

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene**

Institut de Chimie Industrielle

Thèse en vue de l'obtention du grade de Magister

OPTION : Energétique des procédés

THEME :

**SIMULATION DU TRANSFERT DE CHALEUR LORS
DU REFROIDISSEMENT DES DENREES ALIMENTAIRES**

Presentée par :

M^c Maza Abdelkarim

Réalisée sous la direction de :

M^c Azzouz Ali maître de conférences

M^c Belkacem Mohamed maître de conférences

Soutenue devant le jury composé de :

* M^c L. Oufer maître de conférences : Président

* M^c M. Belkacem maître de conférences : Rapporteur

* M^c M. Belmadani chargé de cours : Examineur

* Mme Z. Bendjema maître de conférences : Examineur

* M^c S. chikh maître de conférences : Examineur

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. Position du problème	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
1.1. Hypothèses et formulation relatives aux denrées	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
1.2. Hypothèses et formulation relatives à l'air de la chambre froide	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2. Résolution du problème	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1. Résolution du problème relatif à la denrée alimentaire	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1.1. Expressions de la solution du problème de la condition initiale	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1.2. Expressions de N_j	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1.3. Expressions de $\int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau$	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1.4. Expressions de $\tilde{T}_j(0)$	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.1.5. Développement de l'équation intégrale	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.2. Résolution analytique du problème relatif à l'air de la chambre froide	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3. Simulations et interprétations	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.1. Influence de la période de fluctuation de la température de l'air de la chambre froide	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.1.1. Cas d'un produit sphérique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.1.2. Cas d'un produit de forme cylindrique	36
3.1.3. Cas d'un produit de forme parallélépipédique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.2. Influence de l'amplitude de fluctuation de la température de l'air de la chambre froide	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.2.1. Cas d'un produit sphérique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.2.2. Cas d'un produit cylindrique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.2.3. Cas d'un produit parallélépipédique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.3. Influence de la vitesse de l'air de la chambre froide	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.3.1. Cas d'un produit sphérique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.3.2. Cas d'un produit cylindrique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.3.3. Cas d'un produit parallélépipédique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.4. Validité de la solution du modèle mathématique	58
3.4.1. Travaux de Zuritz et al.	58
3.4.2. Travaux de Virseda et al.	60
3.4.3. Conformité du modèle	61
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70

INTRODUCTION

Pour améliorer la *conservation* des *denrées alimentaires*, à l'état *réfrigéré* ou *congelé*, il est souvent nécessaire de connaître la *réponse* du produit destiné à la consommation à différentes *conditions d'entreposage* frigorifique.

Les variations de températures à l'intérieur des produits alimentaires sont un facteur à étudier pour évaluer *l'apport de froid* nécessaire à leurs conservations et *dimensionner*, ainsi, correctement les installations de refroidissement.

Les denrées alimentaires, d'origine végétale ou animale, sont constituées par une fraction d'eau plus ou moins importante et subissent, lors de leur conservation par le froid, non seulement un refroidissement mais aussi une perte d'eau (*évaporation*) par transfert de matière, due aux conditions *différentes d'humidité* entre l'air de la *chambre froide* et les denrées ; on dit alors qu'il y a *dessiccation* du produit [1-3].

Dans ce travail théorique, nous étudions, à l'aide de diverses hypothèses, la *solution* du *modèle* mathématique de transfert de chaleur, *in stationnaire linéaire* et *unidimensionnel*, constituée par les *champs de températures* à l'intérieur de la denrée.

Au chapitre 1, nous formulons mathématiquement d'une façon simplifiée le problème de *conduction* de la chaleur dans la denrée, et le problème de *convection* thermique de l'air de la chambre froide.

Au chapitre 2, nous résolvons les deux problèmes précédents.

Au chapitre 3, nous faisons une *simulation* des conditions d'entreposage en *variant* les paramètres apparents dans les solutions (période de fonctionnement, nature et forme du produit, amplitudes de variation de la température moyenne de l'air, vitesse moyenne de l'air).

Les résultats obtenus par simulation sont comparés à des *valeurs expérimentales* de températures obtenues par les travaux d'autres chercheurs.

En dernier, nous concluons et donnons certaines *recommandations* afin de faire une *modélisation* plus complète du problème.

1. Position du problème

On s'intéresse à l'étude du transfert de chaleur, in-stationnaire et unidimensionnel, lors de la *réfrigération* ou *durant la conservation à l'état congelé* des denrées alimentaires de formes régulières simples (sphériques, cylindriques ou parallélépipédiques).

On désire, en outre, simuler la réponse du produit entreposé à des conditions concrètes de fonctionnement d'une installation frigorifique régulée par le *thermostat* à ambiance d'air (alternance de deux phases) :

- des phases de fonctionnement de la machine frigorifique pendant lesquelles l'air de la chambre froide, qui se refroidit par l'action de l'*évaporateur*, est *ventilé* (sa vitesse moyenne peut atteindre quelques mètres par secondes) autour du produit alimentaire et vers les parois, et a un coefficient moyen de convection de chaleur \bar{h}_{cf} ,
- des phases d'arrêt de la machine frigorifique (quand la température de l'air descend à la valeur de déclenchement du thermostat, celui-ci coupe l'alimentation électrique du système frigorifique et la remet quand la température remonte à la valeur de son enclenchement) durant lesquelles l'air, non ventilé, se réchauffe ; par conséquent, il a un coefficient moyen de convection de chaleur, \bar{h}_{cn} , avec la denrée, plus faible.

La figure ci-dessous illustre approximativement la température moyenne de l'air, $\bar{T}_{cf}(t)$, d'une installation frigorifique :

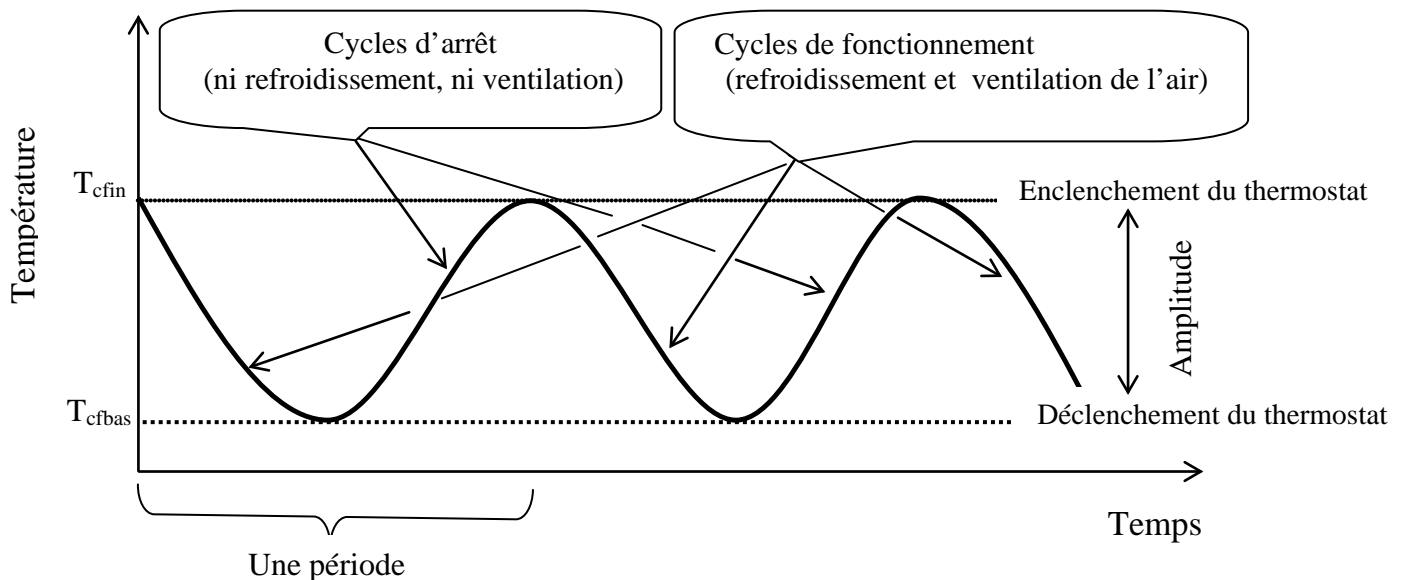


Figure 1.1 Evolution de la température moyenne de l'air d'une chambre froide

La figure suivante montre l'allure approximative du coefficient moyen de convection de l'air d'une chambre froide, $\bar{h}_{cf}(t)$, avec la denrée:

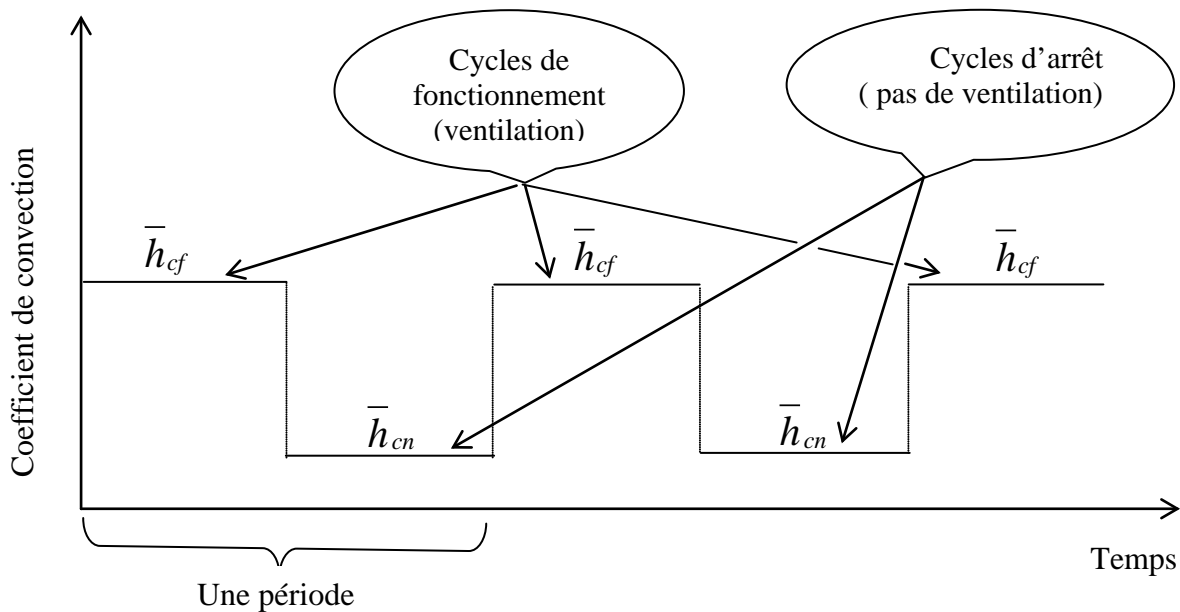


Figure 1.2 Evolution du coefficient moyen de convection de l'air d'une chambre froide

Nous comprenons, alors, pourquoi la température moyenne de l'air de la chambre froide et son coefficient de convection avec la denrée sont fonctions du temps.

Pour ces raisons, nous proposons de déterminer les champs de températures à l'intérieur de chacune des trois formes géométriques des denrées, par résolution du problème différentiel de conduction de chaleur dont la condition à la limite à la surface de la denrée renferme des fonctions du temps ; d'une façon semi-analytique en combinant la résolution analytique avec une méthode numérique.

1.1 Hypothèses et formulation relatives aux denrées

Puisque nous étudions la résolution d'un problème de conduction sur un intervalle de température qui n'est pas large, nous pouvons donner les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ☞ les propriétés physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique) de la denrée peuvent être considérées comme constantes (milieu homogène) ou varient faiblement de façon à prendre leurs valeurs moyennes dans l'intervalle de températures considéré,

le terme de source (chaleur de respiration de la denrée, due à l'oxydation des sucres) est

$$\Phi = q_0 \exp(kT(\xi, t)), \text{ selon Fikiin et autres [4-6].}$$

On le linéarise, autour d'une température T_i , dans l'intervalle de température d'intérêt à l'aide de sa série de Taylor :

$$\Phi = q_0 \exp(kT_i) (1 + k(T(\xi, t) - T_i)) \quad (1.1)$$

Pour que l'approximation du terme de source par l'équation (1.1) soit suffisamment précise, on travaillera sur des intervalles de variation de températures du produit, $[T_i, T_{i+1}]$, de 1°C ,

le problème de conduction de chaleur dans la denrée est unidimensionnel et le gradient

de température existe dans la direction du rayon pour une sphère et un cylindre ; dans la direction de l'épaisseur pour une plaque plane,

aux instants antérieurs ou égal à zéro, la conduction thermique dans la denrée est en régime permanent ; nous supposons que la denrée a subi, au préalable, un *pré-refroidissement* jusqu'aux conditions initiales de la chambre froide.

Le pré refroidissement réalisé dans des systèmes industriels de tunnels ventilés, selon Fikiin et al. [4], réduit la croissance microbienne, minimise l'évaporation de l'eau à la surface, et amène l'établissement du régime de conduction permanent,

l'évaporation de l'eau à la surface de la denrée et la chaleur qui en résulte sont considérées négligeables, en prenant le taux d'humidité de l'air proche de la saturation (80% ou plus),

la phase durant laquelle se produit la congélation de la denrée n'est pas traitée ; on se situe, par l'intervalle de température, soit avant, c'est l'état réfrigéré, soit après et c'est l'état congelé,

solide monocouche (l'emballage ou l'écorce de la denrée ne sont pas considérés comme des couches supplémentaires),

le coefficient de convection de l'air avec le produit, $\bar{h}_{ef}(t)$, varie entre la valeur moyenne \bar{h}_{cf} et la valeur moyenne \bar{h}_{cn} (en fonction échelon),

la température de l'air de la chambre froide $\bar{T}_{cf}(t)$ est une valeur moyenne qui évolue, entre une valeur minimale T_{cfbas} et une valeur maximale notée T_{cfm} qui sont imposées par le thermostat (régulation), de façon périodique.

En appliquant la loi de Fourier de conduction de la chaleur et le premier principe de la thermodynamique (bilan énergétique) à un élément de volume de la forme géométrique de la denrée alimentaire, et tenant compte des conditions aux limites et hypothèses précédentes, nous obtenons le problème différentiel suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{q_0}{c_p} \exp(kT_i) (1 + k(T - T_i)), \quad 0 < \xi < R, t > 0, \end{array} \right. \quad (1.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(\xi, 0) = f_T(\xi), \text{ condition initiale,} \end{array} \right. \quad (1.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \text{ symétrie axiale du problème [7],} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} = \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)), \text{ condition de Fourier.} \end{array} \right. \quad (1.5)$$

$\Gamma=0$, pour une forme parallélépipédique.

$\Gamma=1$, pour une forme cylindrique.

$\Gamma=2$, pour une forme sphérique.

$f_T(\xi)$ est la distribution initiale de températures, à l'intérieur du produit alimentaire, obtenue en résolvant le problème de conduction en régime permanent ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$).

Ainsi, la température $f_T(\xi)$ vérifie le problème :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 f_T}{d\xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{df_T}{d\xi} + \frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})}{\lambda} (1 + k(f_T - T_{ci})) = 0, \quad 0 < \xi < R, \end{array} \right. \quad (1.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{df_T}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \text{ symétrie axiale du problème,} \end{array} \right. \quad (1.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{df_T}{d\xi} \Big|_{\xi=R} = \bar{h}_{ef}(0) (f_T(R) - \bar{T}_{cf}(0)), \text{ condition de Fourier.} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

1.2 Hypothèses et formulation relatives à l'air de la chambre froide

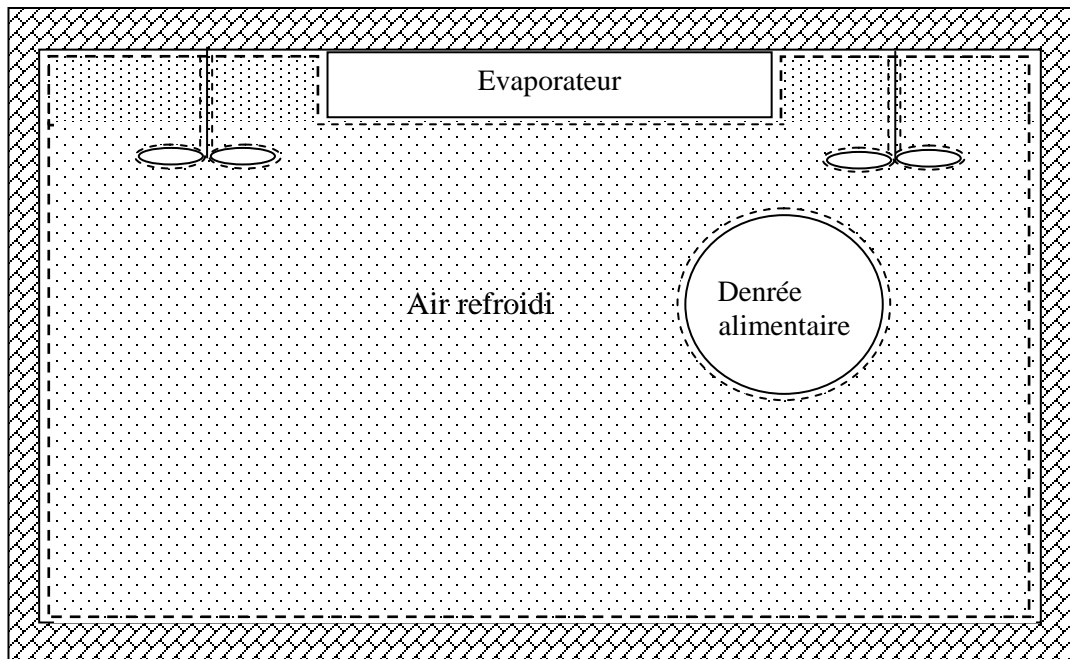


Figure 1.3 Vue schématique d'une chambre froide

La figure ci-dessus montre, de façon simplifiée, l'intérieur d'une chambre froide dans laquelle est entreposée une denrée alimentaire.

L'air représenté par des points se met en mouvement, pendant les phases de fonctionnement de la chambre froide, par ventilation vers l'évaporateur et autour de la denrée.

Les ventilateurs sont directement montés sur la carrosserie métallique de l'évaporateur, selon **Rapin** et al.[8]

Willatzen et autres [9-12] présentent des modèles mathématiques sur l'écoulement du fluide frigorigène dans l'évaporateur.

Van Pee et al.[13] fournit, à l'aide d'une technique d'imagerie par caméra vidéo couplée à un ordinateur et un traceur, des renseignements qualitatifs sur la circulation de l'air dans un entrepôt frigorifique autour de caisses de fruits.

Dans le raisonnement suivant, nous allons mettre en équation la température moyenne, $\bar{T}_{cf}(t)$, de l'air d'une chambre froide.

Suivant le premier principe de la thermodynamique, faisons un bilan global d'énergie sur l'air de l'enveloppe qui a les contours en pointillés de la figure 1.3:

$$\underbrace{\int_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} E \cos(\alpha) ds}_{\text{Flux de l'énergie totale E à travers la surface S de l'enveloppe en pointillés}} + \underbrace{\frac{d}{dt} \left[\int_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} E dv \right]}_{\text{Accumulation de l'énergie totale E dans le volume } V_{cf} \text{ de l'enveloppe en pointillés}} = Q + W \quad (1.9)$$

L'énergie totale E est la somme des énergies cinétique, potentielle, et interne, rapportées à l'unité de masse, de l'élément de volume de l'air de la chambre froide, d'après **Bennett** et **Mc Cabe** [14,15].

Selon **Bennett** et al.[14], $W = W_s + \int_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds$. (1.10)

$\underbrace{W_s}_{\text{Travail mécanique du aux ventilateur}}$

$\underbrace{\int_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds}_{\text{Travail de transvasement de l'air dans le volume } V_{cf}}$

En faisant le bilan algébrique des flux de chaleurs échangés entre l'air et les parois internes, la denrée et l'air, l'évaporateur et l'air, on obtient l'expression du flux totale :

$$Q = \begin{cases} \underbrace{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} (\bar{T}_{pcf} - \bar{T}_{cf}(t))}_{\text{parois-air}} + \underbrace{\bar{h}_{cf} S_p (T(R,t) - \bar{T}_{cf}(t))}_{\text{denrée-air}} - \underbrace{\bar{h}_{evcf} S_{ev} (\bar{T}_{cf}(t) - \bar{T}_{ev})}_{\text{air-évaporateur}}, & (1.11) \\ \text{pendant les phases de fonctionnement de la chambre froide,} \\ \underbrace{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf} (\bar{T}_{pcf} - \bar{T}_{cf}(t))}_{\text{parois-air}} - \underbrace{\bar{h}_{cn} S_p (\bar{T}_{cf}(t) - T(R,t))}_{\text{denrée-air}}, & (1.12) \\ \text{pendant les phases d'arrêt de la chambre froide.} \end{cases}$$

▪ $W_s = 0$, pendant les phases d'arrêt de la machine frigorifique (pas de ventilation). (1.13)

Selon le théorème de la valeur moyenne d'une fonction continue (E, P, ρ_{air}) **Smirnov** [16], on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_S E \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = E_{\text{ms}} \iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds, \\ \iint_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = (P/\rho_{\text{air}})_{\text{ms}} \iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds, \\ \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} E dv = E_{\text{m}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv. \end{array} \right. \quad (1.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = (P/\rho_{\text{air}})_{\text{ms}} \iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds, \\ \iint_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = (P/\rho_{\text{air}})_{\text{ms}} \iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds, \end{array} \right. \quad (1.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_S (P/\rho_{\text{air}}) \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = (P/\rho_{\text{air}})_{\text{ms}} \iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds, \\ \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} E dv = E_{\text{m}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv. \end{array} \right. \quad (1.16)$$

$(P/\rho_{\text{air}})_{\text{ms}}$ est la valeur moyenne du rapport sur la surface S de l'enveloppe d'air.

