferts	39
II.2.1. Coefficient de Transfert de masse	39
II.2.2. Coefficient de transfert de chaleur	40
II.3. L'état de l'art	41
II.3.1. Les modèles de transfert de chaleur	42
II.3.2. Les modèles de transfert de chaleur et de masse	44
Conclusion	49

Chapitre III : Etude Numérique en 2-D des transferts couplés lors de la congélation d'un aliment

Introduction	51
III.1. Model physique et premières hypothèses	55
III.2. Formulation mathématique	52
III.2.1. Equations régissant l'air	52
III.2.2. Equations régissant l'aliment	54
III.2.3. Conditions aux limites	57
III.3. Modélisation du phénomène	57
III.4. Méthode de résolution	58
III.4.1. Discrétisation par la méthode des volumes finis dans l'aliment seul	58
III.4.2. discrétisation des différents thermes	60
III.4.3. schéma implicite ADI	62
Conclusion	63

Chapitre IV : Résultats numériques et interprétations

Introduction	65
IV.1. Evolution des paramètres dans le cas de l'aliment seul	66
IV.1.1. Présentation du domaine	66
IV.1.2. Phase de refroidissement (pré-congélation)	67
IV.1.2.1. Champs de température dans l'aliment	67
IV.1.2.2. Profile de température dans l'aliment	69
IV.1.2.3. Profile de diffusion de l'eau vers la surface pour une variation	

du coefficient de transfert convectif	67
IV.1.3. Phase de congélation	74
IV.3.1.1. Propagation du front de solidification	74
IV.2. Etude dynamique de l'enceinte de congélation	77
IV.2.1. Convection naturelle	77
IV.2.1.1. champs dynamique dans l'enceinte à convection d'air naturelle	78
IV.2.1.2. champs de température dans l'enceinte à convection d'air naturelle	80
IV.2.2. Convection forcée	82
IV.2.2.1. champs dynamique dans l'enceinte à convection d'air forcée	83
IV.2.2.2. champs de température dans l'enceinte à convection d'air forcée	84
Conclusion	86
Conclusion générale	87
Références Bibliographiques	
Annexe	

Liste des figures et graphiques

Ordre	Titre	page
I.1.1	Evolution des phases du processus de congélation	6
I.1.2	Diagramme de congélation de l'eau et d'un aliment	7
I.2.1	Température au centre thermique des pâtés de viandes pour une congélation à air pulsé lente et rapide	9
I.2.2	Section dans un muscle squelettique après une congélation rapide et lente	10
I.4.1	Interface de changement de phase	13
I.4.2	Diagramme de phase de l'eau	14
I.5.1	Schéma simplifié des effets des solutés sur la nucléation en congélation	19
III.1.1	Schéma de la Situation Physique	51
III.4.1	Schéma de discrétisation. (a) domaine de calcul, (b) volume de contrôle	59
IV.1.1	Schéma avec maillage 2-D de l'aliment	66
IV.1.2	champs température pour $hT=20 \text{ w/m}^2.\text{K}$ avec conductivité faible Durant la phase de refroidissement	67
IV.1.3	champs température pour $hT=20 \text{ w/m}^2.\text{K}$ avec forte conductivité Durant la phase de refroidissement	68
IV.1.4	profile de Température avec conductivité faible pour différents Temps à $hT=20$	69
IV.1.5	profile de Température pour différents Temps à forte conductivité	69
IV.1.6	évolution de température dans différentes position dans l'aliment	70
IV.1.7	évolution de température pour déférant valeur de hT à la surface	71
IV.1.8	prédiction du temps de congélation pour différentes valeurs de hT à la surface	71
IV.1.9	évolution de la fraction d'eau pour différentes valeurs de hT .	72
IV.1.10	prédiction de la masse rester et la masse évaporer pour différentes valeurs de hT à la surface	73
IV.1.11	Déplacement du front mobile de congélation	74
IV.1.12	Champs température pour $hT=20 \text{ W/m}^2.\text{K}$ durant la phase de congélation	75
IV.1.13	Variation du taux de glace en fonction d'humidité et température	76

IV.2.1	modèle physique dans le cas de convection naturelle	77
IV.2.2	vitesse du fluide selon les deux axes x et y en mode de convection naturelle. (a) la vitesse selon x et (b) la vitesse selon y	78
IV.2.3	Module de vitesse dans l'enceinte à convection d'air naturelle	78
IV.2.4	lignes de courant et vecteur de vitesse dans l'enceinte à convection d'air naturelle	79
IV.2.5	Champs de température dans l'enceinte à convection naturelle	80
IV.2.6	Champs de température dans l'aliment (convection naturelle)	81
IV.2.7	situation physique d'une enceinte de congélation à convection d'air forcée	82
IV.2.8	vitesse du fluide selon les deux axes x et y en mode de convection forcée	83
IV.2.9	Module de vitesse dans l'enceinte à convection d'air forcée.	83
IV.2.10	lignes de courant et vecteur de vitesse dans l'enceinte à convection d'air forcée	84
IV.2.11	Champs de température dans l'enceinte à convection d'air forcée	85
IV.2.12	Champs de température dans l'aliment (convection forcée)	85

Liste des tableaux

Ordre	Titre	Page
II.1.1	Valeurs des constantes dans l'équation (I.43)	44
III.2.1	Propriétés Physique de l'air	53
III.2.2	Données sur la composition pour poulet de chair : viande uniquement	55

Nomenclature

Symboles

A	Surface [m^2]
a_w	Activité d'eau
C	Concentration molaire mol.m^{-3}
C_p	Chaleur massique [$\text{J} / \text{Kg } ^\circ\text{C}$ ou $\text{KJ} / \text{Kg } ^\circ\text{C}$]
Cr_f	Constante cryoscopique du solvant
D	Coefficient de diffusion [$\text{m}^2. \text{s}$]
D_a	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air [$\text{m}^2. \text{s}$]
E_{freez}	Facteur de forme
G_0, G_1	Facteurs de géométrie dans les équations (II.1.1) et (II.1.2)
h	Coefficient de transfert de chaleur [W. m. s]
H	Enthalpie [J. Kg^{-1}]
i	Facteur de van't Hoff
J	Flux massique [$\text{Kg. m}^{-2}. \text{s}$]
k	Conductivité thermique [$\text{W. m. } ^\circ\text{C}$]
K	Coefficient de transfert de masse [$\text{Kg. m}^2. \text{s}$]
M	Masse de l'eau [Kg]
M_m	Fraction molaire de l'eau
m	Masse molaire [g.mol^{-1}]
P	Pression partielle de la vapeur d'eau [Pa]
P^*	Pression de saturation [Pa]
P_{atm}	Pression atmosphérique ($1,01325 \times 10^5$ [Pa])
R	Rayon [m]
R_g	Constante des gaz parfait ($R=8.314$ [$\text{J. mol}^{-1}. \text{K}^{-1}$])
R_{hd}	Demi-dimension de l'objet
t	temps [s]
T	Température [$^\circ\text{K}$], [$^\circ\text{C}$]
u	Vitesse selon l'axe y
V	Vitesse selon l'axe x
W	Fraction massique de l'eau

Symboles Grecques

ρ	Masse volumique [Kg.m ⁻³]
α	Diffusivité thermique du Produit [m ² /s]
λ	Chaleur latente [j.s ⁻¹]
μ	Viscosité dynamique [Kg. m ⁻¹ . s ⁻¹]
ν	Viscosité cinématique [m ² . s ⁻¹]
σ	L'épaisseur desséchée [m]
τ	Facteur de tortuosité
φ	Flux de chaleur [j.s ⁻¹]
f_g	Fraction vide

Indices

a	Air ambiant
app	Apparente
Cent	Centre
ds	Solide sec
eff	Effective
Freez	Congelé
hd	½ de la Dimension
init	Initial
liq	Liquide
s	Surface
sbt	Sublimation
vap	Vapeur d'eau
w	Eau

Introduction générale

La congélation consiste en trois étapes. Une première phase de refroidissement afin de baisser la température initiale du produit jusqu'à température de changement de phase. Dès que la température cryogénique est atteinte, on assiste au début de la phase de congélation qui est un changement de phase, où l'eau contenue dans l'aliment se transforme en glace, cette étape se termine lorsque la majorité de l'eau change en glace, l'étape post congélation est un refroidissement jusqu'à obtenir une température finale de stockage. Les produits alimentaires sont des bio structures complexes, ils peuvent être étudiés comme un système à deux phases : de l'eau et la matière sèche, ou un système à trois phase : solide, liquides et gaz. Lors de la congélation d'un aliment et en dessous du point initial de congélation les trois phases : solide, liquide et gaz représentent un complexe dynamique, en constante évolution.

La modélisation du processus de congélation, est devenue une méthode largement utilisée, afin d'étudier plusieurs paramètres et facteurs qui n'ont pas pu être développés par des méthodes purement expérimentales. L'approche d'étude numérique permet des données abondantes, qui peuvent être générées pour différentes conditions, et de compenser les lacunes des résultats expérimentaux.

L'objectif de ce modeste travail est de proposer un modèle mathématique, pour résoudre en deux dimensions le problème de congélation d'un aliment (cas d'étude tranche de viande hachée de poulet de forme de cercle plein), à l'intérieur d'une enceinte de congélation, en utilisant 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.

L'étude a été réalisée pour deux cas :

- Le premier cas est l'étude de l'aliment seul, le problème a été résolu pour les deux phases du processus (pré-congélation et congélation), par le modèle programmé avec le langage fortran 90, les résultats sont visualisés à l'aide de l'outil graphique Tecplot 360 et Origin 8.
- Le deuxième cas est l'étude de l'aliment dans l'enceinte. Une étude dynamique, pour les deux modes de transfert convectif, (naturel et forcé), de l'enceinte a été faite afin de comprendre l'allure de leurs interactions aliment-milieu lors du

processus de congélation. Pour cela la simulation numérique des phénomènes était menée avec le logiciel FLUENT.

En outre, nous avons pris en considération dans l'étude l'effet du coefficient de transfert par convection, et la conductivité de l'aliment, sur l'évolution de température, l'avancement du front de congélation, le temps de congélation et le taux de perte par les deux phénomènes évaporation et sublimation. Une attention a été donnée à la première phase de congélation, là où le taux de perte par évaporation est important.

Notre travail comporte quatre chapitres. Le premier chapitre représente des notions générales sur la congélation des aliments. Le deuxième chapitre expose les aspects théoriques des modèles de transferts couplés de chaleur et de masse lors de la congélation des aliments, ainsi que des travaux réalisés par d'autres chercheurs dans le domaine de la modélisation des phénomènes couplés. Quant au Troisième chapitre, nous l'avons consacré à l'étude numérique bidimensionnelle du problème des transferts couplés lors de la congélation d'un aliment. Une présentation des équations qui régissent le phénomène lors de la congélation d'un aliment à convection d'air, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites et initiales de toutes les frontières du domaine. Dans le dernier chapitre les résultats issus de cette étude ainsi que leurs interprétations ont été exposés, les champs et les profils de températures et de diffusion de l'humidité, ainsi que l'avancement du front de congélation dans l'aliment.

En conclusion; nous avons récapitulé le travail réalisé et on a ouvert des perspectives pour ce sujet. L'utilité de ce modeste travail réside dans la prédiction du comportement de l'aliment durant le processus, que ce soit le temps de congélation, la distribution de température au sein du produit et l'enceinte ou bien les pertes en poids due à une évaporation ou sublimation durant la congélation. Dans l'industrie alimentaire qui utilise la congélation comme méthode de conservation une connaissance de ces facteurs peut être un outil d'accompagnement économique, d'estimation et de prévention.

Chapitre I

La congélation des aliments

Introduction

Ce Chapitre comporte certaines notions de base, tirées de la littérature relatives à la congélation des aliments. Au début nous avons présenté les étapes de la congélation, ainsi que sa vitesse et le temps qui caractérise ce processus et leurs effets sur le produit. Ensuite on a décrit les phénomènes prenant place lors de l'opération de congélation, à savoir le changement de phase et la cristallisation. Enfin nous avons décrit divers équipements de congélation, les progrès récents et les techniques émergentes dans le domaine.

I.1. Phases du processus de congélation

La congélation est un procédé physique utilisé pour la conservation, qui consiste à réduire fortement la dégradation naturelle de l'aliment résultant de l'activité bactérienne et enzymatique dans le produit en abaissant sa température à une valeur au moins inférieure à son point de congélation et en diminuant la disponibilité en eau libre de l'aliment. (Laurent Bazinet, 2011).

C'est est l'application du froid et abaisser la température du produit jusqu'en dessous de 0°C, quant à la surgélation c'est une congélation rapide, qui consiste à exposer le produit à l'action du froid à basse température, de façon à provoquer rapidement la cristallisation de l'eau et abaisser la température à une valeur suffisamment basse pour que la proportion d'eau non congelée soit très faible. La température recherchée est en général de l'ordre de -18° à -20°C au cœur. (C. Genot, 2000).

C'est une association de deux processus, un abaissement de la température jusqu'au stade de la cristallisation de l'eau lié à un changement d'état et formation d'une phase solide (la glace) à partir de l'eau du produit, ce qui provoque un changement des propriétés physiques (conductivité, capacité thermique et masse volumique) de l'aliment. (J. Scott Smith et Y.H Hui, 2004).

De nombreux documents bibliographiques font une différence entre « produits congelés » et « produits surgelés », comme les anglo-saxons le font entre « frozen product » et « quick/deep frozen product ». Pourtant, au niveau réglementaire, les dénominations « Produits congelés » et « Produits surgelés » sont les mêmes. Toutefois aujourd'hui la pratique industrielle correspond quasi exclusivement à la surgélation.

Plusieurs auteurs divisent la congélation en trois phases qui comportent plusieurs événements physiques (voir figure I.2.1)

- 1^{ère} phase dite **stade de pré-congélation** : diminution plus ou moins rapide de la température du produit, jusqu'au voisinage du point de congélation commençante, elle correspond au refroidissement de la température initiale T_i au point de changement d'état T_f pendant un temps t_r . L'eau est sous forme liquide.
- 2^{ème} phase dite **stade de congélation** : une fois la température de congélation commençante ou température cryoscopique T_f est atteinte, un palier qui correspond au changement d'état de l'eau de constitution des tissus s'établit et une croute de glace se forme au niveau des couches superficielles du produit, et un avancement du front de congélation vers le centre de l'aliment s'engage, accompagné par l'absorption de la chaleur latente de changement d'état, cette phase dure un temps t_c . Dans les viandes T_f est proche de $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (C. Genot, 2000).
- 3^{ème} phase dit **stade de refroidissement** ou congélation jusqu'à température d'entreposage: c'est l'abaissement de la température du produit. La cristallisation de l'eau de constitution se poursuit avec un avancement du front de congélation vers le centre (centre thermique) du produit jusqu'à la température de la fin de congélation T_R , et ça dure un temps t_R . La majorité de l'eau est congelée et sous forme de glace.

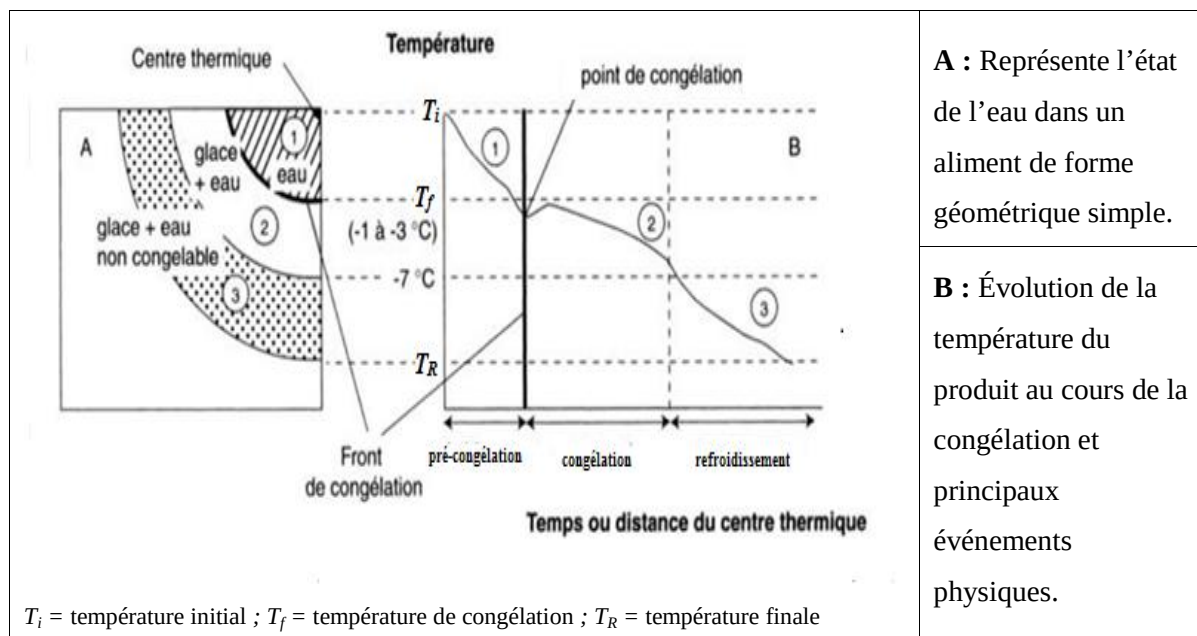


Figure I.1.1 : Evolution des phases du processus de congélation (Claude Genot, 2000).

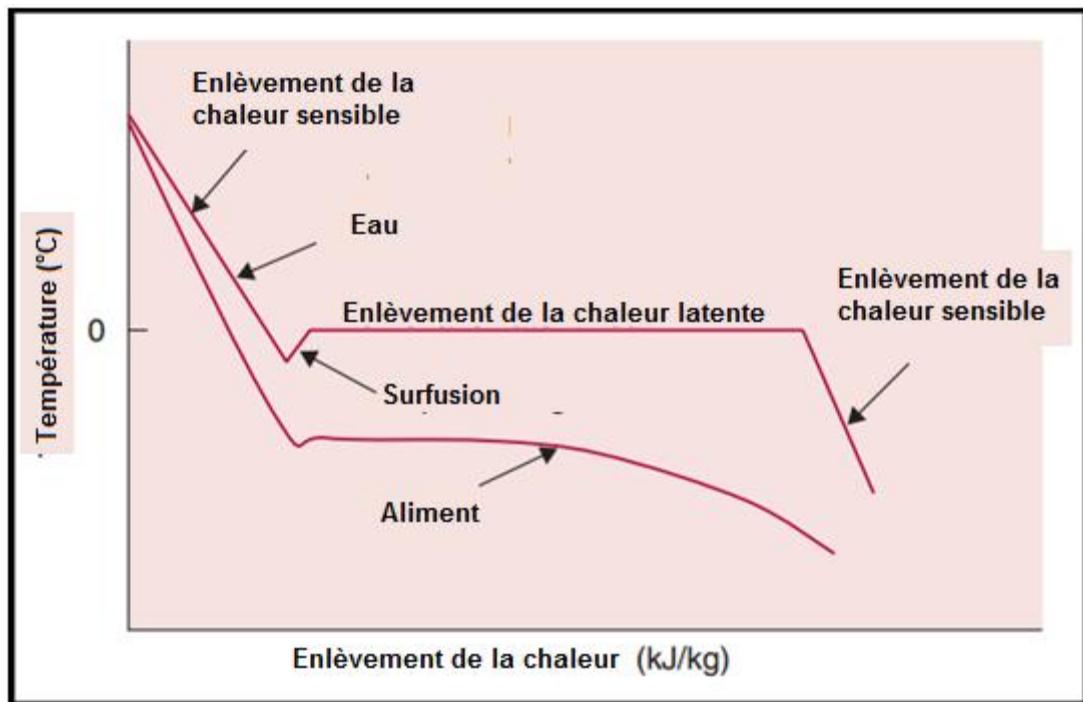


Figure I.1.2 : Diagramme de congélation de l'eau et d'un aliment.

(R.P. singh et D.R. Heldman, 2014)

A l'inverse de l'eau pure, dans l'aliment lorsque l'eau gèle la concentration en soluté augmente, la chaleur latente est donc retirée sur un domaine de température et non à température fixe, voir figure (I.1.2), et pour retirer la chaleur de l'intérieur du produit il doit y avoir conduction à travers la couche externe congelée, tandis que le front de congélation progresse vers le centre thermique du produit. Cette opération entraîne un transfert concomitant de température et d'humidité (masse). La chaleur est retirée de l'aliment par sa surface, soit par transfert convectif (air, fluide cryogénique) soit par conduction au contact d'une surface réfrigérée. (J. bimbinet, 1998)

I.2. La vitesse de congélation

C'est le quotient de la distance minimale entre surface et centre thermique d'une masse alimentaire par le temps écoulé entre l'instant où la surface est à 0°C et celui où le centre thermique est à 10 °C au-dessus de la température de congélation commençante (Dictionnaire international du froid, IIF-IIR, 2007).

Elle détermine la distribution de la taille des cristaux dans les aliments, et dépend de plusieurs facteurs que ce soit du système de congélation (température, vitesse du fluide, les capacités thermiques du système) ou de l'aliment (volume, propriétés thermo physiques, teneur en eau). (R. G. Martin, 1997).

J. R Wagner et Anon, M. C (1985) distinguent entre les différents types de vitesses de congélation, selon les valeurs du taux du mouvement du front de congélation, et le taux d'abaissement de température par le temps :

- **Congélation lente** : si le taux du mouvement du front de congélation est inférieur à 0.2 cm/h, constaté lors d'une congélation à convection naturelle, et si le taux de congélation est inférieur à 0,1 °C/min.
- **Congélation moyenne** : si le taux du mouvement est de 0.5 à 3 cm/h, le cas des congélateurs à air pulsé et à plaques (air blast and plate freezers), et si le taux de congélation est entre 0,24 à 0.3 °C/min.
- **Congélation rapide** : si le taux du mouvement est entre 5 et 10 cm/h, le cas des congélateurs à lit fluidisé, pour les congélateurs cryogéniques une congélation rapide correspond a un taux de mouvement de 10 à 100 cm/h, et si le taux de congélation est supérieur à 1,2 °C/min.

On peut distinguer aussi :

- **La vitesse de congélation locale** (°C/h) déterminée en un point donné du produit par la durée de congélation, c'est la différence entre la température initiale (T_i) et la température finale (T_f) divisée par le temps mis pour atteindre la température (T_f) au point désigné.(Malet, 1994).
- **La vitesse de congélation nominale** (cm/h) c'est le quotient de la plus petite distance passant par le centre thermique du produit par la durée nominale de congélation (Daudin, 1988).

- **La vitesse d'avancement du front de congélation** (cm/h) est la vitesse à laquelle le front de glace se déplace à travers le produit. Cette dernière est plus grande près de la surface que vers le centre (Mascheroni et Calvelo, 1986).

La température cryogénique au centre thermique de l'aliment, est obtenue dans un temps meilleur lors d'une congélation rapide, la figure (I.2.1) montre la différence d'évolution thermique, entre une congélation rapide et lente,

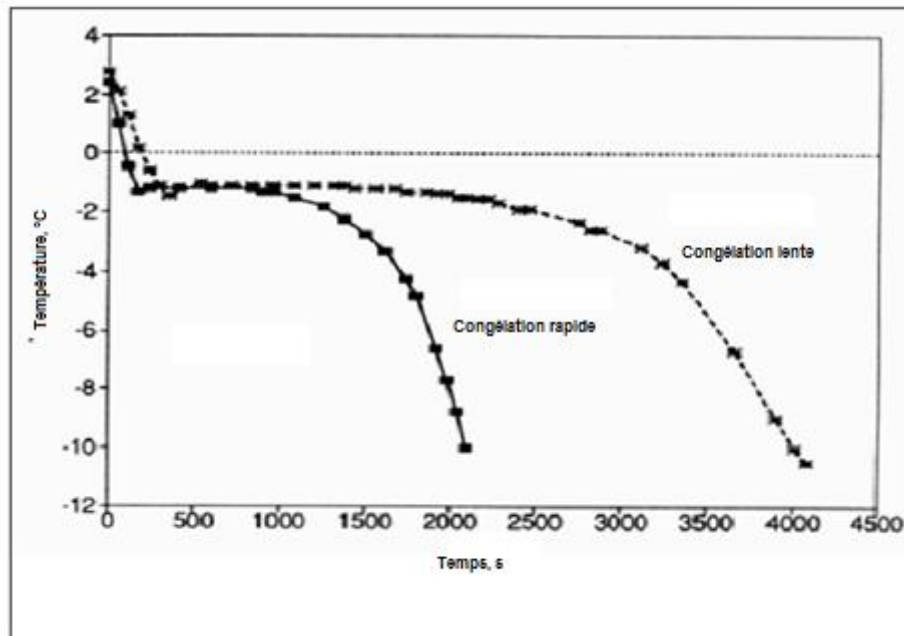


Figure I.2.1 : Température au centre thermique des pâtés de viandes pour une congélation à air pulsé lente et rapide. (G. S. Mittal et al, 1992).

- **Effet de la vitesse de congélation**

Si la congélation est lente la cristallisation se produit par des processus diffusionnels (C. Genot, 2000), et comme les matériaux biologiques sont de mauvais conducteurs thermiques des gradients thermiques peuvent exister, les produits se congèlent lentement et formeront ainsi de gros cristaux, en particulier dans les parties les plus distales de la surface de congélation. (R. Norma et E. Beesley Julian, 1991). Une formation de gros cristaux de forme épineuse, voir figure (I.2.2), qui apparaitront surtout à l'extérieur des cellules et les endommageront par effet d'écrasement.

Une congélation lente provoque une perte d'eau plus importante lors de la décongélation, une plus grande perte de constituants azotés et des dérivés d'acide nucléique, et une plus grande perte de capacité de rétention d'eau de la viande. (C. Genot, 2000). Elle augmente

la protéolyse et provoque une plus grande diminution de l'activité d'adénosine-tri-phosphatase des protéines myofibrillaires. (A. W. Khan, L. Van den berg, 1967)

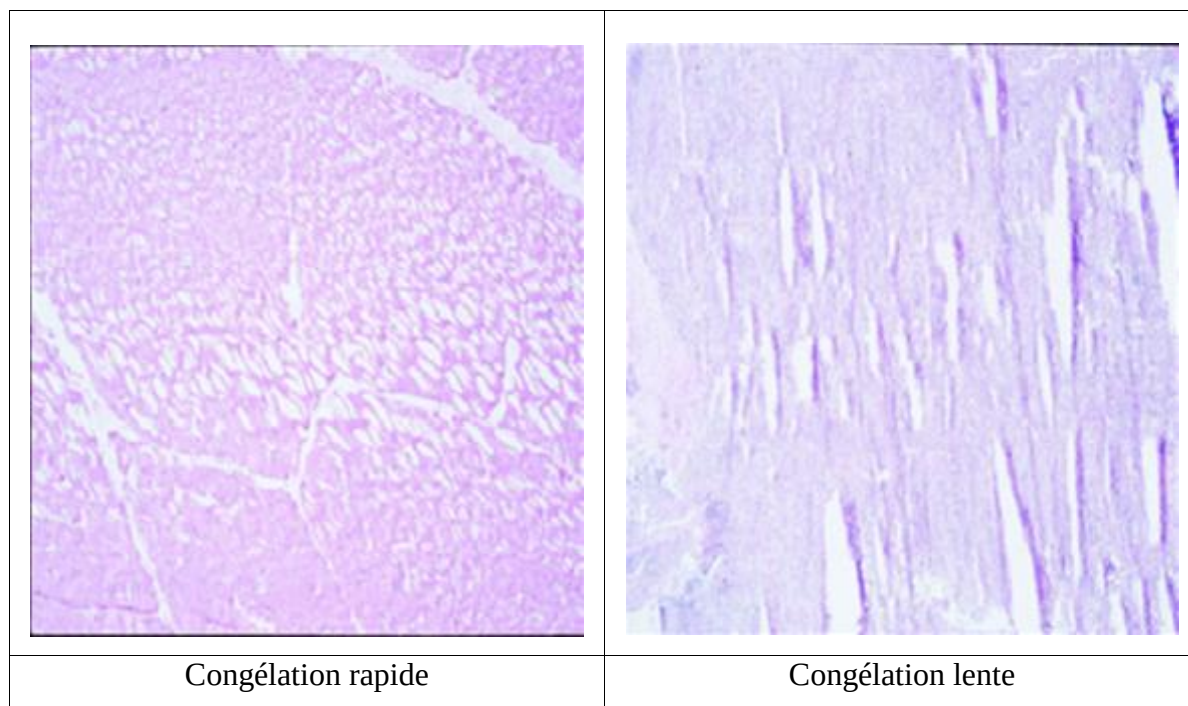


Figure I.2.2 : Section dans un muscle squelettique après une congélation rapide et lente.

La congélation rapide est avantageuse pour de nombreux aliments, plus la congélation est rapide la taille des cristaux de glace est petite et de forme arrondi, la désorganisation des tissus est plus faible et la quantité d'eau sortant des cellules est moins grande, améliorant ainsi les caractéristiques nutritionnelles, la texture, l'arôme et la composition chimique. Lors de la décongélation il se produit peu de ramollissement et d'exsudation.

