

# Modélisation de la congélation par évapo-détente.

Uyen NGUYEN<sup>1</sup>, Claudia COGNE<sup>2\*</sup>, Jean-Louis LANOISELLE<sup>1</sup>, Danièle CLAUSSE

<sup>1</sup>Centre de Recherches de Royallieu - Génie des procédés Industriels - Unité Transformations  
Intégrées de la Matière Renouvelable - BP 20.529 - 60205 Compiègne Cedex

<sup>2</sup>Laboratoire des Technologies Innovantes

48 rue d'Ostende – 02100 Saint Quentin

\* (auteur correspondant : [claudia.cogne@u-picardie.fr](mailto:claudia.cogne@u-picardie.fr))

**Résumé** - Ce travail est relatif à la modélisation du refroidissement et de la congélation de produits alimentaires de type purée par évapo-détente. Dans cet article, nous nous focalisons sur la compréhension des transferts massiques et thermiques mis en jeu lors des changements d'état à faible pression. Le modèle intègre les propriétés thermophysiques de la purée de légume et les conditions opératoires. L'analyse des résultats permet d'estimer les temps de congélation et la fraction d'eau évaporée.

## Nomenclature

$c$  concentration en eau,  $\text{kg.m}^{-3}$

$C_p$  chaleur massique,  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$D$  coefficient de diffusion dans la purée,  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

$D_m$  coefficient de diffusion surfacique,  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

$k$  conductivité thermique,  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$R$  rayon de la goutte,  $m$

$t$  temps,  $s$

$T$  température,  $K$

*Symboles grecs*

$\rho$  masse volumique,  $\text{kg.m}^{-3}$

$\Delta H_V$  chaleur latente de vaporisation,  $\text{J.kg}^{-1}$

## 1. Introduction

La congélation des denrées alimentaires consiste à refroidir les produits à des températures négatives pour transformer une partie de l'eau en glace. Si la congélation et la surgélation des produits alimentaires sont largement étudiées, les travaux qui portent sur les produits élaborés comme les purées de fruits ou les plats cuisinés sont restreints [1, 2].

Le projet est centré sur le développement d'un procédé continu de surgélation par évapo-détente de produits biologiques pâteux et prêts à consommer. L'étude porte sur le cas des purées de légumes. L'objectif final est de s'intéresser à la modélisation des phénomènes physiques afin d'aider à la compréhension du mécanisme de congélation et d'accélérer la mise au point du procédé par recours à la simulation numérique. La démarche de modélisation permettra également de sécuriser le changement d'échelle du procédé de l'installation pilote vers l'atelier de fabrication industrielle et facilitera le transfert du procédé vers des bioproduits différents des purées de légumes.

Dans ce papier, nous nous intéressons essentiellement à la modélisation des transferts massiques et thermiques lors du refroidissement et la congélation du produit.

## 2. Matériels et méthodes

Le produit étudié est une purée de carottes contenant initialement 88 % d'eau et peut être considéré comme une suspension aqueuse de particules molles concentrées. Les propriétés thermo-physiques de la purée nécessaires au calcul des temps de congélation ont été préalablement mesurées. La chaleur massique, notée  $C_p$ , a été mesurée en fonction de la température par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) sous vide. La conductivité thermique  $\lambda$  a été mesurée par la méthode de la sonde à choc en fonction de la température.

En pratique, la purée est pulvérisée dans une chambre d'atomisation où est maintenu un vide de quelques millibars [3]. En fonction des conditions d'atomisation, la taille des gouttelettes dans l'enceinte peut varier de quelques microns à quelques millimètres de diamètre. Comme la pression à l'intérieur de la chambre est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau, l'eau s'évapore, absorbant une certaine quantité de chaleur latente provoquant un refroidissement brusque du produit et une congélation partielle de l'eau résiduelle. En travaillant à très faible pression, autour des conditions du point triple de l'eau, la fraction de glace au sein du produit augmente tant que la quantité de chaleur latente dégagée par la congélation est absorbée par la vaporisation partielle de l'eau (Fig. 1). Le contrôle des paramètres du procédé (débit et pression d'entrée du produit, pression dans la tour, teneur en eau et températures initiales du produit) permet d'obtenir la cristallisation d'une fraction de l'eau et de rigidifier la purée. En sortie de la tour, le produit peut ensuite être mis en forme (sous forme de galets par exemple) avant que la surgélation soit terminée dans un tunnel classique.