- L'équation du bilan global de matière sur le volume V_{cf} [14-15] :

$$\iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = - \frac{d}{dt} \left\{ \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv \right\}. \quad (1.17)$$

- La masse de l'air comprise dans le volume V_{cf} , $\iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv$, est pratiquement *constante*.

Nous déduisons, alors, de (1.17) que : $\iint_S \rho_{\text{air}} \mathbf{u}_{\text{air}} \cos(\alpha) ds = 0$. (1.18)

- On définit la température moyenne de l'air de la chambre froide, \bar{T}_{cf} , en posant l'équation :

$$E_{\text{m}} = c_{\text{vair}}(\bar{T}_{\text{cf}}) \cdot \bar{T}_{\text{cf}} + \frac{\overline{u_{\text{air}}^2}}{2} + (gz)_{\text{m}}, \quad (1.19)$$

que l'on peut obtenir en développant (1.16) et en utilisant la définition de E ,

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{u_{\text{air}}^2} = \frac{\iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} u_{\text{air}}^2 dv}{\iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv}, \\ \end{array} \right. \quad (1.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (gz)_{\text{m}} = \frac{\iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} g z dv}{\iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv}. \end{array} \right. \quad (1.21)$$

g et z représentent, respectivement, l'accélération du champ de gravité et la position verticale.

- On suppose que c_{vair} varie faiblement dans un intervalle de température restreint (les valeurs de la chaleur spécifique à pression constante de l'air données par **Kreith** [17] entre -18°C et 38°C sont très rapprochées de la valeur $0.24 \text{ kcal}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$):

$$c_{\text{vair}}(\bar{T}_{\text{cf}}) \approx \bar{c}_{\text{vair}}. \quad (1.22)$$

- On néglige, dans l'expression de Q :

$\bar{h}_{\text{cn}} S_p (\bar{T}_{\text{cf}}(t) - T(R,t))$ devant $\bar{h}_{\text{pcfn}} A_{\text{pcf}} (\bar{T}_{\text{pcf}} - \bar{T}_{\text{cf}}(t))$ et $\bar{h}_{\text{cf}} S_p (\bar{T}_{\text{cf}}(t) - T(R,t))$ devant $\bar{h}_{\text{pcff}} A_{\text{pcf}} (\bar{T}_{\text{pcf}} - \bar{T}_{\text{cf}}(t))$,
 puisque, s'agissant d'un seul produit, la surface de la denrée, S_p , est très inférieure à la surface interne, A_{pcf} , des parois de la chambre froide et que les gradients de température sont du même ordre de grandeur ainsi que les coefficients moyens de convection.

- On suppose que le mouvement de l'air est en régime permanent, pendant les durées des phases de fonctionnement ou d'arrêt de la machine frigorifique.
- La pression de l'air est pratiquement constante est voisine de 1 atm.

On remplace dans (1.9) et dans l'accumulation d'énergie par l'équation (1.16) et compte tenu des hypothèses précédentes et de l'expression simplifiée de Q et W, on peut écrire :

$$\left\{ \bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv \right\} \frac{d\bar{T}_{\text{cf}}}{dt} + (\bar{h}_{\text{pcff}} A_{\text{pcf}} + \bar{h}_{\text{evcf}} S_{\text{ev}}) \bar{T}_{\text{cf}} = \bar{h}_{\text{pcff}} A_{\text{pcf}} \bar{T}_{\text{pcf}} + \bar{h}_{\text{evcf}} S_{\text{ev}} \bar{T}_{\text{ev}} + W_s, \quad (1.23)$$

pendant chaque phase de fonctionnement de la chambre froide et,

$$\left\{ \bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv \right\} \frac{d\bar{T}_{\text{cf}}}{dt} + (\bar{h}_{\text{pcfn}} A_{\text{pcf}}) \bar{T}_{\text{cf}} = \bar{h}_{\text{pcfn}} A_{\text{pcf}} \bar{T}_{\text{pcf}}, \quad (1.24)$$

pendant chaque phase d'arrêt de la chambre froide.

ou :

$$\frac{d\bar{T}_{\text{cf}}}{dt} + \frac{(\bar{h}_{\text{pcff}} A_{\text{pcf}} + \bar{h}_{\text{evcf}} S_{\text{ev}})}{\bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv} \bar{T}_{\text{cf}} = \frac{\bar{h}_{\text{pcff}} A_{\text{pcf}} \bar{T}_{\text{pcf}} + \bar{h}_{\text{evcf}} S_{\text{ev}} \bar{T}_{\text{ev}} + W_s}{\bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv}, \quad (1.25)$$

pendant chaque phase de fonctionnement de la chambre froide et,

$$\frac{d\bar{T}_{\text{cf}}}{dt} + \frac{\bar{h}_{\text{pcfn}} A_{\text{pcf}}}{\bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv} \bar{T}_{\text{cf}} = \frac{\bar{h}_{\text{pcfn}} A_{\text{pcf}} \bar{T}_{\text{pcf}}}{\bar{c}_{\text{vair}} \iiint_{V_{\text{cf}}} \rho_{\text{air}} dv}, \quad (1.26)$$

pendant chaque phase d'arrêt de la chambre froide.

Ce sont deux équations différentielles linéaires du premier ordre que l'on résout facilement en se donnant des conditions de continuité et de périodicité, correspondantes au début de chaque phase.

Dans le chapitre suivant, on donnera les principales étapes suivies pour obtenir les solutions des équations (1.2), (1.6), avec les conditions aux limites associées, et (1.25), (1.26), avec les conditions initiales associées.

Résolution du problème

On se propose, dans ce chapitre, de résoudre les problèmes, posés au chapitre 1, de conduction de la chaleur dans la denrée ; ainsi que celui du transfert de chaleur in stationnaire dans l'air de la chambre froide.

2.1 Résolution du problème relatif à la denrée alimentaire

Afin de résoudre plus facilement le problème, d'équations (1.2) à (1.5), on effectue le changement de fonction suivant :

$$T_1(\xi, t) = T(\xi, t) + \frac{\bar{h}_{ef}(t)}{2\lambda R} (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) \xi^2, \quad (2.1)$$

et on remplace, ce qui donne les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial \xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \right) + \frac{q_0 \exp(kT_1)}{c_p} kT_1 + g(\xi, t), \quad 0 < \xi < R, t > 0, \end{array} \right. \quad (2.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(\xi, 0) = f_T(\xi) + \frac{\bar{h}_{ef}(0)}{2\lambda R} (f_T(R) - \bar{T}_{cf}(0)) \xi^2, \end{array} \right. \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \text{ symetrie axiale du problème,} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} = 0, \text{ flux nul.} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Tel que :

$$\begin{aligned} g(\xi, t) = & \frac{q_0 \exp(kT_1)(1 - kT_1)}{c_p} - \frac{1}{\lambda R} \left(a(1 + \Gamma) + \frac{q_0 \exp(kT_1)}{2c_p} \xi^2 \right) \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) \\ & + \frac{1}{2\lambda R} \frac{d}{dt} [\bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t))] \xi^2. \end{aligned} \quad (2.6)$$

D'après **Mikhaïlov** et **Ösizik** [18], le problème différentiel et linéaire d'équations (2.2) à (2.5) peut être résolu analytiquement par la méthode de la «transformée intégrale» dont voici les étapes principales :

- on associe, au problème précédant, le problème auxiliaire des fonctions propres et valeurs propres dit de «Sturm-Liouville» :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \psi}{d\xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{d\psi}{d\xi} = -\frac{\mu'^2}{a} \psi, \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{d\psi}{d\xi} \Big|_{\xi=R} = 0. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

$$\text{Tel que } \mu'^2 = \mu^2 - \frac{q_0 \exp(kT_i) k}{c_p}. \quad (2.10)$$

Le système d'équations (2.7) à (2.10) a pour solution, d'après les méthodes de résolution des équations différentielles ordinaires d'ordre 2 données par **Smirnov** [16] et **Spiegel** [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \Gamma = 0, \quad \psi(\xi, \mu') = \cos\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} \xi\right), \end{array} \right. \quad (2.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \Gamma = 1, \quad \psi(\xi, \mu') = J_0\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} \xi\right), \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \Gamma = 2, \quad \psi(\xi, \mu') = \frac{\sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} \xi\right)}{\xi}, \end{array} \right. \quad (2.13)$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } \Gamma = 0, \text{ les } \mu' \text{ sont racines de l'équation } \sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} R\right) = 0, \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } \Gamma = 1, \text{ les } \mu' \text{ sont racines de l'équation } J_1\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} R\right) = 0, \end{array} \right. \quad (2.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour } \Gamma = 2, \text{ les } \mu' \text{ sont racines de l'équation } \sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} R\right) - \left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} R\right) \cos\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}} R\right) = 0. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Les μ' et les μ en sont les valeurs propres tandis que les $\psi(\xi, \mu')$ en sont les fonctions propres associées aux valeurs propres.

Les fonctions propres sont orthogonales, deux à deux, au sens du produit scalaire, selon **Mikařlov** et **Ösizik**. [18].

Les valeurs propres (ou les fonctions propres) sont distinctes et dénombrables ; c'est pourquoi nous pouvons leur mettre un indice, par exemple j , et nous avons alors μ_j ou μ'_j ; j allant de 0, correspondant à la valeur propre $\mu' = 0$, jusqu'à k_{\max} fini.

Les μ_j sont reliés aux μ'_j par l'équation (2.10).

$J_1(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1,

- la solution du problème, équations (2.2) à (2.5), est cherchée sous forme de la décomposition dans la base constituée par les fonctions propres :

$$T_1(\xi, t) = \sum_{j=0}^{\infty} A_j(t) \psi_j(\xi, \mu'_j) \quad \text{dont les } A_j(t) \text{ fonctions du temps restent à déterminer,}$$

• l'équation (2.2) est multipliée par $\rho c_p \psi_j(\xi, \mu'_j)$,
 l'équation (2.7) est multipliée par $\rho c_p T_1(\xi, t)$; on fait la somme des deux résultats et l'on intègre à membre sur le volume, v_p , de la denrée alimentaire,

- on utilise la définition de la transformée intégrale qui est

$$\tilde{T}_j(t) = \int_{V_p} \rho c_p \psi_j(\xi, \mu'_j) T_1(\xi, t) dv, \quad (2.17)$$

- après transformation de l'intégrale de volume en intégrale de surface et usage des conditions aux limites (2.5) et (2.9), on obtient une équation de la forme :

$$\frac{d\tilde{T}_j}{dt} + \mu_j^2 \tilde{T}_j(t) = g'_j(t), \quad (2.18)$$

$$\text{avec } g'_j(t) = \int_{S_p} \lambda \left| \frac{\psi_j(\xi, \mu'_j)}{T_1(\xi, t)} \frac{d\psi_j(\xi, \mu'_j)}{d\xi} \right| ds + \int_{V_p} \rho c_p \psi_j(\xi, \mu'_j) g(\xi, t) dv, \quad (2.19)$$

- on associe, à l'équation (2.18), la condition initiale :

$$\tilde{T}_j(0) = \int_{V_p} \rho c_p \psi_j(\xi, \mu'_j) T_1(\xi, 0) dv, \quad (2.20)$$

- on obtient la solution de l'équation (2.18) qui vérifie (2.20), selon [18] :

$$\tilde{T}_j(t) = \exp(-\mu_j^2 t) \left[\tilde{T}_j(0) + \int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau \right], \quad (2.21)$$

- la solution de (2.2) à (2.5) est, d'après [18] :

$$T_1(\xi, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \exp(-\mu_j^2 t) \left[\tilde{T}_j(0) + \int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau \right] \psi_j(\xi, \mu_j), \quad (2.22)$$

$$\text{tel que } N_j = \frac{1}{2\mu_j'} \int_{S_p} \lambda \left| \begin{array}{cc} \left. \frac{d\psi(\xi, \mu')}{d\xi} \right|_{\mu'=\mu_j'} & \left. \frac{d^2\psi(\xi, \mu')}{d\xi d\mu'} \right|_{\mu'=\mu_j'} \\ \psi_j(\xi, \mu_j) & \left. \frac{d\psi_j(\xi, \mu_j)}{d\xi} \right|_{\xi=R} \end{array} \right| ds. \quad (2.23)$$

2.1.1. Expressions de la solution du problème de la condition initiale

Suivant les valeurs de Γ , la solution du problème différentiel d'équations (1.5) à (1.7), selon [16,19], est:

2.1.1.1. Produit de forme parallélépipédique

$$f_T(\xi) = \frac{\bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1-kT_{ci}}{k} \right) \cos \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \xi \right)}{\bar{h}_{ef}(0) \cos \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right) - \lambda \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right)} - \frac{1-kT_{ci}}{k} \quad (2.24)$$

2.1.1.2. Produit de forme cylindrique

$$f_T(\xi) = \frac{\bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1-kT_{ci}}{k} \right) J_0 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \xi \right)}{\bar{h}_{ef}(0) J_0 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right) - \lambda \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} J_1 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right)} - \frac{1-kT_{ci}}{k} \quad (2.25)$$

$J_0(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0 [19].

2.1.1.3. Produit de forme sphérique

$$f_T(\xi) = \frac{\bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1-kT_{ci}}{k} \right) \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \xi \right)}{\xi}}{\Delta} - \frac{1-kT_{ci}}{k}, \quad (2.26)$$

$$\Delta = \bar{h}_{ef}(0) \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right)}{R} + \lambda \left\{ \frac{\cos \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right) \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}}}{R} - \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R \right)}{R^2} \right\}$$

2.1.2. Expressions de N_j

A partir de l'équation (2.23) et sachant qu'à la surface du produit, S_p , on a, nécessairement, $\xi = R$, on obtient tout calcul fait suivant les valeur de Γ :

$$\Gamma=0 \Rightarrow N_j = \frac{1}{2} R \text{Long} \text{Larg} \rho c_p \cos^2 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right), \quad (2.27)$$

$$\Gamma=1 \Rightarrow N_j = \pi R \text{Long} \rho c_p J_0^2 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right), \quad (2.28)$$

$$\Gamma=2 \Rightarrow N_j = 2\pi R^3 \rho c_p \sin^2 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right). \quad (2.29)$$

2.1.3. Expressions de $\int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau$

Les calculs faits, nous obtenons pour un :

2.1.3.1. Produit de forme parallélépipédique

$$\int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau = \text{Long} \cdot \text{Larg} \rho c_p \left\{ \begin{array}{l} \int_0^R \cos \left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}} \right) d\xi \frac{q_0 \exp(kT_i)(1-kT_i)}{c_p \mu_i^2} (\exp(\mu_j^2 t) - 1) - \frac{\bar{h}_{ef}(0)}{2\lambda R} (f_T(R) - T_{cfin}) \\ \times \int_0^R \cos \left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}} \right) \xi^2 d\xi + \frac{\exp(\mu_j^2 t) \bar{h}_{ef}(t) (T(R,t) - \bar{T}_{cf}(t))}{2\lambda R} \int_0^R \cos \left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}} \right) \xi^2 d\xi - \\ \frac{1}{2\lambda R} \left(2a(1+\Gamma) \int_0^R \cos \left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}} \right) d\xi + \mu_j^2 \int_0^R \cos \left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}} \right) \xi^2 d\xi \right) \\ \times \int_0^t \bar{h}_{ef}(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) (T(R,t) - \bar{T}_{cf}(t)) d\tau \end{array} \right. \quad (2.30)$$

2.1.3.2. **Produit de forme cylindrique**

$$\int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau = 2\pi \text{ Long } \rho c_p \left\{ \begin{aligned} & \int_0^R J_0\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi \frac{q_0 \exp(kT_i)(1-kT_i)}{c_p \mu_j^2} (\exp(\mu_j^2 t) - 1) - \frac{\bar{h}_{ef}(0)}{2\lambda R} (f_T(R) - T_{cfin}) \\ & \times \int_0^R J_0\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi + \frac{\exp(\mu_j^2 t) \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t))}{2\lambda R} \int_0^R J_0\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi - \\ & \frac{1}{2\lambda R} \left(2a(1+\Gamma) \int_0^R J_0\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi + \mu_j^2 \int_0^R J_0\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi \right) \\ & \times \int_0^t \bar{h}_{ef}(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

2.1.3.3. **Produit de forme sphérique**

$$\int_0^t g'_j(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) d\tau = 4\pi \rho c_p \left\{ \begin{aligned} & \int_0^R \sin\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi \frac{q_0 \exp(kT_i)(1-kT_i)}{c_p \mu_i^2} (\exp(\mu_j^2 t) - 1) - \frac{\bar{h}_{ef}(0)}{2\lambda R} (f_T(R) - T_{cfin}) \\ & \times \int_0^R \sin\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi + \frac{\exp(\mu_j^2 t) \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t))}{2\lambda R} \int_0^R \sin\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi - \\ & \frac{1}{2\lambda R} \left(2a(1+\Gamma) \int_0^R \sin\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi + \mu_j^2 \int_0^R \sin\left(\mu'_j \frac{\xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi \right) \\ & \times \int_0^t \bar{h}_{ef}(\tau) \exp(\mu_j^2 \tau) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

$\tilde{T}_j(0)$ 2.1.4. Expressions de

Nous développons l'intégrale de l'équation (2.20), selon les valeurs de Γ , et nous aboutissons, après simplifications, aux différentes expressions de la transformée intégrale de la condition initiale :

2.1.4.1. Produit parallélépipédique

$$\text{Pour } \mu'_j \neq 0, \tilde{T}_j(0) = \frac{1}{2} \text{LongLarg} \rho c_p \frac{2aC_1 \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \cos\left(R \frac{\mu'_j}{\sqrt{a}}\right) \sin\left(R \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}}\right)}{\left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \sqrt{a + \mu'_j}\right) \left(\mu'_j - \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \sqrt{a}\right)} \quad (2.33)$$

avec $C_1 = \frac{\bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1 - kT_{ci}}{k}\right)}{\bar{h}_{ef}(0) \cos\left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R\right) - \lambda \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \sin\left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} R\right)}$

Lorsque $\mu'_0 = 0$, après passage à la limite, nous obtenons :

$$\tilde{T}_0(0) = \frac{1}{2} \text{LongLarg} c_p \frac{\left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_{ef}(0) \left((T_{ci} - T_{cfin}) q_0 \rho k + k q_0 \rho C_1 \cos\left(R \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}}\right) \right) \\ - q_0 \rho \\ + 2C_1 \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}} \sin\left(R \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci})k}{\lambda}}\right) \lambda^2 \exp(-kT_{ci}) \\ + 2kR T_{ci} q_0 \rho \lambda - 2R q_0 \rho \lambda \end{array} \right\}}{q_0 \lambda k} \quad (2.34)$$

2.1.4.2. **Produit cylindrique**

L'expression relative à une denrée de forme cylindrique ($\Gamma=2$) fait apparaître les fonctions de Bessel de première espèce.

$$\left. \begin{aligned}
 & 2Ra k \bar{h}_{ef}(0) \lambda T_{ci} J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j'^3 \\
 & -2Ra^2 \bar{h}_{ef}(0) k^2 T_{ci} q_0 \exp(kT_{ci}) \rho J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j' \\
 & -2\lambda^2 Rka C_1 \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) J_1 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} R \right) \mu_j'^3 \\
 & +2Ra \bar{h}_{ef}(0) C_1 J_0 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} R \right) J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \lambda k \mu_j'^3 \\
 & -2Ra^2 \bar{h}_{ef}(0) C_1 J_0 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} R \right) J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) k^2 q_0 \exp(kT_{ci}) \rho \mu_j' \\
 & -2Ra \bar{h}_{ef}(0) \lambda J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j'^3 \\
 & +2Ra^2 \bar{h}_{ef}(0) q_0 \exp(kT_{ci}) \rho k J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j' \\
 & -2Ra \bar{h}_{ef}(0) T_{cfin} k \lambda J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j'^3 \\
 & +2Ra^2 \bar{h}_{ef}(0) T_{cfin} k^2 q_0 \exp(kT_{ci}) \rho J_0 \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} R \right) \mu_j'
 \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Pour $\mu'_j \neq 0$, $\tilde{T}_j(0) = \pi \text{Long} \rho c_p$

$$\lambda \mu_j'^3 k (-\mu_j'^2 \lambda + q_0 \exp(kT_{ci}) \rho k a)$$

$$C_1 = \frac{\bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1-kT_{ci}}{k} \right)}{\bar{h}_{ef}(0) J_0 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} R \right) - \lambda \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} J_1 \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(kT_{ci}) k}{\lambda}} R \right)}, \text{ telque :}$$

avec

$$J_0(X) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{X}{2} \right)^{2k}}{(k!)^2}, \text{ fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0,}$$

$$J_1(X) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{X}{2} \right)^{2k+1}}{k!(k+1)!}, \text{ fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1.}$$

Pour $\mu'_0 = 0$, on obtient après passage à la limite :

$$\tilde{T}_0(0) = \pi \text{Long } c_p \left\{ \begin{array}{l} -R^2 \bar{h}_{ef}(0) k T_{cfin} q_0 \rho + R^2 h_{ef}(0) k T_{ci} q_0 \rho + k R^2 \bar{h}_{ef}(0) C_1 J_0 \left(R \sqrt{\frac{q_0 \exp(k T_{ci}) \rho k}{\lambda}} \right) q_0 \rho \\ + 8 \lambda^2 C_1 \sqrt{\frac{q_0 \exp(k T_{ci}) \rho k}{\lambda}} J_1 \left(R \sqrt{\frac{q_0 \exp(k T_{ci}) \rho k}{\lambda}} \right) \exp(-k T_{ci}) - R^2 \bar{h}_{ef}(0) q_0 \rho + 4 R \lambda k T_{ci} q_0 \rho \\ - 4 R \lambda q_0 \end{array} \right\} \quad (2.36)$$

$q_0 \lambda k$

2.1.4.3. Produit sphérique

$$\mu'_j \neq 0 \Rightarrow \tilde{T}_j(0) = 2 \pi \rho c_p \left\{ \begin{array}{l} \left(\sin \left(\left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} - \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} \right) R \right) \times \right. \\ \left. \bar{h}_{ef}(0) \left(T_{cfin} + \frac{1 - k T_{ci}}{k} \right) \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} + \frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} \right) \right. \\ \left. - \sin \left(\left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} + \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} \right) R \right) \times \right. \\ \left. \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} - \frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} \right) \right) + \\ \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} + \frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} \right) \left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}} - \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} \right) \Delta \\ \frac{\bar{h}_{ef}(0) R (f_T(R) - T_{cfin}) a \sin \left(\frac{\mu'_j R}{\sqrt{a}} \right)}{2 \mu_j'^2 \lambda} \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

$$\text{avec } \Delta = \bar{h}_{ef}(0) \left(\frac{\sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} R \right)}{R} + \lambda \left(\frac{\cos \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} R \right) \sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}}}{R} - \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{q_0 \rho \exp(k T_{ci}) k}{\lambda}} R \right)}{R^2} \right) \right)$$

pour $\mu'_0 = 0$, on obtient après passage à la limite:

$$\tilde{T}_0(0) = 0. \quad (2.38)$$

2.1.5. Développement de l'équation intégrale

L'expression de $T_1(\xi, t)$ obtenue par l'équation (2.22) renferme l'inconnue $T(R, t)$, température à la surface de la denrée, comme le montrent les équations (2.1), (2.30), (2.31) et (2.32).