Cependant certains produits sont susceptibles de se fissurer lorsqu'ils sont exposés à une température extrêmement basse pendant de longues périodes. Plusieurs mécanismes, y compris l'expansion de volume, la contraction, et variation de la pression interne, sont proposés dans la littérature expliquant les mécanismes des dommages produits pendant la congélation (Hung et Kim, 1996).

Notons que l'effet de la vitesse de congélation dépend aussi de la nature des aliments, aliment denses ou poreux, produits de type cellulaires et non cellulaires (les pommes de terre frites (cellulaires) et les pizzas précuites (non cellulaires)) (S. de Kock, 1995)

I.3. La durée de congélation (min ou h)

C'est le temps nécessaire pour atteindre une température de congélation prédéterminée en tout point du produit alimentaire. (Dictionnaire international du froid, IIR-IIF, 2007). Appelée aussi durée nominale, ou temps caractéristique de congélation. Le temps caractéristique varie à l'intérieur d'un produit ; il est plus important au centre qu'à la surface et dépend de nombreux facteurs très variables. Comme la chaleur massique et latente, la forme, et dimensions, coefficient de conductibilité, la nature de l'emballage, du coefficient de transmission superficielle du produit, la disposition dans le congélateur, la température à laquelle ils sont soumis, le procédé utilisé. (D. R. Heldman, 2007).

La détermination du temps de congélation est un calcul clé dans la conception d'un processus de congélation. Trois périodes distinctes sont perceptibles à n'importe quel endroit au sein d'un aliment soumis à une congélation: pré-congélation (Pré-refroidissement), changement de phase ou (congélation) et post-congélation. (R. P. Singh, 2014). Calvelo (1980) la définit comme le temps nécessaire pour que la température passe de -1 à -7 °C au centre du produit, car dans cet intervalle de température, qui débute avec la formation des premiers cristaux et termine lorsque environ 80% de l'eau est à l'état solide, la variation de volume sont les plus importantes.

Selon Shewfelt et al (1997) en engineering alimentaire on s'intéresse à la prédiction du temps de refroidissement et de congélation afin :

- D'estimer les besoins en réfrigération pour les systèmes de congélation et de concevoir l'équipement nécessaire pour le traitement efficace et rationnel.
- Minimiser l'exigence énergétique.
- Optimiser la fiabilité, la sécurité et la qualité du produit.

Un grand nombre de méthodes et modèles mathématiques simulant les conditions industriels, proposées permettant de prédire les temps de congélation et de décongélation des denrées alimentaires. L'équation de Plank est utilisée comme un point de départ, mais comme cette équation ne comprend pas les temps avant et après le point de congélation, et ne prend pas en considération que le changement de phase dans les aliments a lieu dans un intervalle de température et pas à une seule température, plusieurs tentatives ont été faites pour l'améliorer en ajoutant de nouveaux termes et paramètres, pour la rendre appropriée pour tous les processus de congélation, citant : La formule de D.G. Rjutov (1936), A.J. Ede (1949) J. Nagaoka (1955), F.I. Levy (1984), M. Bäckström (1970), N.D.

Cowell (1967), A.C. Cleland and R.L. Earle (1977), Y.C. Hung and D.R. Thompson (1983), et enfin Q.T. Pham (1984, 1987), Salvadori and Maseroni, (1991), Q. T. Pham (1984, 2006, 2008, 2014).

I.4. Changement de phase lors de la congélation

Lors de la deuxième phase de congélation on assiste à une transformation thermodynamique, correspond au passage d'un état désordonné de molécules en mouvement dans le liquide à un état plus ou moins ordonné d'atomes fixe dans un réseau cristallin. (A. .M. Bianchi, 2004). Provoquée par une extraction d'énergie due à des modifications de température, pression, ou de volume, lié à des changements des propriétés. Cette réaction réversible s'accompagne d'une consommation (fusion lors de la décongélation) ou d'une restitution (solidification lors de la congélation) d'énergie dite la chaleur latente de fusion, qui dépendent des modes de transmission de la chaleur dans le milieu : conduction, convection, ou même rayonnement, si le milieu est semi-transparent. (A. Bricard, 2008). L'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont bien plus importantes que celles qui interviennent lors de transferts sensibles.

Pendant un changement de phase, le milieu est séparé en deux sous domaines, voir figure (I.4.1), de densité et de propriétés matérielles différentes. Selon la composition du matériau et la vitesse du phénomène, la solidification à plusieurs formes :

- Solidification sous la forme d'un front (lisse), le passage de l'état liquide à l'état solide se fait brutalement.
- Solidification Dendritique ou colonnaire, caractérisé par une zone de transition (Zone pâteuse), entre les deux régions liquide et solide.
- Solidification équiaxe, qui se traduit par la germination de petits grains solides et leur croissance (les cristallites) au sein de la phase liquide.

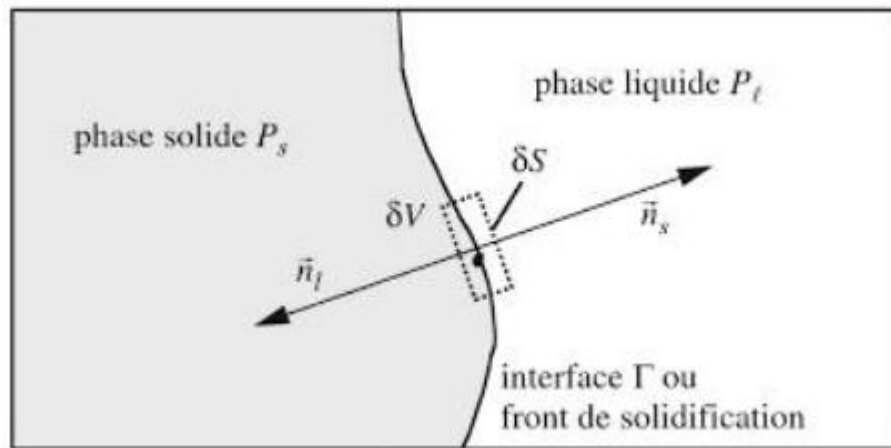


Figure I.4.1 : Interface de changement de phase. (A. M. Bianchi, 2004)

I.4.1. Equilibre des phases

Pour tout changement d'état, sous une pression donnée deux états physiques distincts d'un corps pur ne peuvent être en équilibre qu'à une température parfaitement déterminée. Dans le Diagramme $P = f(T)$ dans la figure (I.4.2), l'ensemble des points correspondant à un équilibre physique donné.

Point triple de l'eau : $T = 273,16 \text{ K}$ et $P = 6,03 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$.

Point critique de l'eau : $T = 647,3 \text{ K}$ et $P = 72,85 \text{ atm}$.

À l'instant où la température franchit le liquidus, la phase solide est en quantité infime. La proportion de cette phase va augmenter rapidement avec la baisse de la température jusqu'à représenter la totalité, lorsque le solidus est franchi. Il est possible de calculer les proportions de ces phases

Soit un alliage de composition nominale C_0 porté à une température T . Si on prend un point représentatif (C_0, T) dans le domaine monophasé, l'alliage contient alors une seule phase liquide de proportion égale à 100%. Si on prend un point représentatif (C_0, T) dans le domaine biphasé, l'alliage contient deux phases liquide et solide de composition C_L et C_S dont les proportions respectivement X_S et X_L sont déterminées par la règle des bras de la conservation de la masse permet d'écrire les deux relations suivantes :

$$\begin{aligned} X_S + X_L &= 1 \\ X_S C_S + X_L C_L &= C_0 \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

Ces relations permettent de déterminer les proportions présentes soit en % :

$$X_s = \frac{C_L - C_0}{C_L - C_s} \cdot 100 \quad (I.2)$$

$$X_L = \frac{C_0 - C_s}{C_L - C_s} \cdot 100 \quad (I.3)$$

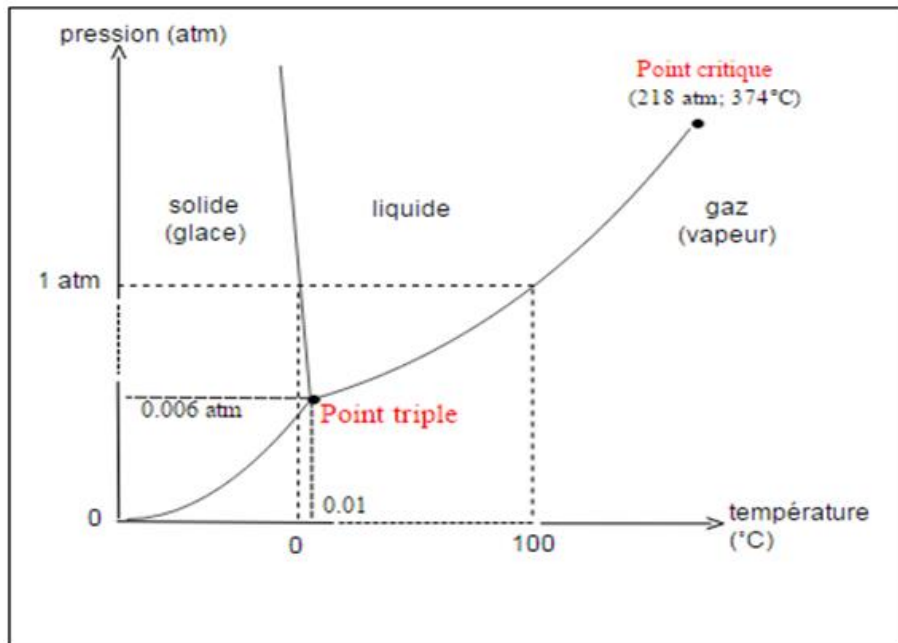


Figure I.4.2 : Diagramme de phase de l'eau.

I.4.2. Phénomène de cristallisation

Les structures qui se développent au cours du changement de phase lors de la congélation d'un aliment sont les cristaux de glace, leur apparition dépend des conditions de la transformation (vitesse, température) (Hartel, 2001).

La vitesse de croissance des cristaux de glace est déterminée par trois facteurs principaux:

- La vitesse de diffusion de l'eau vers les cristaux en croissance, le déplacement de l'interface résulte d'un équilibre entre la production de chaleur et le transport de cette chaleur vers les zones plus froides.
- Taux d'élimination de la chaleur; détermine également le nombre de sites de nucléation formés, et la propagation des cristaux de glace initiaux est insuffisante

pour suivre le rythme de la vitesse d'élimination de la chaleur, ce qui entraîne une vitesse accrue de nucléation (R. Martin George, 1997).

- La vitesse de réaction à la surface du cristal, peut être ralentie dans les solutions et les gels macromoléculaires, et cette diminution n'est pas associée à des changements dans les propriétés dynamiques ou thermodynamiques de l'eau. Ce fut probablement la conséquence d'un effet mécanique directe des macromolécules sur la croissance des cristaux de glace (G. Blond, 1988).

La principale force motrice pour le dépôt d'une phase cristalline solide à partir de solutions liquides et gazeuses, liquides purs et gaz purs est la sursaturation ou surfusion atteinte dans le système (Mullin, 2001).

Le processus se caractérise par deux étapes majeurs, la nucléation et la croissance des cristaux (H. Kiani and D. Wen Sun, 2011).

I.4.2.1. La surfusion :

La surfusion est l'état d'un corps qui demeure en phase liquide alors que sa température est plus basse que celle de la fusion du solide (J. P. RIBEIRO et al. 2007). Dans ce cas la température diminue jusqu'au seuil de solidification, mais l'eau reste liquide, dans un état dit métastable ou d'équilibre précaire (il hésite entre deux comportements stables). Une perturbation suffisante provoque la rupture de surfusion et la solution regagne sa température de solidification et change d'état.

La rupture de surfusion s'accompagne d'un dégagement de chaleur caractéristique du changement de phase (la chaleur latente).

Le phénomène étant très rapide, la diffusion de la chaleur latente au sein du liquide conditionne en grande partie la dynamique du phénomène. (Y. Pomeau et al, 1992)

Le degré de surfusion ΔT est la différence entre la température de fusion (température de congélation commençante) et la température de rupture de fusion (formation des premiers germes nucléons).

$$\Delta T = T_f - T_c \quad (I.4)$$

Plus le degré de fusion ΔT est grand plus la force conduisant à la nucléation est grande.

La Surfusion a généralement une influence mineure sur les calculs du temps de congélation, mais peut provoquer des incertitudes considérables de calcul pour des taux de congélation rapides (Q.T. Pham, 2006).

I.4.2.2. La nucléation (germination)

C'est le phénomène correspondant à l'apparition des premiers germes cristallins. Le processus de nucléation met en jeu une certaine énergie ΔG appelée énergie libre d'activation de germination. (L. Lafferrere, 2002).

Les noyaux ont un temps de vie extrêmement court et se déplacent librement à travers la solution. La température de nucléation de l'eau est d'autant plus basse que le volume correspondant est faible.

On trouve deux types de nucléations : primaire et secondaire.

I.4.2.2.1. Nucléation primaire

Les germes sont directement issus de la solution mère, Cette nucléation primaire pourra être de type **homogène** si les germes se forment dans le volume de la solution, ou de type **hétérogène** si les germes se forment sur les parois ou sur des particules solides étrangères en suspension. (François Puel et al, 2005).

I.4.2.2.1. Nucléation secondaire

Se produit sur un support solide (particules étrangères), qui joue le rôle de catalyseur de la nucléation, (voir la figure I.2.9). L'amorçage de la transformation de phase se fait à la surface de la particule étrangère.

Les germes, lorsqu'ils sont solidifiés ne sont pas sphériques mais présentent des directions de croissance en relation avec leur système cristallin : ces germes arborescents sont appelés dendrites.

On distingue plusieurs types de nucléation secondaire :

- **La nucléation secondaire surfacique** : est un mécanisme d'arrachement de germes en surface des cristaux.
- **La nucléation secondaire de contact** résulte de la libération de particules de tailles microscopiques suite à des chocs lorsque la suspension est dense.
- **La nucléation secondaire apparente** concerne les cristallisations ensemencées : la semence peut libérer en suspension des débris cristallins qui feront office de germes. (François Puel et al, 2005)

Le taux de nucléation secondaire est supérieur à la nucléation spontanée qui se produit à un degré de sursaturation inférieur.

I.4.2.3. La croissance des cristaux

La croissance cristalline implique la diffusion de molécules d'eau à la surface du cristal et le transfert de la chaleur de la formation de glace loin du cristal. Le taux de croissance des cristaux augmente linéairement avec l'augmentation du sous-refroidissement. Cependant, la viscosité accrue de la solution concentrée tend à diminuer le taux de croissance. (Van Pelt et Jansen 1988).

La nucléation nécessite plusieurs degrés de surfusion, la croissance des cristaux (parfois appelée propagation) est possible avec très peu de surfusion ($> 0,01^{\circ}\text{C}$). C'est parce que les molécules peuvent se joindre à un cristal déjà existant, plutôt que d'avoir à former un nouveau, et de continuer jusqu'à l'équilibre.

La compétition entre la nucléation et la croissance des cristaux détermine les caractéristiques des cristaux de glace formés.

Une congélation rapide produit beaucoup de noyaux, et laisse peu de temps pour la croissance, de sorte que de nombreux petits cristaux de glace se forment. Une congélation lente, produit moins et plus gros cristaux. Lorsque toute l'eau est gelée, la croissance cesse et la quantité de glace n'augmente pas davantage. Le système n'est pas nécessairement à l'équilibre. Les petits cristaux de glace ont une surface plus grande que les gros cristaux, ce qui augmente l'énergie, cette énergie peut être réduite avec la recristallisation (C. Clarke, 2004).

Les modèles actuels pour calculer la taille des cristaux de glace utilisent des paramètres intrinsèques, tels que les différences de température interne et la vitesse de pénétration du front de congélation. Les paramètres intrinsèques peuvent être déterminés en utilisant un équipement de pointe capable de surveiller le processus de congélation à l'intérieur de l'aliment, tel que l'IRM ou XRT (radiographie).

De nouveau modèle utilise un seul paramètre; La vitesse de congélation. Ce paramètre peut être dérivé de deux paramètres de processus: la température de congélation et la méthode de congélation. Le modèle est donc facile à utiliser, pratique et pratique. Il réduit également le besoin de recherche expérimentale pour optimiser le processus de congélation. (R. G. M. Van Der Sman, et al, 2013)

I.5. Propriétés thermodynamiques des aliments lors de la congélation

Les propriétés des aliments doivent être connues et prises en considération, pour effectuer les différents calculs de transfert de chaleur impliqués dans la conception des équipements de stockage et de réfrigération et l'estimation des temps de processus. Étant

donné que les propriétés thermiques des aliments dépendent fortement de la composition chimique et de la température, il est presque impossible de déterminer expérimentalement et tabuler les propriétés thermiques des aliments pour toutes les conditions et compositions possibles. Cependant, les données de composition pour les aliments sont facilement disponibles auprès de sources telles que Holland et al. (1991) et USDA (1975) (voir Annexe). Ces données sont constituées des fractions massiques des principales composantes des aliments. Les propriétés thermiques des aliments peuvent être prédites en utilisant ces données de composition conjointement avec des modèles mathématiques en fonction de la température des propriétés thermiques des constituants alimentaires.

I.5.1. Point de congélation (point de solidification)

C'est la température à laquelle un liquide se congèle lorsqu'on lui enlève de la chaleur (sauf spécification contraire, sous pression atmosphérique normale). (Dictionnaire international du froid, IIF-IIR, 2007).

Au cours du processus de congélation, la concentration de matières solubles augmente dans l'eau non congelée, ce qui entraîne une variation de la température de congélation. Par conséquent, la température à laquelle apparaît le premier cristal de glace est communément considérée comme la température de congélation initiale. Il existe des équations empiriques dans la littérature qui peuvent calculer la température initiale de congélation de certains aliments en fonction de leur teneur en humidité (Levy, 1979).

Le point de congélation d'un solvant est proportionnel au nombre de moles de soluté qu'il contient, (voir Figure II.2.1). Ses propriétés colligatives provoquent une dépression du point de congélation ainsi une modification de la capacité de l'eau à former des cristaux en raison de la perturbation des liaisons Hydrogène. La dépression du point de congélation de plus de quelques °C nécessite des solutions très concentrées (Wolfe, J. Bryant, G., 1999)

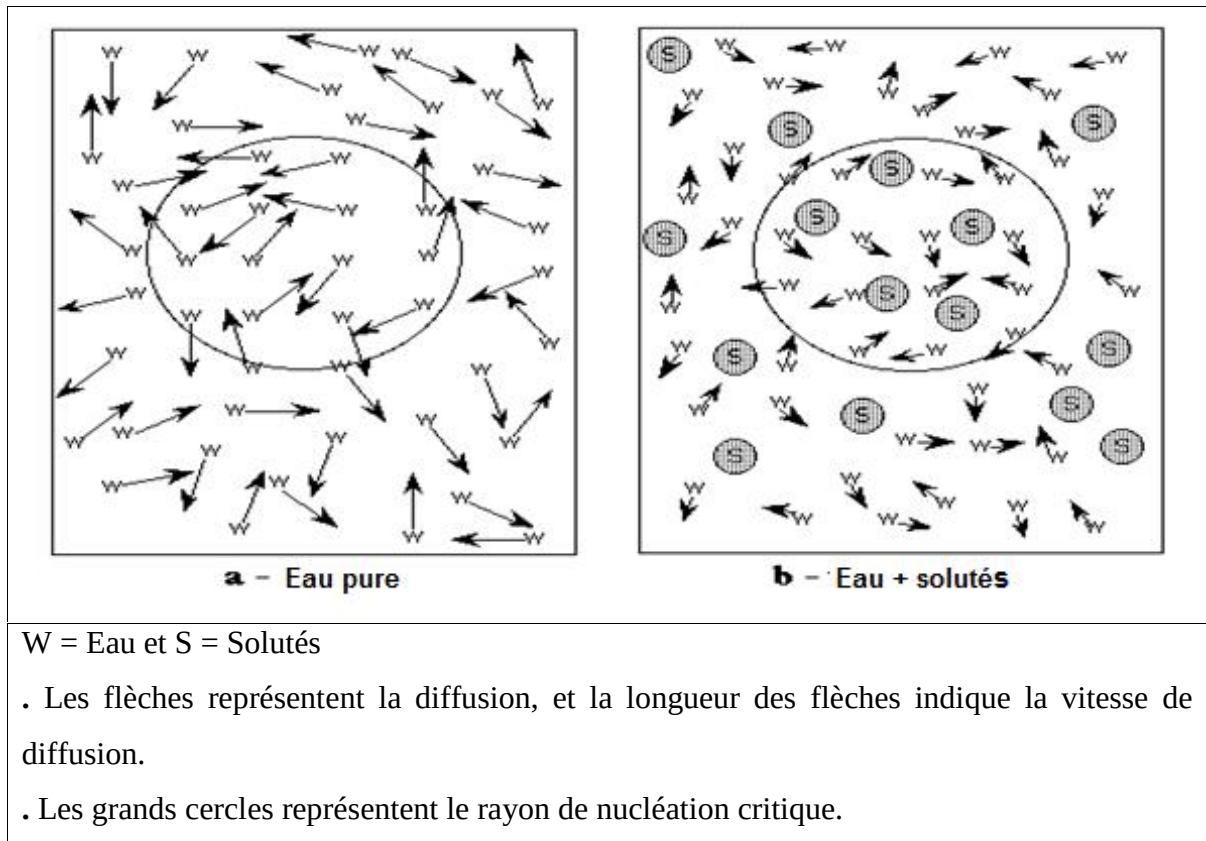


Figure I.5.1: Schéma simplifié des effets des solutés sur la nucléation en congélation.

(Wolfe, J. Bryant, G, 1999).

(a) Seule l'eau est présente. Pour qu'un noyau critique se forme, les molécules d'eau dans le volume représenté par le cercle doivent s'organiser spontanément en une structure régulière glacée. Si ce réseau régulier est plus grand que la taille critique, alors le cristal va croître.

(b) Montre la situation en présence de solutés (le rapport molaire soluté: eau est de 1: 4). Tout d'abord, les solutés augmentent la viscosité, de sorte que la diffusion est réduite (donc des flèches plus petites dans (b) que (a)). Deuxièmement, pour former un noyau critique, un volume égal ou supérieur à ce que le rayon critique doit être complètement exempt de molécules de soluté. Ce n'est pas le cas ici. À mesure que la concentration de solutés augmente, cet effet devient plus fort, réduisant encore davantage les chances de nucléation.

On peut quantifier l'abaissement de la température de congélation d'un solvant en fonction de la quantité de soluté ajouté :

$$\Delta T_f = K_f \cdot x_s \quad (I.4)$$

ΔT_f = l'abaissement de la température de solidification du solvant. $\Delta T_f > 0$.

K_f = la constante cryoscopique du solvant.

x_s = la fraction molaire du soluté.

Autrement dit, la température de solidification T_f du solvant pur passe à $T_f - \Delta T_f$ en présence d'une fraction molaire x_s de soluté.

I.5.2. La fraction de glace

La prédiction des propriétés thermo-physiques des aliments congelés, Dépendent fortement de la fraction de glace dans l'aliment, la fraction massique d'eau cristallisée doit être déterminée. En dessous du point initial de congélation, la fraction massique de l'eau cristallisée dans l'aliment est une fonction de la température.

Pendant la congélation, une partie de l'eau liquide cristallise, les solides dissous dans l'eau liquide restante deviennent de plus en plus concentrés, abaissant ainsi la température de congélation. On peut supposer que cette solution non gelée obéit à l'équation de dépression du point de congélation donnée par la loi de Raoult (Pham 1987). Sur la base de cette loi, Pham (2006) propose le modèle suivant pour prédire la fraction massique de glace X_{glace}

$$X_{\text{glace}} = \frac{x_s R T_0^2 (T_c - T)}{M_s L_0 T_c T} \quad (\text{I.5})$$

X_s = fraction massique des solides dans les aliments

M_s = masse moléculaire relative des solides solubles, kg / kmol

R = constante de gaz universelle = 8,314 kJ / (kg mol · K)

T_0 = point de congélation de l'eau = 273,2 K

L_0 = chaleur latente de fusion de l'eau à 273,2 K = 333,6 kJ / kg

T_c = point initial de congélation des aliments, ° C

T = température des aliments, ° C

La masse moléculaire relative des solides solubles dans l'aliment peut être estimé comme suit:

$$M_s = \frac{x_s R T_0^2}{(x_{w0} - x_b) L_0 T_c} \quad (\text{I.6})$$

x_{w0} est la fraction massique de l'eau dans l'aliment non congelé et x_b est la fraction massique de l'eau liée dans l'aliment.

La fraction massique d'eau liée peut être estimée comme suit:

$$x_b = 0,4 x_p \quad (\text{I.7})$$

X_p est la fraction protéique de l'aliment.

A partir des équations (I.5) et (I.6) on aura:

$$X_{glace} = (x_{w0} - x_b) \left(1 - \frac{T_c}{T} \right) \quad (I.8)$$

I.5.3. La chaleur

La chaleur qui s'exprime en joule est l'augmentation ou diminution de l'agitation des molécules constituant le produit. Le transfert de cette chaleur se fait par trois modes : La Conduction, La convection, et Rayonnement. La quantité de chaleur transférée par unité de temps, est le flux de chaleur en général symbolisé par (j), et exprimé en J / s ou en Watt, une analogie avec le transfert de masse où le débit fluide est un Flux de matière exprimé en (m^3 / s)

$$j = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (I.9)$$

La force motrice de ce flux est une : différence de température ΔT , une différence de pression ΔP .

I.5.3.1 La chaleur massique C_p

C'est la quantité d'énergie nécessaire pour changer de 1°C ou 1 °K, une unité de masse d'un liquide, d'un gaz ou d'un solide.

La capacité thermique massique est la quantité de chaleur qu'un kilogramme d'une substance doit absorber ou perdre pour que sa température s'élève ou baisse d'un degré Celsius ou Kelvin.

La capacité thermique massique est désignée avec les acronymes suivants dans les formules:

- C_{pv} : Chaleur massique à volume constant
- C_{pp} : Chaleur massique à pression constante
- C_{pm} : Chaleur massique

L'unité de la capacité thermique massique est J / Kg °C ou KJ / Kg °C.

La valeur du C_p varie en fonction de la matière, de la température, la pression et la quantité d'eau dans le produit. Quand il est difficile de mesurer les valeurs de C_p d'un aliment, on fait recours à des équations de calcul de la chaleur massique, Bazinet. (2011), propose une différenciation entre la chaleur massique des produits non congelés mentionnée C_p^+ , et

des produits congelés noté C_p^- . Il propose des équations de calcul des valeurs de la chaleur massique des aliments.

- Chaleur massique déduite par la composition de l'aliment

$$C_p^+ = 2,09 F + 1,26 ST + W 4,18 \quad (I.10)$$

F = Pourcentage de gras, $0 < F < 1$

ST = pourcentage de solide totaux, $0 < ST < 1$

W = Pourcentage d'eau, $0 < W < 1$

C_p^+ = Chaleur massique du produit non congelé (KJ/Kg. °C)

Avec $F+ST+W=1$.

- Lorsque seul la teneur en eau est connue

$$C_p^+ = 0,835 + 3.4W \quad (I.11)$$

Cette équation s'applique aux produits contenant entre 26 et 100% d'eau, sauf pour les jus elle est valable pour $W > 50\%$

- En tenant compte du pourcentage du solide soluble

$$C_p^+ = 4,18 - 2,30 S - 0,63 S^3 \quad (I.12)$$

- Pour les produits laitiers

$$C_p^+ = 1,256 \times SNG/100 + 2,093 \times F/100 + 4,187 \times W/100 \quad (I.13)$$

SNG = Pourcentage du solide non gras.

$$SNG/100 + F/100 + W/100 = 1$$

- En dessous du point de congélation / on connaît sa composition

$$C_p^- = 2,09 (F+G) + 1.26 ST + 4.18 E \quad (I.14)$$

G = Pourcentage de glace, $0 < G < 1$

E = Pourcentage d'eau non gelée, $0 < E < 1$ avec $G + E = W$

$$F + ST + W = 1$$

- En dessous du point de congélation du produit / en connaissant que sa teneur en eau et sa teneur en eau non congelée

$$C_p^- = 1,256 E + 0,837 \quad (I.15)$$

- En dessous du point de congélation / solide soluble

$$C_p^- = 1,55 + 1,25 S \quad (I.16)$$

- En fonction de la température de congélation et de congélation commençante T_e

$$C_p = (2,093 (T_e / T) + 0,837) W + 1,382 \quad (I.17)$$

I.5.3.2. Chaleur latente C_L

Chaleur de changement d'état, c'est l'énergie ou la chaleur à fournir ou à extraire pour faire passer un produit d'un état à un autre état, sans qu'il y ait changement de température. Elle est exprimée en (J / s)

I.5.4. Masse volumique (ρ)

La masse volumique d'un corps correspond au rapport de sa masse (m) par son volume (V), à une température donnée, peut être calculée en utilisant la relation suivante:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (I.18)$$

m la masse, en Kg

V le volume, en m³

ρ la masse volumique en Kg/m³

La masse volumique diminue lors de la congélation, l'eau a une masse volumique de 1000 Kg/m³, mais à l'état la glace 920 Kg/m³.

Certaines équations de calculs de la masse volumique sont proposées pour faciliter les calculs, ces derniers reposant sur la composition des aliments.