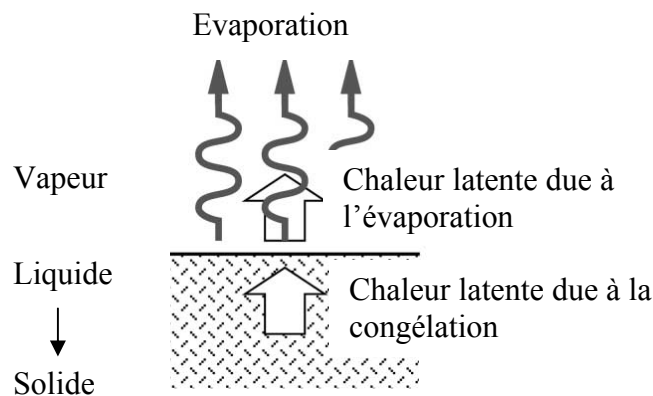


Figure 1 : Refroidissement/congélation d'un liquide par l'évaporation du liquide dans des conditions proches du point triple.

## 3. Modélisation

L'analyse bibliographique de la congélation sous vide montre que peu de modèles sur ce sujet ont été développés [4]. Dans le domaine du refroidissement sous vide de produits alimentaires, on peut citer les travaux de Wang et al. [5] qui s'intéressent au comportement de viande cuisinée ainsi que ceux de He et al. [6] concernant des produits alimentaires de forme sphérique. Dans ces deux études, les modèles développés intègrent à la fois des transferts massiques et thermiques, mais sont limités au refroidissement sans congélation du produit.

### 3.1. Bilan massique et thermique

Dans cette étude, notre modèle est développé en deux dimensions axisymétriques à partir du logiciel commercial COMSOL (v. 3.4, Grenoble, France). Il consiste à intégrer numériquement par la méthode des éléments finis les bilans massiques et thermiques sur une goutte de bioproduit supposée parfaitement sphérique.

A l'intérieur de la goutte de purée, le processus de diffusion permet de décrire à la fois le transfert de chaleur et le transport d'humidité. Le bilan énergétique peut être écrit sous la forme (Eq. 1) :

$$\nabla(k \nabla T) = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Les propriétés thermophysiques de la purée, telles que la conductivité thermique  $k$  et la chaleur massique  $C_p$  dépendent de la température du produit. La chaleur massique a été préalablement mesurée par calorimétrie différentielle à balayage. La valeur intégrée au modèle est une chaleur massique apparente qui tient compte du flux de chaleur dégagée lors de la congélation partielle de l'eau dans la goutte de purée.

Concernant le bilan massique, l'évaporation de l'eau est due à la différence d'humidité entre l'interface goutte/air et le milieu ambiant. Pour déterminer la concentration en eau au sein de la goutte, l'équation de la diffusion est appliquée à la géométrie où  $c$  est la concentration en eau et  $D$  est le coefficient de diffusion de l'eau au sein de la purée (Eq. 2).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = 0 \quad (2)$$

### 3.2. Conditions initiales et conditions aux limites

Initialement, la purée a une température de 60°C. Concernant les conditions aux frontières, un terme lié aux flux massiques et thermiques est intégré au modèle pour simuler la vaporisation de l'eau (Eq. 3) et (Eq. 4). Nous supposons que l'évaporation est un phénomène surfacique à la périphérie de la goutte.

$$k \nabla T = D_m \Delta H_v \nabla c \quad \text{en } r = R \quad (3)$$

$$\text{et } D \nabla c = k_c (c_b - c) \quad \text{en } r = R \quad (4)$$

avec  $D_m$  le coefficient de diffusion de l'eau de la purée vers le milieu ambiant,  $\Delta H_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $k_c$  le coefficient de transfert de masse et  $c_b$  l'humidité du milieu ambiant (dans notre cas,  $c_b \rightarrow 0$ ). Ces paramètres dépendent fortement de la nature du produit et des conditions opératoires du procédé, telles que la pression dans la tour d'atomisation. A l'heure actuelle, les valeurs des paramètres du modèle sont extraites de l'article de Chen et al. [7].