Il est donc nécessaire, en premier lieu, d'en déterminer l'expression ou les valeurs fonction du temps afin de résoudre pour les positions ξ plus interne à la denrée.

L'équation à résoudre pour obtenir $T(R, t)$ est la combinaison des équations (2.22), (2.1) et, selon la forme du produit, soit de (2.30), soit de (2.31), soit de (2.32).

Nous posons $\xi = R$, et nous avons la forme générale :

$$\begin{aligned}
 T(R, t) + \frac{\bar{h}_{ef}(t)R}{2\lambda} [T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)] = & \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \exp(-\mu_j^2 t) \psi_j(R, \mu'_j) [\tilde{T}_j(0) + A(\mu'_j, R, t)] \\
 & + \frac{\alpha(\Gamma)}{2\lambda R} \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(R, \mu'_j) B(\mu'_j, R) \right\} \bar{h}_{ef}(t) [T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)] \\
 & + \int_0^t \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(R, \mu'_j) C(\mu'_j, R) \exp(-\mu_j^2 (t-\tau)) \right\} \bar{h}_{ef}(\tau) [T(R, \tau) - \bar{T}_{cf}(\tau)] d\tau \\
 \alpha(\Gamma) = & \begin{cases} \text{LongLarg} & \text{si } \Gamma=0, \\ 2\pi \text{Long} & \text{si } \Gamma=1, \\ 4\pi & \text{si } \Gamma=2. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

En regroupant les termes qui contiennent l'inconnue $T(R, t)$, nous aboutissons à une autre forme générale plus adéquate au calcul :

$$\begin{aligned}
 T'(R, t) = & \frac{\sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \exp(-\mu_j^2 t) \psi_j(R, \mu'_j) [\tilde{T}_j(0) + A(\mu'_j, R, t)] - \bar{T}_{cf}(t)}{V(R, t)} \\
 & + \int_0^t \frac{\left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(R, \mu'_j) C(\mu'_j, R) \exp(-\mu_j^2 (t-\tau)) \right\}}{V(R, t)} \bar{h}_{ef}(\tau) T'(R, \tau) d\tau
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

$$\text{telque: } V(R, t) = 1 + \frac{\bar{h}_{ef}(t)}{2\lambda} \left[R - \frac{\alpha(\Gamma)}{R} \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(R, \mu'_j) B(\mu'_j, R) \right\} \right]$$

$$\text{et } T'(R, t) = T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)$$

C'est une *équation intégrale* de type «Voltera» qui a, certes, une solution analytique d'après **Smirnov** [20], mais son expression est compliquée (la somme d'intégrales multiples) et peu adéquate à être programmer sur ordinateur.

Nous préférons donc, pour résoudre sur ordinateur, l'algorithme numérique proposé par **Press** et al. [21] (chapitre 18 équations (2.2) à (2.4)) pour une équation de type Voltera, et que nous reportons dans l'annexe 1.

L'expression de la solution analytique de (2.40) est, néanmoins, donnée dans l'annexe 1, à titre informatif.

Une fois que les valeurs de $T(R, t)$ sont obtenues, on réutilise la combinaison des équations (2.1) et (2.22), pour chaque valeur de ξ , afin de déterminer $T(\xi, t)$:

$$\begin{aligned}
T(\xi, t) = & \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \exp(-\mu_j^2 t) \psi_j(\xi, \mu_j') [\tilde{T}_j(0) + A(\mu_j', R, t)] \\
& + \left\{ \alpha(\Gamma) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(\xi, \mu_j') B(\mu_j', R) - \xi^2 \right\} \frac{\bar{h}_{ef}(t)}{2\lambda R} [T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)] \\
& + \int_0^t \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(\xi, \mu_j') C(\mu_j', R) \exp(-\mu_j^2 (t - \tau)) \right\} \bar{h}_{ef}(\tau) [T(R, \tau) - \bar{T}_{cf}(\tau)] d\tau
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Pour avoir la solution $T(\xi, t)$ lorsque l'intervalle de variation de température de la denrée, $[T_0, T_n]$, est relativement large (supérieur à $1^\circ C$), on utilise l'équation :

$$T(\xi, t) = \sum_{i=0}^n [U(T(\xi, t) - T_i) - U(T(\xi, t) - T_{i+1})] T^{(i)}(\xi, t), \tag{2.42}$$

où $U(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0, \\ 0 & \text{si } x < 0, \\ \frac{1}{2} & \text{si } x = 0. \end{cases}$ est l'échelon unitaire de Heaviside définie par **Spiegel** [22],

$T^{(i)}(\xi, t)$ est la solution, de (1.2) à (1.5), correspondante à la valeur de T_i .

Les températures T_i sont fixées d'avance tel que $T_{i+1} - T_i = 1^\circ C$.

On vérifie bien que $q_0 \sum_{i=0}^n [U(T - T_i) - U(T - T_{i+1})] \exp(kT_i) (1 + k(T - T_i))$ représente une bonne approximation de $q_0 \exp(kT)$ lorsque $T(\xi, t)$ appartient à l'intervalle $[T_0, T_n]$.

Les différentes expressions des fonctions $A(\mu_j', R, t)$, $B(\mu_j', R)$, $C(\mu_j', R)$ sont reportées dans l'annexe 1.

2.2. Résolution analytique du problème relatif à l'air de la chambre froide

Les solutions générales des équations du premier ordre (1.25) et (1.26) sont respectivement [16] :

$$\bar{T}_{cf}(t) = c_1 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv} \right) t \right) + \left\{ \frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} \bar{\bar{T}}_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev} \bar{\bar{T}}_{ev} - W_s}{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}} \right\}, \quad (2.43)$$

pendant chaque phase de fonctionnement de la machine frigorifique de la chambre froide.

$$\bar{T}_{cf}(t) = c_2 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv} \right) t \right) + \bar{\bar{T}}_{pcf}, \quad (2.44)$$

pendant chaque phase d'arrêt de la machine frigorifique de la chambre froide.

Afin de calculer les constantes c_1 , c_2 , $\bar{\bar{T}}_{pcf}$ et l'expression entre accolades, on utilise le fait que la température varie périodiquement entre T_{cfin} et T_{cfbas} fixes.

Si T_{pr} représente la durée d'une période (fonctionnement+arrêt) et t_f la durée des phases de fonctionnement, alors nous avons continuité de la température de l'air aux temps de la forme $MT_{pr} + t_f$ où M est un entier quelconque; lorsque le temps t est compris dans un intervalle d'une longueur T_{pr} , M représente la partie entière de t divisé par la période.

Les conditions de continuité et de périodicité de la température de l'air de la chambre froide sont :

$$\begin{cases} \bar{T}_{cf}(MT_{pr}) = \bar{T}_{cf}((M+1)T_{pr}) = T_{cfin}, M = 0,1,2,\dots, \\ \bar{T}_{cf}(MT_{pr} + t_f) = T_{cfbas}. \end{cases} \quad (2.45)$$

Par conséquent, nous avons à résoudre le système d'équations algébriques:

$$c_1 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) MT_{pr} \right) + \frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} \bar{T}_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev} \bar{T}_{ev} - W_s}{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}} = T_{cfin}, \quad (2.46)$$

$$c_1 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) (MT_{pr} + t_f) \right) + \frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} \bar{T}_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev} \bar{T}_{ev} - W_s}{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}} = T_{cfbas}, \quad (2.47)$$

$$c_2 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) (MT_{pr} + t_f) \right) + \bar{T}_{pcf} = T_{cfbas}, \quad (2.48)$$

$$c_2 \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) (M+1)T_{pr} \right) + \bar{T}_{pcf} = T_{cfin}, \quad (2.49)$$

(2.46) et (2.47) donnent, par soustraction et substitution :

$$c_1 = \frac{(T_{cfin} - T_{cfbas}) \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) MT_{pr} \right)}{1 - \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) t_f \right)} \quad (2.50)$$

$$\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} \bar{T}_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev} \bar{T}_{ev} + W_s}{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}} = \frac{T_{cfbas} - T_{cfin} \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) t_f \right)}{1 - \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{\bar{c}_{vair} \iiint_{V_{ef}} \rho_{air} dv} \right) t_f \right)} \quad (2.51)$$

Les equations (2.48) et (2.49) donnent, par soustraction et substitution :

$$c_2 = \frac{(T_{cf\text{fin}} - T_{cf\text{bas}}) \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{\text{vair}} \iiint_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} dv} \right) (MT_{pr} + t_f) \right)}{1 - \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{\text{vair}} \iiint_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} dv} \right) (T_{pr} - t_f) \right)} \quad (2.52)$$

$$\bar{T}_{pcf} = T_{cf\text{bas}} + \frac{T_{cf\text{fin}} - T_{cf\text{bas}}}{1 - \exp \left(- \left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{\text{vair}} \iiint_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} dv} \right) (T_{pr} - t_f) \right)} \quad (2.53)$$

Afin d'obtenir une valeur approchée de la masse de l'air de la chambre froide, $\iiint_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} dv$, nous devons connaître une équation d'état de l'air .

Pour cela, la plus simple à utiliser est l'équation des gaz parfaits qui donne de bon résultats aux pressions relativement faibles comme le cas de la pression atmosphérique.

Donc, à partir de cette équation, on obtient:

$$\iiint_{V_{cf}} \rho_{\text{air}} dv \approx \frac{V_{cf}}{R_g (T_{cf\text{fin}} + 273.15)} M_{\text{air}} \quad (2.54)$$

En remplaçant les expressions de c_1 et c_2 dans les équations (2.43), (2.44), on obtient :

$$\bar{T}_{cf}(t) = \frac{(T_{cfin} - T_{cfbas}) \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)(t - MT_{pr})\right) + T_{cfbas} - T_{cfin} \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)t_f\right)}{1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcff} A_{pcf} + \bar{h}_{evcf} S_{ev}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)t_f\right)}, \quad (2.55)$$

si $MT_{pr} \leq t \leq MT_{pr} + t_f$; phases de fonctionnement.

$$\bar{T}_{cf}(t) = \frac{(T_{cfin} - T_{cfbas}) \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)(t - MT_{pr} - t_f)\right) + T_{cfin} - T_{cfbas} \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)(T_{pr} - t_f)\right)}{1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{h}_{pcfn} A_{pcf}}{c_{vair} \iiint_{V_{cf}} \rho_{air} dv}\right)(T_{pr} - t_f)\right)}, \quad (2.56)$$

si $MT_{pr} + t_f \leq t \leq (M+1)T_{pr}$; phases d'arrêt.

3. Simulations et interprétations

Dans ce chapitre, nous étudions l'effet des paramètres de fonctionnement d'une chambre froide sur la distribution des températures à l'intérieur des denrées alimentaires de formes sphériques, cylindriques ou parallélépipédiques.

Parmi ces paramètres, on distingue la durée d'une période (fonctionnement + arrêt) de la température de l'air de la chambre froide, l'amplitude des variations de température de l'air, $T_{cf\text{fin}} - T_{cf\text{bas}}$, l'effet de la vitesse moyenne de l'air pendant les phases de fonctionnement.

Les résultats des simulations ont été obtenus par l'exécution d'un programme que nous avons écrit en Objet Pascal du logiciel de programmation orienté objet Delphi 4.

Ce programme met en œuvre les principales équations du chapitre 2, à savoir les équations (2.11 à 2.16, 2.24 à 2.26, 2.39 à 2.42 et 2.54 à 2.56), en tenant compte de leur relativité à chaque forme géométrique.

Nous avons choisit un pas de variation du temps de $Dt = 0.1$ h et nous avons appliqué, à la résolution de l'équation intégrale (2.40) par la méthode numérique de **Press** et al. [21], le procédé d'extrapolation de Richardson [21, 23], afin d'améliorer la précision des résultats $T(R, t)$ et $T(\xi, t)$.

Pour tenir compte de l'effet du terme de source, qui suit une loi de variation exponentielle en fonction de la température locale du produit sur tout l'intervalle de température, après la linéarisation autour d'une température T_i (équation 1.1), nous faisons varier T_i avec un pas de 1°C de la température $T_{cf\text{fin}}$ à la température $T_{cf\text{bas}}$.

Pour chaque valeur de T_i , on obtient, par résolution de (2.40) et utilisation de (2.41), $T^{(i)}(R, t)$ et $T^{(i)}(\xi, t)$, que l'on enregistre, avec le pas Dt de progression du temps t , sur toute la durée de conservation du produit.

Des que $\left| T^{(i)}(\xi, t) - T_i \right| \geq 1$, l'approximation du terme de source par (1.1) devient moins précise et on change par conséquent de valeur pour T_i et, de ce fait, on change également de solutions $T^{(i)}(\xi, t)$ et $T^{(i)}(R, t)$.

La durée totale de conservation de la denrée est prise égale à 48 heures afin de pouvoir observer, sur un nombre suffisant de périodes (fonctionnement+arrêt) de la machine frigorifique, l'existence ou non du régime permanent.

Nous choisissons, pour faire nos simulations, une pomme, une orange, une tomate, une carotte, une banane, de la crème glacée cylindrique, du beurre ; que nous introduisons chacune à la fois dans la chambre froide.

On se sert des références [24-28], pour se procurer les données thermophysiques des produits utilisés. Nous reportons ces valeurs, dans l'annexe 1.

L'interface du programme est :

The screenshot shows the software interface for simulating the refrigeration of food products. The window title is "SIMULATION DE LA REFRIGERATION DE PRODUITS ALIMENTAIRES".

Input fields include:

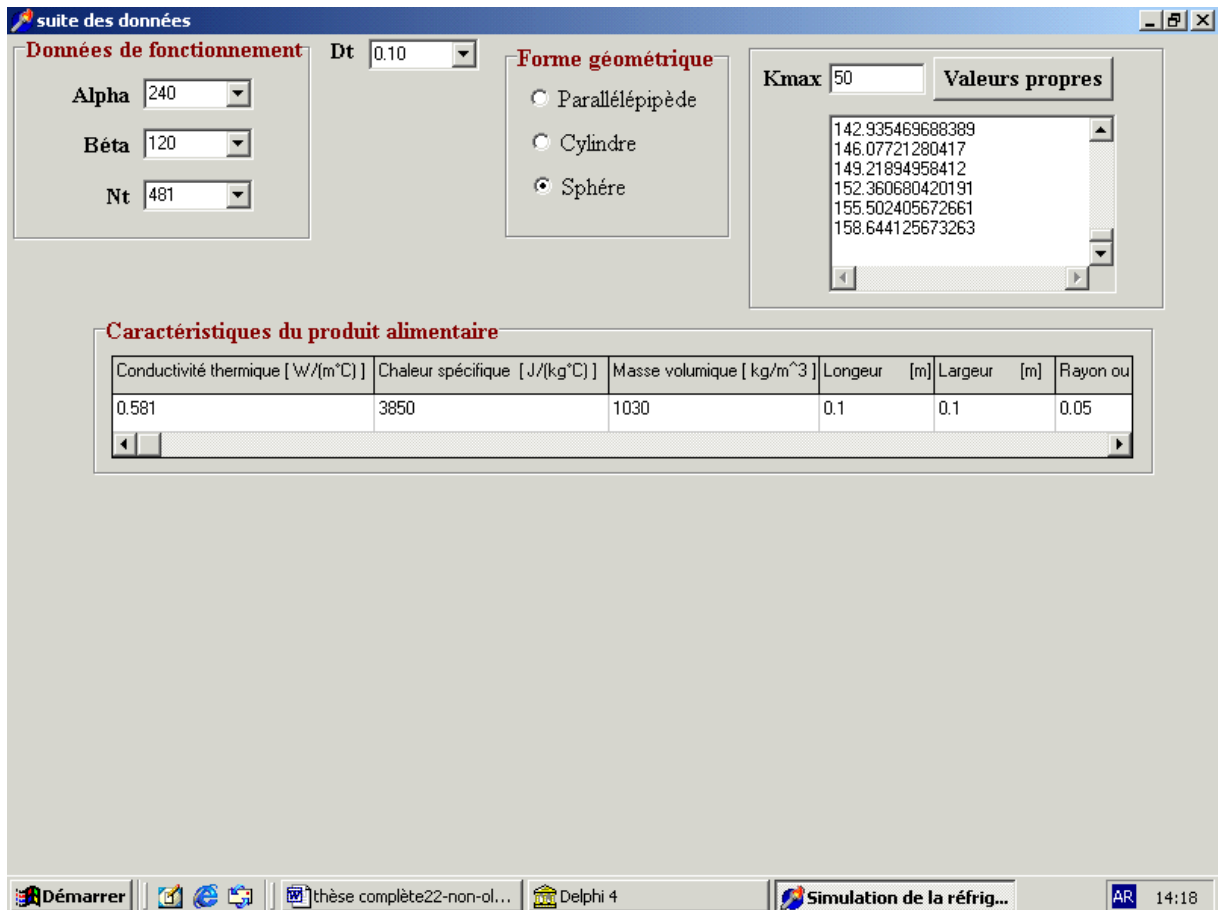
- Ksi: 0
- Ordre de l'extrapolation de Richardson: 4
- Données sur les parois de la chambre froide:**
 - Apcf: 199
 - Hpcf: 6.54960
 - Hpcn: 1
- Données sur l'air:**
 - Tintrod: 4
 - Tcfin: 4
 - Tcfbas: 2
 - Tambiante: 18
 - Hcf: 17.3
 - Hcn: 1
 - Vcf: 165
 - Umoyair: 2
- Données sur l'évaporateur:**
 - Sev: 54.3
 - D₀: 0.014
 - hevcf: 127.69

A table titled "Température de Surface ou Intérieure" displays the following data:

0	4	4.014	4.025
2	2	2.193	2.363
4	2	2.057	2.107
6	2	2.025	2.044
8	2	2.017	2.029
10	2	2.015	2.026
12	2	2.015	2.025
14	4	2.257	2.181
16	4	2.458	2.391
18	4	2.638	2.579
20	4	2.8	2.748
22	4	2.945	2.899
24	4	3.169	3.054
26	2	2.203	2.383
28	2	2.06	2.111
30	2	2.025	2.045
32	2	2.017	2.03
34	2	2.015	2.026
36	2	2.015	2.025
38	4	2.257	2.181
40	4	2.458	2.391

A button labeled "Reste des données" is located at the bottom right of the interface.

Lorsqu'on appui sur «reste des données », on voit la fenêtre :



Nous adoptons, pour nos simulations, l'exemple de l'entrepôt frigorifique de l'article de **Hasse** et al [12] qui en donne les caractéristiques ; il a un volume $V_{cf} = 165 \text{ m}^3$ pour une surface totale de ses parois $A_{pcf} = 199 \text{ m}^2$.

La surface de l'évaporateur est $S_{ev} = 54.3 \text{ m}^2$.