- Si on ne connaît que la teneur en eau

$$\rho = 890 + 110W \quad (I.19)$$

W = Pourcentage d'eau, $0 < W < 1$

- Au dessus du point de congélation / on connaît la composition

$$\frac{1}{\rho} = \frac{W}{1000} + \frac{F}{930} + \frac{C}{1550} + \frac{P}{1380} \quad (I.20)$$

F = Pourcentage de gras $0 < F < 1$

C = Pourcentage d'hydrate de carbone, $0 < C < 1$

P = Pourcentage de protéines $0 < P < 1$

$W+F+C+P = 1$

- Au dessus du point de congélation / on connaît le taux des solides totaux

$$\frac{1}{r} = \frac{W}{r_w} + \frac{ST}{r_{ST}} \quad (I.21)$$

r_w = Masse volumique de l'eau (Kg/m³).

r_{ST} = La masse volumique ds solides totaux (Kg/m³)

ST = Pourcentage des solides totaux.

- En dessous du point de congélation

$$\frac{1}{r} = \frac{E}{1000} + \frac{F}{930} + \frac{C}{1550} + \frac{P}{1330} + \frac{G}{920} \quad (I.22)$$

G = Pourcentage de glace $0 < G < 1$

E = Pourcentage d'eau non congelée $0 < E < 1$

Avec $E+G = W$ et $E+F+C+P+G = 1$

- En dessous du point de congélation / on connait le taux des solides totaux

$$\frac{1}{r^-} = \frac{E}{r_E} + \frac{G}{r_G} + \frac{ST}{r_{ST}} \quad (I.23)$$

r^- = Masse volumique du produit congelé (Kg/m³)

r_E = Masse volumique de l'eau

r_G = Masse volumique de la glace

r_{ST} = Masse volumique de solides totaux

E = Pourcentage d'eau non congelée du produit congelée

G = Pourcentage de glace du produit congelé, $0 < G < 1$

ST = Pourcentage des solides totaux

Le rapport $\frac{ST}{r_{ST}}$ ne change lors de la congélation.

I.5.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant. Plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau est conducteur, plus elle est petite, plus le matériau est isolant.

La conductivité dépend de la nature de produit, la température, la pression, l'humidité, l'état et le taux de l'eau dans l'aliment change cette valeur, la conductivité thermique de la glace est plus élevée que celle de l'eau.

Pour les aliments poreux on parle aussi de la conductivité Thermique effective, qu'on va voir dans le chapitre III.

Des équations de calculs sont disponibles pour estimer la conductivité thermique des aliments. Conductivité thermique des viandes $k = 0,50 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, et $k = 0.175 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ Pour les corps gras (Bazinet, 2011)

- Au dessus du point de congélation de l'aliment / on connaît que le taux de l'eau
 - Dans le cas général $k^+ = 0,55xW + 0,26x(1-W)$ (I.24)
 - Poissons $k^+ = 0,0324 + 0,3295W$ (I.25)
 - Viande hachée $k^+ = 0,096 + 0,34W$ (I.26)
 - Viandes en général $k^+ = 0,080 + 0,52W$ (I.27)
 - Les jus de fruit $k^+ = 0,140 + 0,42W$ (I.28)
- Au dessus du point de congélation / on connaît le pourcentage d'eau et la température
 - $k^+ = 0,4448W + 0,0005T$ (I.29)

T = température en kelvin k = conductivité thermique (W/m.k) ou ($\text{W/m.}^\circ\text{C}$).

- $k^+ / k_{\text{eau}} = 1,0 - 0,5(1-W)$ (I.30)

- Au dessus du point de congélation / on connaît la composition et la température

$$k^+ = 0,344W - 0,0644P - 0,1334F + 0,0008T \quad (\text{I.31})$$

Pour un produit séché

$$k_{\text{sec}}^+ = k_{\text{frais}}^+ / 20 \quad (\text{I.32})$$

- En dessous du point de congélation / on connaît le Pourcentage de l'eau

$$k^- = 2,18 + 0,26W \quad (\text{I.33})$$

On peut l'écrire aussi :

$$k = 2,4W + 0,26(1-W) \quad (I.34)$$

Ou bien L'écrire :

$$k/k_{\text{glace}} = 1,0 - 0,5(1-W) \quad (I.34)$$

- En dessous du point de congélation / on connaît la température de congélation commençante, ou de changement d'état, et la température du produit

$$K = 1,745W (1-T/T) + 0,233 \quad (I.35)$$

La conductivité thermique de la glace est :

$$k_{\text{glace}} = (780/T) - 0,615 \quad (I.36)$$

I.5.6. La diffusivité thermique

C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction, dans le produit. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. C'est une grandeur de l'inertie thermique. Unité m^2/s .

La diffusivité thermique est exprimée comme suit :

$$a = \frac{K}{r C_p} \quad (I.37)$$

k = Conductivité thermique ($W/m \cdot ^\circ C$)

C_p = Chaleur massique ($J/Kg \cdot ^\circ C$)

r = Masse volumique (Kg/M^3)

Les équations de calcul sont :

- Au dessus du point de congélation / on connaît le pourcentage d'eau.

$$\alpha^+ = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_{\text{eau}} - 0,088 \times 10^{-6}) W \quad (I.38)$$

α_{eau} diffusivité de l'eau à la température considérée m^2/s

$$a_{\text{eau}} = \frac{K_{\text{eau}}}{r_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}} \quad \text{et} \quad C_{p_{\text{eau}}} = 4,18 KJ / Kg \cdot ^\circ C \quad (I.39)$$

- Au dessus du point de congélation / on connaît le pourcentage d'eau, de gras et la température

$$\alpha^+ = (0,0572W + 0,0138F + 0,0003T) \times 10^{-6} \quad (I.40)$$

T exprimée en K

- En dessous du point de congélation / on connaît la diffusivité à l'état congelé

$$\alpha_{\text{congelée}} = 9\alpha_{\text{non congelée}} \quad (I.41)$$

- En dessous du point de congélation / on connaît le pourcentage d'eau

$$\alpha^- = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_{\text{glace}} - 0,088 \times 10^{-6}) W \quad (I.42)$$

α_{glace} = La diffusivité de la glace a la température considérée.

$$a_{\text{glace}} = \frac{K_{\text{glace}}}{r_{\text{glace}} C_{p_{\text{glace}}}} \quad C_{p_{\text{glace}}} = 2,04 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (I.43)$$

Conclusion

La congélation est un processus compliqué, qui nécessite l'interaction de plusieurs facteurs techniques, thermo-physiques, et même économiques, pour une bonne maîtrise. La compréhension de l'interaction de ces facteurs, demande plus d'efforts scientifiques, et un travail plus poussé dans ce domaine, le recourt a la modélisation des phénomènes liés à la congélation propose des solutions efficaces.

Dans cette partie nous avons évoqué les aspects généraux de la congélation, déroulement des phases, une définition de vitesse et le temps nécessaire pour cette opération ainsi que les phénomènes intervenant.

Cependant, dans la congélation des produits alimentaires est accompagné par un changement d'état, cette abaissement de température se traduit par une variation du potentiel chimique, et la dynamique de l'eau dans l'aliment, abaissant la cinétique des réactions chimiques et biologiques et perturbe leurs vitesses.

Notant une modification des propriétés des éléments constituant la matrice du produit qui en conséquence et dans la majorité des cas influent sur la qualité technologique et fonctionnelle des aliments surtout dans les cas ou on assiste a une mauvaise maîtrise de cette opération. En présence d'un écart significatif de température, une chute de poids est inévitable de l'ordre de 1 à 3% environ et selon le type d'aliment mais surtout pour les denrées non emballé, due aux pertes d'eau sous différentes formes (vapeur, liquide) et par plusieurs mécanismes forment l'évaporation, la diffusion et par sublimation.

Enfin, une présentation des propriétés thermo-physiques des aliments lors de la congélation, été faite, vue leur importances.

Chapitre II

Modélisation des transferts de chaleur et de masse lors de la congélation des aliments

Introduction

Cette partie, comporte une revue bibliographique sur quelques travaux réalisés dans le domaine de la modélisation des transferts de chaleur et de masse lors de la congélation, et les différentes approches théoriques de modélisation des phénomènes de la perte en eau lors de la congélation et les équations utilisées. Une partie a été consacrée aux Coefficients de transferts de chaleur et de la matière, vue leurs importance lors du processus, sa modélisation ainsi que sa simulation.

II.1. Aspects théoriques des modèles de transferts couplés lors de la congélation des aliments:

Dans cette partie, nous rappelons quelques principes de résolution du transfert de chaleur et de matière (masse) appliqués aux systèmes alimentaires. Notant que plusieurs ouvrages et auteurs ont mis en évidence une différence entre les aliments qui présentent une structure dense et ceux à structure poreuse.

Lors de la congélation des aliments, le transfert de chaleur est toujours accompagné par transfert de masse, Cependant, le changement de phase ne se produit presque jamais seul et d'autres phénomènes ont lieu en parallèle. Le mouvement d'humidité se produit à l'échelle macro et au niveau cristallin et cellulaire. (Q.T. Pahm, 2006).

Selon Pham (2014) et y. Zhao et P.S. Takhar (2017), Lorsque le transfert de masse se produit, la conduction n'est pas le seul mode de transfert de chaleur, l'énergie thermique est également transmise par la substance diffusante, ce qui nécessite l'ajout d'un deuxième terme de transport. Cela peut être le plus facilement exprimé avec l'enthalpie forme de l'équation de transport de chaleur:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \nabla(H_w J) \quad (\text{II.1})$$

Où

J : Le flux massique (densité de flux de matière)

H_w : L'enthalpie de la substance diffusante, le changement de la densité dus à un déséquilibre du flux massique est pris en compte.

Le flux de masse est supposé suivant la loi de Fick:

$$J = -r_{ds} D_w \nabla W \quad (\text{II.2})$$

r_{ds} : La concentration massique de solide sec.

W : La fraction de massique de matière sèche de la substance en diffusion (kg / kg solides secs).

D_w : Diffusivité (efficace).

L'équation régissant le transfert de masse est donc :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D_w \nabla W) \quad (\text{II.3})$$

Plusieurs auteurs négligent les effets mécaniques (gravité, gradient de pression), ainsi que la diffusion de masse due à un gradient de température, (effet Soret) et la diffusion de la chaleur due à un gradient de concentration (effet Dufour). (T. Q. Pham, 2006).

Le second terme de l'équation de transport de chaleur peut généralement être négligé dans les aliments denses en raison du taux de diffusion de l'humidité très lent, mais pas dans les aliments poreux, où l'évaporation ou la condensation peut se produire, entraînant des changements importants dans H_w .

Hamdami (2004), signale qu'à l'intérieur de l'aliment, le coefficient de diffusion de l'humidité dans la zone congelée est plus petit que dans la zone non congelée, qui fait une variation subite de chaleur latente à la température du point de congélation, pour éviter ce problème, à résoudre l'équation de conduction par la méthode des différences finies à chaque temps la chaleur gagnée par le nœud est supposée correcte, d'où la nouvelle enthalpie nodale est :

$$H^{new} = (r C_p)(T^{new} - T^{old}) + H^{old} \quad (\text{II.4})$$

En générale Dans la congélation des aliments denses (non poreux), l'eau évaporée de la surface est alimentée par l'eau profonde de diffusion vers la surface, jusqu'à ce que la congélation se produise. Par la suite, l'eau sublime sur le front de glace, près de la surface, mais il n'y a pas de mouvement d'eau importante dans l'aliment.

Le transfert de masse se produit seulement dans une assez fine couche près de la surface, contrairement au transfert de chaleur qui se produit tout au long, et le principal problème est de savoir comment traiter efficacement les différentes échelles. Dans la congélation des aliments poreux, tels que le pain et la pâte, le mouvement de l'humidité continue lors du processus de congélation et profondément dans l'aliment.

II.1.1. Cas des aliments à structure dense

Dans les aliments denses, la diffusion de l'humidité est très lente et sa contribution au transport de la chaleur peut être négligée, d'où le second terme de l'équation. (II.1) peut être négligée, sauf à l'évaporation à la surface elle-même.

Les problèmes à prendre en compte sont les changements dans les conditions aux limites et les différences d'échelle entre les transferts de chaleur et de masse.

Pendant la phase de pré-refroidissement (avant la congélation en surface), l'eau évaporée à partir de la surface et est réapprovisionnée par l'humidité diffusant à l'intérieur de la surface. Cet équilibre se traduit par :

$$r_{ds} D_w \left[\frac{\partial W}{\partial n} \right] = -K_g (P_s - P_a) \quad (II.5)$$

- r_{ds} : La densité du composant sec et solide.
- n : Le vecteur normal unitaire.
- K_g : Le coefficient de transfert de masse ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$).
- P_s : Pression partielle de la vapeur d'eau à la surface des aliments.
- P_a : La pression partielle de la vapeur d'eau dans les alentours.

Le côté gauche dans l'équation (II.5) est le flux d'humidité vers la surface telle qu'elle est exprimée par la loi de Fick, tandis que le côté droit est le flux de vapeur d'eau de la surface à l'air ambiant.

La pression partielle de la vapeur d'eau à la surface des aliments P_s est liée à la l'humidité de surface par :

$$P_s = a_w P^*(T_s) \quad (II.6)$$

$P^*(T_s)$: La pression de saturation de la vapeur d'eau à la température de la surface T_s .

a_w : l'activité d'eau de la surface.

La chaleur latente de vaporisation λ_v , représente la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg de liquide (à pression et température constantes) pour obtenir 1 kg de vapeur saturée. À noter que la chaleur de vaporisation varie en fonction de la température de l'eau qui s'évapore : de 2 257 kJ/kg à 100°C, la chaleur de vaporisation est de 2 454 kJ/kg à 20°C et de 2 501 kJ/kg à 0°C. Il est donc un peu plus facile pour une goutte de passer à l'état vapeur lorsqu'elle se trouve déjà à 100°C.

La chaleur latente de vaporisation λ_v , doit être prise en compte dans la condition limite de l'équation de conduction de la chaleur:

$$-k \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right] = h(T_s - T_a) - \lambda_v k_g (P_s - P_a) \quad (\text{II.7})$$

h : le coefficient de transfert de chaleur en surface par convection.

R. P. Singh (2014), a développé l'expression mathématique du taux d'humidité (w) qui est la masse d'eau dans un kilogramme d'air sec(en basant sur l'équation des gaz parfait) on trouve:

$$W = \frac{R_a P_s}{R_s (P - P_s)} = \frac{287}{461.5} \left(\frac{P_s}{P - P_s} \right) = 0.622 \left(\frac{P_s}{P - P_s} \right) \quad (\text{II.8})$$

On utilisant W dans l'équation de transfert de masse et notant qu'à partir des coefficients de transfert de masse on peut avoir le flux de masse J suivant le gradient pression de vapeur.

$$J_w = \frac{K_m \cdot A \cdot M_w}{R_u \cdot T} (P_a - P_s) \quad (\text{II.9})$$

Supposant que nous avons deux taux d'humidités différents W_a et W_s . En substituant la relation (II.8) dans l'équation du flux de la vapeur d'eau (II.9), on aura l'expression mathématique du mouvement la vapeur d'eau de la surface de l'aliment vers l'air qui l'entoure:

$$J_w = (W_a - W_s) \frac{K_m \cdot A \cdot M_w \cdot P_{atm}}{0,622 \cdot R_u \cdot T} \quad (\text{II.10})$$

J = flux de la vapeur d'eau.

$K_m = D_m$ = coefficient de transfert de masse.

A = surface de l'aliment.

M_w = poids moléculaire de l'eau.

P_{atm} = Pression atmosphérique

V : volume de l'air en m^3

R_a : constante des gaz dans le cas de l'air humide = 287j/Kg K

R_s : constante des gaz dans le cas de la vapeur d'eau = 461.5 j/Kg K

T : Température absolue du mélange air vapeur en K.

A.E. Delgado et Da Wen Sen (2001) indique que la vitesse de transfert de masse à l'interface air-surface peut être représentée par :

$$\frac{dM}{dt} = AK_m (P_s a_{ws} - P_a) \quad (\text{II.11})$$

M : masse de l'eau (Kg).

K_m : Coefficient de transfert de masse ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

a_{ws} : activité d'eau a la surface de l'aliment.

P_s et P_a : Les pressions partielles respectivement à la surface et de l'air ambiant.

Cependant dans certaines expressions, la concentration molaire d'eau au lieu de la pression de vapeur d'eau peut apparaître, en supposant que la vapeur d'eau est un gaz idéal.

Ainsi, le transfert d'énergie à la surface a lieu en raison du transfert de chaleur et de masse couplé et l'état de frontière à la surface peut être écrit comme suit:

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = h(T_s - T_a) + K_m (a_{ws} P_s - P_a) l_v \quad (\text{II.12})$$

Par conséquent, les coefficients de transfert de chaleur et de masse et l'activité de l'eau de surface doivent être évalués.

Les conditions aux limites pour la chaleur et le transfert de masse deviennent non-linéaires, car elles contiennent un terme P_s , qui est fonction de la température et de l'humidité. Une autre complication est causée par les différences d'échelle entre transfert de chaleur et de masse, la diffusivité de l'humidité dans les aliments denses est de l'ordre $D_w \approx 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, tandis que la diffusivité thermique est de l'ordre $k / \rho C \approx 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, ce qui signifie qu'avec le temps le processus de congélation sera terminée, seule une très fine couche près de la surface a subi de changement notable dans la teneur en humidité. (Q.T. Pham, 2006).

Une fois que la surface de l'aliment est congelée (à un point de congélation initiale déterminée thermodynamiquement par l'activité de l'eau de surface), l'eau devient immobilisée et la diffusion interne s'arrête.

L'humidité se sublime, d'abord de la surface, puis à travers une couche de nourriture desséchée qui épaisse progressivement à mesure que la glace du front recule, à un taux déterminé par (Pham et Willix, 1984; Pham et Mawson, 1997 ; Pham, 2014).

II.1.2. Cas des aliments à structure poreuse

Pour les aliments poreux, la diffusion de masse est beaucoup plus rapide que dans les aliments denses en raison de la diffusion de la vapeur dans les pores. L'eau s'évapore des parties intérieures chaudes de l'aliment et diffuse vers l'extérieur. Lorsque le point de congélation est atteint, la vapeur se condense en glace. (Hamdami et al, 2004).

La présence de trois phases est un facteur de complication et les travaux précédents ont fait diverses approximations. Q. T. Pham (2014) a développé un modèle plus rigoureux où l'équilibre de l'humidité peut être écrit:

$$r_{ds} \frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla J_w \quad (II.13)$$

r_{ds} : La densité du solide sec.

W : La teneur en humidité totale par unité de masse de solide sec.

J_w : Le flux d'humidité.

L'humidité se diffuse principalement dans la phase vapeur, où le flux basé sur la superficie de section transversale totale.

$$J_w = -\frac{f_g}{t} \cdot \frac{M_w \cdot C \cdot D_v}{1 - y_w} \cdot \nabla y_w \quad (II.14)$$

C : La concentration molaire de l'eau dans la phase gazeuse.

f_g : La fraction vide.

t : Le facteur de tortuosité du chemin de diffusion.

y_w : La fraction molaire de vapeur d'eau dans les pores.

D_v : La diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air

Dans cette expression :

$(-M_w C D_v \nabla y_w)$ est le flux de diffusion de la vapeur d'eau libre dans la première loi de Fick,

$[1 / (1 - y_w)]$ est un facteur de correction pour le déplacement en vrac (Bird et al, 1960).

$\frac{f_g}{t_a}$: est un facteur de géométrie.

La concentration molaire totale de gaz est, à partir de la loi des gaz parfaits:

$$C = \frac{P_{atm}}{R_g T} \quad (II.15)$$

Et la fraction molaire de la vapeur d'eau est :

$$y_w = \frac{a_w P_{liq}^*}{P_{atm}} \quad (II.16)$$

P_{liq}^* : Pression de vapeur de saturation de l'eau liquide (l'eau en surfusion, si $T < 273,15$ K)

a_w : est l'activité d'eau de l'aliment.

P_{atm} : la pression atmosphérique.

La Substitution de C et y_w dans l'équation (II.14) donne l'expression du flux de l'humidité J_w (en supposant a_w constant):

$$J_w = \frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}^*} \frac{dP_{liq}^*}{dT} \nabla T \quad (II.17)$$

En combinant Eq. (II.13) et (II.14) on aura :

$$r_{ds} \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \left[\frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}^*} \frac{dP_{liq}^*}{dT} \nabla T \right] \quad (II.18)$$

L'équation de transport de chaleur dépend de la présence de la glace. En absence de la glace, le déséquilibre du flux représente une évaporation ou la condensation, ce qui provoque une source de chaleur ($-l_{vl} \nabla J_w$).

$l_{vl} = H_v - H_l$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le bilan thermique donne alors:

$$r c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - l_{vl} \nabla J_w \quad (II.19)$$

La présence de la glace sous forme d'une phase pure, contrairement à l'eau liquide qui se fait normalement contenir des solutés qui dépriment a_w , cela induit que la pression de vapeur du contenant de la glace alimentaire (congelée) est la même que celle de la glace.

L'équation (II.18) devient alors :

$$r_{ds} \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \left[\frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{ice}} \frac{dP_{ice}}{dT} \nabla T \right] \quad (II.20)$$

P_{ice}^* est la pression de vapeur de la glace. La condition de continuité au niveau du point de congélation donne a_w à des températures supérieures à la congélation :

$$a_w = \frac{P_{ice}(T_f)}{P_{liq}(T_f)} \quad (II.21)$$

Le diagramme de phase de l'eau dans l'aliment, illustre la relation entre les pressions de vapeur d'eau de l'aliment, l'eau liquide pure et la glace. Comme la température baisse en dessous de T_f , la glace se forme et la solution liquide devient de plus en plus concentrée, en abaissant l'activité par rapport au liquide en surfusion.

L'équation de transport de chaleur dépend de la présence de la glace. Si la glace n'est pas présente, le déséquilibre du flux représente une évaporation ou la condensation de / vers l'eau, ce qui provoque une source de chaleur $-l_{vl} \nabla J_m$.

Dont $l_{vl} = H_v - H_l$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le bilan thermique donne alors:

$$r C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - l_{vl} \nabla J_w \quad (II.22)$$

k : La conductivité thermique et qui peut être calculée à partir des modèles de calculs des propriétés thermo physiques.

C_p : La chaleur spécifique.

$r C_p$ Dépend de l'humidité et peut être calculée à partir de:

$$r C_p = r_s (C_{p_{ds}} + W C_{p_{liq}}) \quad (II.23)$$

$C_{p_{ds}}$: La chaleur spécifique du solide sec

$C_{p_{liq}}$: La chaleur spécifique de l'humidité liquide.

Dans cette équation, la chaleur spécifique de l'eau liée est supposée être la même que celle de l'eau libre, $C_{p_{liq}}$ une hypothèse faite communément.

Substituant J_w dans l'équation (II.19):

$$r_c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[\left(k + \frac{f_g}{t} \frac{l_{vl} D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}} \frac{dP_{liq}}{dT} \right) \nabla T \right] \quad (II.24)$$

Qui peut être écrit :

$$r_c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[(k + k_{eva-con}) \nabla T \right] \quad (II.25)$$

$k_{eva-con}$ est la conductivité thermique effective due à l'évaporation-condensation (Hamdami, 2004).

$$k_{eau-con} = \frac{f_g}{t} \frac{l_{vl} D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}} \frac{dP_{liq}}{dT} \quad (II.26)$$

Lorsque la glace est présente, la situation est plus compliquée car il ya 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. (Q. T. Pham, 2008).

Par ailleurs, La contribution de la vapeur d'eau à la masse totale d'humidité peut être négligée en raison de sa faible densité.

Alors on suppose que l'humidité consiste en l'humidité liée $W_{liée}$, l'humidité liquide libre W_{libre} et la glace W_{ice} :

$$W = W_{liée} + W_{libre} + W_{ice} \quad (II.27)$$

$W_{liée}$ peut être supposé constante, tandis que $W_{libre} = W_{libre, eq}$, l'équilibre de l'humidité non congelée libre, qui dépend de la température.

$$W_{libre,eq} = (W_0 - W_{liée}) \frac{T_f - T_0}{T - T_0} \quad (II.28)$$

W_0 : La teneur initiale en humidité

T_f : Le point initial de congélation, avant que l'humidité soit perdue ou acquise.

T_0 : Le point de congélation de l'eau pure.

Dès lors que la teneur en humidité du liquide est déterminée par l'équilibre, toute vapeur de condensation doit se condenser en glace. Ainsi, la chaleur latente d'évaporation-condensation (ou sublimation dans certains cas) devient : $(-l_{sbt} \nabla J_w)$

Où $\lambda_{sbt} = H_v - H_{ice} = \lambda_{vl} + \lambda_f$ qui est la chaleur latente de la sublimation de la glace.

Mascheroni et al (2001), signalent qu'il y a une autre source de chaleur latente provoquée par la congélation d'eau liquide ou la fonte de la glace pour maintenir la teneur en eau liquide à l'équilibre avec de la glace:

$$-l_f r_{ds} \frac{dW_{l,eq}}{dt} = -l_f r_{ds} \frac{dW_{l,eq}}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (II.29)$$

Où $\frac{dW_{l,eq}}{dT}$ peut être obtenu à partir d'une relation d'équilibre telle que l'équation (II.28).

Enfin L'équation de la chaleur (II.24) pour la congélation des aliment poreux, et le fait que la pression de vapeur d'eau dans l'aliment est celle de la glace lorsque celle-ci est présente à l'équilibre, peut être exprimée comme suit :

$$r_c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + l_{vi} \nabla \left[\left(\frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{ice}} \frac{dP_{ice}}{dT} \right) \nabla T \right] - l_f r_s \frac{dW_{l,eq}}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (II.30)$$

Après réarrangement et mise en place $r_s = X_s r$:

$$r C_{p_{app}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[\left(k + \frac{f_g}{t} \frac{l_{stb} D_v M_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{ice}} \frac{dP_{ice}}{dT} \right) \nabla T \right] \quad (II.31)$$

Et :

$$r C_{p_{app}} = r_{ds} \left[C_{p_{ds}} + (W_{lieé} + W_{libre,eq}) C_{p_{liq}} + W_{ice} C_{p_{ice}} + l_f \frac{dW_{libre,eq}}{dT} \right] \quad (II.32)$$

$C_{p_{app}}$: La chaleur spécifique apparente, $\frac{dH}{dT}$ est une variation d'enthalpie par apport à la température, qui comprend aussi la chaleur latente de congélation.

II.2. Coefficients de transferts

Ces coefficients sont essentiels pour prédire non seulement les temps de processus, mais aussi les pertes de poids produites par l'évaporation ou la sublimation de l'eau superficielle. Ils dépendent des propriétés thermo-physiques du fluide et du produit, les caractéristiques de l'objet, le flux de fluide et les équipements de transfert de chaleur, il faut prendre soin d'utiliser les données déclarées pour une condition spécifique. Ces coefficients peuvent être obtenus par des corrélations de nombres sans dimension tels que Nusselt et Sherwood. (Rahman, 1995).

Lors d'un transfert simultané de la masse et de la convection entre l'air et la surface du produit, il existe une analogie entre les coefficients de masse et de transfert de chaleur, qui est déterminé par la relation de Lewis (A.E. Delgado et Da-Wen Sun, 2001).

$$\frac{h}{K} = r Cp(Le)^a \quad (II.33)$$

J. J. Bimbenet, (1993); A. M. Tocci et R. H. Mascheroni, (1995), on écrit que l'exposant (a) est compris entre 0,4 et 0,66, avec 0,66 comme valeur la plus courante utilisée. Cette équation est généralement utilisée pour évaluer un des coefficients si l'autre est connu. Le coefficient de transfert de masse est fréquemment obtenu à partir du coefficient de transfert de chaleur. Cette équation est valide pour des vitesses d'air supérieures à 0,6 m / s. Cependant, l'écart se produit à des vitesses inférieures à 0,6 m / s car la composante radiative ne peut être négligée à des vitesses d'air faibles. (A. Kondjoyan et al, 1993). Le temps et la vitesse de congélation dépendent fortement de ces coefficients, qui varient légèrement avec la température et l'humidité de l'air dans une zone bien définie.

II.2.1. Coefficient de transfert de masse (K)

Le coefficient de transfert de masse (K) dépend de l'hydrodynamique, la nature et des propriétés du fluide ainsi que la géométrie du système. Il peut être déterminé soit par des modèles de transfert de masse, des corrélations qui est l'utilisation des nombre adimensionnels ou par expérimentation.

$$J = K.\Delta C \quad (II.34)$$

J : Flux de matière ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

K : Coefficient de transfert de matière (m.s^{-1})

ΔC : Gradient de concentration (Kg.m^{-3} ou mol.m^{-3})

On utilise des corrélations disponibles dans la littérature pour estimer (K), en exploitant les données propre au système, en général on distingue la vitesse d'écoulement du fluide (u), dimension caractéristique du système (d), la viscosité dynamique du fluide (μ), le coefficient de diffusion (D), la masse volumique du fluide (ρ).