## 4. Résultats et discussions

L'analyse des résultats permet de s'intéresser aux champs de température et au gradient de concentration en eau au sein d'une goutte de purée. La figure 2 montre l'évolution de la température entre la surface et le cœur du produit pour une goutte de 2 mm de diamètre après 50 secondes ainsi que l'écart de température entre le cœur du produit et sa périphérie.

On note que la congélation est rapide – le régime permanent est atteint au bout de 35 secondes – comparée à des procédés classiques à pression atmosphérique en convection forcée. De plus, le gradient de température entre le cœur et la périphérie du produit ne dépasse pas 6°C, assurant une homogénéité au sein de la goutte et donc une meilleure qualité organoleptique du produit fini.

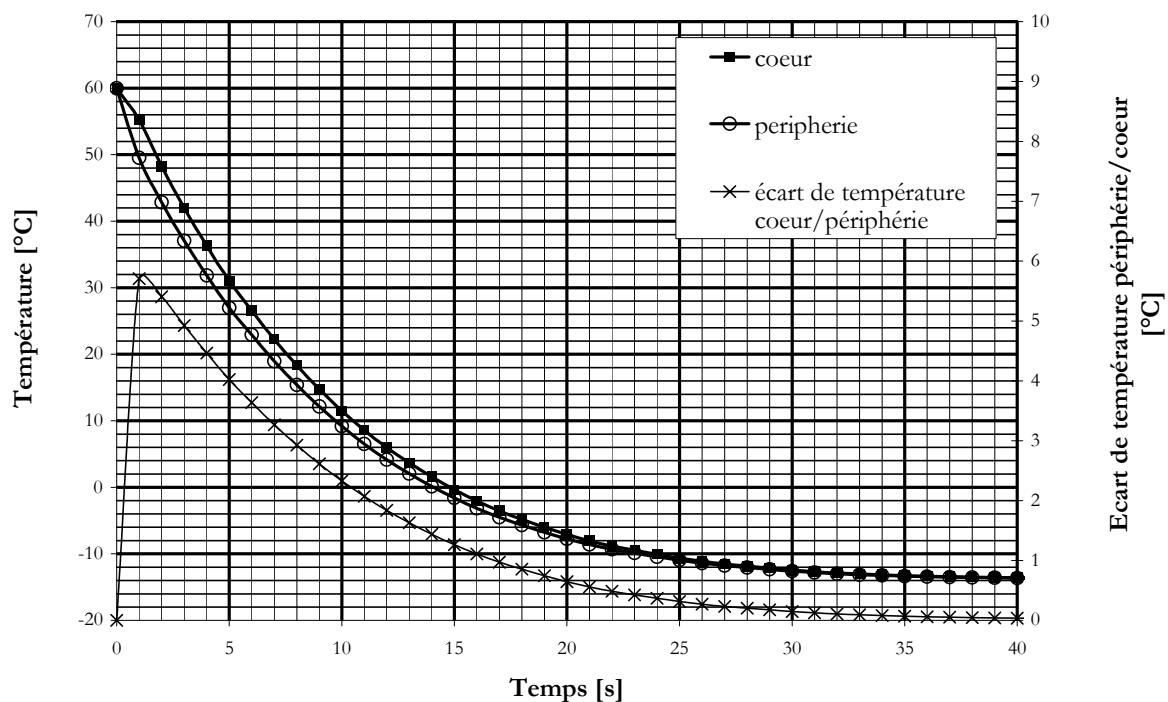


Figure 2 : Evolution de la température d'une goutte de purée à cœur et à la périphérie.

D'un point de vue massique, la figure 3 représente le champ de concentration en eau au sein d'une goutte de purée [en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] après 50 secondes de congélation. La concentration en eau est homogène sur tout le volume, excepté au niveau de la périphérie de la goutte où les pertes massiques sont plus importantes (Fig 4). Après intégration volumique de la concentration en eau sur toute la géométrie, la quantité d'eau évaporée est de 5% par rapport à la quantité initiale au bout de 50 secondes.