On admet que $t_f = \frac{T_{pr}}{2}$.

On a calculé avec 50 valeurs propres, pour avoir la convergence de la solution.

Afin d'évaluer les coefficients moyens de convection de l'air \bar{h}_{cf} , \bar{h}_{en} , \bar{h}_{evcf} , \bar{h}_{pcff} , \bar{h}_{pcfn} nous avons utilisé des corrélations qui lient le nombre de **Nusselts** aux nombres de **Reynolds** et de **Prandtl**, en convection forcée autour des objets de formes simples (sphérique, cylindrique, parallélépipédique), et aux nombres de **Grashof** et **Prandtl**, en convection naturelle ; on peut se reporter, par exemple, aux références de **Bennett** [14], **Kreith** [17], et autres [15, 29].

Par conséquent, nous n'avons qu'un ordre de grandeur de ces coefficients.

Un résumé d'ensemble de ces corrélations est reporté dans l'annexe 4.

Pour simplifier la notation des légendes, nous omettons le signe barre sur les lettres h et U .

Les tableaux des valeurs numériques, solution du modèle, calculées par le programme sont fournis dans l'annexe 5.

3.1. Influence de la période de fluctuation de la température de l'air

Nous comparons l'allure des courbes relatives au centre du produit ($\xi = 0$) et à sa surface ($\xi = R$), sur différentes valeurs de la période T_{pr} , et pour différentes denrées.

On fixe une vitesse moyenne de l'air de 2m/s, pendant les phases de fonctionnement de la machine frigorifique.

3.1.1. Cas d'un produit sphérique

a) Une pomme

Pour une pomme de 10 cm de diamètre qui est conservée dans un intervalle de températures de l'air de 1°C, entre 5 °C et 4°C, nous obtenons les figures 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 ; aux périodes respectives de 24 h, 12h, 6h, 16h :

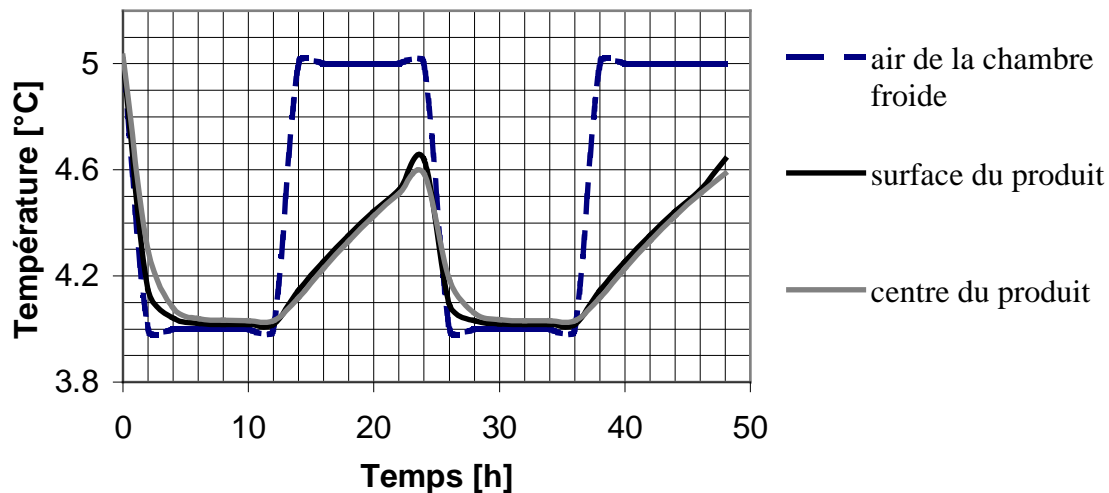


Figure 3.1 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=24$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

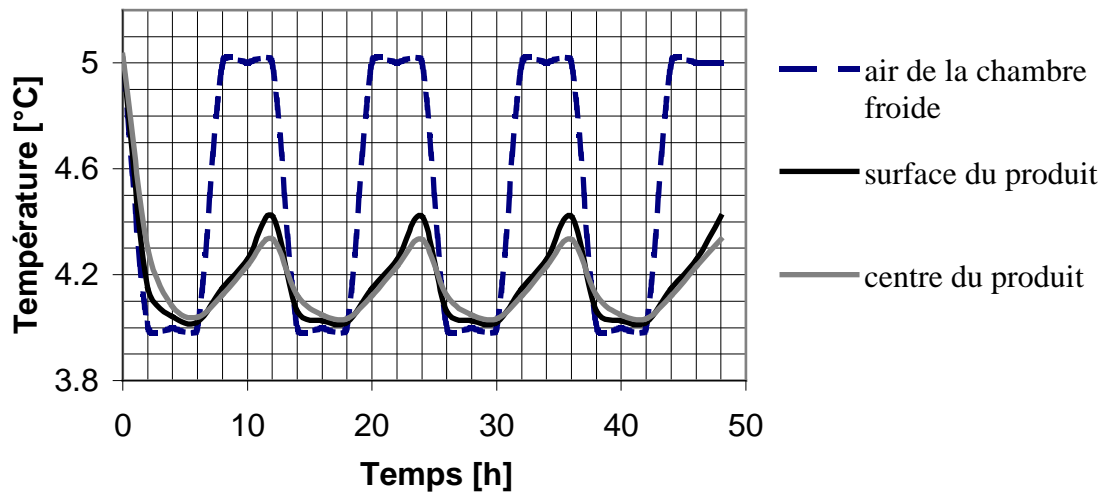


Figure 3.2 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

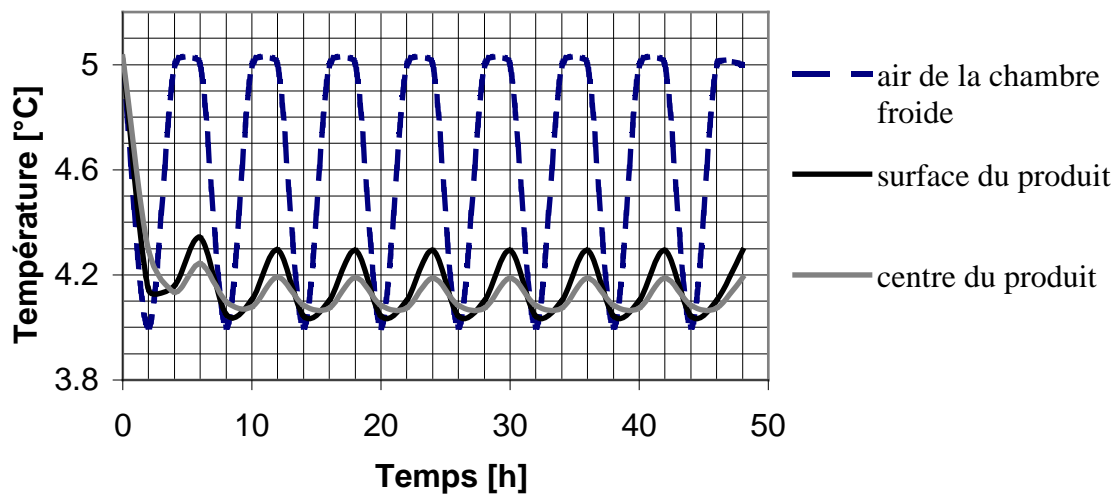


Figure 3.3 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=6$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

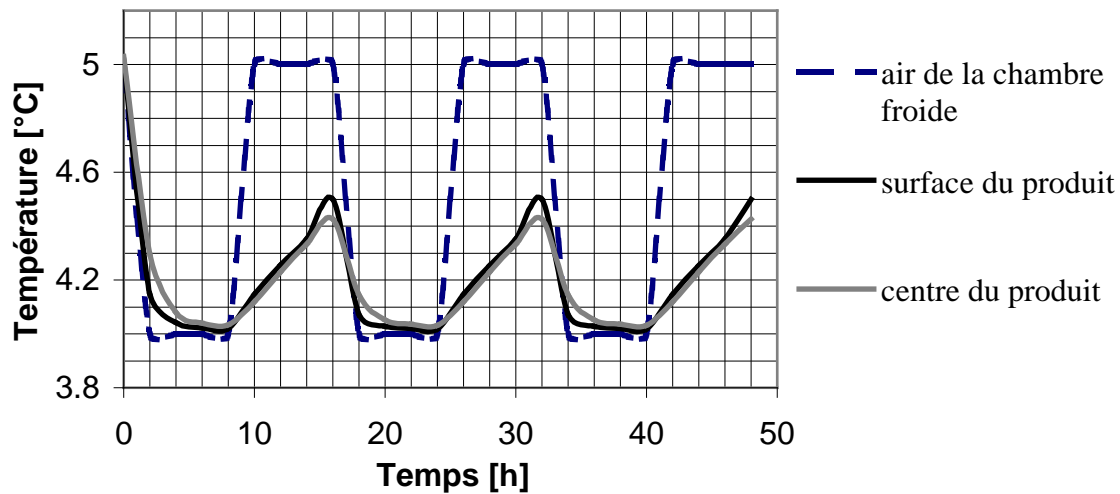


Figure 3.4 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=16$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

b) Une tomate

Pour une tomate de même diamètre que la pomme, maintenue entre des températures de l'air de 7 °C et 10°C, températures que préconise **Rapin** et al.[8] pour une courte durée de sa conservation, nous obtenons les figures 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, correspondantes, respectivement, aux périodes 24h, 12h, 6h, 16h :

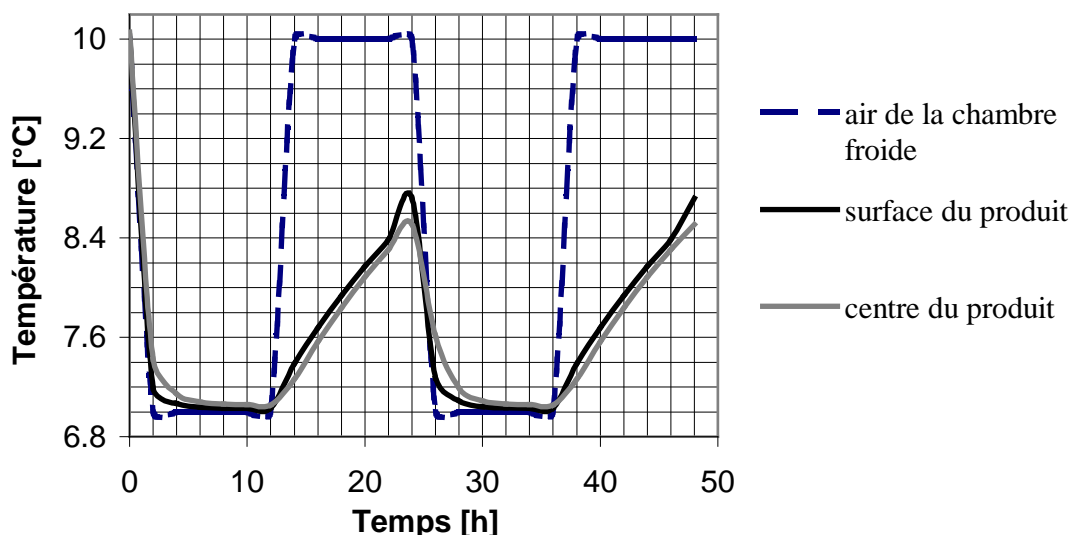


Figure 3.5 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=24$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

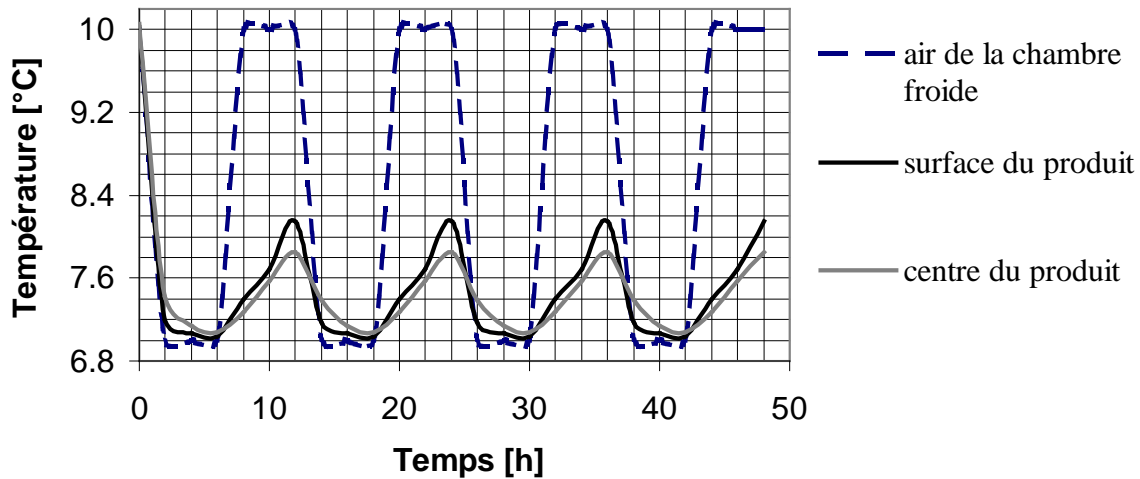


Figure 3.6 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

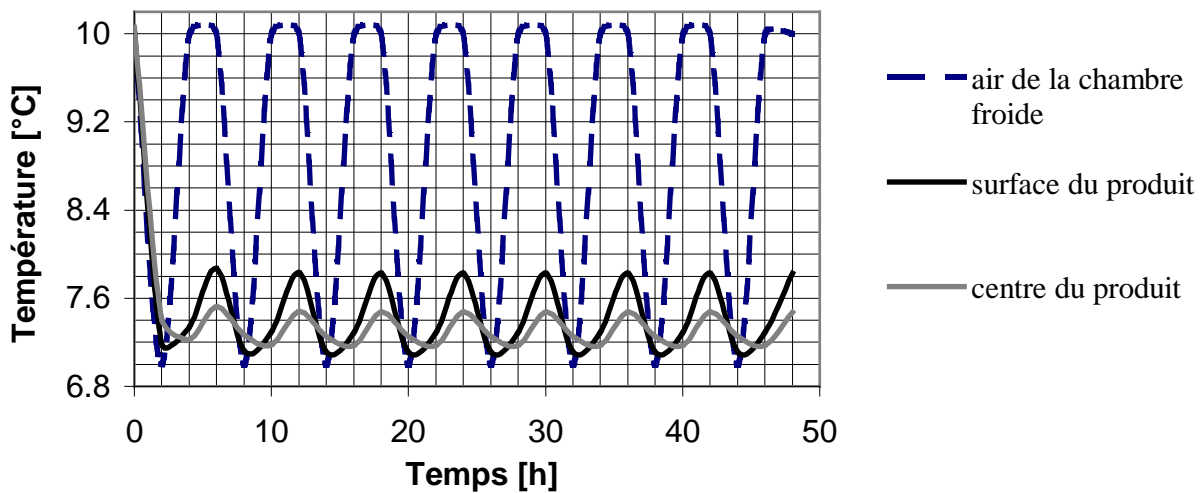


Figure 3.7 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=6$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

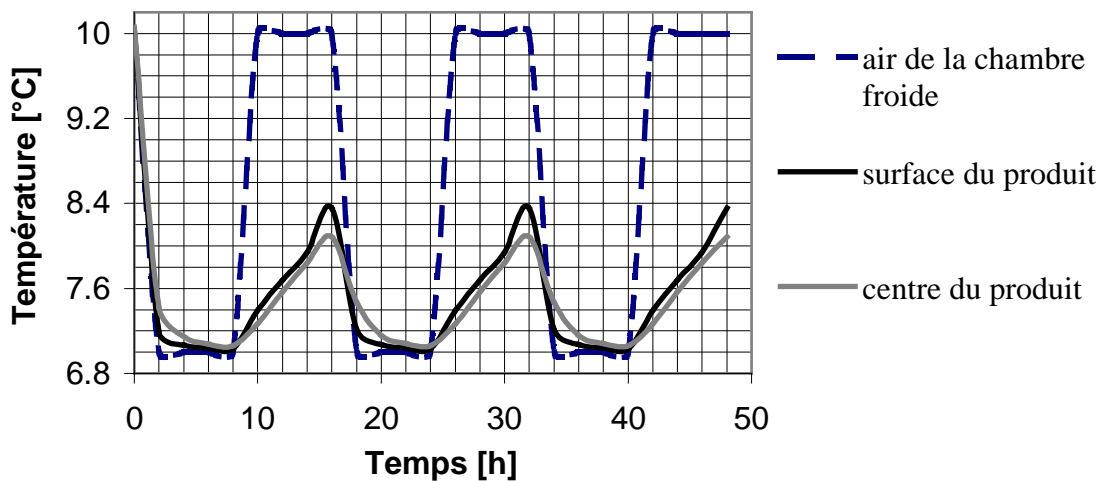


Figure 3.8 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=16$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

c) Une orange

Pour une orange de même diamètre que la pomme, conservée entre 2 °C et 4 °C, températures recommandées par **Rapin** et al.[8], on obtient les figures 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, respectivement aux périodes 24h, 12h, 6h, 16h :

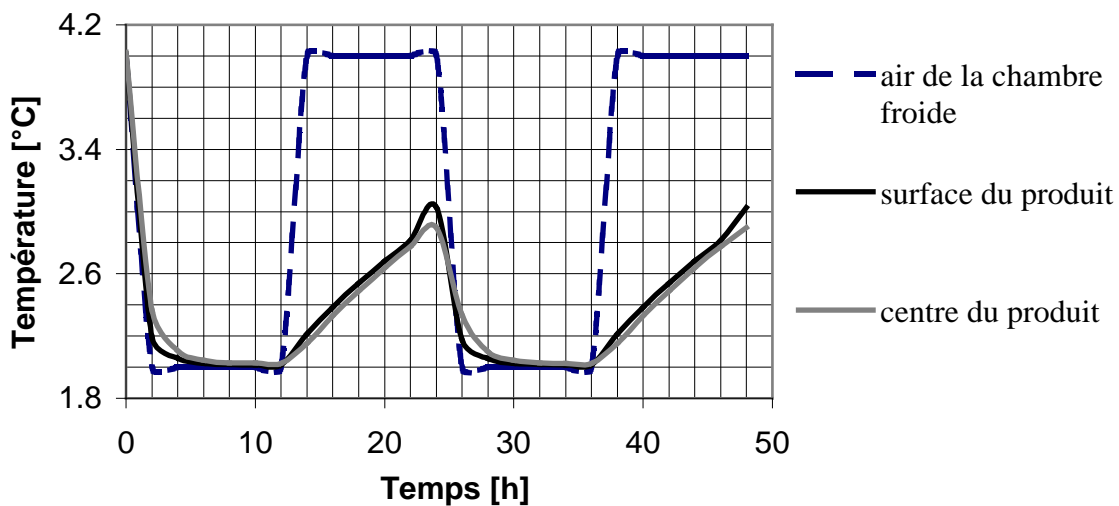


Figure 3.9 Profils des températures d'une orange de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=24$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.3$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

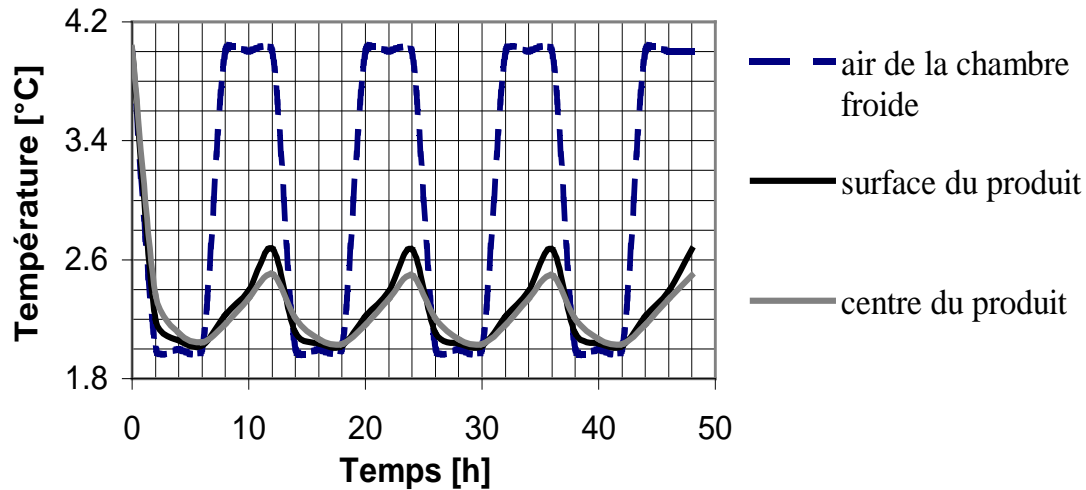


Figure 3.10 Profils des températures d'une orange de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.3$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