On retrouve toutes ces grandeurs dans 3 nombres adimensionnels reliés suivant une équation du type (analyse dimensionnelle) :

$$Sh = a + b.Re^c.Sc^d \quad (II.35)$$

II.2.2. Coefficient de transfert de chaleur (h)

Il quantifie le flux d'énergie traversant un milieu et à une interface, par unité de surface, de volume ou de longueur. Il présente la facilité de pénétration de l'énergie thermique. L'inverse du coefficient de transfert thermique est la résistance thermique.

Le flux de chaleur à une interface s'écrit :

$$Q = h.\Delta T \quad (II.36)$$

Donc

$$h = \frac{\Delta T}{Q} \quad (II.37)$$

L'unité peut être en :

$W.m^{-2}.K^{-1}$ si le transfert est surfacique.

$W.m^{-1}.K^{-1}$ si le transfert est linéique.

$W.K^{-1}$ pour un transfert ponctuel.

Le coefficient de transfert thermique peut être relié à l'épaisseur de la couche limite thermique par l'intermédiaire du modèle du film. Considérant que le profil de concentration dans la couche limite est linéaire et que le transfert dans la couche limite est essentiellement conductif, le flux de matière:

$h = \frac{\lambda}{d_{th}}$: Qui est conductivité thermique par rapport à l'épaisseur de la couche limite thermique.

Comme pour le transfert massique on trouve des corrélations par des nombres adimensionnels qui indiquent et calcule le coefficient de transfert thermique, comme :

- **Nombre de Nusselt** : Caractérise les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé transfert convectif. On le définit de la manière suivante :

$$Nu = \frac{Q_{convection}}{Q_{conduction}} \quad (II.38)$$

$$Nu = \frac{h.L_{car}}{l} \quad (II.39)$$

- **Nombre de Prandtl (Pr)** : Il représente le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement et la diffusivité thermique, il s'écrit :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{m.C_p}{l} \quad (II.40)$$

a : Diffusivité thermique $m^2.s^{-1}$.

II.3. L'état de l'art

Les débuts de la modélisation des phénomènes de la congélation (changement de phase liquide/solide) revient à l'ingénieur mécanicien Emile Clapeyron en 1831 qui résolu le problème de congélation à une température initiale égale à la température de congélation, après une étude qui présentait une continuité d'un travail de Fourier sur le phénomène de la solidification.

En 1890 **Boltzmann Ludwig** a étudié le problème de fusion et de congélation d'eau , suite aux travaux de **Josef Stefan** , travail pionnier dans la modélisation du phénomène de changement de Phase liquide/solide. D'ailleurs la solidification est Considérée dans la littérature comme un problème de Stefan, une appellation qui englobe aussi tous les problèmes de diffusion dans un domaine déformable, signalé aussi problèmes à frontières libres ou mobiles.

Des Solutions analytiques du problème Stefan ainsi que la prédiction du temps de congélation se basant seul sur les transferts de chaleur et l'équation de plank (1941), ont été cité par plusieurs auteurs.

Mollor (1976) a suggéré une modification de l'équation de Plank, il à remplacé la chaleur latente de fusion par un facteur comprenant sa variation.

Hayakawa et Bakal (1973) ont développé une solution au problème de congélation d'une tranche finie, ils ont divisée le procédé de congélation en quatre périodes : pré-

refroidissement, première période de changement de phase, seconde période de changement de phase, et le refroidissement.

Mais à la suite plusieurs auteurs l'ont divisé en trois étapes (Masheroni et Calvelo, 1982 ; De Michelis et Calvelo, 1982 et 1983 ; Castaigne, 1986 ; Q.T. Pham, 1984 ; 2006, 2008).

Jusqu'à ce moment, les modèles disponibles pour décrire le processus de congélation peuvent être divisés en deux groupes principaux: Les modèles de transfert de chaleur et les modèles de transfert de chaleur et de masse.

II.3.1. Les modèles de transfert de chaleur

Les modèles de résolutions basés sur seul le transfert de chaleur, considèrent l'aliment comme un milieu ou un domaine homogène et estiment que la congélation est un transfert de chaleur par conduction avec changement de phase.

Utilisés en général pour le calcul de la température à n'importe quelle position à l'intérieur de l'objet, ainsi que le temps de congélation, selon plusieurs facteurs comme la forme.

Pour ces modèles les propriétés thermo-physiques ne représentent pas tous les phénomènes, qui se déroulent lors de la congélation.

Hayakawa et al. (1982) ont proposé un modèle pour la conduction thermique d'un aliment rectangulaire au cours de congélation avec transfert d'humidité aux limites, dans le même contexte **Q. T. Pham (1987)** proposent un algorithme pour la résolution numérique du transfert uni et bidimensionnel prenant compte des transferts de chaleurs et les phénomènes diffusionnels.

Diverses extensions semi-empiriques de la solution de Plank ont également été proposées par Q.T.Pham (1984), L'IIF (1986) (institut international du froid), Cleland, (1990), pour tenir compte de la chaleur spécifique finie et de la libération progressive de la chaleur latente.

L'équation modifiée de plank par Q.T. Pham (1984) est :

$$t = \frac{Q}{h.A(T_f - T_a)} \left(1 + \frac{Bi}{4} \right) \quad (II.41)$$

t = Temps de congélation (s).

Q = Taux de chaleur dégagé (J).

h = Coefficient de transfert de chaleur (W/m².K).

T_f = Température de congélation (K ou °C).

T_a = Température de l'air (K ou °C).

Salvadori et Mascheroni (1991) ont obtenu une méthode analytique simplifiée particulièrement adaptée aux calculs industriels pratiques et aux produits de géométries simples et régulières. Dans cette méthode, le temps de congélation peut être exprimé en fonction de la température finale, des dimensions et des propriétés physiques des aliments frais et des conditions de fonctionnement:

$$t_c = (A_1 T_{centre} + B) \left(\frac{1}{Bi} + c \right) \left[\frac{(T_c - T_i)}{T_c} \right]^n \left[\frac{(T_a - T_c)}{T_c} \right]^{-m} a_0^{-1} R^2 \quad (II.42)$$

a_0 : est diffusivité thermique du produit frais.

T_c : est la température au centre du produit.

Bi : nombre de Biot

A.E. Delgado et Da-Wen Sun (2001) expliquent que l'approche générale de la prévision du temps de congélation consiste à chercher des relations approximatives ou empiriques plutôt que de trouver des solutions analytiques exactes.

L'approche la plus simple pour prédire les temps de congélation est généralement basée sur l'équation de Plank, ou sur les modulations de l'équation de Plank.

Ils rapportent que l'équation de Plank non modifiée sous-prédit les temps de congélation de $10 \pm 40\%$ et peut être écrite comme suit:

$$t_{plank} = \frac{r_s L_1}{T_c - T_a} \cdot \left[\frac{P.R}{h} + \frac{Q.R^2}{k_s} \right] \quad (II.43)$$

L'équation (II.43) indique que le temps de congélation dépend de deux groupes de facteurs.

- Un groupe caractérise le produit, dont l'enthalpie du produit entre la température initiale T_a et la température caractéristique de congélation T_c , le poids spécifique du produit à l'état congelé, la conductivité thermique du produit congelé et la dimension caractéristique (épaisseur ou diamètre) et la forme définie par les Facteurs de forme.
- L'autre groupe caractérise le procédé et les facteurs du milieu de refroidissement et le coefficient de transfert de chaleur par convection.

Tableau II.1.1 : Valeurs des constantes dans l'équation (I.43)

Géométrie	m	N	c	A ₁	B
Plaque a (Slab)	1,04	0,09	0,18	-1,08125	62,9375
Plaque b (Slab)	1,03	0,1	0,1	-0,9425	62,435
Cylindre infini	1	0,09	0,09	-0,46875	28,7625
Sphère	0,9	0,06	0,06	-0,16875	15,3625

Q.T. Pham (2014), estime que la solution pseudo-stationnaire proposée par R. Plank (1941), peut être écrite sous la forme suivante :

$$t_{Plank} = \frac{r \cdot l_f \cdot R}{E_{Freeze} \cdot h(T_c - T_a)} \cdot \left(1 + \frac{B_i}{2}\right) \quad (II.44)$$

Où E_{freeze} le facteur de forme est égal à 1 pour les tranches ou plaques, 2 pour les cylindres infinis et 3 pour les sphères.

$R = P/4$

P égal à 1/2 pour les plaques, 1/4 pour les cylindres infinis et 1/6 pour les sphères.

Enfin, Les modèles mathématiques qui décrivent le phénomène de solidification cités dans la littérature sont notamment basés sur l'équation de la conduction de la chaleur. Cependant, M. Truex (2010) regroupe les modèles basé seul sur le transfert de chaleur en trois catégories :

- Modèle d'interface pointue (sharp interface model).
- Modèle enthalpique (enthalpy model).
- Modèles de phase de champ (phase field model).

II.3.2. Les modèles couplés de transfert de chaleur et de masse.

Ces modèles prennent en considération l'hétérogénéité de l'aliment, et la variété des modes de transferts au sein de ce dernier, un transfert couplé de chaleur et de masse se produit simultanément dans le domaine d'étude et durant le processus. Le changement de phase se produit et entraîne des changements complexes dans les propriétés de transport tels que la densité, la chaleur spécifique, la conductivité et la chaleur latente de fusion qui sont fonction de la température. (K.S. Surana, 2015).

De cela La synthèse de ces deux variables (chaleur et masse) détermine le comportement du produit durant le procédé de ainsi que la qualité finale du produit.

Dans la littérature plusieurs travaux concernant les transferts de la chaleur et de masse durant le refroidissement et au cours de la congélation, admettent que les aliments solides ont des structures très compliquées, l'eau et la vapeur d'eau sont transportées simultanément par plusieurs mécanismes et il est donc impossible d'identifier un seul mécanisme physique pour construire un fond théorique pour le calcul. (Hallström, 1990). Tocci et Mascheroni (1995); Campa, Salvadori et Mascheroni (1997), Chuntranuluk, Wells et Cleland, (1998), utilisaient les équations de transfert de chaleur et de masse et les a résolu par des méthodes numériques pour obtenir des modèles simples et utilisable pour plusieurs types d'aliments.

Une perte d'humidité de la surface du produit non seulement accélère le processus de refroidissement mais modifie également les attributs de qualité du produit. Des pertes de poids supérieures à 1% se produisent généralement dans certains procédés de réfrigération commerciale. Dans le refroidissement de la carcasse de boeuf par exemple, la perte de poids est d'environ $1,5 \pm 2,3\%$. (Chuntranuluk et al, 1998).

Davey et Pham (1997), ont élaboré un modèle pour prédire la charge de chaleur et la perte de poids pendant le refroidissement des carcasses de bœuf. Ce modèle a été l'un des premiers modèles validés au niveau industriel. Ils ont utilisé une approche de différence finie sans flux de chaleur axiale, dans lequel la géométrie de carcasse irrégulière a été approchée par une combinaison de sept cylindres et plaques.

Hu et Sun (2000) ont utilisé la dynamique des fluides informatiques pour simuler les vitesses de refroidissement et la perte de poids pendant le refroidissement de la viande porc en forme de cylindre. Dans la première étape, ils ont étudié le champ d'écoulement en régime permanent, suivi du calcul du coefficient de transfert de chaleur convectif moyen qui tient compte de la convection, du rayonnement et de l'évaporation à la surface du produit. Ils ont simulé le transfert de chaleur et de masse dans le produit en supposant le coefficient de transfert thermique homogène calculé dans l'étape précédente. Il a été démontré qu'il y avait une grande quantité de chaleur éliminée par évaporation, qui était supérieure à la perte de chaleur par convection. De plus, ils ont signalé que la perte de chaleur par rayonnement était relativement faible par rapport à la perte de chaleur causée par l'évaporation et la conduction.

L.A. Campanone, V.O. Salvadori et R.H. Mascheroni (2000) ont développé un modèle numérique qui résout les bilans de chaleur et de masse couplés pendant la congélation et le stockage congelé d'aliments non emballés. Il permet d'évaluer les températures, le temps de

congélation, l'épaisseur de la couche déshydratée et la perte de poids lors de la congélation et du stockage. Le modèle est adapté pour différents aliments (avec les propriétés physiques adéquates) et différentes géométries (slab, cylindre et sphère). Les résultats numériques donnent une très bonne prédiction des valeurs expérimentales.

Delgado and Sun (2001) utilisant l'analyse des différences finies, et l'approximation de la forme du produit par une géométrie régulière, les équations sont associées au flux de chaleur entre les noeuds. Cette méthode est très utile pour les modèles unidimensionnels mais elle a une application limitée aux produits à formes régulières comme les cylindres, les plaques et les boîtes

Frédéric Peyrin, Alain Kondjoyan (2002) ont étudiés l'effet de la turbulence de l'air sur le transfert de chaleur et masse autour d'un cylindre. Le coefficient de transfert thermique a été mesuré autour d'un cylindre circulaire placé dans un contre-courant d'air dont l'intensité de turbulence du flux libre était de 14%. Dans cette gamme, l'effet sur la valeur moyenne du coefficient de transfert est très faible et ne peut être comparée à l'influence considérable de l'intensité de la turbulence.

N. Hamdami, et al (2004) ont effectué une simulation numérique dans produit parallélépipédique en utilisant le schéma de trois niveaux de Lee (Lee's three-levels scheme) et une grille fixe (fixed grid) pour prédire le transfert de chaleur et de masse pendant la congélation d'une matrice humide poreuse, ainsi que la perte en eau des aliments par évaporation à travers sa surface au cours du processus. Par l'introduction des deux termes d'évaporation condensation et le taux de formation de glace, dans les équations d'énergie et de masse.

A.E. Delgado, Da-Wen Sun (2007) ont étudié l'effet de différentes valeurs de l'activité de l'eau sur les temps de congélation / décongélation et la prédiction de la perte de poids de viande de porc et de bœuf cuits et de viande de poulet. Un schéma explicite de la méthode différence finie, qui incorpore le transfert de masse a été utilisée dans l'analyse. Des données expérimentales sur les temps de congélation / décongélation et la perte de poids ont également été obtenues pour vérifier et comparer les prévisions du modèle.

J.A. Esfahani et al (2008) ont réalisé une modélisation des transferts de chaleur et de masse durant la congélation des aliments poreux, l'étude numérique été mener par la méthode des volumes finies, et la résolution par un programme élaboré à l'aide du code

fortran, la simulation été faite dans une chambre pour une convection d'air naturelle, le modèle établie n'a pas besoin du coefficient de transfert de chaleur pour le calcul, mais ils ont utilisé le nombre de Rayleigh pour prédire le temps de congélation et le taux de transfert.

O. Nelson (2011) dans une étude du transfert de chaleur et de masse pendant la congélation d'un bloc de boeuf dans un congélateur d'un réfrigérateur domestique. Il tient compte de la convection naturelle dans l'air couplée à la conduction thermique et à la diffusion de l'eau dans la viande. Les équations différentielles partielles non linéaires décrivant la conservation de masse, le moment linéaire, l'énergie et la concentration des espèces en deux dimensions sont résolues avec l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) et la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus comprennent la description de l'état d'inertie du mouvement de l'air ainsi que la température et la concentration de l'eau dans l'air et la répartition de la température et de la concentration de l'eau dans la viande. La perte de poids prédite de l'aliment atteint une valeur de 1,5%

Q.T. Pham (2014) a établi un modèle pour la résolution du problème de transfert de chaleur et de masse durant la congélation et le stockage des aliments, ou il divise les aliments en deux catégories, des aliments denses et des aliments poreux. Pour lui le changement de phase ne se produit presque jamais seul et d'autres phénomènes ont lieu en parallèle avec le transfert de chaleur,

S. Ditudompo et P.S. Takhar (2015) des principes thermodynamiques sont employés pour développer des modèles déterministes de médias poreux. Les lois relatives à la balance à micro-échelle en moyenne sur les domaines fluide-solide adjacents pour atteindre les équations méso-échelle. Les équations de méso-échelle sont en outre moyennées sur le mélange solide-fluide et les phases en vrac pour obtenir des équations à macro échelle. Ils ont utilisé une version simplifiée pour dériver les équations de Navier-Stokes pour les fluides, les équations d'élasticité utilisées pour modéliser les solides et la loi de Darcy utilisée Pour modéliser l'écoulement.

Y. Zhao et P. S. Takha (2017) Proposent une autre approche de modélisation des transferts couplée, la théorie du mélange hybride (HMT ; Hybrid mixture theory), une méthode puissante pour intégrer des mécanismes multi-scalaires pour estimer les changements physiques et les mécanismes de transport généraux qui se produisent dans

une matrice alimentaire. HMT peut également être utilisé pour prédire les changements de qualité d'un produit congelé pendant le processus de congélation. Les lois de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et de l'entropie sont mesurées deux fois en volume pour obtenir des équations à l'échelle méso et macroscopiques

Cependant, en général, toutes les approches conduisant à une meilleure compréhension et une meilleure description de divers processus et peuvent être classées comme :

- **Approche expérimentales** : Le processus considéré est simulé en laboratoire ou à l'échelle pilote. Cette approche fournit des données précieuses sur la performance du système, mais peut manquer d'une description théorique généralisée du processus. Les corrélations développées sont généralement empiriques ou semi-empiriques et ne peuvent donc pas être facilement généralisées.
- **L'approche analytique** : D'autre part, est basée sur des principes physiques. L'approche analytique peut être subdivisée en trois catégories:
 - ✓ Solutions exactes en forme fermée : Avec les solutions exactes, de nombreuses simplifications sont faites pour résoudre des problèmes pratiques de nature complexe : Les solutions approchées tentent de résoudre approximativement les problèmes du monde réel
 - ✓ Solutions approximatives en forme fermée.
 - ✓ Solutions numériques : Les solutions numériques demandent plus d'informations sur le processus et le produit et sur les méthodes de calcul. Ainsi, il existe encore de nombreuses situations dans lesquelles les méthodes simples de prédiction du temps de congélation sont préférées par les ingénieurs en alimentation plutôt que les méthodes numériques plus complexes.

Conclusion

Pour une meilleure compréhension du phénomène et sa modélisation, nous avons introduit dans ce chapitre des modèles de transferts couplés de chaleur et de masse lors de la congélation des aliments, et les méthodes de résolution appliqués. Ainsi que les travaux réalisés dans cet axe, et les différentes approches d'étude.

Le potentiel des transferts lors du processus, est conditionné par plusieurs facteurs et paramètres due aux propriétés dynamique et thermodynamique du fluide utilisée, et au produit qui subit la congélation, les termes de flux, les coefficients de transfert interne et externe, les nombre adimensionnels, la diffusion de la chaleur.

L'interprétation mathématique des phénomènes de transfert massique et énergétique, avec changement de phase, dépend de la structure de l'aliment qu'elle soit dense ou poreuse, car une différence est notée dans les processus interne et même externe de transfert lors de la congélation.

Le flux de masse suivant la loi de Fick et le flux de chaleur et suivant l'équation de la chaleur.

Des changements dans les propriétés de transport tels que la densité, la chaleur spécifique, la conductivité et la chaleur latente de fusion en fonction de la température, à prendre en compte lors de la modélisation.

Chapitre III

Etude Numérique en 2-D des transferts
couplés lors de la congélation d'un
aliment

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équations qui régissent le phénomène de transfert de chaleur et de masse lors de la congélation d'un aliment à convection d'air, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites et initiales de toutes les frontières du domaine. La modélisation des écoulements fluidiques Dans l'aliment, consiste à déterminer en tout point et à chaque instant les variables d'état représentatives de l'écoulement, dans notre étude nous avons négligé les vitesses internes des fluides (liquide, vapeur) dans l'aliment pour simplifié le travail, et nous avons considéré seulement les phénomènes diffusifs et le changement de phase.

III.1. Modèle physique et premières hypothèses

L'étude porte sur la configuration d'un système de congélation à air pulsé, La situation physique indiquée dans la figure (III.1.1) considère le compartiment en fonctionnement, la température initiale de l'air est de -20°C , celle de l'aliment (viande hachée à base de viande de poulet) est de $T_0 = +25^{\circ}\text{C}$.

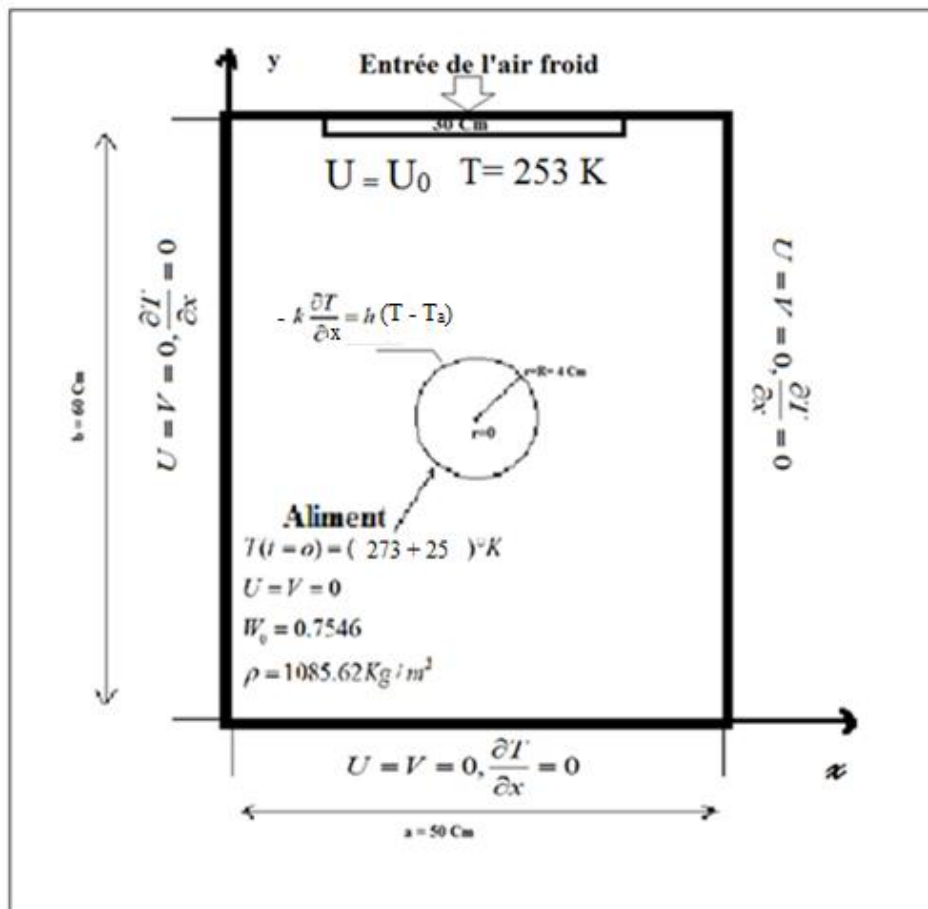


Figure III.1.1 : Schéma de la Situation Physique.

- L'aliment étudié est viande hachée à base de viande de poulet sous forme de cercle plein.
- Sa température de congélation initiale (cryogénique) est de $T_f = -2.8$ C.
- Sa teneur initiale en humidité de 75% ($W = 0,75$ g d'eau - 100 g⁻¹ d'échantillon).
- L'aliment est non déformable.
- Les transferts de matière s'effectuent dans l'aliment et entre la surface et l'air.
- La concentration en eau est présentée en fonction du taux de matière sèche.
- Le transfert de chaleur prend compte la convection et la conduction
- Le modèle est fortement non linéaire car dans les équations les coefficients sont dépendant des variables d'état surtout la température.

III.2. Formulation mathématique

III.2.1. Equations régissant l'air

Le mouvement d'air qui était initialement au repos est causé par la convection de chaleur forcée. Il existe également une différence de concentration entre l'eau liquide contenue dans l'aliment et la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant, ce qui provoque la perte de poids de l'aliment par évaporation. Les hypothèses faites dans l'étude le considèrent un problème bidimensionnel instable, dans lequel le fluide (l'air), est newtonien et le flux est laminaire.

Les propriétés de l'air, à part la densité, sont constantes. On suppose que la densité de l'air varie linéairement avec la température selon l'approximation de Boussinesq. Dans ces hypothèses, le modèle mathématique de l'air pendant le processus de congélation est décrit par les équations suivantes:

➤ Equation de continuité

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial(rv)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

➤ Equation de quantité de mouvement suivant x

$$\frac{\partial(ru)}{\partial t} + u \frac{\partial(ru)}{\partial x} + v \frac{\partial(rv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.2})$$

➤ **Equation de quantité de mouvement suivant y**

$$\frac{\partial(rv)}{\partial t} + u \frac{\partial(rv)}{\partial x} + v \frac{\partial(rv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + r g b. (T - T_{ref}) \quad (III.3)$$

➤ **Equation de l'énergie**

$$\frac{\partial(r_{Air} C_{p,Air} T_{Air})}{\partial t} + u \frac{\partial(r_{Air} C_{p,Air} T_{Air})}{\partial x} + v \frac{\partial(r_{Air} C_{p,Air} T_{Air})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (k_{Air} \frac{\partial T_{Air}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{Air} \frac{\partial T_{Air}}{\partial y}) \quad (III.4)$$

➤ **Equation de la masse (humidité air)**

$$\frac{\partial(W_{Air})}{\partial t} + u \frac{\partial(W_{Air})}{\partial x} + v \frac{\partial(W_{Air})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{Air} \frac{\partial W_{Air}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{Air} \frac{\partial W_{Air}}{\partial y}) \quad (III.5)$$

Tableau III.2.1 : Propriétés Physique de l'air

Propriétés	D _{air} (m ² .s ⁻¹)	ρ _{air} (Kg.m ⁻³)	K _{air} (W.m ⁻¹ .C ⁻¹)	b (K ⁻¹)	C _{p,air} (Kj.Kg ⁻¹ .C ⁻¹)	μ (Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
Valeurs	2.5 10 ⁻⁵	1.287	0.024	3.5 10 ⁻³	1.006	1.7 10 ⁻⁵

➤ **Pression de Saturation de l'air**

Pour le calcul de la pression de saturation P_{sat}^* de l'air, on utilise La formule de Rankine, une simplification de la formule de Dupré, donne des valeurs pour la pression de vapeur saturante de l'eau avec des coefficients légèrement différents (écart de 0,39 à 4,1 %) par rapport aux tables thermodynamiques) (R. Taillet et al, 2009), pour plus de précision on utilise la formule de Rankine.

$$\ln P_{sat}^* = 13.7 - \frac{5120}{T} \quad \text{Formule de Rankine. } T : \text{température en K}$$

$$P_{sat}^* = \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{Formule de Dupré, } T : \text{température en } ^\circ\text{C}$$

➤ **concentration d'humidité dans l'air**

La concentration d'eau dans l'air a été calculée à partir de la pression de saturation de l'air et de l'humidité relative :

$$C_{air}^* = \frac{P_{air}^* (T_{air}^*)}{R.T_{air}^*} \quad (III.6)$$

$$R = \frac{8312}{m} (Nm.Kg^{-1}.K^{-1}) \quad (III.7)$$

III.2.2. Equation régissant l'aliment

Pour l'aliment les équations sont les suivantes

➤ **Equation Thermique (énergétique)**

$$\frac{\partial(r_{Aliment} C_{p_{Aliment}} T_{Aliment})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{Aliment} \cdot \frac{\partial T_{Aliment}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{Aliment} \cdot \frac{\partial T_{Aliment}}{\partial y} \right) \quad (III.8)$$

➤ **Equation massique (concentration de l'eau):**

$$\frac{\partial(W_{Aliment})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Aliment} \cdot \frac{\partial W_{Aliment}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{Aliment} \cdot \frac{\partial W_{Aliment}}{\partial y} \right) \quad (III.9)$$

➤ **La pression de saturation dans l'aliment**

La pression de vapeur de saturation en tous points de l'aliment est indépendante du volume et ne dépend que de la température locale de la viande, et on peut avoir une approximation satisfaisante à partir de la température surfacique jusqu'à la température de l'air, à l'aide de l'équation d'Antoine. (Chuntranuluck et al, 1998)

$$\log_{10} \left(\frac{P_{Aliment}^*}{P_{atm}} \right) = A - \frac{B}{T + C} \quad (III.10)$$

$P_{sat.Aliment}$ = Pression de la vapeur d'eau dans l'aliment (Pa)

P_{Atm} = Pression standard atmosphérique ($1,01325 \cdot 10^5$ Pa)

T = Température absolue (K)

A, B, C = Coefficient d'Antoine

Nous allons utiliser la formule :

$$P_{sat.Aliment} = e^{\left(23.4795 - \frac{3990.5}{T + 233.833} \right)} \times 10^{-3} \quad (III.11)$$

La chaleur latente de vaporisation est approximée comme suit

$$l_{evp} = 2.5 \times 10^6 - 2.5 \times 10^3 T_{Aliment} \quad (III.12)$$

➤ **La concentration de saturation dans l'aliment**

La concentration de saturation et la pression de saturation de l'air (Delgado et Sun, 2003; Sun et Hu, 2003) sont calculées comme :

$$C_{SAT} = \frac{P_{SAT}}{R.T_{SAT}} \quad (III.13)$$

➤ **Calcule des propriétés de l'aliment**

La composition chimique de l'aliment, dont elle est la base de non calcule pour les propriétés thermo physiques, est définie dans le tableau (III.2.2).