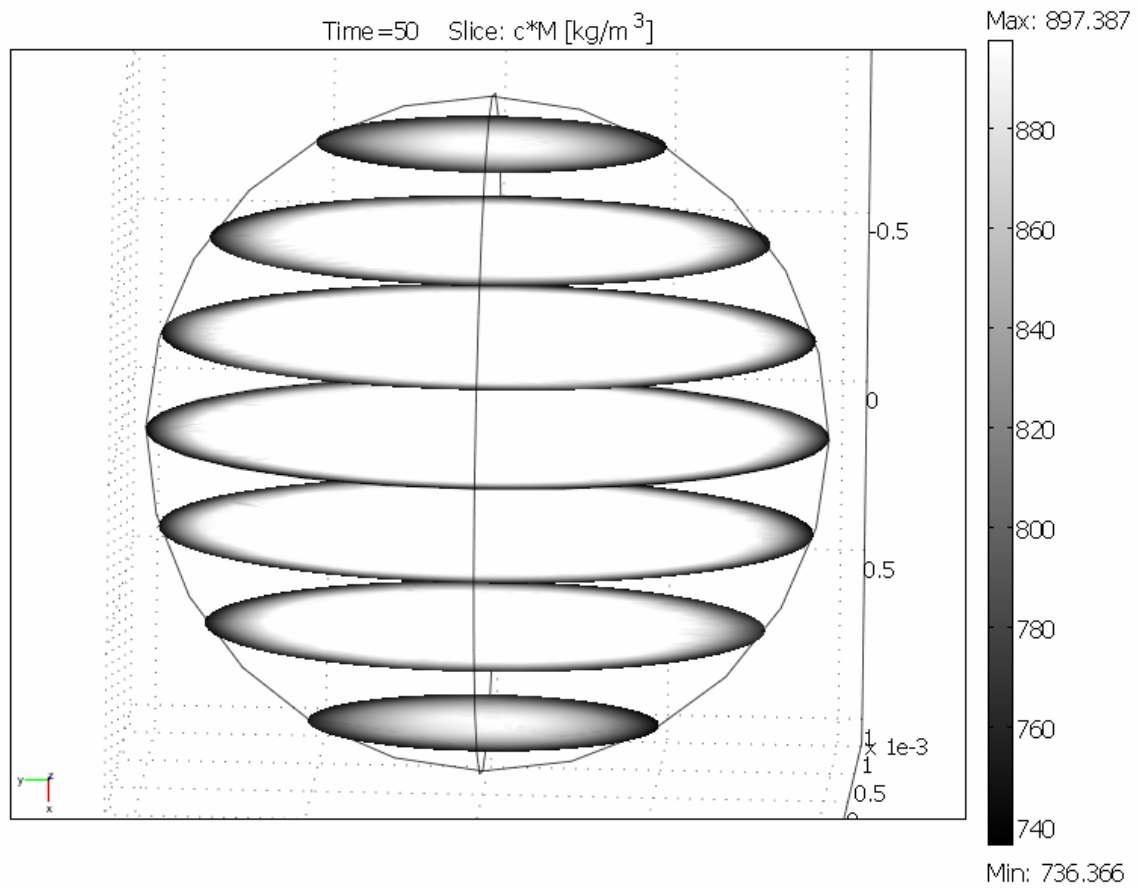


Figure 3 : Concentration massique en eau après 50 secondes de congélation.