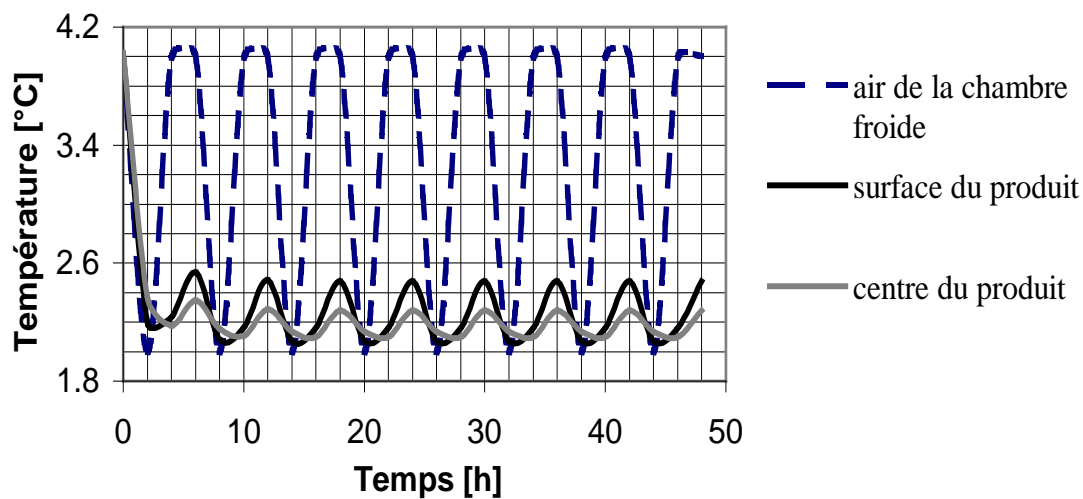
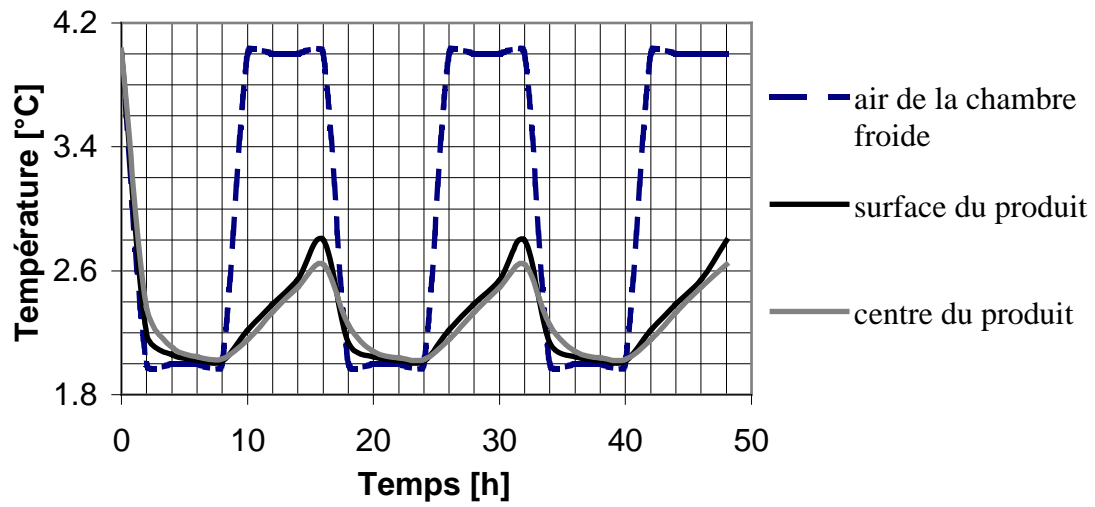


Figure 3.11 Profils des températures d'une orange de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=6$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=17.3$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).



$$T_{pr}=16 \text{ h}, T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}, U_{\text{air}} = 2 \text{ m/s}, h_{cf}=17.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}),$$

$$h_{cn}=1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), h_{evcf}=127.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), h_{pcff}= 6.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}),$$

$$h_{pcfn}=1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}).$$

3.1.2. Cas d'un produit de forme cylindrique

a) Une banane

On choisit une banane de 0.20m de longueur et 0.03m de diamètre, conservée entre 11°C et 15°C.

Nous obtenons les figures 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, pour les périodes respectives de 24h, 12h, 6h, 16h :

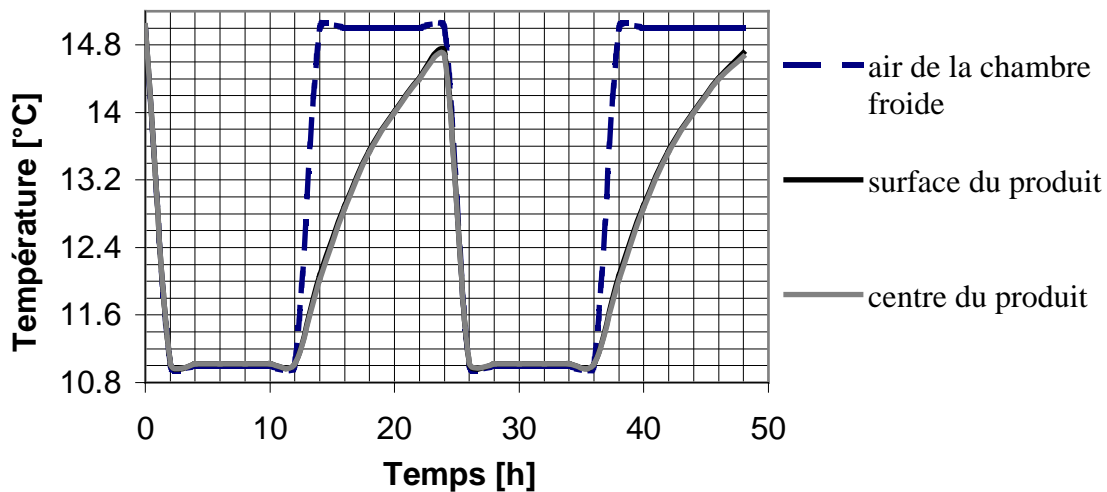


Figure 3.13 Profils des températures d'une banane de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=24$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=4^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=23.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.3$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

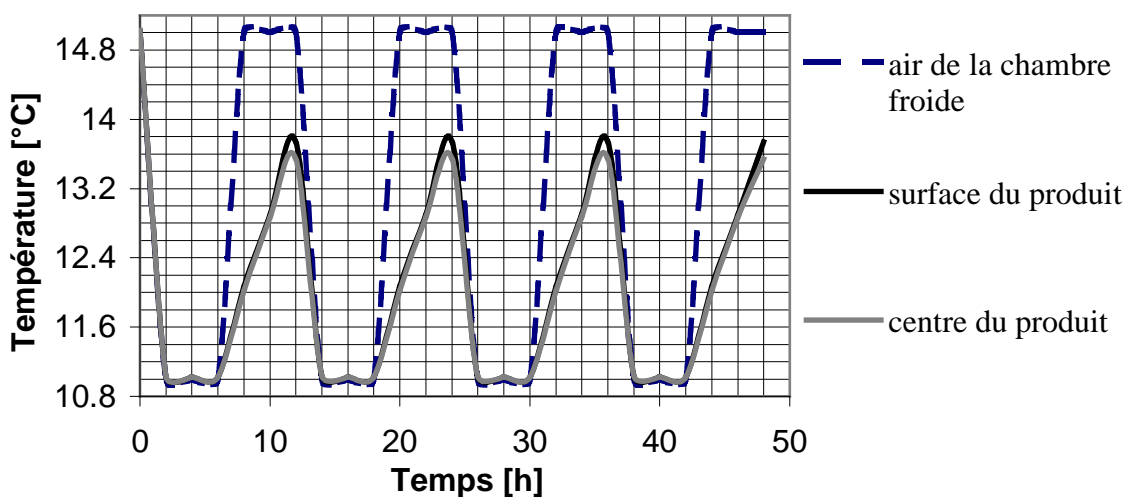


Figure 3.14 Profils des températures d'une banane de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=4^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=23.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.3$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

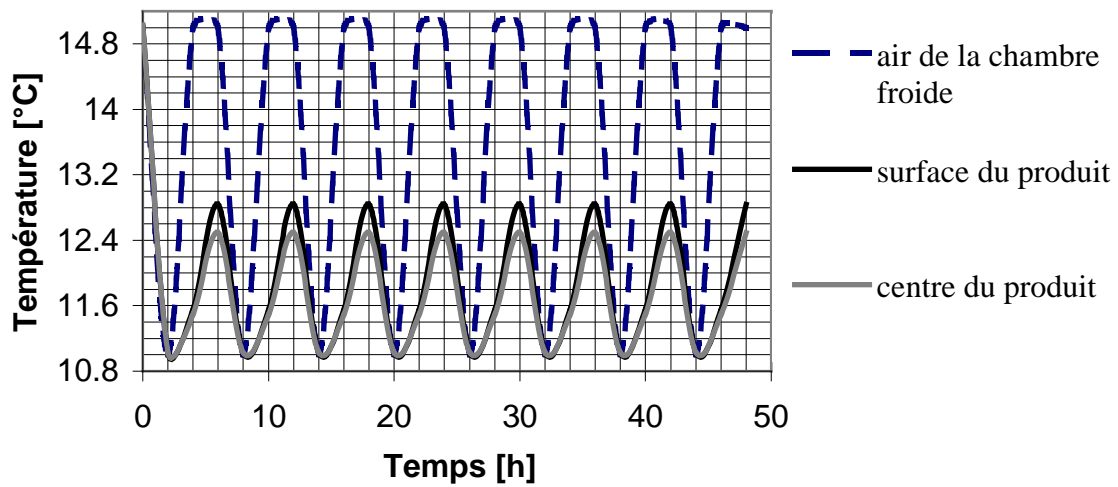
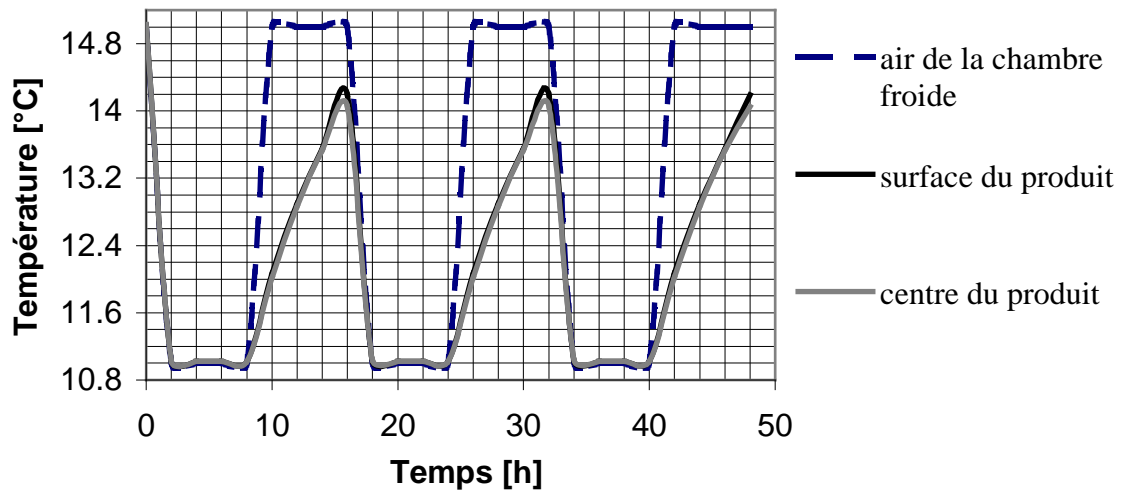


Figure 3.10 Profils des températures d'une banane de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=16$ h, $T_{cfm}-T_{cfbas}=4^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.3$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C). $h_{pcff}= 6.3$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).



b) Une carotte

Nous choisissons une carotte de même dimensions que la banane, conservée entre 4°C et 6°C, températures conseillées par [8].

Nous obtenons les figures 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, pour les périodes respectives de 24h, 12h, 6h, 16h :

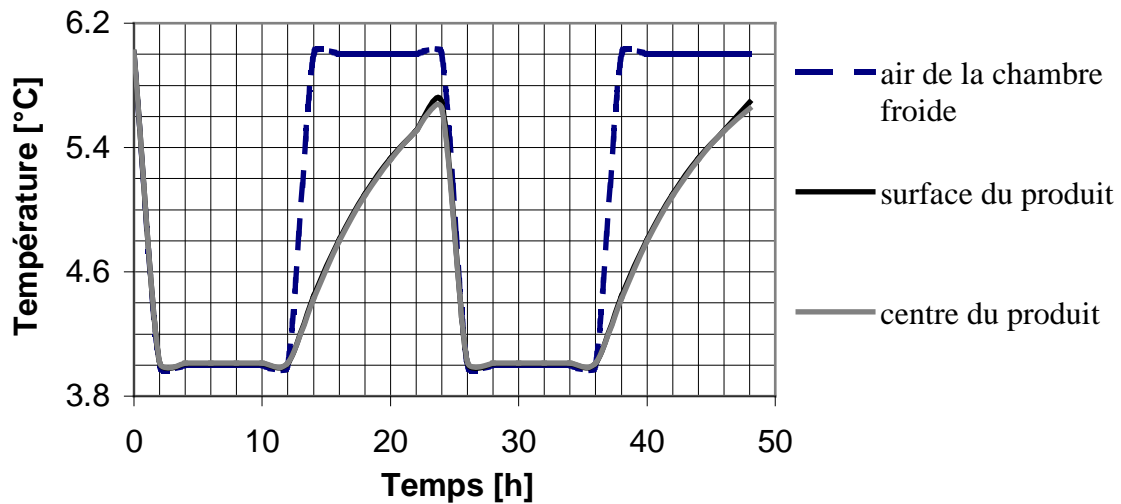


Figure 3.17 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=24$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

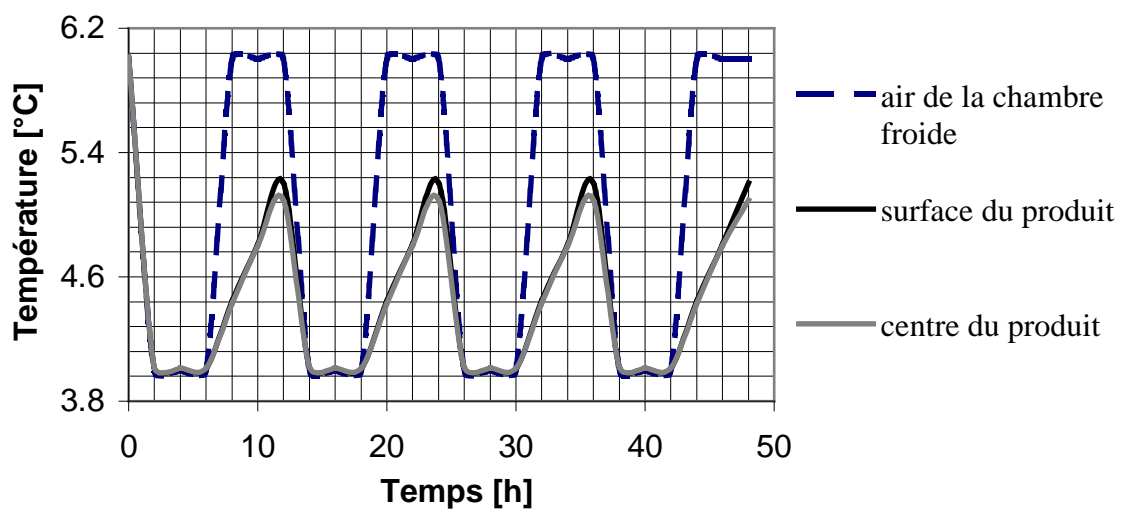


Figure 3.18 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

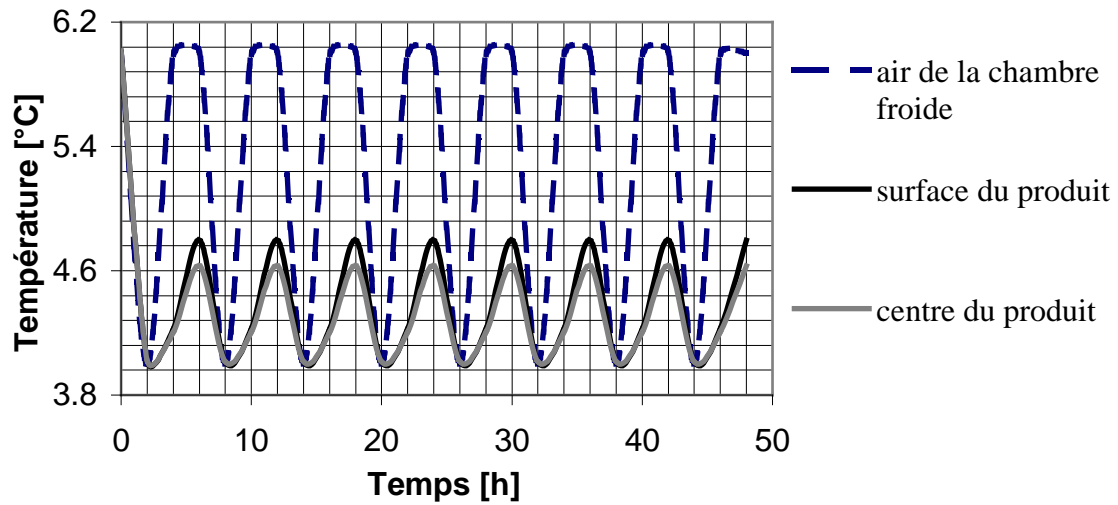


Figure 3.19 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=6$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=23.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

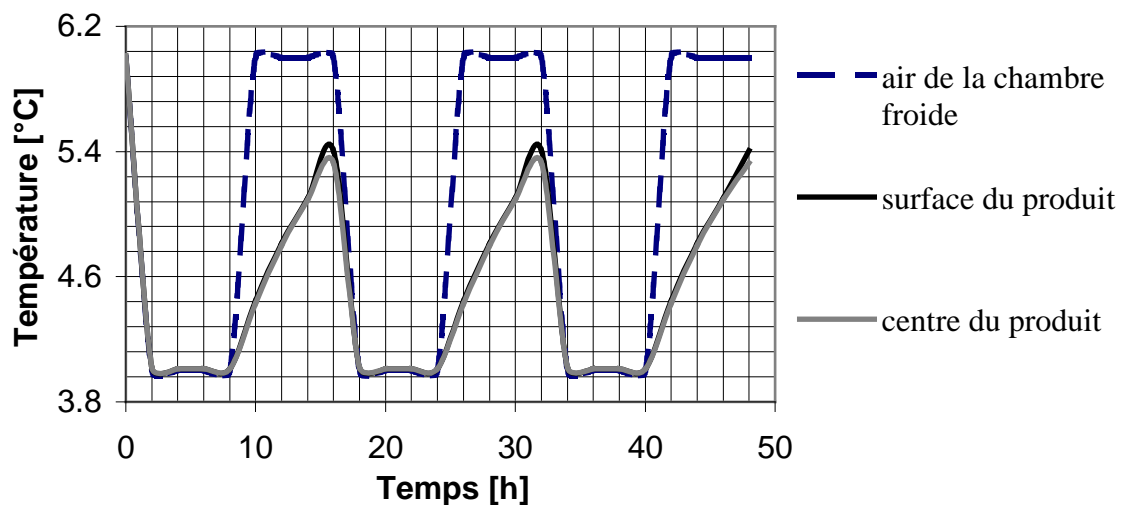


Figure 3.20 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=16$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=23.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

c) Une crème glacée cylindrique

Nous adoptons une crème glacée de 0.1m de diamètre et 0.19m de longueur, conservée entre -19.3°C et -9.6°C ; identique à celle utilisée dans les expériences de **Zuritz** et al. [30]

Nous traçons les courbes des figures 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, respectivement, pour les périodes de 24h, 12h, 6h, 16h :

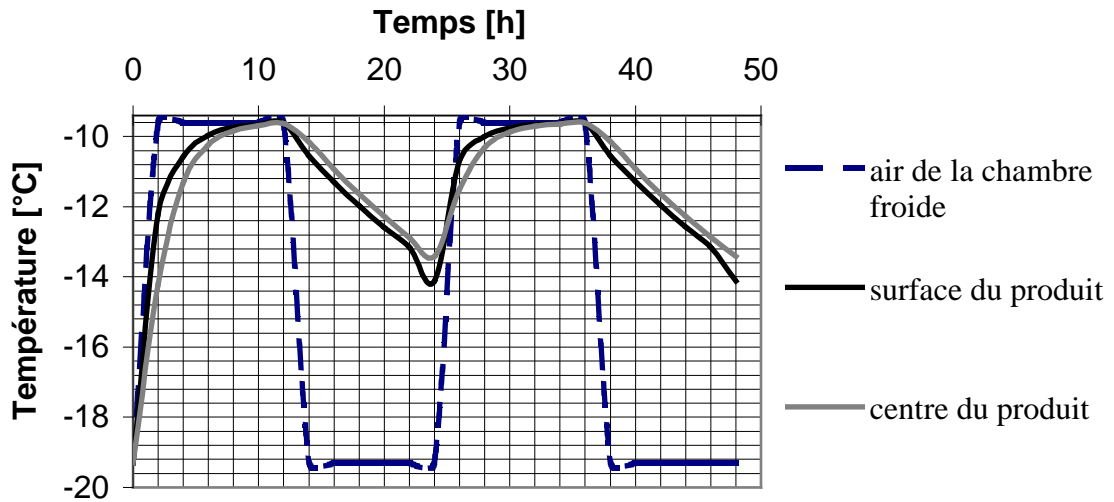


Figure 3.21 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=24$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m^2C), $h_{cn}=1$ W/(m^2C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m^2C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m^2C), $h_{pcfn}=1$ W/(m^2C).