Tableau III.2.2: Données sur la composition pour poulet de chair : viande uniquement

	Unit	Value per 100g
Eau	G	75,46
Protéines	G	21,39
Lipides totaux	G	3,08
Carbohydrates	G	0.00
Minéraux et vitamines	G	0,07

Les valeurs suivantes des propriétés alimentaires sont calculées par les formules proposées par Bazinet (2011):

- Une teneur en eau non gelée W_b , l'eau qui ne gèle pas à - 40 ° C, est calculée selon la formule (I.5) proposée par Pham (2014), et noté au chapitre I.

$$W_b = 0.4 X_{proteine} \quad (III.14)$$

Dans le cas de la viande de poulet (voir Tableau III.2.2)

$$X_{Proteine} = 21.39\%$$

On aura donc: $W_b = 8.556 \%$

• **Masse volumique de la viande de poulet :**

- **aux dessus du T_f**

$$\frac{1}{r} = \frac{W}{1000} + \frac{F}{930} + \frac{C}{1550} + \frac{P}{1380}$$

On substituant les valeurs sur le Tableau III.2.2 on aura :

Une valeur proche a celle cité par C. Genot (2000) dans la littérature qui propose une valeur de 1080 Kg/m³

- **Aux dessous de T_f**

$$\frac{1}{r} = \frac{E}{1000} + \frac{F}{930} + \frac{C}{1550} + \frac{P}{1330} + \frac{G}{920}$$

Donc la Valeur finale de la masse volumique du produit lors d'une congélation complète et estimée à :

On peut Prédire la variation de masse volumique à partir du point de congélation par la formule utilisée par O.Nelson (2012) comme suit :

$$r = \frac{1085.62}{\frac{0.98221 + 0.1131.W_{eau} + 0.25746.(1 - W_{eau})}{T}}$$

• **Chaleur massique C_p**

- **Aux dessus de T_{Cr}**

$$C_p^+ = 2,09 F + 1,26 ST + W 4,18$$

- **Aux dessous de T_{Cr}**

$$C_p^- = 2,09 (F+G) + 1,26 ST + 4,18 E$$

On peut aussi prédire la variation de C_p^- par la relation utilisée par Nelson (2012), et elle est comme suit :

$$C_p = \frac{3874 - 2534W_{eau} + 902893.(1 - W_{eau})}{T^2}$$

• **Chaleur latente C_L**

La valeur citée dans la littérature par C. Genot, (2000) est utilisée pour ce modèle

$$C_L = 220 \text{ Kj/Kg}$$

• **Conductivité thermique**

- **Au dessus de point de congélation T_{Cr}**

$$k^+ = 0,096 + 0,34W$$

- **Au dessous du point de congélation T_{Cr}**

$$k^- = 2,4W + 0,26(1-W)$$

• **Diffusivité thermique**

- **Aux dessus du point de congélation**

$$\alpha^+ = (0,0572W + 0,0138F + 0,0003T) \times 10^{-6}$$

- **En dessous du point de congélation**

$$\alpha^- = 0,088 .10^{-6} + (\alpha_{\text{glace}} - 0,088.10^{-6}) W$$

Toutes les valeurs mentionnées ont été utilisées comme données d'entrée dans la simulation numérique.

III.2.5. Conditions aux limites

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

Si $T > T_f$ on doit prendre en considération la chaleur latente d'évaporation de l'eau

$$-k(W, W_{air}, T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r,R} = h(T_s - T_a) - \lambda_v k_g (P_s - P_a) \quad (III.15)$$

Si $T < T_f$ en prend en considération la chaleur latente de sublimation

$$-k(W, W_{air}, T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r,R} = h(T_s - T_a) - \lambda_{sbl} k_g (P_s - P_a) \quad (III.16)$$

La diffusivité de la masse vers la surface est équilibré par l'évaporation et la sublimation

$$-D(T) r_{ds} \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r,R} = k(T_s - T_a) - (P_s - P_a) \quad (III.17)$$

$$W_{l,eq} = (W_0 - W_b) \frac{T_f - T_0}{T - T_0} \quad (III.18)$$

III.3. Modélisation du phénomène

$$r C p_{app} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k_{eff} \nabla T) \quad (III.19)$$

$$r_{ds} \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla (D_{wT} \nabla T) \quad (III.20)$$

Si $T > T_f$ absence de la glace

$$r C p_{app} = r_s (C p_{ds} + W C p_w)$$

$$k_{eau-con} = \frac{f_g}{t} \frac{l_v D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}^*} \frac{dP_{liq}^*}{dT} \quad (III.21)$$

$$D = \frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w a_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - a_w P_{liq}^*} \frac{dP_{liq}^*}{dT} \quad (III.22)$$

Si $T < T_f$ on assiste a une présence de la glace

$$r C p_{app} = r_{ds} \left[C p_{ds} + (W_b + W_{l,eq}) C p_l + W_{ice} C p_{ice} + l_f \frac{dW_{l,eq}}{dT} \right] \quad (III.23)$$

$$k_{eff} = k + \frac{f_g}{t} \frac{l_v D_v M_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{ice}^*} \frac{dP_{ice}^*}{dT} \quad (III.24)$$

$$D = \frac{f_g}{t} \frac{D_v M_w}{R_g T} \frac{P_{atm}}{P_{atm} - P_{ice}^*} \frac{dP_{ice}^*}{dT} \quad (III.25)$$

En équilibre les relations suivante doivent réagirent

$$W_{l,eq} = (W_0 - W_b) \frac{T_f - T_0}{T - T_0} \quad (III.26)$$

$$a_w = \frac{P_{ice}^*(T_f)}{P_{liq}^*(T_f)} \quad (III.27)$$

III.4. Méthodes de résolution

Dans notre travail nous avons étudié et résolu le modèle de transfert de chaleur et de masse suivant deux cas :

- **L'aliment seul:** On a utilisé la méthode des volumes finis en cordonnés cylindriques dans ce cas on a construit un programme fortran, pour l'obtention des champs de température et humidité sous forme de contours et des profils et tous cela en fonction du temps.
- **L'aliment dans l'enceinte frigorifique :** Ce modèle a été résolu à l'aide du code FLUENT, après une construction de géométrie et maillage avec le logiciel GAMBIT

III.4.1. Discrétisation par la méthode des volumes finis dans l'aliment seul

La technique des volumes finis consiste à discrétiser la forme intégrale des équations de conservations plutôt que leurs formes différentielles. Le résultat de l'intégration exprime la conservation exacte de la grandeur physique f , sur chaque volume de contrôle. Cette relation claire entre l'algorithme numérique et le principe de conservation physique détermine la principale attraction de la méthode des volumes finis et son concept devient plus facile à comprendre.

Cette méthode va être appliquée sur les équations de transport qui peuvent être écrites sous la forme générale suivante:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r u f}{\partial r} + \frac{\partial w f}{\partial q} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\Gamma \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial q^2} \right) + a.S + b \quad (\text{III.28})$$

L'évaluation des différentes intégrales de l'équation de convection-diffusion ci-dessous exige qu'on fasse un certain nombre d'approximations de façon à former un système d'équation linéaires liant entre elles les valeurs de la fonction f aux points du maillage P

Pour aborder l'intégration de l'équation de transport, nous commençons par définir à l'intérieur du domaine de calcul un maillage constitué d'un réseau de points P . L'approche du type volume de contrôle exige que l'on définisse autour du point P un volume élémentaire sur lequel on va intégrer l'équation aux dérivées partielles.

$$\int_{t \text{ VC}} \left(\underbrace{\frac{\partial f}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial r u f}{\partial r}}_2 + \underbrace{\frac{\partial w f}{\partial q}}_3 \right) r \cdot dr \cdot dq \cdot dt = \int_{t \text{ VC}} \left(\underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right)}_4 + \underbrace{\frac{1}{r^2} \left(\Gamma \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial q^2} \right)}_5 + \underbrace{a \cdot S + b}_6 \right) r \cdot dr \cdot dq \cdot dt \quad (\text{III.29})$$

Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectifs doivent posséder un côté commun. Il s'en suit que la réunion de tous les volumes de contrôle couvre l'ensemble du domaine de calcul. Cette propriété fondamentale va nous permettre de mettre en évidence des propriétés de conservation des flux locaux et globaux

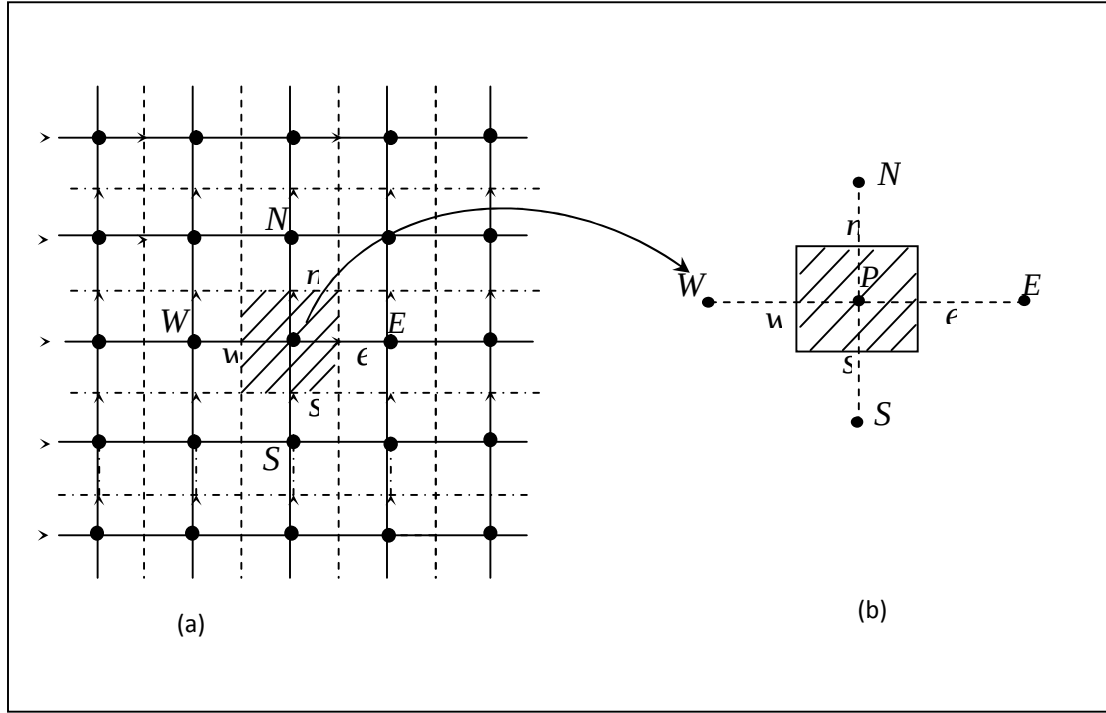


Figure III.4.1 : Schéma de discrétisation. (a) domaine de calcul, (b) volume de contrôle.

III.4.2. Discrétisation des Différents Termes

➤ Terme de Stockage

$$\int_w^e \int_s^n r \cdot dr \cdot dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) dt = f \Big|_t^{t+\Delta t} \cdot \frac{r^2}{2} \Big|_s^n \cdot q \Big|_w^e = \frac{1}{2} \cdot (f_p^{t+\Delta t} - f_p^t) \cdot (r_n^2 - r_s^2) \cdot \Delta q = (f_p^{t+\Delta t} - f_p^t) \cdot \Delta V \quad (\text{III.30})$$

➤ **Terme Convectif Suivant r :**

$$\int_s^n \left(\frac{\partial r u f}{\partial r} \right) dr \cdot \int_w^e dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = (r u f)_s^n \cdot \Delta z \cdot \Delta t = \left((r u f)_n - (r u f)_s \right) \Delta q \cdot \Delta t \quad (\text{III.31})$$

$$\int_s^n \left(\frac{\partial r u f}{\partial r} \right) dr \cdot \int_w^e dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = (F_n \cdot f_n - F_s \cdot f_s) \cdot \Delta t$$

$$F_n = r_n \cdot u_n \cdot \Delta q ; \quad F_s = r_s \cdot u_s \cdot \Delta q$$

➤ **Terme Convectif Suivant q :**

$$\int_s^n r \cdot dr \cdot \int_w^e \left(\frac{\partial w f}{\partial q} \right) dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = (w \cdot f)_w^e \cdot \frac{r^2}{2} \Big|_s^n \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot \left((w f)_e - (w f)_w \right) \cdot (r_n^2 - r_s^2) \cdot \Delta t \quad (\text{III.32})$$

$$\int_s^n r \cdot dr \cdot \int_w^e \left(\frac{\partial w f}{\partial q} \right) dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = (F_e \cdot f_e - F_w \cdot f_w) \cdot \Delta t$$

$$F_e = \frac{1}{2} \cdot (r_n^2 - r_s^2) \cdot w_e ; \quad F_w = \frac{1}{2} \cdot (r_n^2 - r_s^2) \cdot w_w$$

➤ **Terme Diffusif Suivant r**

$$\int_s^n \underbrace{\frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right)}_4 dr \cdot \int_w^e dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = \left(\Gamma \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right)_s^n \cdot \Delta q \cdot \Delta t = \left(\left(\Gamma \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right)_n - \left(\Gamma \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right)_s \right) \Delta q \cdot \Delta t \quad (\text{III.33})$$

$$= \left(\Gamma_n \cdot r_n \cdot \frac{f_N - f_P}{\Delta r_{NP}} - \Gamma_s \cdot r_s \cdot \frac{f_P - f_S}{\Delta r_{PS}} \right) \Delta q \cdot \Delta t = (D_n \cdot (f_N - f_P) - D_s \cdot (f_P - f_S)) \cdot \Delta t$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \cdot r_n \cdot \Delta q}{\Delta r_{NP}} ; \quad D_s = \frac{\Gamma_s \cdot r_s \cdot \Delta q}{\Delta r_{PS}}$$

➤ **Terme Diffusif Suivant q**

$$\begin{aligned}
 \int_s^n \frac{dr}{r} \cdot \int_w^e \frac{\partial}{\partial q} \left(\Gamma \cdot \frac{\partial f}{\partial q} \right) \cdot dq \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt &= \left(\Gamma \cdot \frac{\partial f}{\partial q} \right)_w^e \cdot (\ln(r_n) - \ln(r_s)) \cdot \Delta t \\
 &= \left(\left(\Gamma \cdot \frac{\partial f}{\partial q} \right)_e - \left(\Gamma \cdot \frac{\partial f}{\partial q} \right)_w \right) \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_s}\right) \cdot \Delta t \\
 &= \left(\left(\Gamma_e \cdot \frac{f_E - f_P}{\Delta q_{EP}} \right) - \left(\Gamma_w \cdot \frac{f_P - f_W}{\Delta q_{PW}} \right) \right) \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_s}\right) \cdot \Delta t \\
 &= (D_e \cdot (f_E - f_P) - D_w \cdot (f_P - f_W)) \cdot \Delta t
 \end{aligned} \tag{III.34}$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e \cdot \ln(r_n / r_s)}{\Delta q_{EP}}; \quad D_w = \frac{\Gamma_w \cdot \ln(r_n / r_s)}{\Delta q_{PW}}$$

➤ **Terme Source**

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n (a \cdot f + b) r \cdot dr \cdot dq \cdot dt = \frac{1}{2} (a \cdot f_P + b) \cdot (r_n^2 - r_s^2) \cdot \Delta q \cdot \Delta t = (a \cdot f_P + b) \cdot \Delta V \cdot \Delta t \tag{III.35}$$

On considère que le terme source S_f est linéaire par rapport (f). Après une substitution dans l'équation de transport-diffusion et en appliquant un schéma implicite pour le temps, on obtient la forme discrétisée suivante :

$$\begin{aligned}
 (f_P^{t+\Delta t} - f_P^t) \frac{\Delta V}{\Delta t} + (F_e \cdot f_e^{t+\Delta t} - F_w \cdot f_w^{t+\Delta t}) + (F_n \cdot f_n^{t+\Delta t} - F_s \cdot f_s^{t+\Delta t}) &= (D_e \cdot (f_E^{t+\Delta t} - f_P^{t+\Delta t}) - D_w \cdot (f_P^{t+\Delta t} - f_W^{t+\Delta t})) + \\
 (D_n \cdot (f_N^{t+\Delta t} - f_P^{t+\Delta t}) - D_s \cdot (f_P^{t+\Delta t} - f_S^{t+\Delta t})) &+ (a \cdot f_P^{t+\Delta t} + b) \cdot \Delta V
 \end{aligned} \tag{III.36}$$

Pour arriver à une forme finale, on doit choisir un schéma de discrétisation des termes convectifs. Le schéma employé pour la discrétisation est le schéma hybride. Ce schéma, dont la précision spatiale est réduite au premier ordre, possède les propriétés de transport et de conservation. Le schéma hybride se réduit à l'approximation du schéma centrée CSD lorsque $|Pe_m| < 2$, mais il devient identique au schéma Upwind UDS1 lorsque $|Pe_m| > 2$.

Après un réarrangement on aura :

$$\begin{aligned}
 |Pe_m| &= \left| \frac{F}{D} \right| < 2 \\
 a_P \cdot f_P^{t+\Delta t} &= a_w \cdot f_W^{t+\Delta t} + a_e \cdot f_E^{t+\Delta t} + a_s \cdot f_S^{t+\Delta t} + a_n \cdot f_N^{t+\Delta t} + b \cdot \Delta V + a_P^0 \cdot f_P^t
 \end{aligned} \tag{III.37}$$

➤ **Schéma centrée CSD**

$a_w = D_w + \frac{F_w}{2}$	$a_e = D_e - \frac{F_e}{2}$	$a_s = D_s + \frac{F_s}{2}$	$a_n = D_n - \frac{F_n}{2}$
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

➤ **Schéma Upwind UDS1**

$a_w = D_w + \max(F_w, 0)$	$a_e = D_e + \max(-F_e, 0)$	$a_s = D_s + \max(F_s, 0)$	$a_n = D_n + \max(-F_n, 0)$
----------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------

➤ **Schémahybride :**

$a_w = \max\left(F_w, D_w + \frac{F_w}{2}, 0\right)$	$a_e = \max\left(-F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0\right)$
$a_s = \max\left(F_s, D_s + \frac{F_s}{2}, 0\right)$	$a_n = \max\left(-F_n, D_n - \frac{F_n}{2}, 0\right)$
$a_p^0 = \frac{1}{2}(r_n^2 - r_s^2) \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t}$	$a_p = a_p^0 + a_w + a_e + a_s + a_n - a \cdot \Delta V$

III.4.3. Schémas Implicite ADI

Le schéma implicite est un schéma qui n'est pas restreinte au critère de stabilité, c'est-à-dire qu'elle est stable pour tout Δt : autrement dit elle est inconditionnellement stable: L'une de ces schémas implicite est le schéma (ADI): elle est très efficace pour la résolution des problèmes des phénomènes de transport, bidimensionnels.

Ce schéma consiste à diviser le pas de temps Δt en deux pas $t \rightarrow t + \Delta t / 2 \rightarrow t + \Delta t$:

Le premier pas $t \rightarrow t + \Delta t / 2$ en prenant l'implicite suivant q au temps $(t + \Delta t / 2)$ et l'explicite suivant r au temps (t)

$$-a_w \cdot f_w^{t+\frac{\Delta t}{2}} + a_p \cdot f_p^{t+\frac{\Delta t}{2}} - a_e \cdot f_e^{t+\frac{\Delta t}{2}} = a_s \cdot f_s^t + a_n \cdot f_n^t + a_p^0 \cdot f_p^t + b \cdot \Delta V \quad (III.38)$$

Le deuxième pas $t + \Delta t / 2 \rightarrow t + \Delta t$ en prenant l'implicite suivant r au temps $(t + \Delta t)$ et l'explicite suivant q au temps $(t + \Delta t / 2)$

$$-a_s \cdot f_s^{t+\Delta t} + a_p \cdot f_p^{t+\Delta t} - a_n \cdot f_n^{t+\Delta t} = a_w \cdot f_w^{t+\frac{\Delta t}{2}} + a_e \cdot f_e^{t+\frac{\Delta t}{2}} + a_p^0 \cdot f_p^{t+\frac{\Delta t}{2}} + b \cdot \Delta V \quad (III.39)$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à expliquer le phénomène de transfert de chaleur et de masse par une modélisation mathématique. Afin de pouvoir visualiser son évolution. Une formulation mathématique a été mise en place, quelques modifications dans les termes sources ont été effectuées afin de bien cerner les variations lors du processus, parlons bien de la conductivité, la masse volumique et la chaleur latente. Les variations au niveau surfacique prenant compte de l'air, ont été jugées par rapport au coefficient de transfert h . En outre nous avons résolu le modèle de transfert de chaleur et de masse en utilisant la méthode des volumes finis en coordonnées cylindriques, à l'aide du programme Fortran, dans le domaine **aliment seul**.

Cependant dans le cas d'étude de **l'aliment dans l'enceinte frigorifique** on a fait recourir au code FLUENT, après une construction de géométrie et maillage avec le logiciel GAMBIT.

Chapitre IV

Résultats Numériques et interprétations

Introduction

Dans ce chapitre on va procéder à la résolution de notre modèle mathématique et le calcule numérique à l'aide du langage programmer avec le code fortran 90, et afficher les résultats obtenus et les discutés.

Notre étude qui porte sur un aliment (viande hachée de poulet), sur une géométrie bidimensionnel (2-D), dans les deux cas :

- 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.

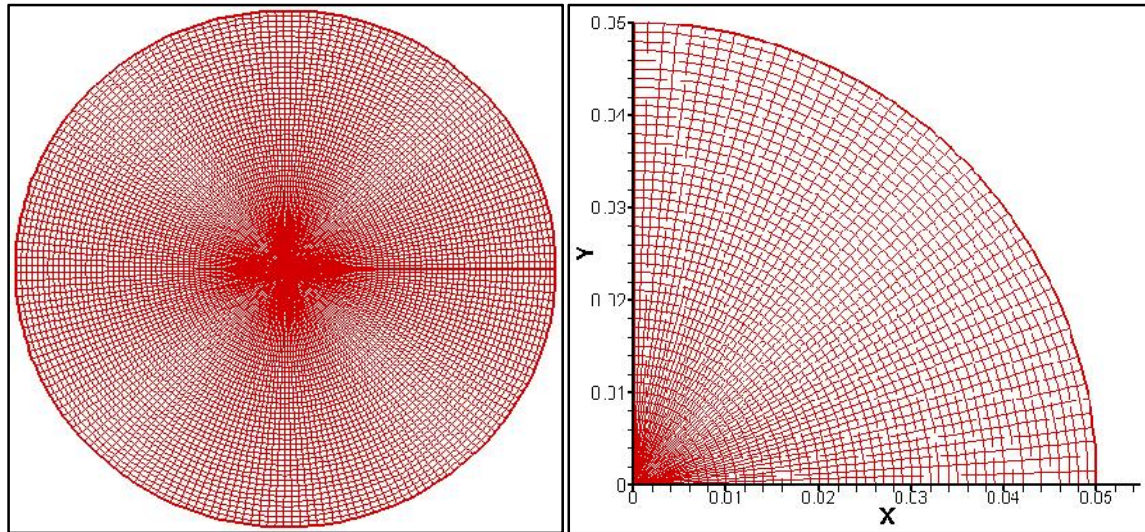
Ils focalisent sur l'effet du coefficient de transfert par convection, et la conductivité de l'aliment, sur l'évolution de température et le taux de perte par les deux phénomènes évaporation et sublimation. Une attention a été donnée à la première phase de congélation, là où le taux de perte par évaporation est important.

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

IV.1- Evolution des paramètres dans le cas de l'aliment seul

IV.1.1. Présentation du domaine

L'aliment simulé est représenté en deux dimensions (2-D), sous la forme d'un cercle plein (disque), d'un rayon $R = 0.05$ m. Mais nous avons pris en considération qu'un quart du cercle (quadrant), cela pour minimiser le temps de calcul.



(a)

(b)

Figure IV.1.1 : Schéma avec maillage 2-D de l'aliment

(a) Représentation en cercle

(b) Représentation en quadrant

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.

IV.1.2. Phase de refroidissement (pré-congélation)

IV.1.2.1. Champs de température dans l'aliment :

Dans les deux figures (IV.1.2) et (IV.1.3), on remarque que la distribution de la température dans l'aliment varie du centre vers la surface. La température à la surface de l'aliment rejoint la température de congélation avant le centre, cela s'explique par un coefficient de transfert de chaleur à la surface, supérieur à la conductivité dans l'aliment.

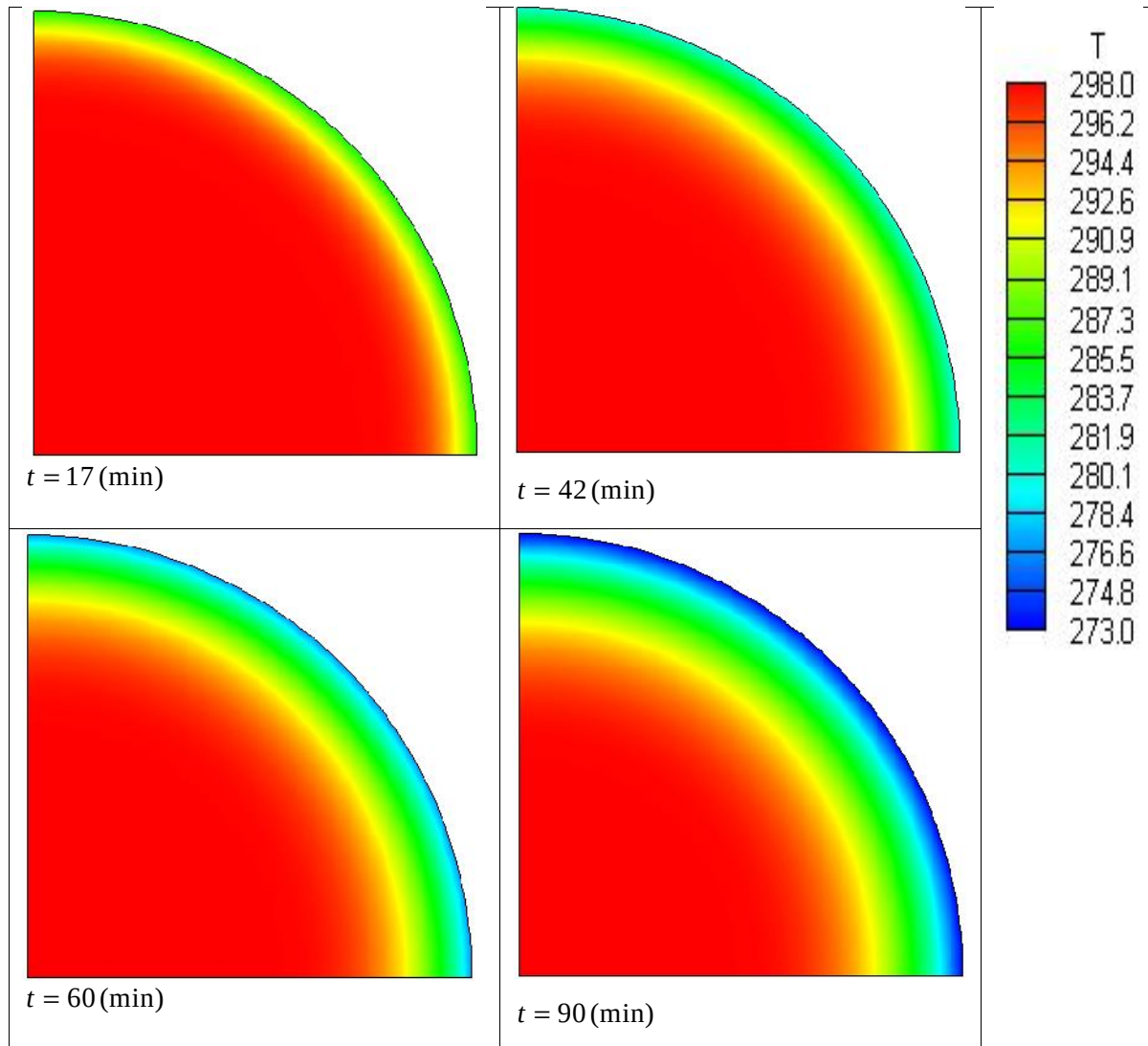


Figure IV.1.2: Champs température pour $h_T=20 \text{ w/m}^2.\text{K}$ avec une conductivité faible
Durant la phase de refroidissement.