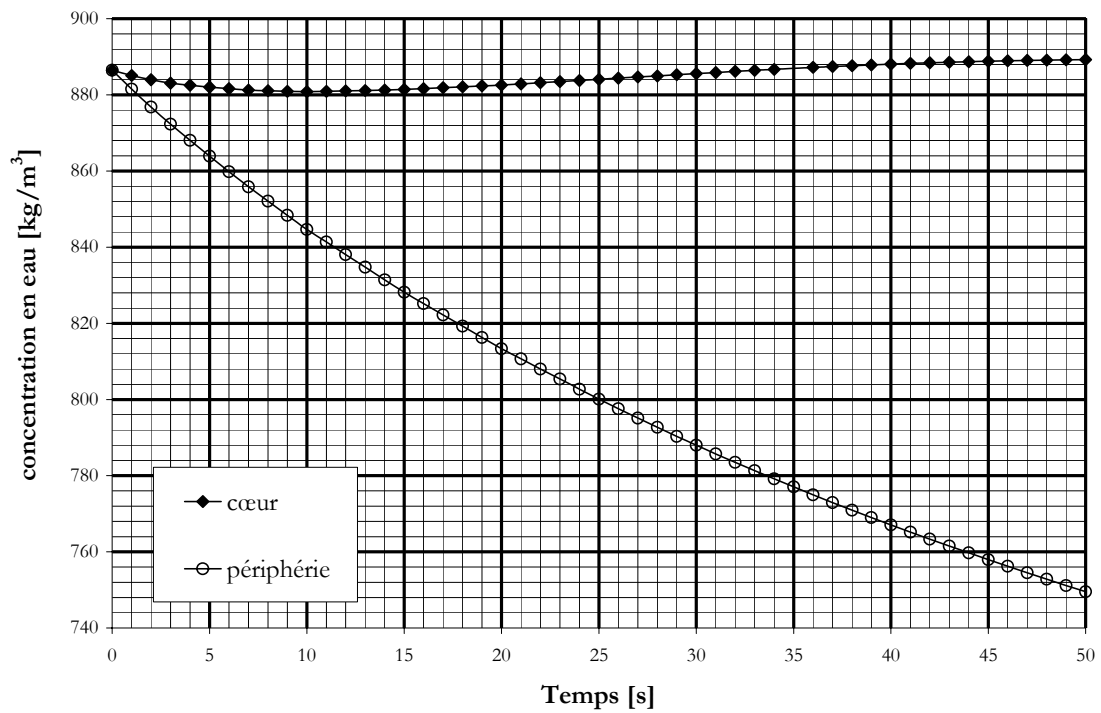


Figure 4 : Evolution de la concentration en eau à cœur et à la périphérie

## 5. Conclusion

Cette étude a permis de développer un modèle de transferts thermiques et massiques en 2 dimensions axisymétriques pour caractériser la concentration en eau et la température au cours d'un procédé de congélation sous vide d'une goutte de purée. Le modèle intègre les propriétés thermiques de la purée de carotte et tient compte des phénomènes physiques tels que l'évaporation partielle et la congélation de l'eau.

L'analyse des résultats permet de mettre en évidence des temps de congélation très rapides comparés à des procédés traditionnels par échange convectifs. Par ailleurs, il est possible à partir d'un bilan massique de suivre la quantité d'eau évaporée.

Par la suite, une étude sera menée pour affiner les valeurs du modèle et pour tenir compte des phénomènes de rétrécissement des gouttes lors de l'évaporation partielle de l'eau. De plus, une analyse paramétrique permettra de définir les facteurs influents du modèle. Enfin, il sera nécessaire de valider nos résultats à partir des données expérimentales issues d'un pilote de congélation sous vide. Nous pourrions, par exemple, comparer les temps de séjour dans le pilote, les températures entrée/sortie du produit et la quantité d'eau évaporée.

## 6. Remerciements

Les auteurs remercient le groupe Bonduelle et le Conseil Régional de Picardie pour leur soutien financier ainsi que le pôle de compétitivité Industries et Agro-Ressources des régions Champagne Ardenne et Picardie pour avoir labellisé ce projet.

## Références

- [1] Redmond G. A., Gormley T. R., Butler F., Effect of short- and long-term frozen storage with MAP on the quality of freeze-chilled lasagna, *Food Science and technology*, 38(1) (2005), 81-87.
- [2] Ranz WE, Marshall WR. Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, 48(4) (1952), 141-146.
- [3] Maureaux A., Baranowski E., Luchini F., Procédé et installation pour la préparation et conservation de produits tels que des denrées et/ou de produits biologiques, demande de brevet européen, n°05370022.5 par Bonduelle.
- [4] Zheng L, Sun D.W., Vacuum cooling for the food industry – A review of recent research advances. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (12) (2004), 555-568.
- [5] Wang L.J., Sun D.W. Numerical analysis of the three-dimensional mass and heat transfer with inner moisture evaporation in porous cooked meat joints during vacuum cooling. *Transactions of the ASAE*, 45 (6) (2002c), 107-115.
- [5] He S.Y., Li Y.F., theoretical simulation of vacuum cooling of spherical foods, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003), 1489-1501.
- [7] Chen H., Marks B.P., Murphy R.Y., Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties, *Journal of Food Engineering*, vol 42, 1999, 139-146.