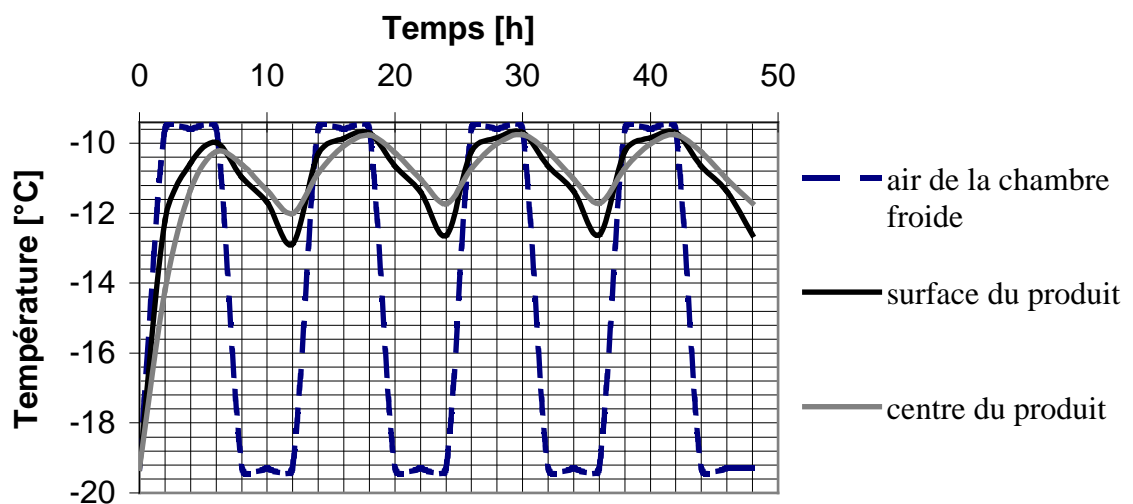


Fig et 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m^2C), $h_{cn}=1$ W/(m^2C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m^2C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m^2C), $h_{pcfn}=1$ W/(m^2C).

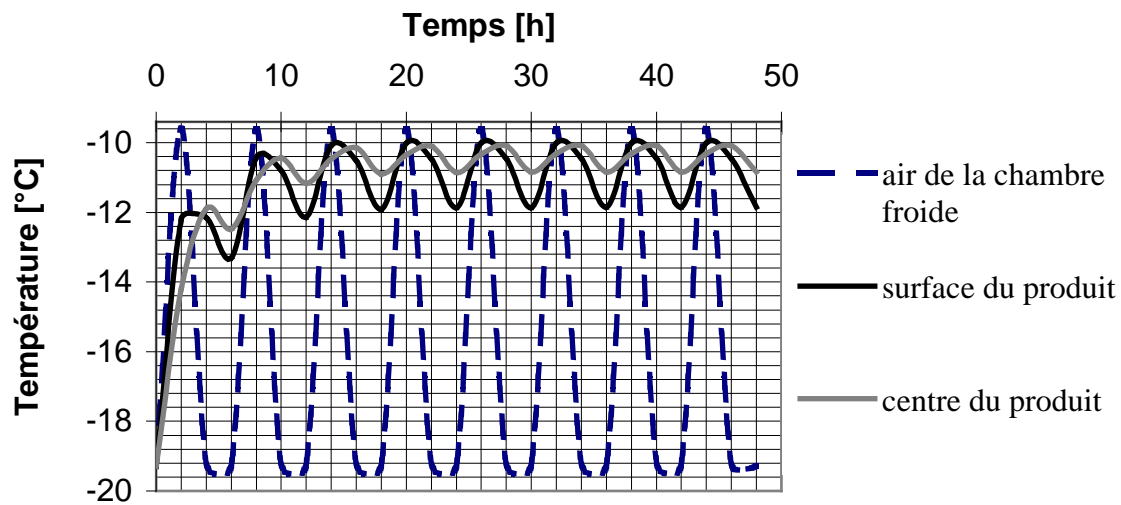


Figure 3.23 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=6h$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}C$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

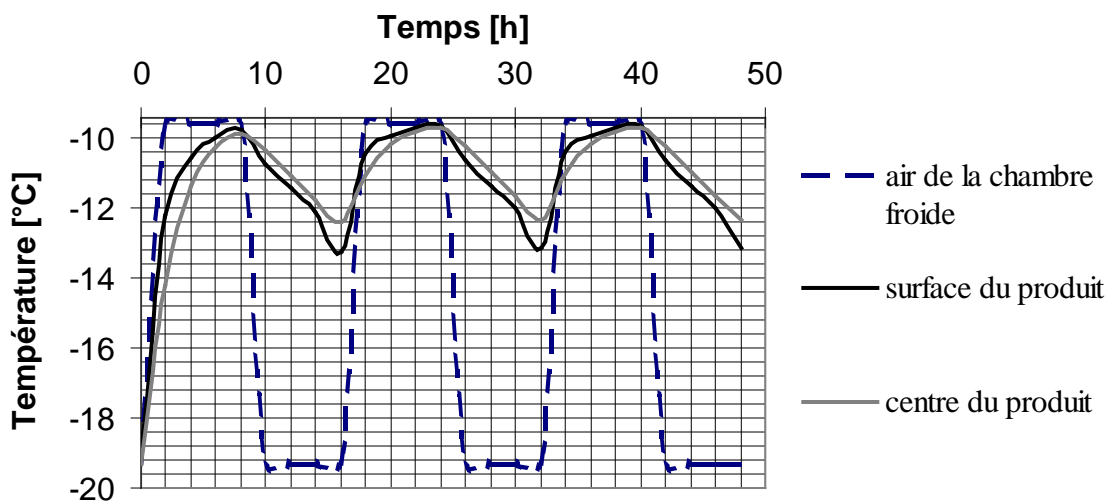


Figure 3.24 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=16h$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}C$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

3.1.3. cas d'un produit de forme parallélépipédique

Nous choisissons pour cette forme l'exemple d'un beurre (margarine) de 0.12m de longueur, de 0.06 m de largeur et 0.03 m d'épaisseur, conservée entre 6°C et 8°C qui sont recommandées par [8].

Alors, nous obtenons les figures 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, respectivement pour les périodes 24h, 12h, 6h, 16h :

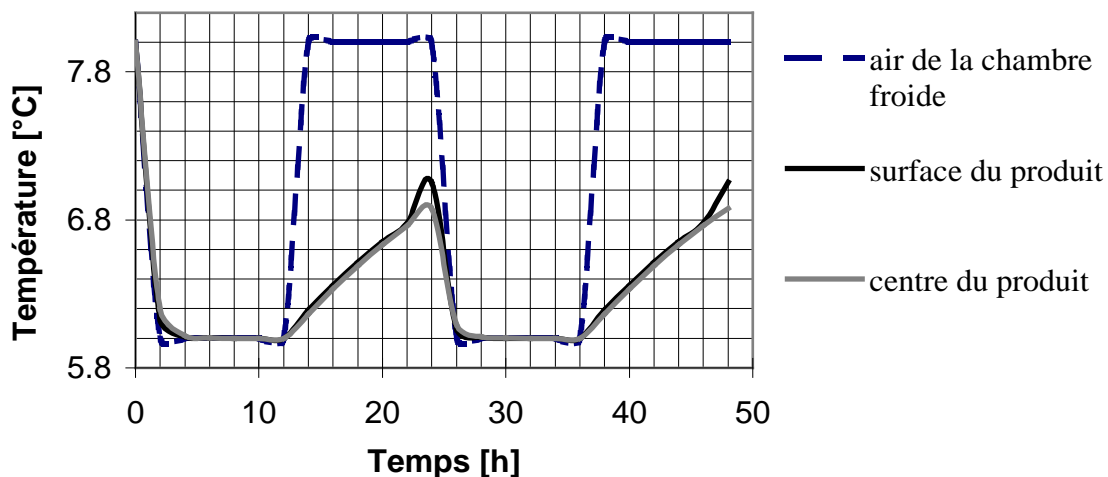


Figure 3.25 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06 m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=24h$, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2\text{ m/s}$, $h_{cf}=15\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{cn}=1\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{evcf}=127.7\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{pcff}=6.5\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{pcfn}=1\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$.

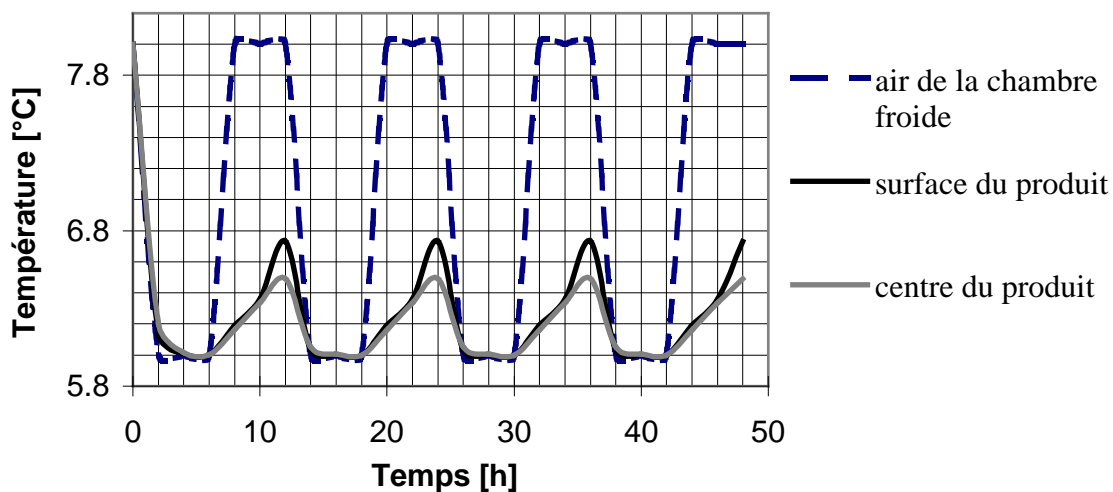


Figure 3.26 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06 m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=12h$, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2\text{ m/s}$, $h_{cf}=15\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{cn}=1\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{evcf}=127.7\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{pcff}=6.5\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$, $h_{pcfn}=1\text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$.

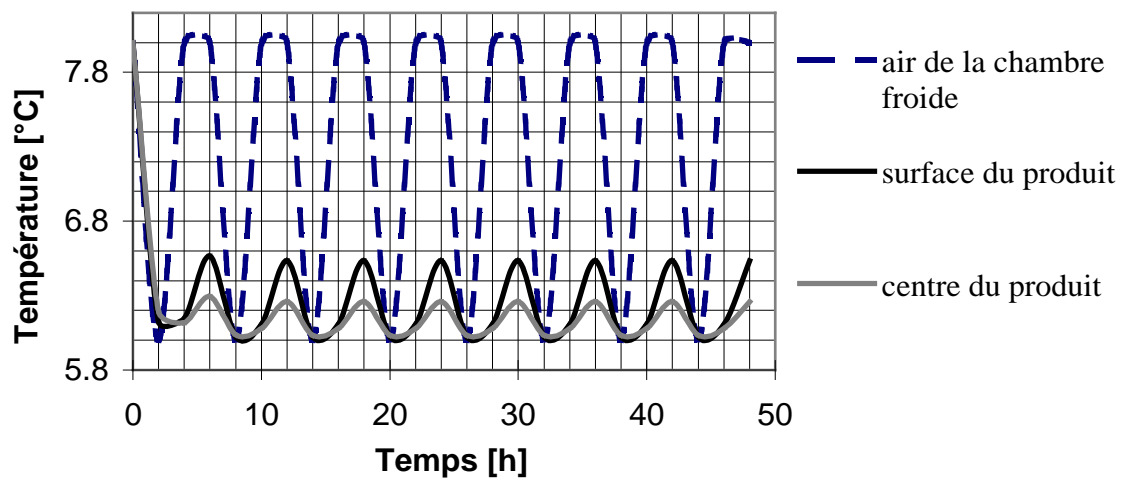


Figure 3.27 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06 m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=6h$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}C$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=15$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

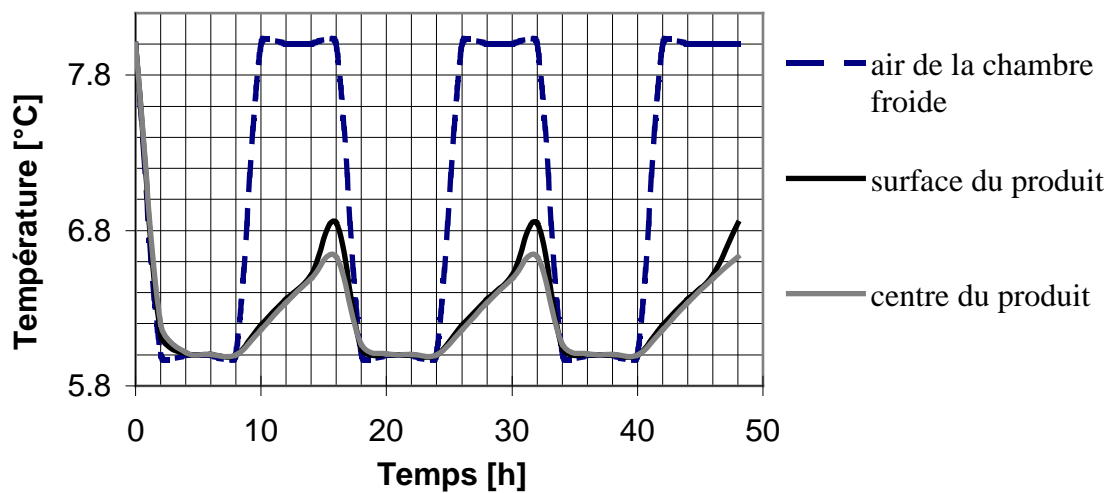


Figure 3.28 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06 m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=16h$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}C$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=15$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

Après un certain nombre de période (une ou deux), on constate que la variation des températures au sein de la denrée se reproduit de la même façon ; ce qui signifie qu'un nouveau régime, qu'on peut qualifier de pseudo-permanent (variation *périodique* par rapport au temps), est atteint.

D'autre part, pour l'ensemble des produits précédents et indépendamment de leurs natures et formes, on note que plus la période diminue et plus les amplitudes de fluctuations des températures de la denrée diminuent ; par contre, la vitesse de variation des températures par rapport au temps à l'intérieur du produit augmente.

Ainsi que le montrent les pics, le gradient de températures entre le centre et la surface augmente, au fur et à mesure que diminue la période.

L'existence de cet important gradient, est due, en partie, à la chaleur de respiration qui varie en exponentielle.

En conclusion, pour ce paramètre, nous déduisons que pour assurer une température pratiquement constante de conservation de la denrée, il est nécessaire d'entretenir une période relativement faible (en première approximation, inférieure à 6h), de fonctionnement et arrêt, de la machine frigorifique, puisque, ainsi, les fluctuations de températures au sein du produit seraient beaucoup moins importantes. Toutefois, un *compromis* avec les fréquences élevées d'arrêt et de remise en marche du système de refroidissement, qui en résulteraient à faibles périodes, est, logiquement, à envisager afin d'éviter les pannes à long terme, et diminuer le coût de l'entretien.

3.2. Influence de l'amplitude de fluctuation de la température de l'air de la chambre froide

Nous faisons, également, une comparaison entre les températures de surface et du centre, pour différentes valeurs de l'amplitude des fluctuations, $T_{cf\text{fin}} - T_{cf\text{bas}}$, et pour chacune des trois formes géométriques des denrées.

Nous fixons la vitesse moyenne de l'air à 2m/s, et la période à 12h

3.2.1 Cas d'un produit sphérique

a) Une pomme

Nous choisissons une de même dimension que dans d'étude du paramètre précédent.

Nous obtenons les figures 3.29, 3.30, 3.31, pour des amplitudes respectives de 5°C, entre 4°C et 9°C, de 1°C, entre 4°C et 3°C, et de 2°C, entre 4°C et 2°C :

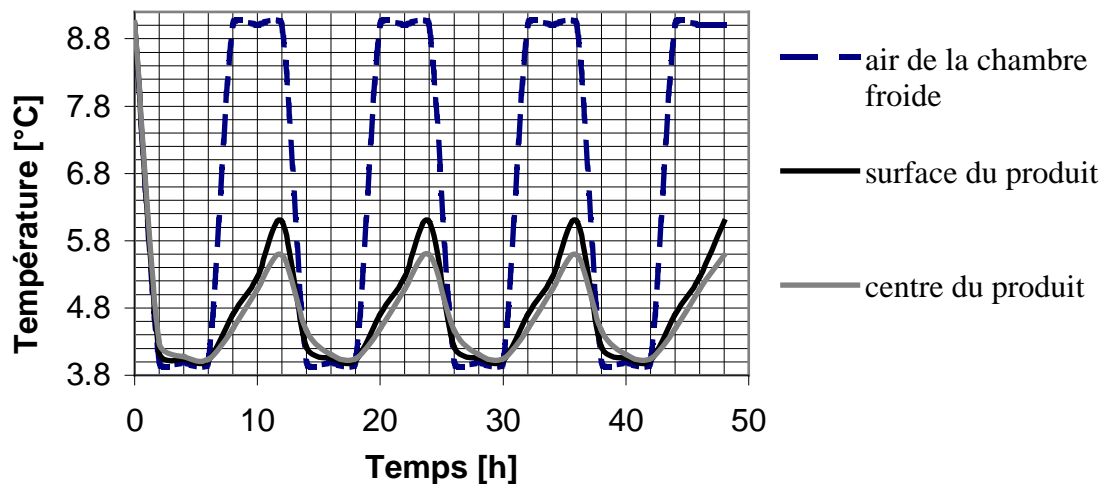


Figure 3.29 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :

$$T_{pr}=12 \text{ h}, T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=5^{\circ}\text{C}, U_{\text{air}}=2 \text{ m/s}, h_{cf}=18.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), \\ h_{cn}=1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), h_{evcf}=127.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), h_{pcff}=6.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}), \\ h_{pcfn}=1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C}).$$

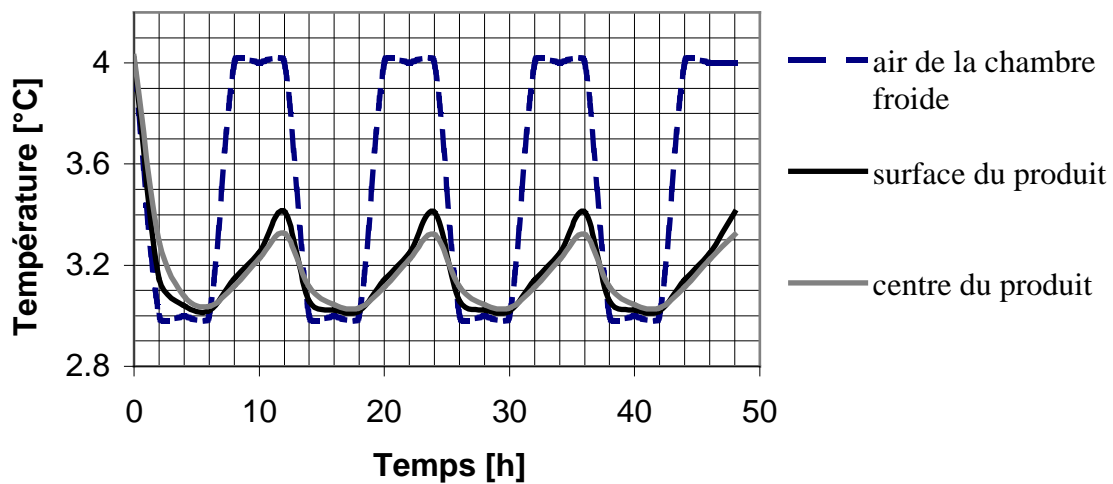


Figure 3.30 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=18.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

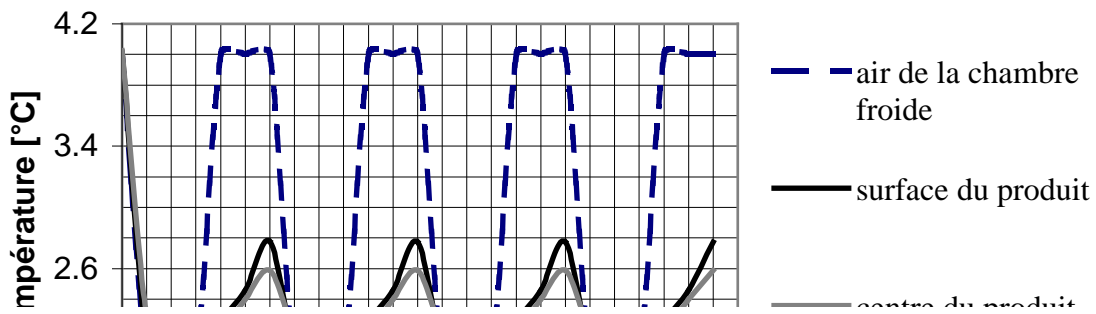


Figure 3.31 Profils des températures d'une pomme de 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=18.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

b) Une tomate

Nous en choisissons une de même dimension que précédemment.