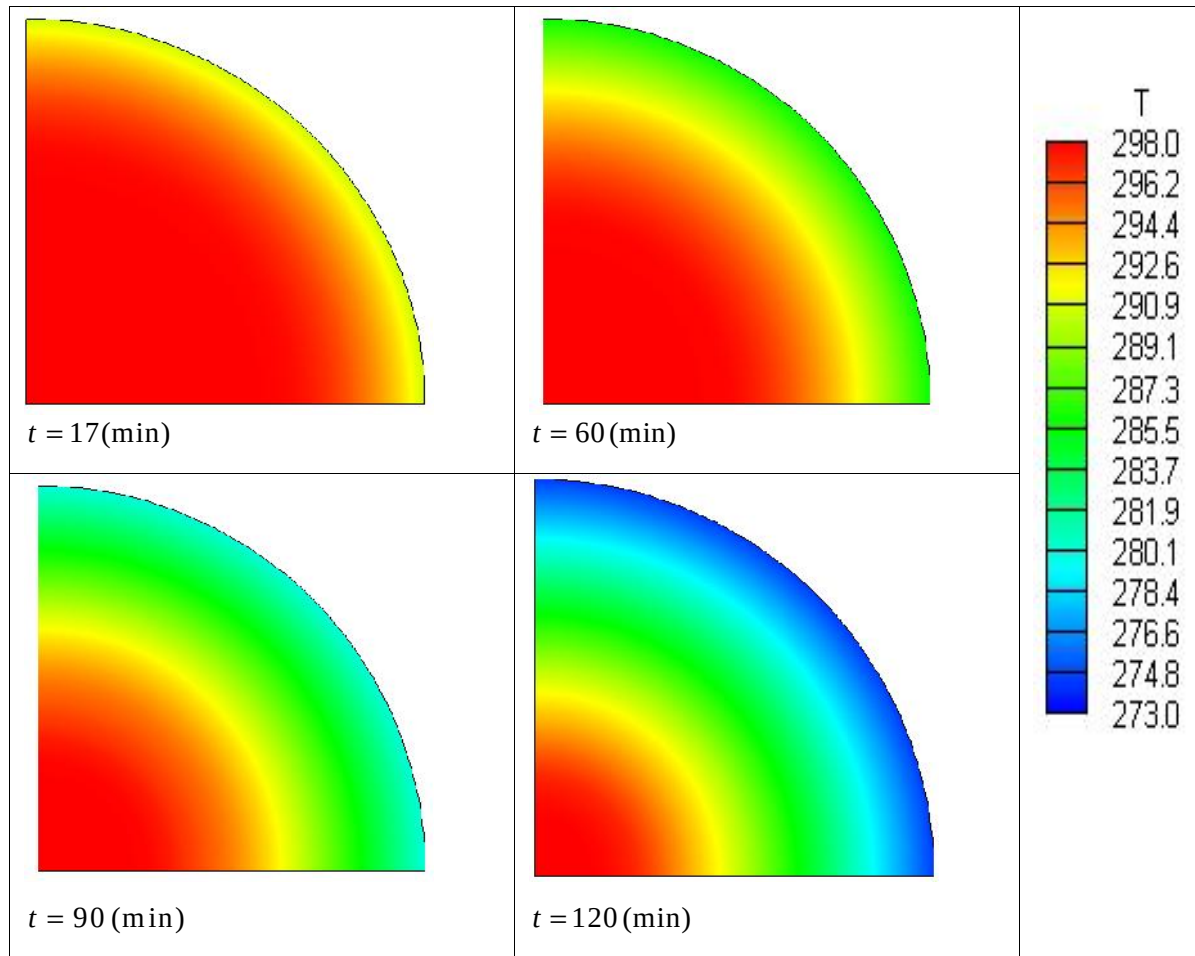


Figure IV.1.3 : champs température pour $h_T=20 \text{ w/m}^2.\text{K}$ avec une forte conductivité
Durant la phase de refroidissement.

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. 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.

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 $h_T= 20 \text{ W/m}^2.\text{K}$, 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, 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.

IV.1.2.2. Profile de température dans l'aliment

Les profiles de température dans les figures (IV.1.4) et (IV.1.5) 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.

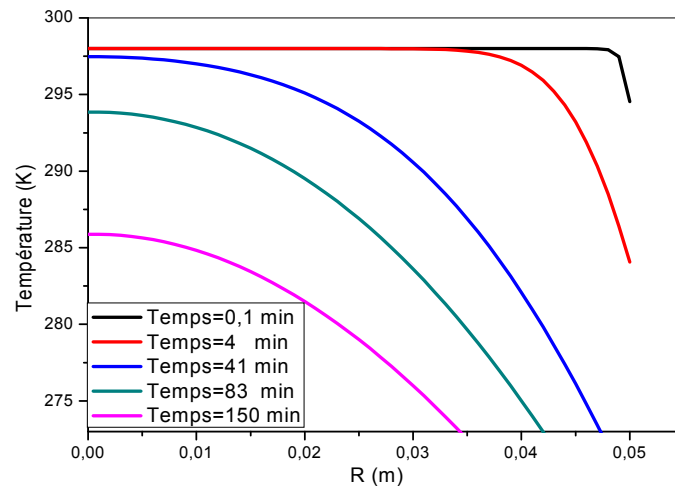


Figure IV.1.4 : Profile de Température avec une conductivité faible pour différents Temps à $h_T = 20\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

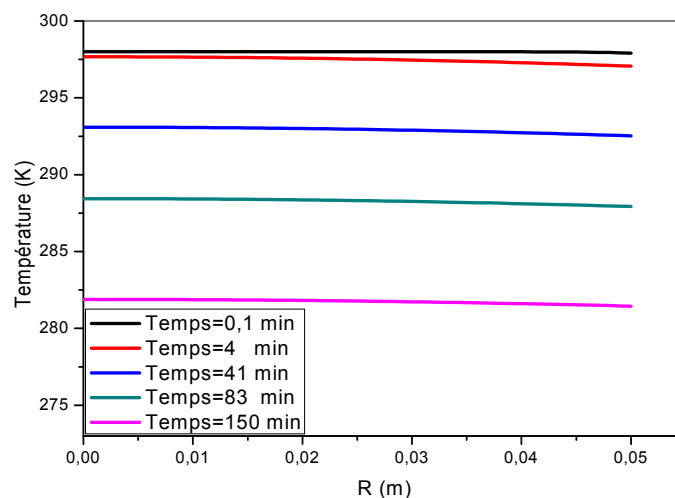


Figure IV.1.5 : Profile de Température pour différents Temps à forte conductivité.

On peut dire qu'une congélation uniforme sera faite si la conduction thermique de l'aliment est améliorée, qui va avoir un impact direct sur la vitesse de congélation et le flux des transferts couplés.

On remarque dans la figure (IV.1.6) que la répartition de la température n'est pas homogène suivant le rayon (R) dans plusieurs positions, le temps nécessaire pour que la température de l'aliment, rejoigne la valeur de température cryogénique, varie avec la variation du coefficient de transfert.

L'effet du coefficient de transfert est souligné par plusieurs auteurs (A. Kondjoyan et al, (1993), A. M. Tocci et R. H. Mascheroni, (1994) ; A. E. Delgado et D. W Sun, (2001) ; R. Mekprayoon et C. Tangduangdeem (2012) ; M. SADOT. (2016))

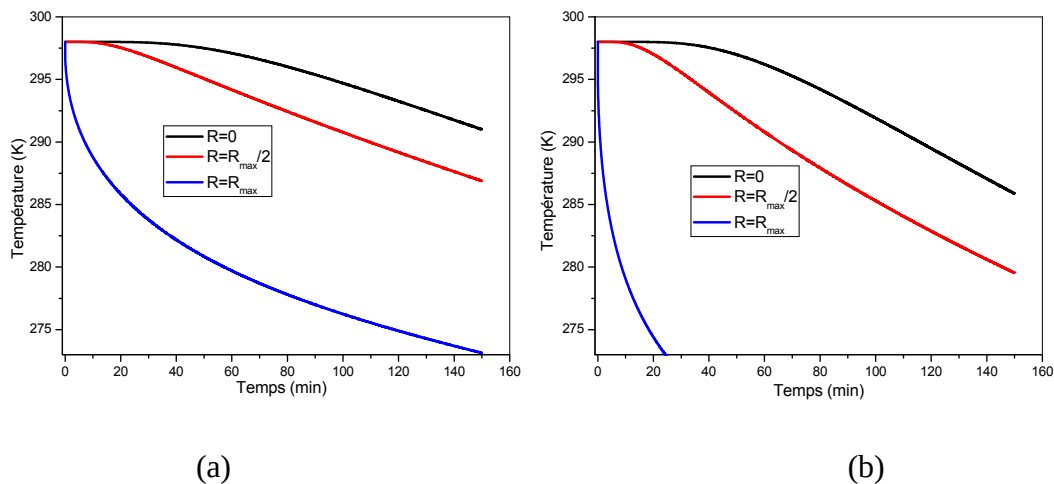


Figure IV.1.6 : Evolution de température dans différentes position dans l'aliment

$$(a) \text{ à } h_T = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad ; \quad (b) \text{ à } h_T = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

En outre, la résistance thermique interne retarde l'échange de chaleur entre le centre de l'aliment et sa surface en contact avec l'air ambiant. Alors l'écart de température entre la surface et le centre thermique du produit est amélioré par le taux de transfert (h) en surface, entraînant un potentiel thermique, favorisant l'extraction de la chaleur et la diminution de la température dans de courtes durées.

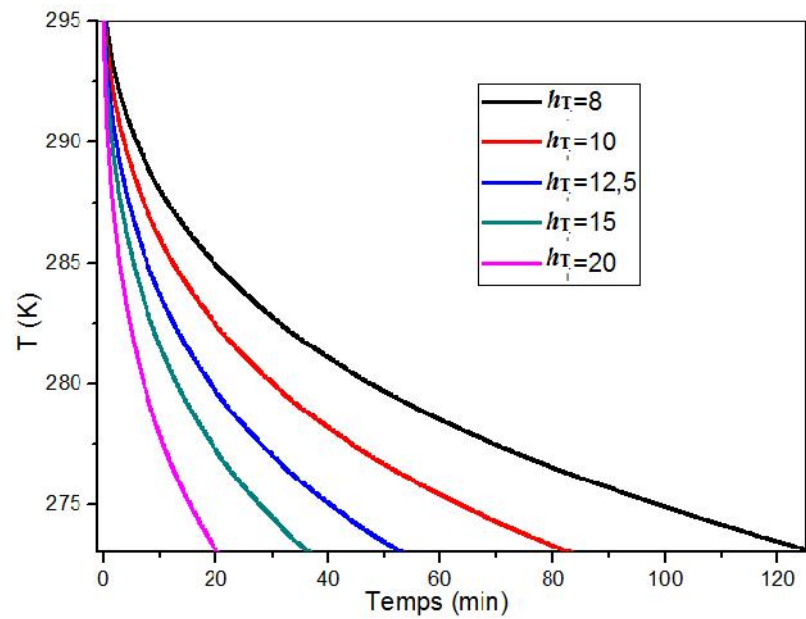


Figure IV.1.7: Evolution de température pour différentes valeurs de h_T à la surface de l'aliment.

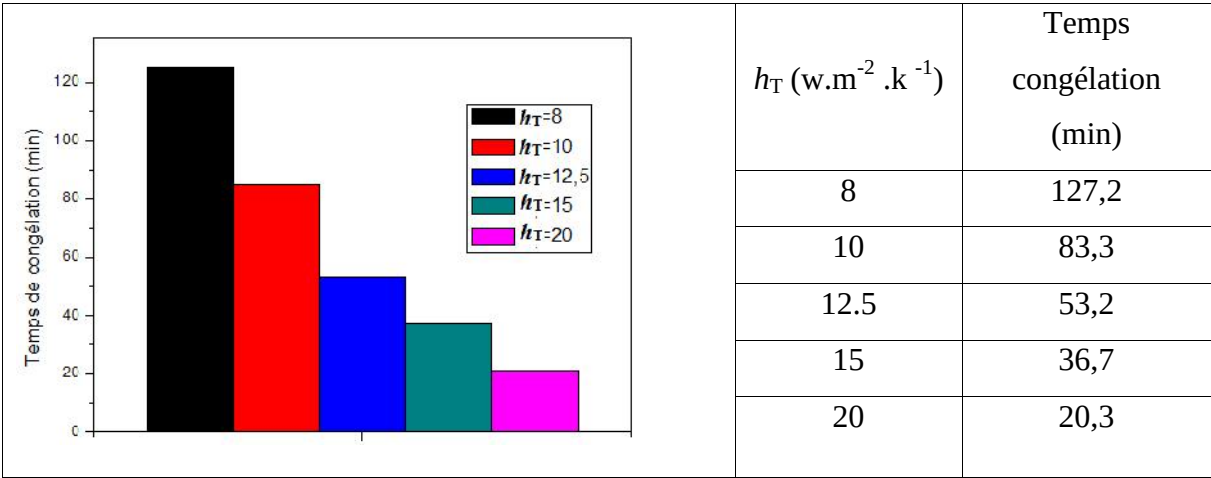


Figure IV.1.8: prédiction du temps de congélation pour différentes valeurs de h_T à la surface de l'aliment.

L'effet de (h_T) sur le temps de congélation est visible dans la figure (IV.1.8) une température de 0 °C est atteinte à un temps de 20.3 min dans le cas du coefficient de transfert élevée $h_T = 20 \text{ w.m}^{-2} . \text{k}^{-1}$, alors que la diminution du coefficient de transfert jusqu'à $h_T = 8 \text{ w.m}^{-2} . \text{k}^{-1}$, retarde la congélation à la surface dans notre cas le temps $t = 127.2 \text{ mn}$.

IV.1.2.3. Profile de diffusion de l’eau vers la surface pour une variation du coefficient de transfert convectif

La concentration d'eau et son évolution dans le temps sont les changements les plus significatifs se produisent à la surface, la variation du coefficient de transfert par convection (h_T) a un effet sur la quantité de perte en eau de l'aliment, comme il est montré dans la figure (IV.1.9), pour des valeurs élevées du coefficient de transfert, jusqu'à une valeur de ($h_T = 20 \text{ W/m}^2.\text{K}$) on assiste à une perte minimale en eau d'environ 0.137 (perte par évaporation rapporté au taux d'humidité initial $W_0= 0.75$), et un temps de refroidissement réduit. Pour une valeur faible du coefficient de transfert $h_T = 8 \text{ W/m}^2.\text{K}$ on aura une perte de 0.289 d'humidité.

On remarque pour une variation du coefficient de transfert $h_T = 8 \text{ W/m}^2.\text{K}$ jusqu'à $h_T = 20 \text{ W/m}^2.\text{K}$ on peut récupérer une différence de $0.289 - 0.137 = 0.152$ perte en eau par évaporation lors du processus.

Signalons que l'évaporation ce termine dès que la congélation débute, lorsque la couche surfacique est congelée.

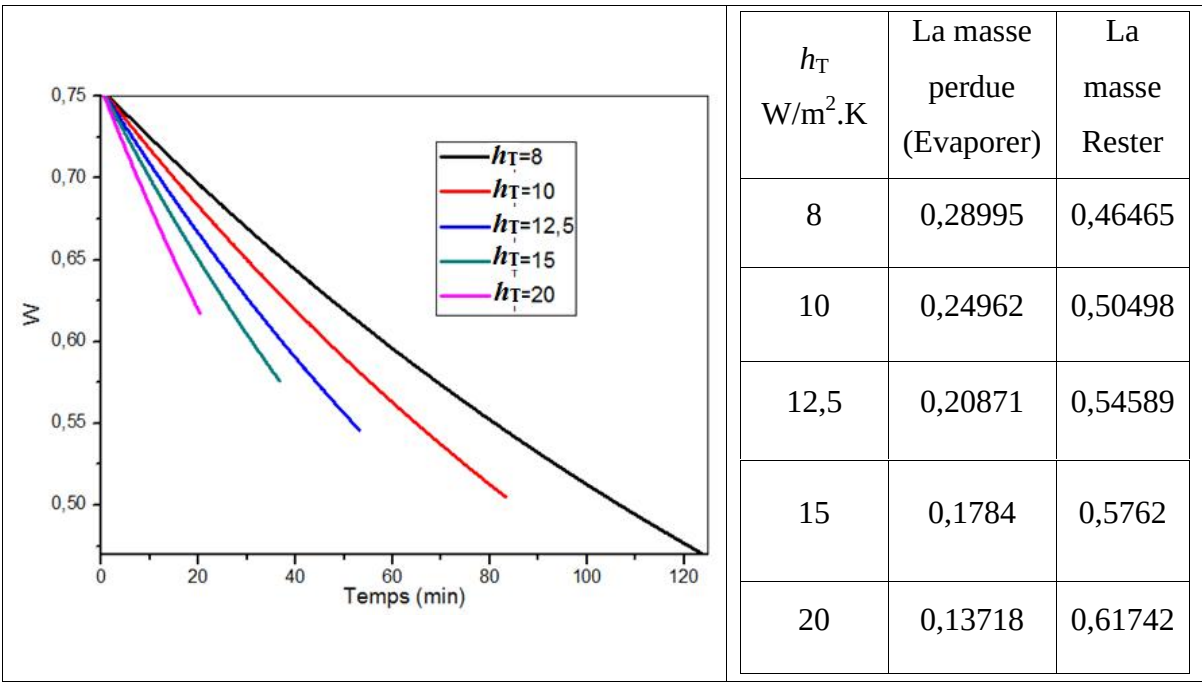


Figure IV.1.9: Evolution de la fraction d’eau pour différentes valeurs de h_T .

La perte de poids par évaporation lors de la première phase de congélation est le principal paramètre lié au transfert de masse. Cette valeur peut être prédite par le programme établie.

La concentration de l'eau dans l'aliment varie localement à proximité de la surface car le coefficient de diffusion de masse est faible. Cela rend les gradients de concentration bas à l'intérieur de l'aliment et plus élevés à la surface, dans la figure (IV.1.10) qui représente la perte en eau suivant le changement du coefficient de transfert convectif lors de la première phase de congélation, on peut prédire le mouvement de l'humidité dans l'aliment, selon une variation des conditions de congélation.

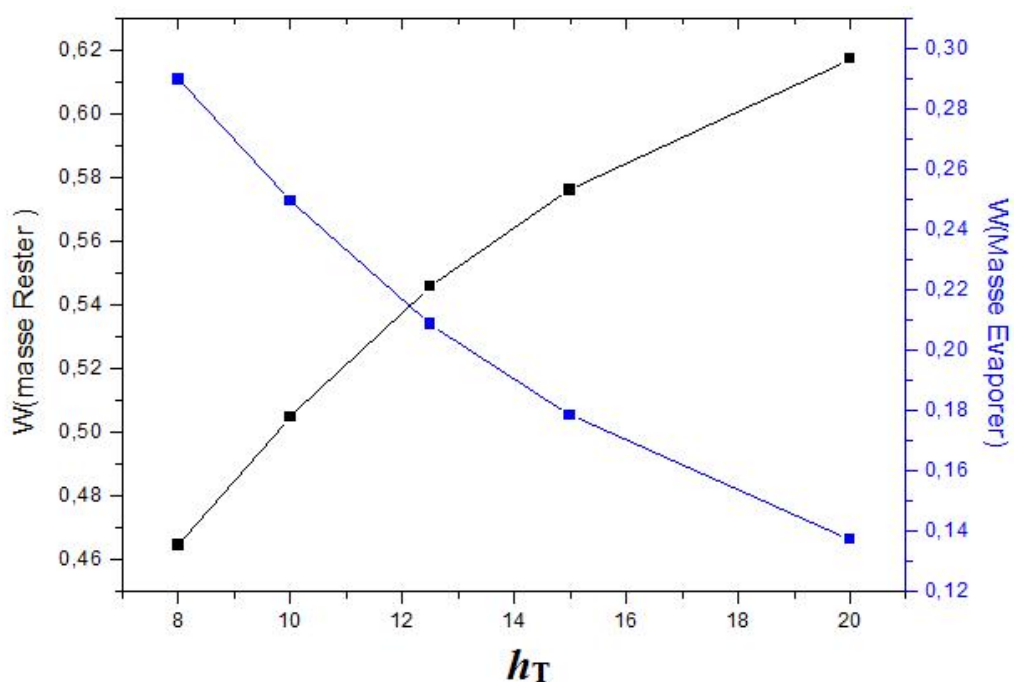


Figure IV.1.10: Prédiction de la masse restée et la masse évaporée pour différentes valeurs de h_T à la surface.

On a supposé que l'activité d'eau dans la viande était égale à $a_w = 0,95$, une valeur tirée de la littérature. L'activité de l'eau superficielle, en fonction de la teneur en eau évaluée à la surface de la viande hachée, au cours du processus de congélation s'est révélée être dans la plage d'activité élevée de l'eau, $a_w = 0,95$, en raison de la diffusion continue de l'eau depuis l'intérieur de la nourriture vers la surface.

IV.1.3. Phase de congélation

IV.1.3.1. Propagation du front de solidification

L'avancement du front de solidification est translaté par le taux de propagation de la glace dont la tenure est mentionnée W_{ice} dans la figure (IV.1.11).

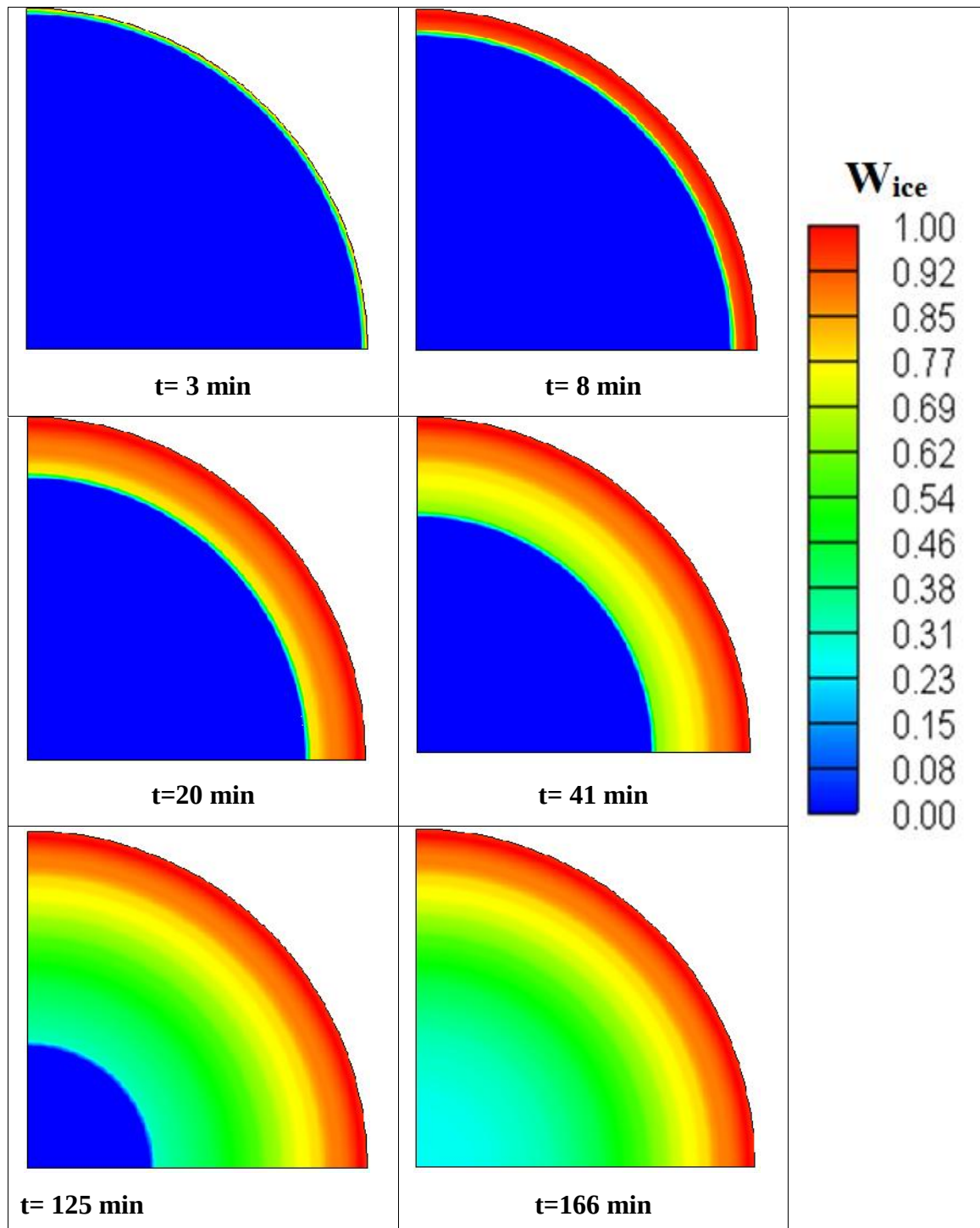


Figure IV.1.11 : Déplacement du front mobile de congélation.

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_{ice} 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 $(W_{ice} + W_b)$, où W_b est la fraction d'eau liée non congelée.

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.

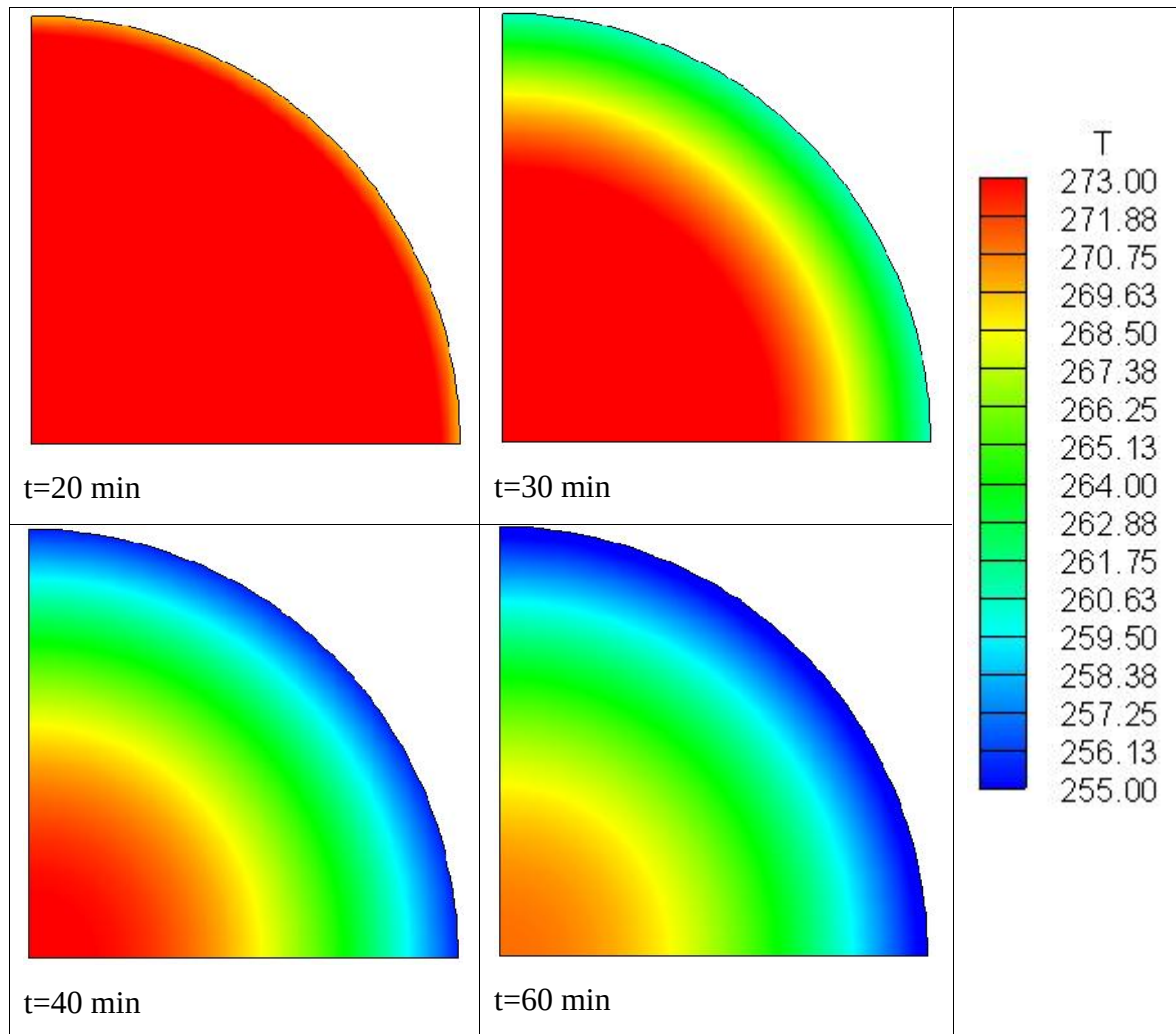


Figure IV.1.12: Champs de température pour $h_T = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (phase de congélation).

Ce cycle de gains et de perte, ce répète jusqu'à solidification de toute l'aliment. La forme dans la figure indique que sur le bord le coefficient de transfert de masse est plus grand que dans le centre, ce qui donne lieu à un transfert de masse plus rapide dans ces zones.

Dans la figure (IV.1.12) on remarque qu'au temps $t = 20$ min, dans la majorité de l'aliment la température est de 273 K, mais à la surface on constate des différences de plages de température allant de 255 K à 270 K, dans les formes qui suivent on peut voir clairement les différentes plages de température, et le transfert de chaleur qui se déroule entre les couches internes de l'aliment, la propagation du transfert dans l'aliment se réalise d'une façon exponentielle de l'extérieur vers l'intérieur.

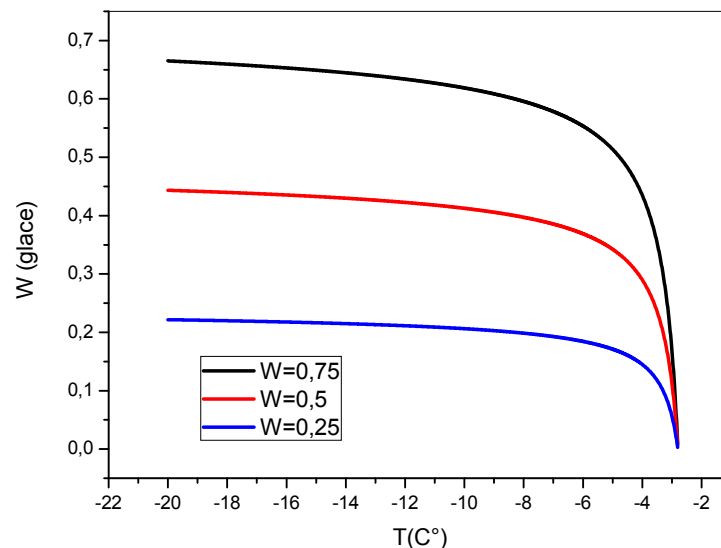


Figure IV.1.13: Variation du taux de glace en fonction de l'humidité et la température.

Le taux de la glace formée lors du processus de congélation est en fonction de l'humidité initiale de l'aliment et l'humidité des couches internes de l'aliment à l'instant où la température atteint la valeur de congélation. Les formes des courbes dans la figure (IV.1.13) nous montre qu'il y'a une accélération dans la formation de la glace dans le début, et à une plage de température de -2,8 °C jusqu'à environ -5 °C. Les cristaux de glace ont été déjà formés, la température de la viande continue à diminuer à mesure que la chaleur sensible était libérée. Puis on constate un ralentissement de sa formation jusqu'à épuisement de toute l'humidité liquide dans l'aliment.

IV.2. Etude dynamique de l'enceinte de congélation

L'évolution transitoire des vitesses et de température de l'air à l'intérieur du congélateur de forme carré, ainsi que les champs de température à l'intérieur d'un morceau de viande hachée de poulet de forme de disque ont été étudiés en deux dimensions à l'aide du code FLUENT, pour les deux modes de convection naturelle et forcée.

Les situations physiques dans les deux cas de monde de transferts par convection naturelle et forcée son représentés dans les figures (IV.2.1) et (IV.2.6).

IV.2.1. convection naturelle

Dans la figure (IV.2.1), La température est imposée pour chaque paroi de l'enceinte, dans les quartes cotés, à une température de 253 K (-20 °C).

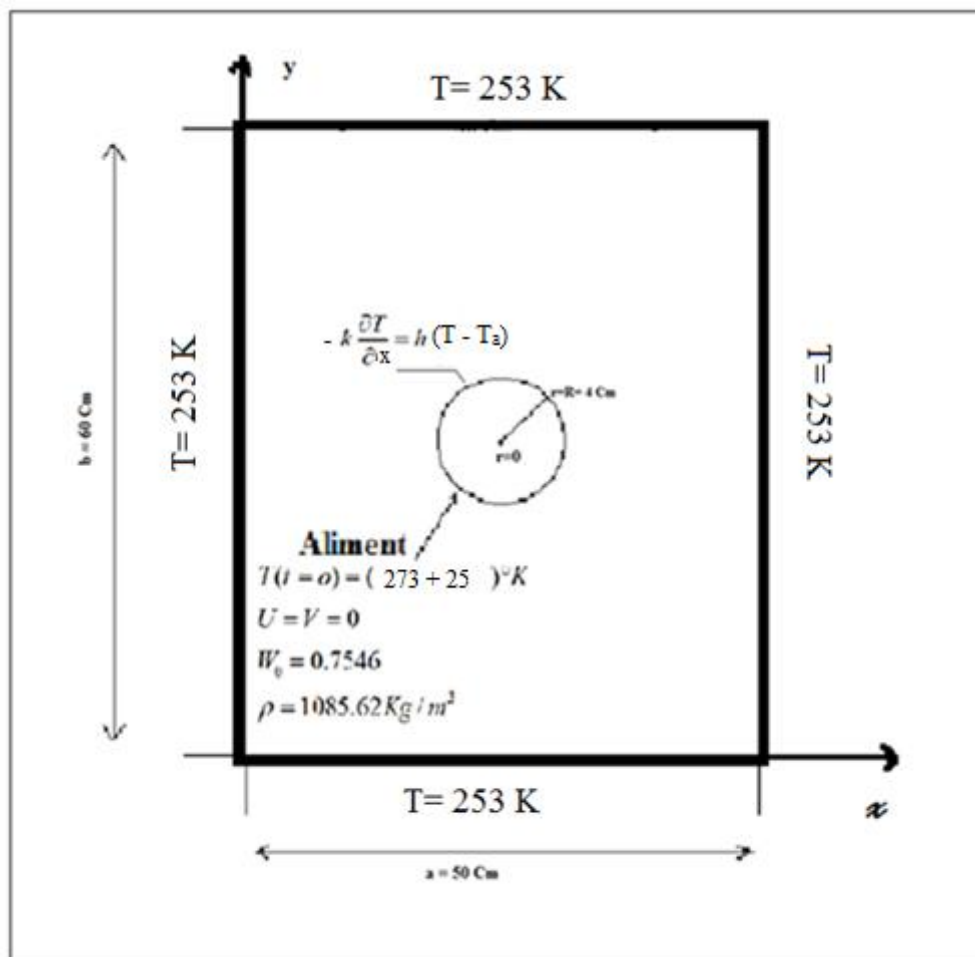


Figure IV.2.1 : Modèle physique dans le cas de convection naturelle.

IV.2.1.1. Champs dynamiques dans l'enceinte à convection d'air naturelle

L'écoulement du fluide autour de l'aliment dans l'enceinte et lors d'un transfert à convection d'air libre, est provoqué par les différences de masse volumique résultant des différences de températures, et le champ de force de la pesanteur.

Dans les figures (IV.2.2) et (IV.2.3) qui illustrent les vitesses de l'air dans l'enceinte suivant les deux axes x et y et leur module, on remarque que les valeurs maximales de la vitesse se situent au dessus de l'aliment, et s'affaiblissent en s'éloignant en vers le bas suivant l'axe y, sens de la pesanteur.

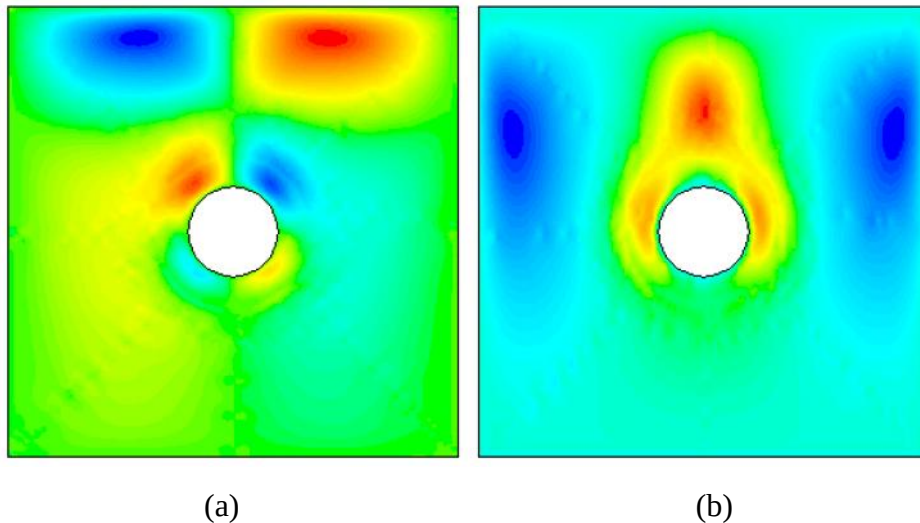


Figure IV.2.2 : Vitesse du fluide selon les deux axes x et y en mode de convection naturelle. (a) La vitesse selon x et (b) La vitesse selon y

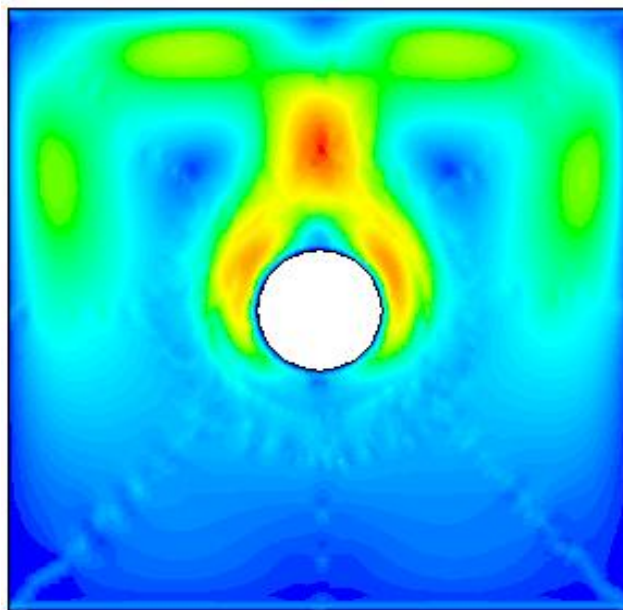
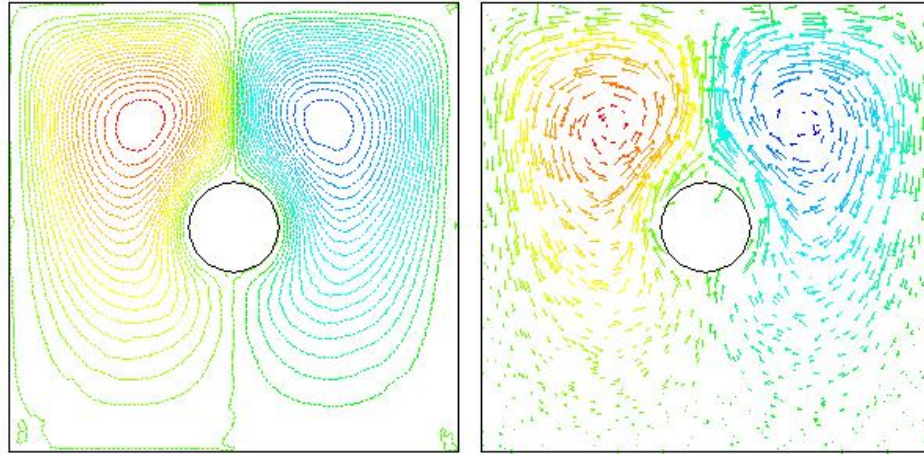


Figure IV.2.3 : Module de vitesse dans l'enceinte à convection d'air naturelle.



(a)- Lignes de courant

(b)- Vecteurs de vitesse

Figure IV.2.4 : Lignes de courant et vecteur de vitesse dans l'enceinte à convection d'air naturelle.

La figure (IV.2.4) représente les lignes de courants et les vecteurs de vitesse, elle montre le comportement et la structure de l'écoulement dans l'enceinte. On remarque que les lignes de courant forment deux structures une tournant dans le sens horaire, et l'autre au sens inverse, remontant le long de la paroi de l'aliment, considéré la plus chaude et descendant le long des parois froides de l'enceinte. Par ailleurs les lignes de courant présente une déformation en haut de l'enceinte, signe d'un écoulement rotationnel et toubillionnaire, appelé aussi par certains auteurs tourbillon de Rayleigh Bénard.

Au voisinage de la surface de l'aliment la vitesse du fluide est faible, et au voisinage immédiat elle devient quasiment nulle.

IV.2.1.2. Champs de température dans l'enceinte à convection naturelle

La figure (IV.2.4) illustre la distribution de la chaleur dans l'enceinte. En remarque qu'en bas de l'enceinte le milieu rejoint la température des parois environ $T = 255$ K, alors que en haut la température est plus élevée environ $T = 268.5$ K, où une différence $\Delta T = 13,5$ °C, cependant, la température autour de l'aliment est à environ $T = 271$ K, aux alentours de la paroi inferieur et à environ $T = 273$ K en haut du produit.

Cela s'explique par, le fluide qui est en mouvement dans l'enceinte par convection libre et par différence de gradient de température, crée une stratification du fluide selon la température, le plus chaud et moins dense est déplacé par le mouvement convectif vers le haut tandis que le plus froid se dirige vers le bas par gravité.

La baisse de température près de la surface de l'aliment est empêchée par une résistance thermique superficielle de l'aliment vers le milieu ambiant.

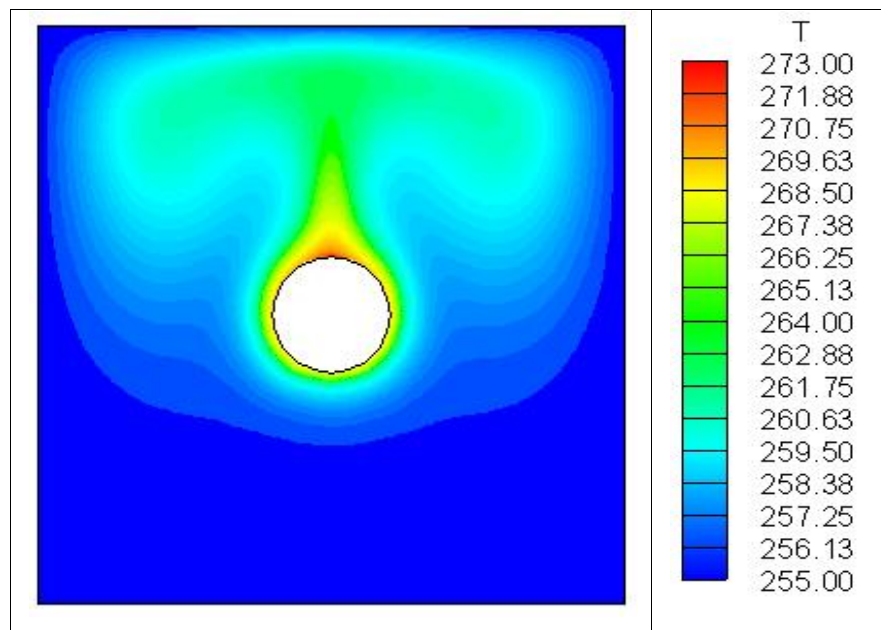


Figure IV.2.5 : Champs de température dans l'enceinte à convection naturelle.

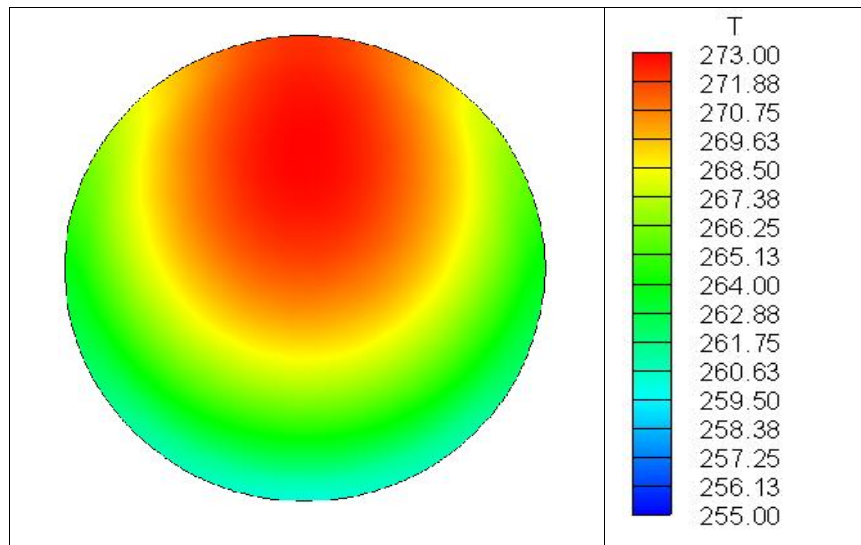


Figure IV.2.6 : Champs de température dans l'aliment (convection naturelle).

Cela engendre une hétérogénéité dans la distribution de la chaleur autour de l'aliment, et par conséquent une hétérogénéité spatiale, dans la distribution de la température et le déplacement de la glace dans l'aliment, révélant un potentiel thermique disparate dans les couches internes de l'aliment. comme il est montré dans la figure (IV.2.6).

L'avantage de l'étude de l'aliment dans son milieu est de se rapprocher de la réalité du processus, à l'inverse de l'étude de l'aliment seul qui ne prend pas en considération l'hétérogénéité de l'interaction, milieu – aliment.

IV.2.2. Convection forcée

Dans la figure (IV.2.7) toutes les parois sont supposées adiabatiques sauf l'ouverture d'une longueur de 0.3 m, en haut de l'enceinte, l'air est supposé à une température de $T_{\text{air}} = 253 \text{ K}$, la vitesse de l'air est de $U_0 = 0.1 \text{ m/s}$.

L'aliment est disposé au milieu avec une température à temps initial $T(t_0) = 298 \text{ K}$.

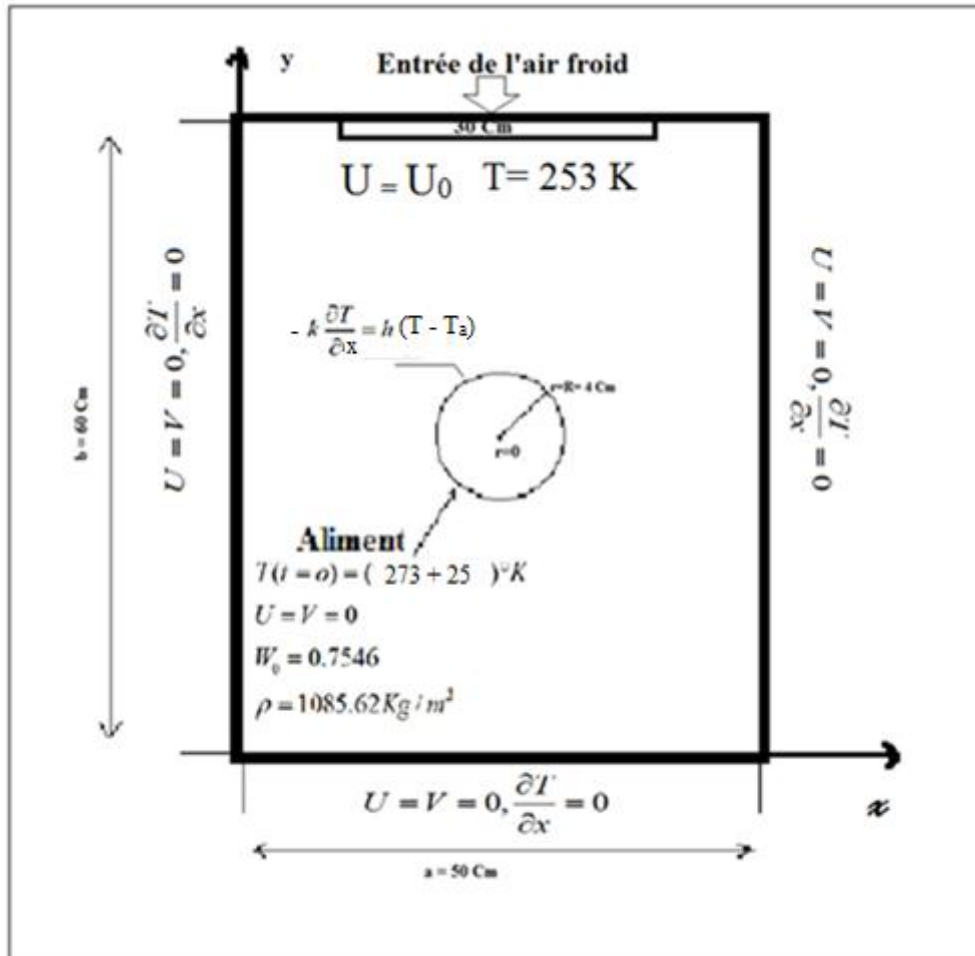


Figure IV.2.7 : Situation physique d'une enceinte de congélation à convection d'air forcée.

IV.2.2.1. Champs dynamiques dans l'enceinte à convection d'air forcée

L'écoulement du fluide autour de l'aliment dans l'enceinte et lors du transfert à convection d'air forcée est dû au débit d'air pulsé par l'ouverture.

Dans les figures (IV.2.8) et (IV.2.9) on remarque que les valeurs maximales de la vitesse se situent en amont de l'aliment, et au coté des parois, mettent en évidence six boucles de recirculation entre l'aliment et les parois, le jet d'air provenant de l'entrées se dirige directement vers l'aliment et les recirculations en-dessous sont symétriques.

Contrairement au cas de la convection naturelle, l'écoulement dans ce cas est plus dynamique.

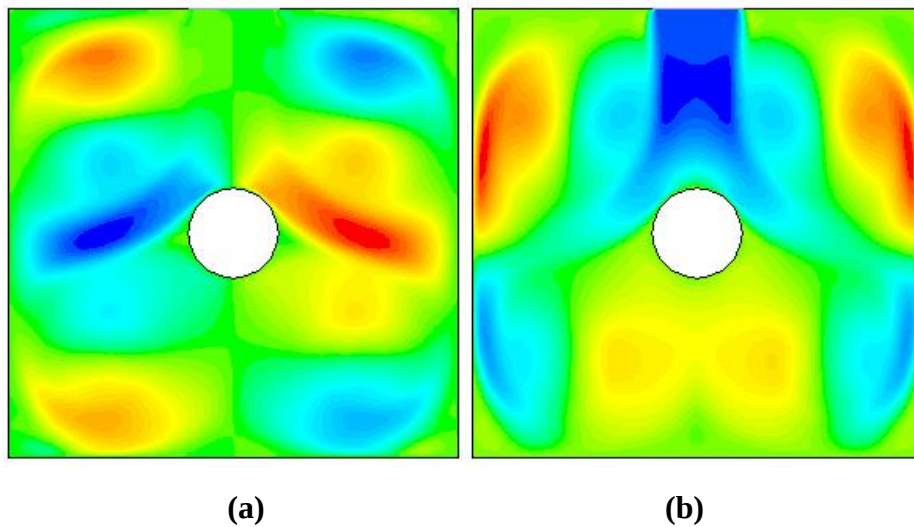


Figure IV.2.8 : Vitesse du fluide selon les deux axes x et y en mode de convection forcée.

(a) Vitesse U selon x (b) Vitesse V selon y

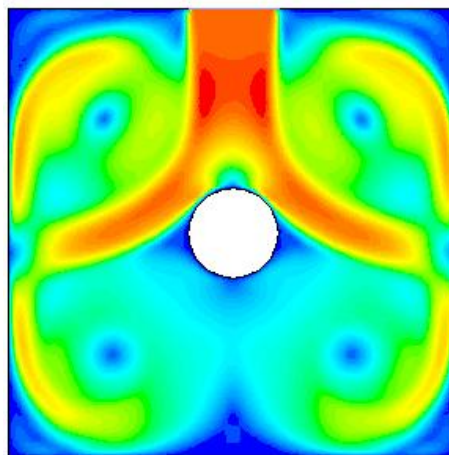
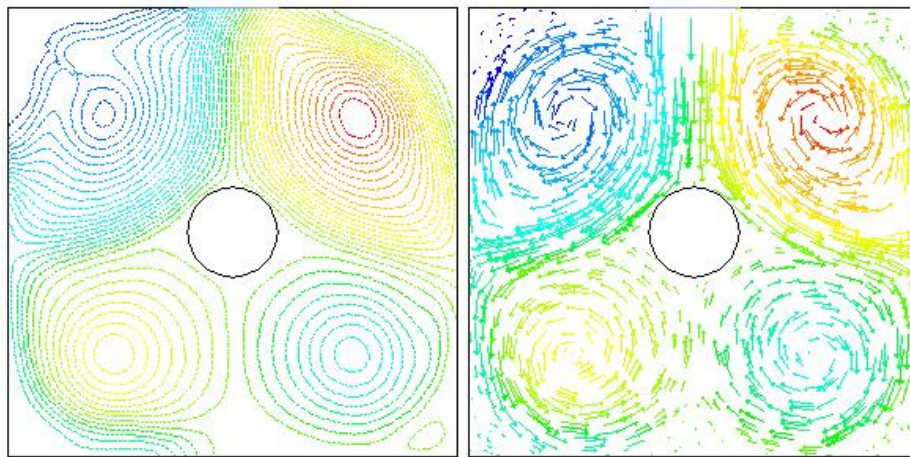


Figure IV.2.9 : Module de vitesse dans l'enceinte à convection d'air forcée.

Dans la figure (IV.2.10) le profil d'écoulement dans l'enceinte démontre l'effet dominant du jet d'air provenant de l'entrée. Ce jet descend vers l'aliment avec des courants d'air qui forme de grandes boucles symétriques de recirculation au-dessus et en dessous, qui tournent dans des directions opposés.



(a) Lignes de courant

(b) Vecteurs de vitesse

Figure IV.2.10 : Lignes de courant et vecteur de vitesse dans l'enceinte à convection d'air forcée.

Au voisinage de l'aliment les vecteurs de vitesse montrent qu'en aval du cercle (aliment) la vitesse du fluide est plus faible que celle en amont en face de l'ouverture.

IV.2.2.2. Champs de température dans l'enceinte à convection d'air forcée

La distribution de la température de l'air dans l'enceinte lors du transfert à convection d'air forcée n'est pas homogène, on remarque dans la figure (IV.2.11) que le fluide atteint des températures minimales dans le côté supérieur, proche de l'ouverture de pulsion d'air, et des zones plus chaudes se situent en dessous de l'aliment, cependant le brassage due à la circulation d'air, crée des flux thermiques perturbés en dessous de l'aliment.

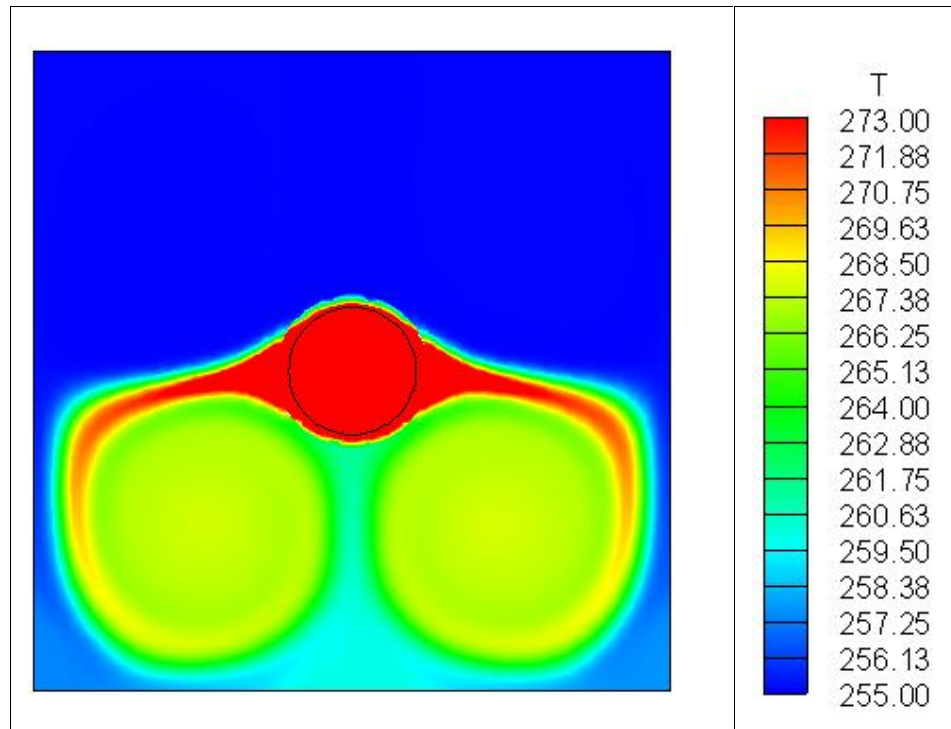


Figure IV.2.11 : Champs de température dans l'enceinte à convection d'air forcée .

Dans la figure (IV.2.12) une variation de température suivant le périmètre de l'aliment, qui se répercute sur sa distribution suivant le rayon R , on observe que la partie supérieure de l'aliment est plus froide que celle en dessous, qui conduira à une propagation de la chaleur du haut vers le bas.

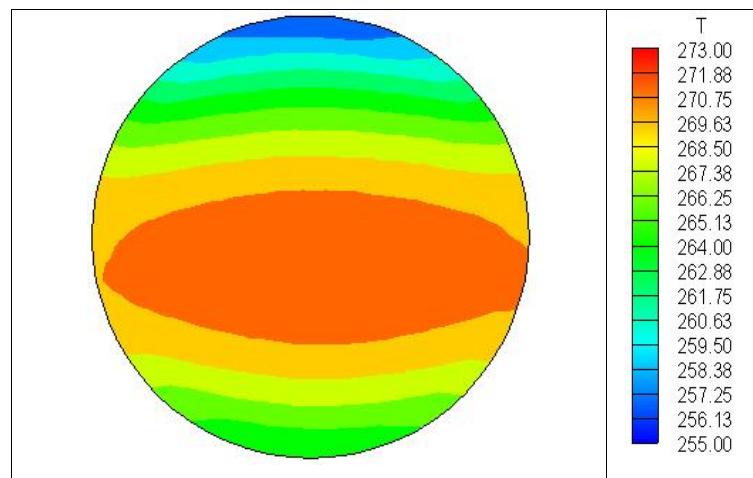


Figure IV.2.12 : Champs de température dans l'aliment (convection forcée).

Conclusion

Pour conclure le problème conjugué bidimensionnel lors de la congélation de la viande hachée de poulet avec convection d'air a été résolu en incluant un modèle transitoire convection-diffusion de chaleur et de masse, qui peut prédire la perte de poids et les champs de températures dans l'aliment. Cela est fait en utilisant la méthode des volumes finis avec une programmation sur fortran, une grille maillé pour un quart de cercle pour minimisé le temps de calcule, et un pas de temps d'une seconde.