Pour des amplitudes de 3 °C, entre 10°C et 7°C, de 1°C, entre 7°C et 6°C, de 6°C, entre 7°C et 1°C, nous obtenons respectivement les figures 3.32, 3.33, 3.34 :

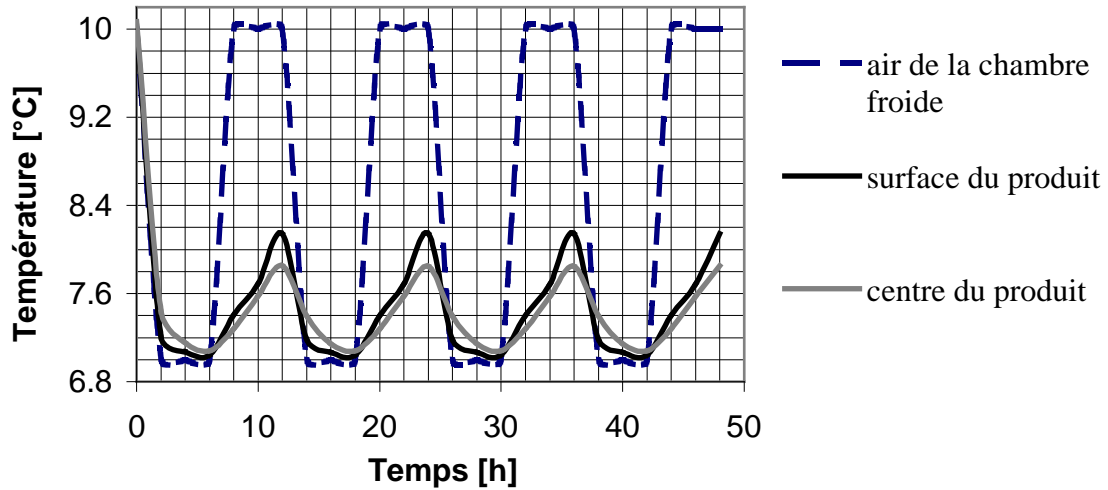


Figure 3.32 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :

$T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=18.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.4$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

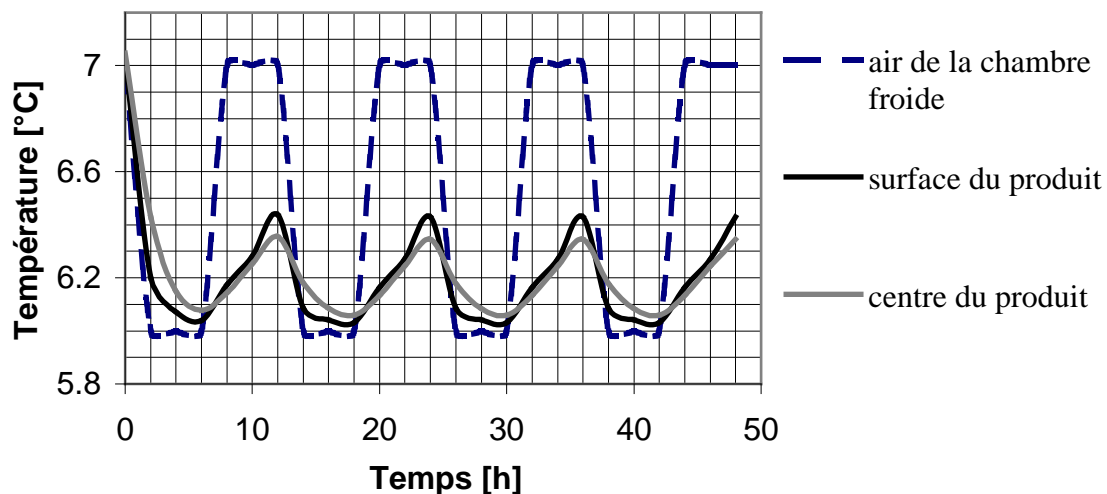


Figure 3.33 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :

$T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=17.3$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

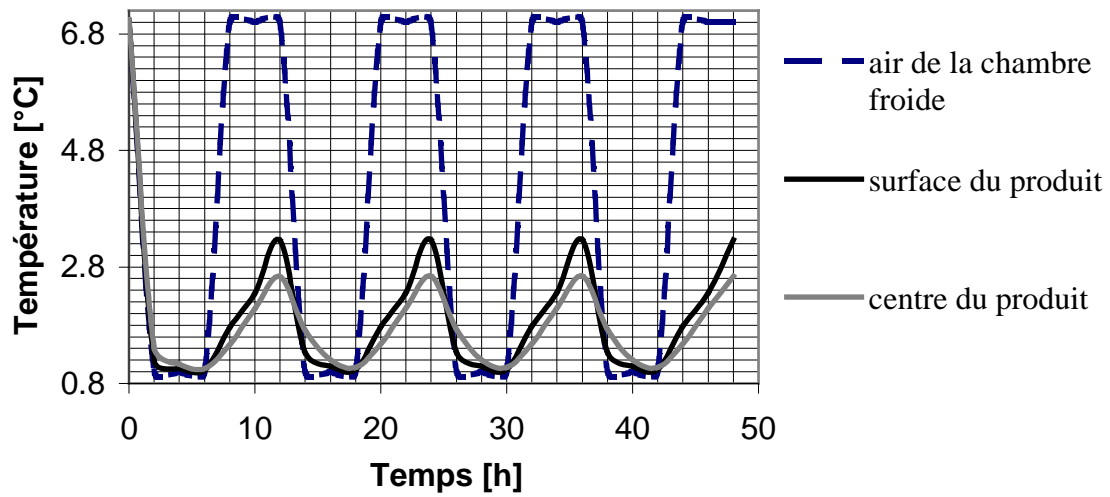


Figure 3.34 Profils des températures d'une tomate de 0.1m de diamètre :

$T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=6^{\circ}\text{C}$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C),
 $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C),
 $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

3.2.2 Cas d'un produit cylindrique

a) Une carotte

De même dimensions que dans l'étude du paramètre précédent, nous traçons les figures 3.35, 3.36, 3.37, respectivement pour les amplitudes de 2 °C, entre 6°C et 4°C, de 1°C, entre 4°C et 3°C, de 3°C, entre 4°C et 1°C :

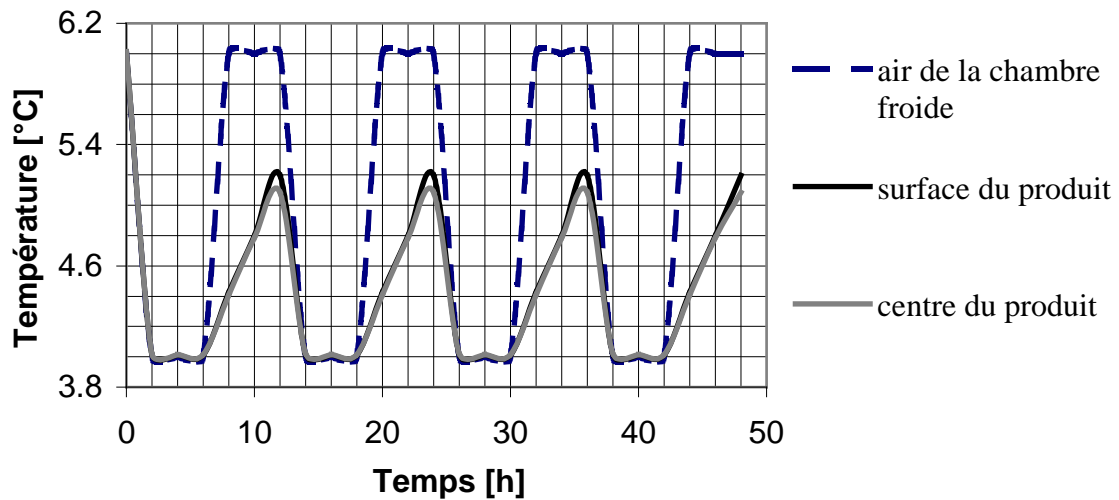


Figure 3.35 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

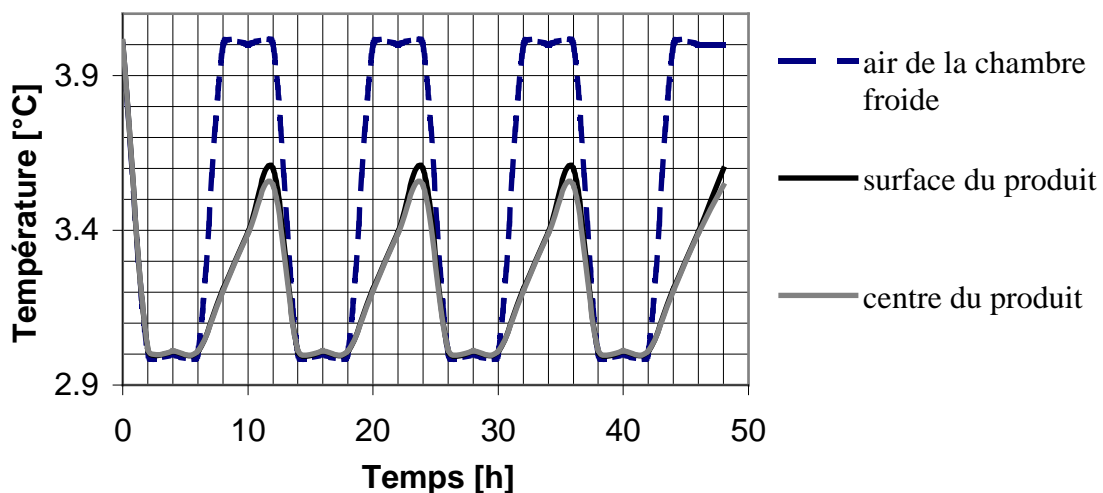


Figure 3.36 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

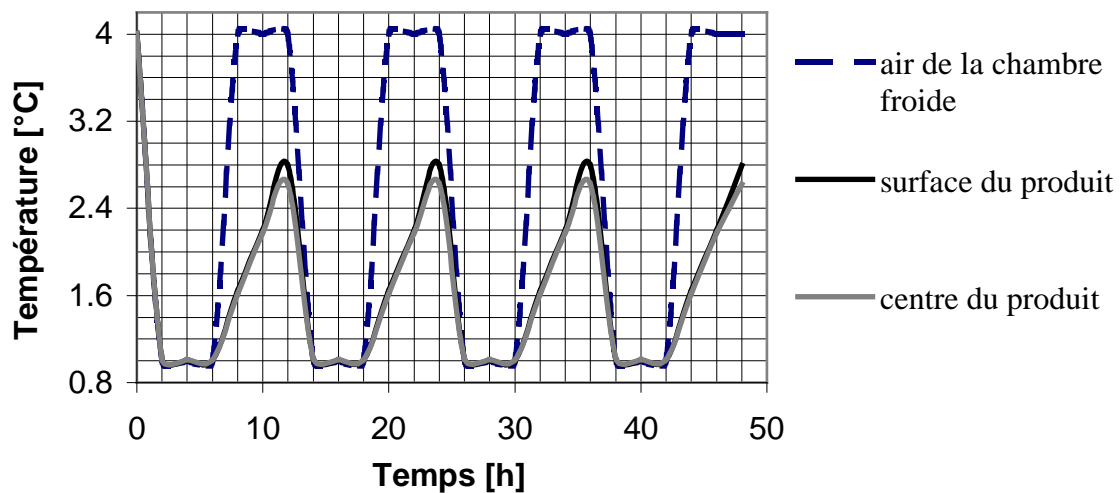


Figure 3.37 Profils des températures d'une carotte de 0.2m de long et 0.03m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcf}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

b) une crème glacée

Nous prenons une crème glacée de même dimensions que celle étudiée précédemment.

Pour des amplitudes de 9.7 °C, entre -19.3°C et -9.6°C, de 1°C, entre -19.3°C et -20.3°C, de 3°C, entre -19.3°C et -22.3°C, nous obtenons respectivement les figures 3.38, 3.39, 3.40 :

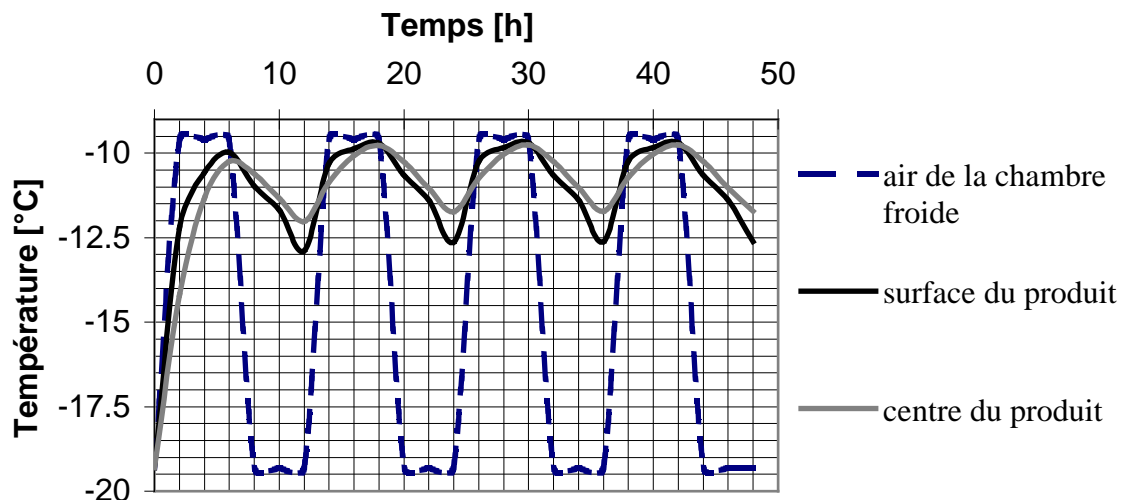


Figure 3.38 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=9.7^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=14.7$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcf}=7.0$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

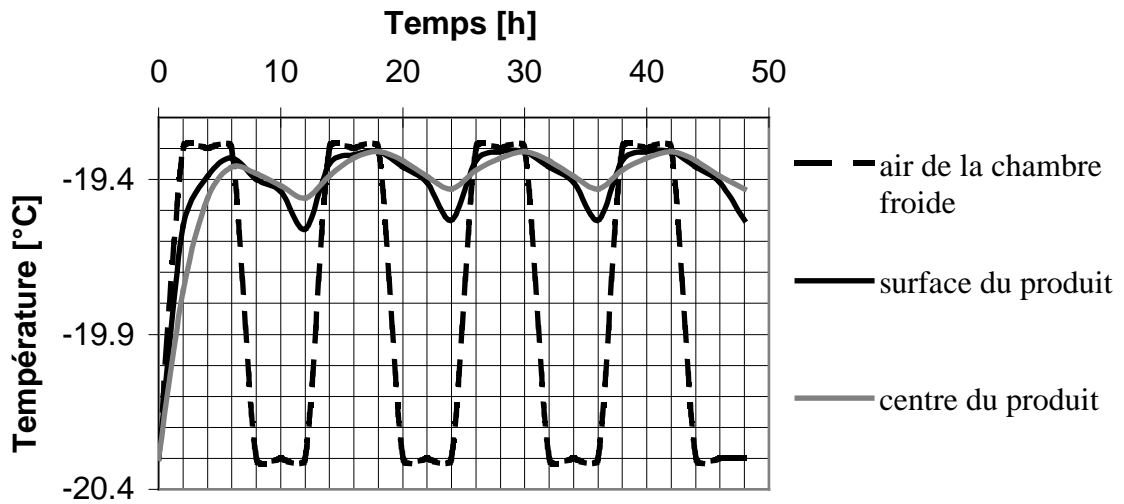


Figure 3.39 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=1^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=15.6$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 7.0$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

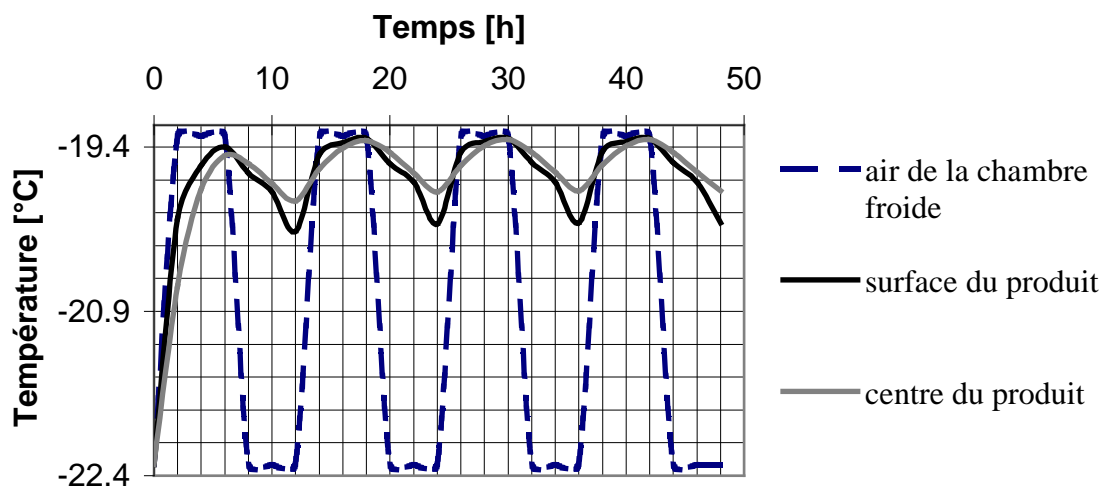


Figure 3.40 Profils des températures d'une crème glacée de 0.19m de long et 0.1m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=3^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}} = 2$ m/s, $h_{cf}=15.7$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 7.1$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

3.2.3 Cas d'un produit parallélépipédique

Nous prenons le beurre de l'étude du paramètre qui précède.

Pour des amplitudes de 2°C, entre 6°C et 8°C, de 1°C, entre 6°C et 5°C, de 4°C, entre 6°C et 2°C, on trace respectivement les figures 3.41, 3.42, 3.43 :

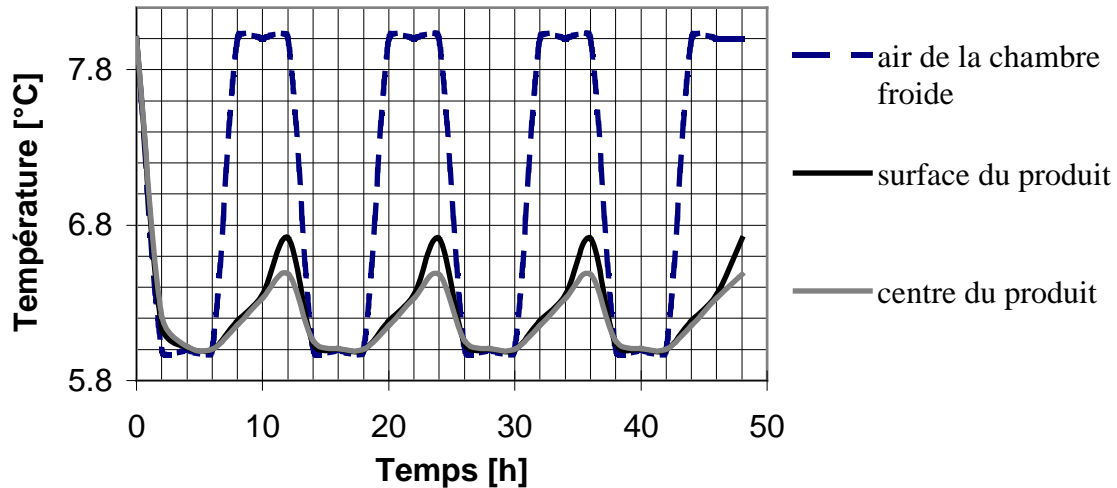


Figure 3.41 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=16.0$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

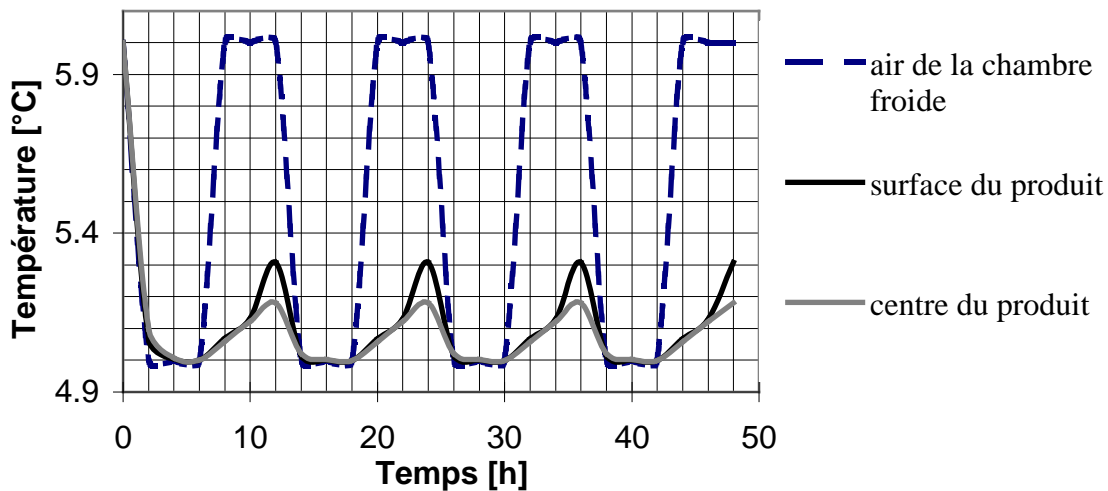


Figure 3.42 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=1^{\circ}\text{C}$, $U_{air}=2$ m/s, $h_{cf}=16.0$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

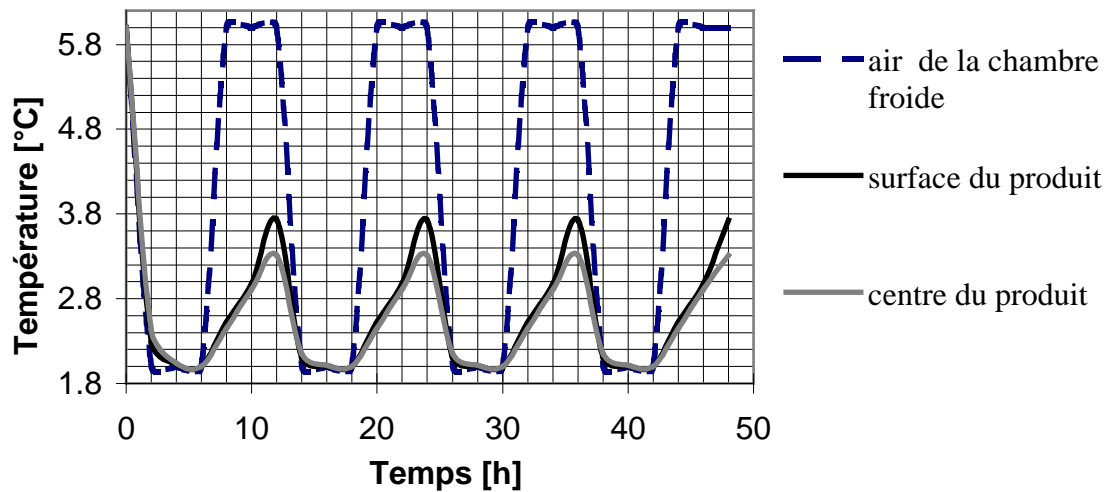


Figure 3.43 Profils des températures d'un beurre de 0.12m de long et 0.06m de large et 0.03 m d'épaisseur : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=4^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=15.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

Nous constatons, pour l'ensemble des produits précédents, que lorsque les amplitudes de variation de la température de l'air de la chambre froide diminuent, les amplitudes des températures à l'intérieur de la denrée diminuent, en conséquence.