L'effet des coefficients de transfert est étudié le long des parois de l'aliment. La perte de poids lors du processus de refroidissement du produit à été calculée et représente des taux qui varie selon les coefficients de transfert et le temps de refroidissement, allant jusqu'à 15% de perte.

L'étude sommaire à laide du code Fluent, nous a permet de mieux comprendre le comportement du transfert et les structures de l'écoulement dans l'enceinte de congélation, pour les deux modes de convections, que ce soit naturelle ou forcée, et de visualisé l'hétérogénéité des écoulements et des transferts lors du processus, en se rapprochant de la réalité du phénomène.

Conclusion générale

L'intitulé de notre travail de recherche: « *Modélisation bidimensionnelle des transferts couplés chaleur et masse lors de la congélation d'un aliment* », avait pour objectif d'étudier le phénomène de transfert de chaleur et de masse en deux dimensions, d'une tranche de viande hachée de poulet qui à une forme de cercle plein, un taux d'humidité initial de $W_0 = 75\%$ et une température initial $T_0 = 293\text{ K}$, dans une enceinte de congélation à convection d'air et à une température de $T_a = 253\text{ K}$. Pour cela nous avons utilisé un modèle transitoire convection-diffusion de chaleur et de masse, qui peut 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 à été calculée.

Les résultats obtenus sont discutés selon deux cas :

Le premier, est le cas d'aliment seul :

Phase de pré-congélation (refroidissement) :

- la visualisation des champs de température en 2-D, nous a permis de prédire la variation spatiale et temporelle de la température dans l'aliment, et l'effet de la conductivité thermique de l'aliment sur le temps de congélation, où nous avons constaté une diminution du temps à une valeur de 25 min pour une variation de la conductivité de l'aliment de 0.351 W/m.k à 3.51 W/m.k .
- L'effet de (H_T) sur le temps de congélation est visible un gain de temps de 106 min pour une variation du coefficient de transfert de $8\text{ w.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ à $20\text{ w.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$.
- Le coefficient de transfert par convection (hT) a un effet sur la quantité de perte en eau de l'aliment, une variation du coefficient de transfert $hT = 8$ jusqu'à $hT = 20$ peut récupérer une différence de 15% de perte en eau par évaporation lors du processus.

Phase de congélation :

- Une visualisation du déplacement du front de congélation nous montre que la congélation surfacique dans le cas de notre étude est à $t = 8\text{ min}$.
- une accélération dans la formation de la glace dans le début, et à une plage de température de $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à environ $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Puis nous avons constaté un ralentissement de sa formation jusqu'à épuisement de toute l'humidité liquide dans l'aliment.

Le deuxième cas, étude dynamique de l'enceinte de congélation :

Cas de la convection naturelle :

- les champs dynamiques dans l'enceinte montrent que l'écoulement dans l'enceinte se fait au tour de l'aliment par des mouvements rotationnels dite de Rayleigh Bénard.
- Les champs de température dans l'enceinte, montre une hétérogénéité de la distribution de la température au tour des l'aliment. la congélation se fait à partir de la surface inférieure de l'aliment.

Cas de la Convection forcée :

- Les champs dynamiques dans l'enceinte, montrent une dynamique de l'écoulement et un brassage de l'air au tour de l'aliment, les valeurs maximales de la vitesse se situent en amant (en dessus) de l'aliment.
- Les Champs de température dans l'enceinte, montrent une hétérogénéité dans la distribution de la température, ce qui fait une variation de température suivant le périmètre de l'aliment, et donc une distribution désordonnée suivant le rayon R, on observe une propagation de la chaleur du haut vers le bas.

Enfin, ce travail nous a permis de vérifier :

- L'effet du coefficient de transfert convectif du milieu et de la conductivité de l'aliment sur la congélation.
- Comprendre l'allure du phénomène transfert de chaleur et de masse lors de la congélation d'un aliment et la prédiction des températures et la perte en eau dans l'aliment.
- saisir la différence entre l'étude de l'aliment seul et dans son milieu.

Etendre l'application du modèle, exploité plus de données et de conditions d'études et même une validation par des études expérimentales sont les perspectives de ce travail.

Références bibliographiques

- **Alain-Claude roudot. 2007.** Mathématique appliquées a l'agroalimentaire, Ed. Lavoisier/tec&doc, 138 p.
- **Alizadeh E, Chapleau N, De lamballerie M, Le bail A. 2003.** Effect of Freezing and Cooking Processes on the Texture of Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) Fillets. Proceedings of the 5th CIGR Section VI International Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management, Potsdam, Germany, pp 262 - 269.
- **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 1993.** ASHRAE handbook: fundamentals, S-I Edition, 845 p.
- **Angelo F, Chiara C, Rodrigo T. 2014.** Moisture diffusivity coefficient estimation in solid food by inversion of a numerical model, Food research international, volume 56, pp 63 – 67
- **Bald WB. 1991.** Food freezing today and tomorrow, Springer London.
- **Bart GCJ. 1988.** Estimation of freezing or chilling behavior, international Journal of .Refrigeration, 21 (1), PP 55-63.
- **Bazinet L. 2011.** Concepts de génie alimentaire : Procédés associés et applications à la conservation des aliments, Edition tec&doc, Lavoisier, 576 p.
- **Bianchi A.M, Fautrelle Y, Etay J.2004.** Transferts thermiques, Presses polytechniques et universitaire Romandes, 1^{er} édition.
- **Bimbenet J. J. 1998.** Bases conceptuelles du génie des procédés agroalimentaires, Techniques de l'ingénieur, pp 7-9
- **Bin Xia, Da-Wen Sun. 2002.** Application of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 34, pp 5 – 24.
- **Blond G. 1988.** Velocity of linear crystallization of ice in macromolecular systems, Cryobiology, 25 (1), pp 61-66.
- **Campañone LA, Salvadori VO, Mascheroni RH . 2005.** Food freezing with simultaneous surface dehydration: approximate prediction of weight loss during freezing and storage. International Journal of Heat and Mass Transfer 48(6), pp 1195–1204.
- **Castro-Giráldez M, Balaguer N, Hinarejos E, Fito PJ. 2014.** Thermodynamic approach of meat freezing process, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Vol 23, pp 138–145.

- **Chan JTY, Dileep AO, Mirko B. 2011.** Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat, *Food Chemistry*, 127(1), pp 102-118.
- **Cheng L, Da-Wen Sun, Zhiwei Zhu, Zhang Zi. 2017.** Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses, *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 57 (4), pp 769-781
- **Clarke C. 2004.** The science of ice Cream, The royal society of chemistry, Cambridge. UK edition, pp 13-34.
- **Cleland AC. 1990.** Food Refrigeration Processes Analysis, Design and Simulation, *International Journal of Refrigeration*, 8 (6), pp 372-373.
- **Coleen L, Trevor J. Britz L C. 2012.** Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich M. iliofibularis, *Meat Science*, Volume 91 (3), pp 364–368.
- **Curtis L W, Lijun Wang. 2005.** Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, CRC Press, pp 101 -125, 760 p
- **Davey LM, Pham QT. 1997.** Predicting the dynamic product heat load and weight loss during beef chilling using a multi-region finite difference approach. *International Journal of Refrigeration*, 20(7), pp 470-482.
- **Davey LM., Pham QT. 2000.** A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 23(6), 444-456.
- **De Kock S, Minnaar A, Berry D, Taylor JRN. 1995.** The effect of freezing rate on the quality of cellular and non-cellular par-cooked starchy convenience foods, *Food Science and Technology*, 28 (1), pp 87-95.
- **Delgado AE, Da-Wen Sun. 2001.** Heat and mass transfer models for predicting freezing processes, *Journal of Food Engineering*, 47 (3), pp 157–174.
- **Duminil N, virnat G. 1988.** Freezing foodstuff: comparative study of "mechanical" and "cryogenic" methods. Comparison between the two processes: quality of products, *Agris journal*, 3(2), pp 10-15,
- **Dupont S, Beney L, Gervais P. 2013.** Conservation à long terme de systèmes biologiques viables et fonctionnels, *Techniques de l'ingénieur*, pp 3 – 6.
- **Enochian RV, Woolrich WR. 1977.** The rise of Frozen Foods, *Principles of Food Freezing, the Technology of Food Freezing*, 4th ed., AVI Publishing Co, pp 70-82

- **Eon C, Pommier C, Guichon G. 1971.** Vapor Pressures and Second Virial Coefficients of Some Five-Membered Heterocyclic Derivatives, *Journal of Chemical Engineering Data*, 16 (4), pp 408-410.
- **Esfahani JA, Teimourtash A. Barati E. 2008.** Numerical modeling of heat and mass transfert during freezing of prous food, In Book: F. Yang, *Progress in applied mathematical modeling*, Nova science publishers. Inc, chapter 3, pp 107 - 152
- **Favier JC, Ireland-Ripert J, Toque C, Feinberg M. 1995.** Repertoire général des aliments : Tables des aliments, *Technique & Documentation ; INRA*, 927 p.
- **Filip S, Fink R, Jevsnik M. 2010.** Influence of food composition on freezing time, *International journal of sanitary engineering research*, 4(1), pp 4 – 13.
- **Genot C. 2000.** Congélation et qualité de la viande, *INRA editions*, 97 p.
- **Grant D J W .1999.** Polymorphism in pharmaceutical solids, *taylor & francis*, 448p
- **Gurerraiche D, Bougriou C. 2016.** Modélisation de la solidification d'un matériau a changement de phase (MCP) dans un cylindre, *Third international conference on energy, Materials, Applied energetics and pollution, , Constantine, Algeria.*
- **Gustavo V, Barbosa C, Altunakar B, Danilo J. Mejía L. 2005.** Freezing of fruits and Vegetables, *Food and agriculture organization of the USA.*
- **Hallström B. 1990.** Mass transport of water in foods a consideration of the engineering aspects. *Journal of Food Engineering*, volume 12, pp 45-52.
- **Hamdami N, Monteau JY, Le Bail A. 2004.** Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix, *International journal of refrigeration*, pp 595-603.
- **Hartel WR. 2001.** Crystallization in foods. *Springer us* , 326 p
- **Hayakawa K, Succar J. (1982).** Heat transfer and moister loss of sphericqlfresh produce. *Journql of food science* vol 47, pp596-605.
- **Heldman DR, Lund DB, 2007.** *Handbook of Food Engineering*, second ed. *Taylor and Francis Group*, 1009 p.
- **Hung YC, Kim, NK. 1996.** Fundamental aspects of freeze-cracking, *Journal of Food Technology*, 1996, pp 50-59.
- **Iuliana M, Buruleanu L, Manea LC. 2006.** Etude des transformations chimiques et histologiques pendant la congélation et le stockage de la viande, *SCIENTIFIC STUDY & RESEARCH*, Vol. VII (4), ISSN 1582-540X, Roumanie.

- **Jeantet R. 2006.** Science des aliments: tome 1, tec&doc, Lavoisier, 381 p
- **Khan AW, Van den berg L. 1967.** Biochemical and Quality Changes Occurring During Freezing of Poultry Meat, *Journal of food science*, 32 (2), pp 148–150.
- **Kiani H, Da-Wen Sun. 2011.** Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review, *Trends in Food Science & Technology*, pp 407-426.
- **Kondjoyan A, Daudin JD. 1997.** Heat and mass transfer coefficients at the surface of a pork hindquarter, *Journal of Food Engineering*, 32 (2), pp 225–240.
- **Kondjoyan A, Boisson HC. 1997.** Comparison of calculated and experimental heat transfer coefficients at the surface of circular cylinders placed in a turbulent cross-flow of air, *Journal of Food Engineering*, 34 (2), pp 123–143
- **Kondjoyan A., Daudin JD. Bimbenet JJ. 1993.** Heat and mass transfer coefficients at the surface of elliptical cylinders placed in a turbulent air flow, *Journal of Food Engineering*, 20 (4), PP 339-367.
- **Koster K.L, Lynch DV. 1992.** Solute accumulation and compartmentation during the cold acclimation of Puma rye. *Plant Physiol Journal*, vol 98, pp108-113.
- **Kuitche A, Daudin JD, Letang G. 1996.** Modeling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time variable conditions using an analytical-based method, *Journal of Food Engineering*, Volume 28, pp 55-84.
- **Lafferrere L. 2002.** Nucléation et transitions de phases en chimie pharmaceutique. Génie des procédés. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, France.
- **Lawrie R.A. 1991.** Meat Science 5th Ed. Pergamon Press Vol 24, Oxford. 512 p
- **Lemuel MD, Ngoc-Thao MT. 2016.** 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, *Journal of food chemistry and nanotechnology*, pp 14-20
- **Levy F. 1979.** Enthalpy and specific heat of meat and fish in the freezing range. *International Journal of Food science and Technology*, volume 14 (6), pp 549-560.
- **López-Leiva M, Hallström B. 2003.** The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions, *Journal of Food Engineering*, 58 (3), pp 267–275.
- **Lusena CV. 1955.** Ice propagation in systems of biological interest. III. Effect of solutes on nucleation and growth of ice crystals, *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 57 (2), pp 277-284.

- **Mafart P. 1997.** Procédés physiques de conservation : Gia Tome 1, Tec &doc, Lavoisier. 340 p.
- **Mallett, CP. 1993.** Frozen Food Technology. Chapman and Hall, London, UK.
- **Maltini E, Torreggiani D, Venir E, Bertolo G. 2003.** Food Chemistry, Volume 82, Issue 1, 2nd International Workshop on Water in Foods, pp 79–86.
- **Marilyn E, Yen-Con Hung. 2012.** Quality in frozen food, Springer Science & Business Media, Vol 8, pp 16 - 20.
- **Marilyn RG. 1997.** quality in frozen food, freezing systems, Chapman & Hall, 1(1), 484 p.
- **Mascheroni RH, Campanone LA, Salvadori VO. 2001.** Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods, Journal of Food Engineering, 47 (2), pp 69–79.
- **Mascheroni RH. 1998.** Transfer during freezing and storage of unpaked foods, Conference Paper ; IIF-IIR-Commission B1, C1 and C2 -Orsay, France.
- **Meléndez-Pérez R, Arjona-Roman JL, Velazquez-Castillo RR, Mendez-Albores A, Vazquez-Duran A. 2012.** On the thermal properties of frozen, refrozen and freeze drying porcine Longissimusdorsi. Journal Animal Veterenary Adv, 194(3), pp 326-31.
- **Mullin JW. 2001.** Crystallization, (4nd ed). London: Butterworths, 594 p.
- **Nelson OM, Leopold AJ, Roberto A, Lemus M. 2012.** Heat and mass transfer in conjugate food freezing/air natural Convection, International journal of refrigeration, Vol 35, pp 880-889.
- **Peyrin F, Kondjoyan A. 2002.** Effect of turbulent integral length scale on heat transfer around a circular cylinder placed cross to an air flow, Experimental Thermal and Fluid Science, 26 (5), pp 455–460.
- **Pham QT. 2001.** Prediction of cooling/freezing/thawing time and heat load, in: Da-Wen Sun (Ed.), Advances in Food Refrigeration, Leatherhead Food RA, Leatherhead, pp 110 – 152.
- **Pham QT. 2014.** Food freezing and thawing, Springer, 152 p.
- **Pieter W. 2003.** Physical Chemistry Of Foods (Tome 2), Marcel Dekker, Inc, 873 p.
- **Puel F, Veesler S, Denis M. 2005.** Cristallisation - Aspects théoriques – Nucléation, Technique de l'ingénieur, pp 9-15.

- **Rahman Md S. 1994.** The accuracy of prediction of the freezing point of meat from general models, *Journal of Food Engineering*, 21 (1), pp 127-136.
- **Reid N, Beesley J. 1991.** Sectioning and Cryosectioning for Electron Microscopy. *Practical Methods in Electron Microscopy*, Elsevier, Vol 13, 322 p.
- **Ribeiro JP, Strub M, Bedecarrats JP, Strub F, Dumas JP.** Etude thermique et dynamique de la cristallisation de l'eau à la rupture de surfusion, *Congrès Français de Thermique*, SFT 2007, Ile des Embiez, 29 mai - 1 juin 2007, Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (LTEP).
- **Sadot M, Curet S, Rouaud O , Le bail A , Havet M.** Modélisation d'un procédé de congélation assistée par micro-ondes, *Conférence: Congrès de la Société Française de Thermique*, At Toulouse, Juin 2016, PP 1-8.
- **Scott-smith j, Hui YH. 2004.** Food processing principles and application, Blackwell publishing.
- **Shewfelt RL, Sista RV, Erickson MC. 1997.** Quality deterioration in frozen foods associated with hydrolytic enzymic activities, Chapter 7, in: *quality in frozen food, freezing systems*, Chapman & Hall, pp 101-110,
- **Singh RP, Heldman DR. 2001.** Introduction to food engineering. 3rd Ed. San Diego, CA: Academic Press, 2001, Page 659.
- **Singh RP, Heldman DR. 2009.** Introduction to food engineering, 4ème édition, Elsevier, 864 p.
- **Singh RP. 2014.** Food freezing, , Elsevier, Chapter 7, pp 521 - 563.
- **Soyer A, Özalp B, Ülkü D, V Bilgin. 2010.** Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat, *Food Chemistry*, Volume 120 (4), pp 1025–1030.
- **Taillet R., Febvre P, Villain L. 2009.** Dictionnaire de physique, De Boeck Supérieur, 2^{ème} Edition, 754 p.
- **Thatien B. 1988.** Rapport de mission séminaire sur la formation de formateurs au techniques de pêche Agadir (MAROC), FAO.
- **Tocci AM , Mascheroni RH. 1995.** Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration, freezing and storage of meats, meat products and analogues, *Journal of Food Engineering*, 26 (2), pp 147–160.

- **Tolstorebrov I, Eikevik TM, Bantle M. 2016.** Effect of low and ultra-low temperature applications during freezing and frozen storage on quality parameters for fish, *International Journal of Refrigeration*, Volume 63, pp 37–47.
 - **Vander-Sman R.G.M, Voda A., van Dalen G, Duijster A. 2013.** Ice crystal interspacing in frozen foods. *Journal of food engineering*, 116 (2), pp 622–626.
 - **Van-Pelt WHJM, Jansen HA. 1988.** Pre-concentration and drying of food materials. Elsevier, Amsterdam, pp 77–86.
 - **Johnston WA, Nicholson FJ, Roger A, Stroud GD. 1994.** Freezing and refrigerated storage in fisheries, M-47 ISBN 92-5-103579-2, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Rome.
 - **Wagner JR., Anon MC. 1985.** Effect of freezing rate on the denaturation of myofibrillar proteins. *Journal of Food Technology*, 20 (6), pp 735–744.
 - **Wiefels R. 2014.** L'industrie de la Pêche et de l'Aquaculture en Algérie, Projet d'Appui à la Formulation de la Stratégie Nationale de Développement de la Pêche et de l'Aquaculture (2015 -2020), Projet ALG/14/001/ /01/34, 2014, page 27.
 - **Wolfe J. Bryant G. 1999.** Freezing, drying and/or vitrification of membrane-solute-water systems. *Cryobiology*, pp 103-129.
 - **Xanthopoulos G, Mitropoulos D, lambrinos G. 2012.** Estimation of heat and mass transfer coefficients during air freezing of cucumber, *international journal of food properties*, volume 15, pp 221 – 235.
 - **Pomeau Y, Ben Amar M, Godrèche C. 1992.** Solids far from equilibrium, , Cambridge University Press, Cambridge, 365 p.
 - **Yanco G. 1981.** Phase Transitions of Water in Some Products of Plant Origin at Low and Superlow Temperatures, *Advances in Food Research*, Vol 27, pp 297–361.
 - **Zehua hu, Sun D. 2000.** CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process. *Journal of Food Engineering*, 46(3), pp 189-197.
- USDA, Base de données nationale sur les éléments nutritifs pour la version de référence standard, <https://ndb.nal.usda.gov> , visité 28-7-2016.
- Philippe Lours, Ecole des mines d'Albi-Carmaux , Au cœur des matériaux cristallins, 2014, http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/module_SM_1.html, visité 6-1-2017

Annexe

Tableau 1.A : Données sur la composition et éléments nutritifs pour: Poulet, poulets de chair, viande uniquement, brut

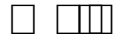
	Unit	Value per 100g
Water	g	75.46
Energy	kcal	119
Protein	g	21.39
Total lipid (fat)	g	3.08
Carbohydrate, by difference	g	0.00
Fiber, total dietary	g	0.0
Sugars, total	g	0.00
Minerals		
Calcium, Ca	mg	12
Iron, Fe	mg	0.89
Magnesium, Mg	mg	25
Phosphorus, P	mg	173
Potassium, K	mg	229
Sodium, Na	mg	77
Zinc, Zn	mg	1.54
Vitamins		
Vitamin C, total ascorbic acid	mg	2.3
Thiamin	mg	0.073
Riboflavin	mg	0.142
Niacin	mg	8.239
Vitamin B-6	mg	0.430
Folate, DFE	µg	7
Vitamin B-12	µg	0.37
Vitamin A, RAE	µg	16
Vitamin A, IU	IU	52
Vitamin E (alpha-tocopherol)	mg	0.21
Vitamin D (D2 + D3)	µg	0.1
Vitamin D	IU	5
Vitamin K (phylloquinone)	µg	1.8
Lipids		
Fatty acids, total saturated	g	0.790
Fatty acids, total monounsaturated	g	0.900
Fatty acids, total polyunsaturated	g	0.750
Cholesterol	mg	70
Other		
Caffeine	mg	0

Source: USDA National Nutrient Database for Standard Reference 28 slightly revised May 2016 Software v.3.6.4.1 2017-01-17

Tableau 2.A : Composition et propriétés thermo-physiques des aliments

Food Item	Moisture Content, %	Protein, %	Fat, % x_f	Carbohydrate		Ash, % x_a	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	x_{wo}	x_p		Total, % x_c	Fiber, % x_{fb}					
Pork										
Backfat	7.69	2.92	88.69	0.0	0.0	0.70	—	2.17	2.98	26
Bacon	31.58	8.66	57.54	0.09	0.0	2.13	—	2.70	2.70	105
Belly	36.74	9.34	53.01	0.0	0.0	0.49	—	2.80	3.37	123
Carcass	49.83	13.91	35.07	0.0	0.0	0.72	—	3.08	3.10	166
Ham, cured, whole, lean	68.26	22.32	5.71	0.05	0.0	3.66	—	3.47	2.22	228
country cured, lean	55.93	27.80	8.32	0.30	0.0	7.65	—	3.16	2.31	187
Shoulder, whole, lean	72.63	19.55	7.14	0.0	0.0	1.02	-2.2	3.59	2.20	243
Sausage										
Braunschweiger	48.01	13.50	32.09	3.13	0.0	3.27	—	3.01	2.40	160
Frankfurter	53.87	11.28	29.15	2.55	0.0	3.15	-1.7	3.15	2.31	180
Italian	51.08	14.25	31.33	0.65	0.0	2.70	—	3.10	2.37	171
Polish	53.15	14.10	28.72	1.63	0.0	2.40	—	3.14	2.36	178
Pork	44.52	11.69	40.29	1.02	0.0	2.49	—	2.95	2.43	149
Smoked links	39.30	22.20	31.70	2.10	0.0	4.70	—	2.82	2.45	131
Poultry Products										
Chicken	65.99	18.60	15.06	0.0	0.0	0.79	-2.8	4.34	3.32	220
Duck	48.50	11.49	39.34	0.0	0.0	0.68	—	3.06	2.45	162
Turkey	70.40	20.42	8.02	0.0	0.0	0.88	—	3.53	2.28	235
Egg										
White	87.81	10.52	0.0	1.03	0.0	0.64	-0.6	3.91	1.81	293
dried	14.62	76.92	0.04	4.17	0.0	4.25	—	2.29	2.10	49
Whole	75.33	12.49	10.02	1.22	0.0	0.94	-0.6	3.63	1.95	252
dried	3.10	47.35	40.95	4.95	0.0	3.65	—	2.04	2.00	10
Yolk	48.81	16.76	30.87	1.78	0.0	1.77	-0.6	3.05	2.25	163
salted	50.80	14.00	23.00	1.60	0.0	10.60	-17.2	3.01	3.79	170
sugared	51.25	13.80	22.75	10.80	0.0	1.40	-3.9	3.07	2.54	171
Lamb										
Composite of cuts, lean	73.42	20.29	5.25	0.0	0.0	1.06	-1.9	3.60	2.14	245
Leg, whole, lean	74.11	20.56	4.51	0.0	0.0	1.07	—	3.62	2.14	248
Dairy Products										
Butter	17.94	0.85	81.11	0.06	0.0	0.04	—	2.40	2.65	60
Cheese										
Camembert	51.80	19.80	24.26	0.46	0.0	3.68	—	3.10	3.34	173
Cheddar	36.75	24.90	33.14	1.28	0.0	3.93	-12.9	2.77	3.07	123
Cottage, uncreamed	79.77	17.27	0.42	1.85	0.0	0.69	-1.2	3.73	1.99	266
Cream	53.75	7.55	34.87	2.66	0.0	1.17	—	3.16	2.91	180
Gouda	41.46	24.94	27.44	2.22	0.0	3.94	—	2.87	2.77	138
Limburger	48.42	20.05	27.25	0.49	0.0	3.79	-7.4	3.03	2.82	162
Mozzarella	54.14	19.42	21.60	2.22	0.0	2.62	—	3.15	2.46	181
Parmesan, hard	29.16	35.75	25.83	3.22	0.0	6.04	—	2.58	2.94	97
Processed American	39.16	22.15	31.25	1.30	0.0	5.84	-6.9	2.80	2.75	131
Roquefort	39.38	21.54	30.64	2.00	0.0	6.44	-16.3	2.80	3.36	132
Swiss	37.21	28.43	27.45	3.38	0.0	3.53	-10.0	2.78	2.88	124
Cream										
Half and half	80.57	2.96	11.50	4.30	0.0	0.67	—	3.73	2.16	269
Table	73.75	2.70	19.31	3.66	0.0	0.58	-2.2	3.59	2.21	246
Heavy whipping	57.71	2.05	37.00	2.79	0.0	0.45	—	3.25	2.32	193
Ice Cream										
Chocolate	55.70	3.80	11.0	28.20	1.20	1.00	-5.6	3.11	2.75	186
Strawberry	60.00	3.20	8.40	27.60	0.30	0.70	-5.6	3.19	2.74	200
Vanilla	61.00	3.50	11.00	23.60	0.0	0.90	-5.6	3.22	2.74	204
Milk										
Canned, condensed, sweetened	27.16	7.91	8.70	54.40	0.0	1.83	-15.0	2.35	—	91
Evaporated	74.04	6.81	7.56	10.04	0.0	1.55	-1.4	3.56	2.08	247
Skim	90.80	3.41	0.18	4.85	0.0	0.76	—	3.95	1.78	303
Skim, dried	3.16	36.16	0.77	51.98	0.0	7.93	—	1.80	—	11
Whole	87.69	3.28	3.66	4.65	0.0	0.72	-0.6	3.89	1.81	293
dried	2.47	26.32	26.71	38.42	0.0	6.08	—	1.85	—	8
Whey, acid, dried	3.51	11.73	0.54	73.45	0.0	10.77	—	1.68	—	12
sweet, dried	3.19	12.93	1.07	74.46	0.0	8.35	—	1.69	—	11

Source : ASHRAE handbook : fundamentals, Atlanta, GA, Asharae, 1993.



يركز هذا العمل على النمذجة الرقمية ثنائية الأبعاد، لظاهرة النقل المتزامن للمادة والحرارة، تجميد الأغذية (FLUENT) بطريقة الأحجام المحددة (méthode des volumes finis) ومحاكاته الكمبيوتر (FLUENT). وهذا في حالتين: الحالة الأولى دراسة الظاهرة للمادة الغذائية، أما في الحالة الثانية فإن دراسة الظاهرة تشمل المادة الغذائية التجميد معاً. أظهرت تأثير التوصيل الحراري في توزيع ومعدل خسارة الرطوبة بالنسبة للمادة الغذائية.

الكلمات المفتاحية: تجميد الأغذية، النمذجة الرقمية، ظاهرة النقل المتزامن للمادة والحرارة، FLUENT.

Résumé

Ce travail porte sur la modélisation bidimensionnelle des transferts couplés de chaleur et de masse lors de la congélation d'un aliment (viande hachée de poulet), dans un compartiment de congélation à convection d'air. Le modèle a été résolu à l'aide du langage de programmation Fortran 90, par la méthode des volumes finis et simulé par le code Fluent, dans deux cas : aliment seul et aliment dans l'enceinte de congélation. 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 clefs : congélation des aliments, modélisation, transferts de chaleur et de masse, coefficient de transfert convectif, viande de poulet hachée.

Abstract

This work deals with the two-dimensional modeling of coupled heat and mass transfers during the freezing of a food (chicken minced meat) in a convection freezing compartment. The model was solved using the Fortran 90 programming language, using the finite volume method and simulated by the Fluent code, in two cases: food alone and food in the freezing chamber. The results obtained showed the effect of the convective transfer coefficient as well as the thermal conductivity on the temperature distribution and the rate of water loss.

Key words: food freezing, modeling, heat and mass transfer, convective transfer coefficient, chicken minced meat.