Cependant, cette diminution des amplitudes des températures au sein de la denrée est presque la *même*, d'une amplitude à une autre de la température de l'air, mais n'est pas la même, d'une denrée à l'autre ou d'une forme à l'autre ; elle dépend de la nature et de la forme du produit.

Nous pouvons, de ce fait, conclure, en second lieu, pour ce paramètre, qu'il serait préférable de maintenir de faibles amplitudes de la température de l'air, pour assurer des faibles amplitudes des fluctuations des températures de la denrée.

3.3. Influence de la vitesse de l'air de la chambre froide

Nous comparons les profils des températures de surface et du centre, sur différentes valeurs de la vitesse de l'air pendant les phases de fonctionnement de la machine frigorifique, pour chacune des trois formes géométriques des denrées.

Nous établissons la période à 12 h, une valeur de l'amplitude $T_{cf\text{fin}} - T_{cf\text{bas}}$ de la température de l'air dépendante de la denrée à conserver ; nous n'examinons, pour alléger l'exposé, qu'un produit par forme géométrique.

3.3.1 Produit sphérique

Pour une orange de même diamètre que précédemment, on maintient une amplitude de la température de l'air de 2°C entre 2°C et 4°C , qui sont recommandées par **Rapin** [8].

Pour des vitesses de 2 m/s et 6 m/s, nous obtenons respectivement les figures 3.44, 3.45 :

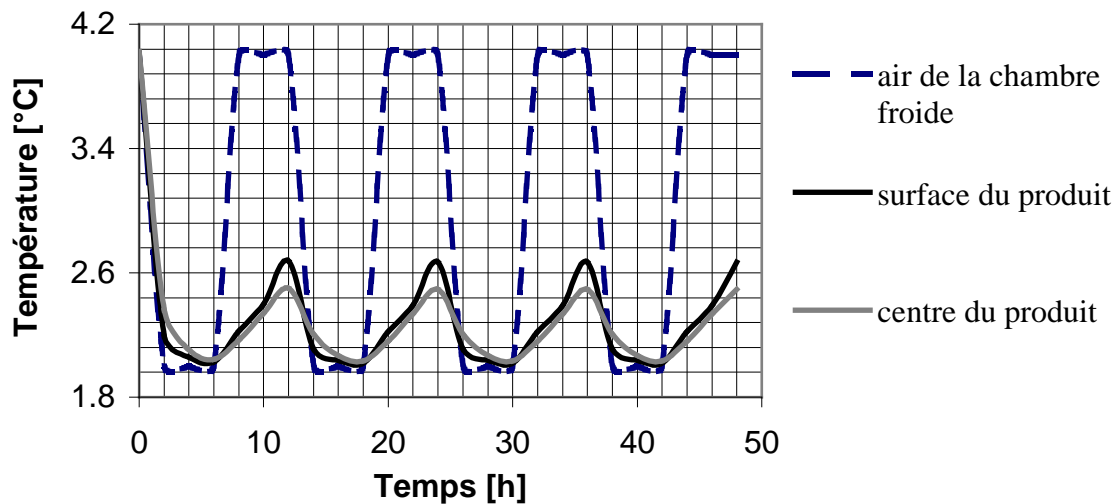


Figure 3.44 Profils des températures d'une orange de 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=17.5$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

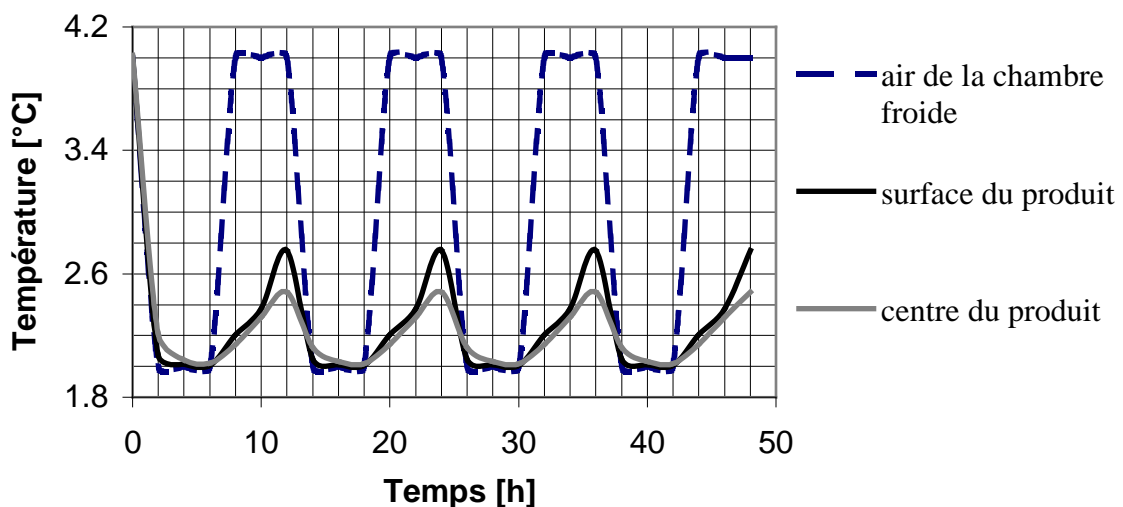


Figure 3.45 Profils des températures d'une orange de 0.1 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^\circ\text{C}$, $U_{\text{air}}=6$ m/s, $h_{cf}=32.5$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=235.3$ W/(m²°C), $h_{pcff}=15.8$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C).

3.3.2 Produit cylindrique

Pour une banane de même dimensions qu'auparavant, nous fixons une amplitude de 3°C de la température de l'air entre 11.5°C et 14.5 °C, températures recommandées [8] à sa conservation.

A des vitesses de 2 m/s et 6 m/s, nous obtenons respectivement les figures 3.46, 3.47 :

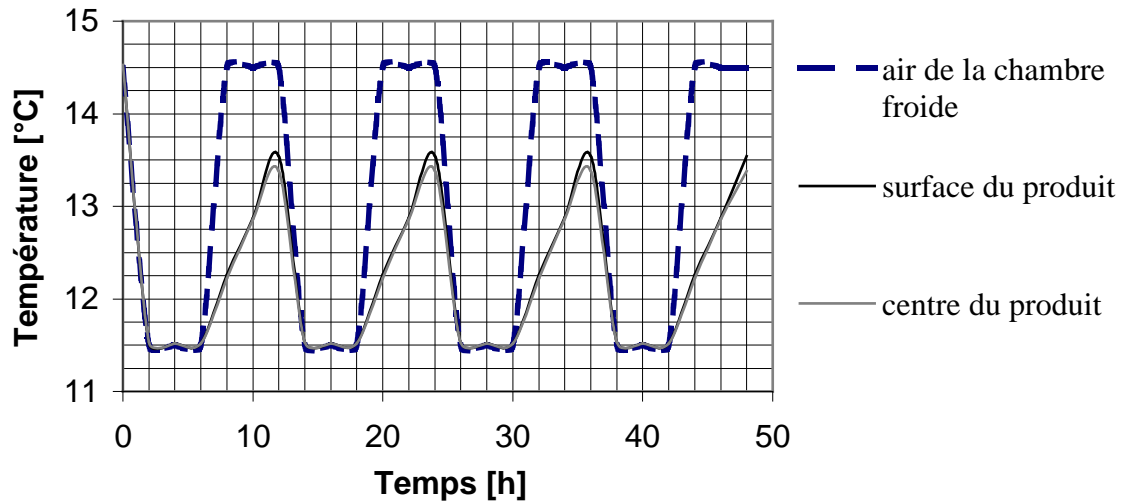


Figure 3.46 Profils des températures d'une banane de 0.20 m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 2$ m/s, $h_{cf}=23.3$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 6.4$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

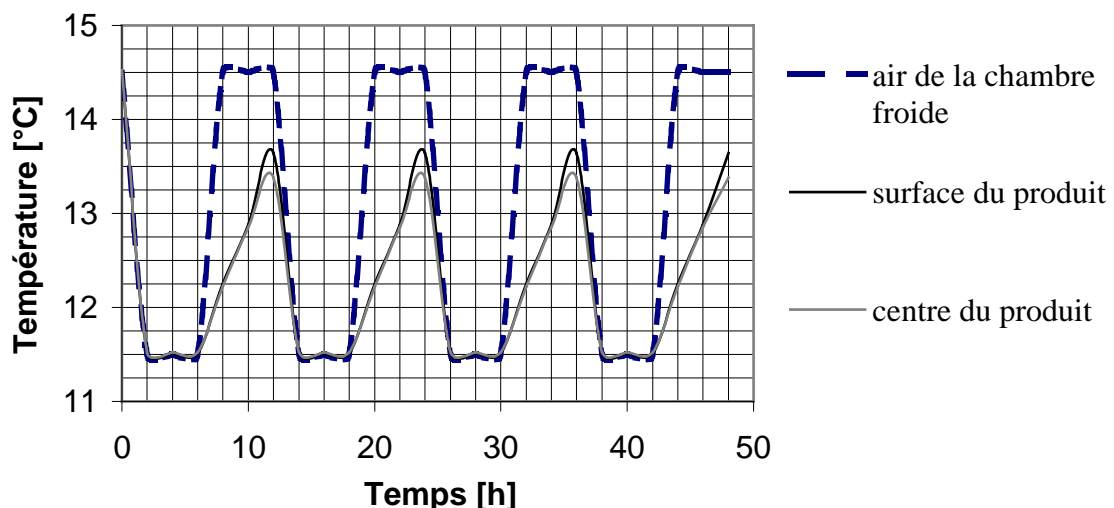


Figure 3.47 Profils des températures d'une banane de 0.20 m de long et 0.03 m de diamètre : $T_{pr}=12$ h, $T_{cfin}-T_{cfbas}=3^{\circ}\text{C}$, $U_{air} = 6$ m/s, $h_{cf}=45.2$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=235.3$ W/(m²°C), $h_{pcff}= 15.7$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

3.3.3 Produit parallélépipédique

Pour du beurre de même dimensions que précédemment, nous établissons une amplitude de la température de l'air à 2°C, entre 6 °C et 8 °C ; températures recommandées [8] à sa conservation.

Aux vitesses de 2 m/s et 6 m/s, nous obtenons respectivement les figures 3.48, 3.49 :

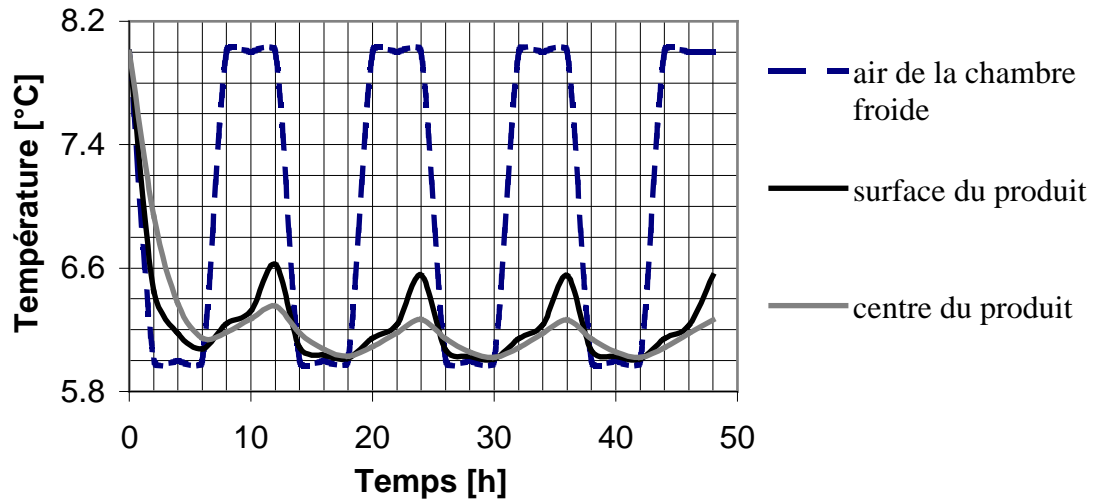


Figure 3.48 Profils des températures d'un beurre de 0.12 m de long et 0.06 m de large et 0.03m d'épaisseur : $T_{pr}=12h$, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=2$ m/s, $h_{cf}=16$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=127.7$ W/(m²°C), $h_{pcff}=6.5$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

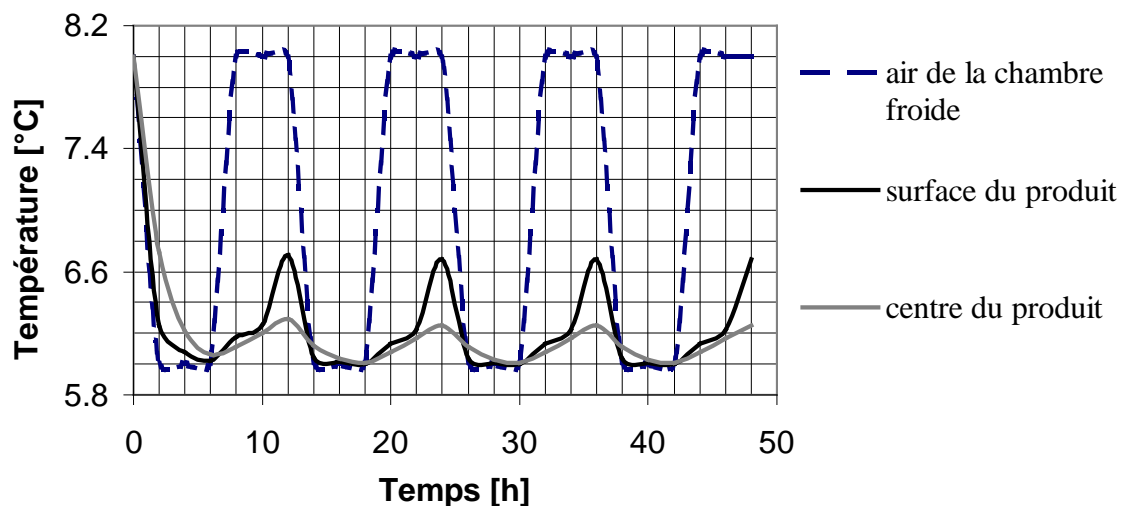


Figure 3.49 Profils des températures d'un beurre de 0.12 m de long et 0.06 m de large et 0.03m d'épaisseur : $T_{pr}=12h$, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=2^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{air}}=6$ m/s, $h_{cf}=26.3$ W/(m²°C), $h_{cn}=1$ W/(m²°C), $h_{evcf}=235.3$ W/(m²°C), $h_{pcff}=15.6$ W/(m²°C), $h_{pcfn}=1$ W/(m²°C)

Nous remarquons, globalement sur l'ensemble des produits, que lorsque la vitesse de l'air augmente, les amplitudes de fluctuation de la température au centre de la denrée diminuent légèrement ; par contre, à sa surface, elles ont tendance à croître légèrement.

Nous pouvons conclure, cependant pour ce paramètre, que la vitesse de l'air n'a pas influé considérablement sur les températures de la denrée vue qu'une variation de 4 m/s n'a que peu affecté les profils des températures. Néanmoins, il est préférable, afin d'assurer des faibles amplitudes des fluctuations des températures de la denrée conservée, de maintenir des vitesses modérées de l'air.

En résumé, pour les trois paramètres précédents, nous constatons que pour entretenir des faibles fluctuations des températures au sein des différentes denrées, il est essentiel, à la fois, de maintenir des faibles périodes de fonctionnement et arrêt de la machine frigorifique, des faibles amplitudes de la température de l'air, et des vitesses modérées de l'air.

Un régime *pseudo-permanent* de conduction de chaleur au sein de la denrée s'établit constamment.

Un ajustement convenable de la température de l'air de la chambre froide permet d'atteindre une température de conservation de la denrée pratiquement constante.

3.4. Validité de la solution du modèle mathématique

Afin de confirmer notre modèle, nous avons confronté les résultats obtenus par celui-ci avec les résultats expérimentaux de **Zuritz** et al. [30] et **Virseda** et al [31].

Dans la première partie de ce sous chapitre, nous exposons les travaux de **Zuritz** et al, et **Virseda** et al. ; la comparaison avec nos résultats se fera dans une deuxième partie.

3.4.1 Travaux de Zuritz et al.

Les auteurs de l'article[30] ont préparé de la crème glacée à l'échelle pilote et l'ont rempli dans deux cylindres identiques en aluminium de 0.19m de longueur et 0.10m de diamètre. L'un des cylindres a été couvert latéralement d'une couche de 0.8 mm de carton.

Les extrémités des deux cylindres sont recouvertes d'une épaisse couche (4 cm) de « Styrofoam », afin de les isoler thermiquement.

Ils réalisent une *première* expérience au cours de laquelle ils mettent les deux cylindres de crème glacée dans un premier congélateur pendant 12h sous une température de l'air de -19.3 ± 1 °C. Pour simuler la variation périodique de la température de conservation, ils les retirent et les placent rapidement dans un second congélateur à -9.6 ± 1 °C pendant 12 h.

Deux thermocouples cuivre-constantan sont utilisés pour suivre la température des deux congélateurs.

Pour estimer le coefficient moyen de convection dans chaque congélateur, ces chercheurs ont utilisés, ensemble avec les cylindres de crème glacée, un cylindre plein en aluminium de même dimensions que ceux contenant la crème.

Ces chercheurs ont régulièrement reparti sur le diamètre de chaque cylindre trois thermocouples cuivre-constantan, pour mesurer les températures.

Ils mesurent indirectement (via le tracé des résultats température-temps d'un modèle à paramètres réunis où ils supposent que le nombre de **Biot** du système congélateur-air / cylindre plein est petit) un coefficient moyen de convection, constant tout au long de cette expérience, de $29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$.

Ils obtiennent à la surface de la crème les courbes suivantes :

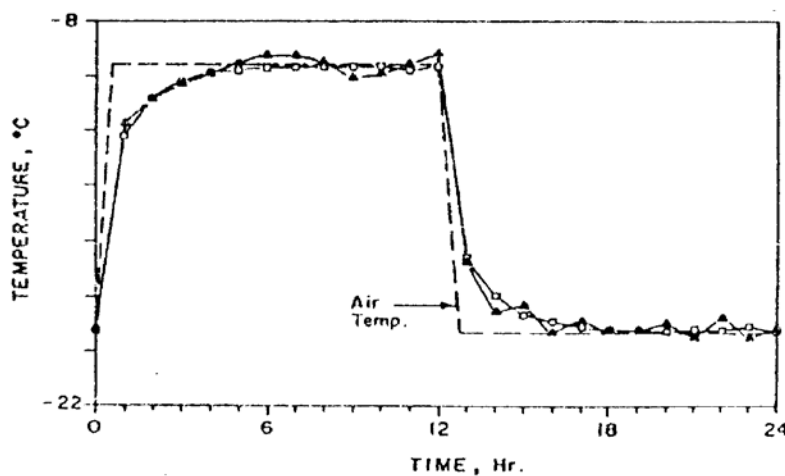


Figure 2 Températures superficielles mesurées et prévues de la crème glacée. Essai sans matériau d'emballage. ▲, Valeurs expérimentales, [], valeurs prévues. $U = 29,00 \text{ Wm}^{-2} \text{°C}^{-1}$

+

Au centre de la crème, ils obtiennent les courbes suivantes :

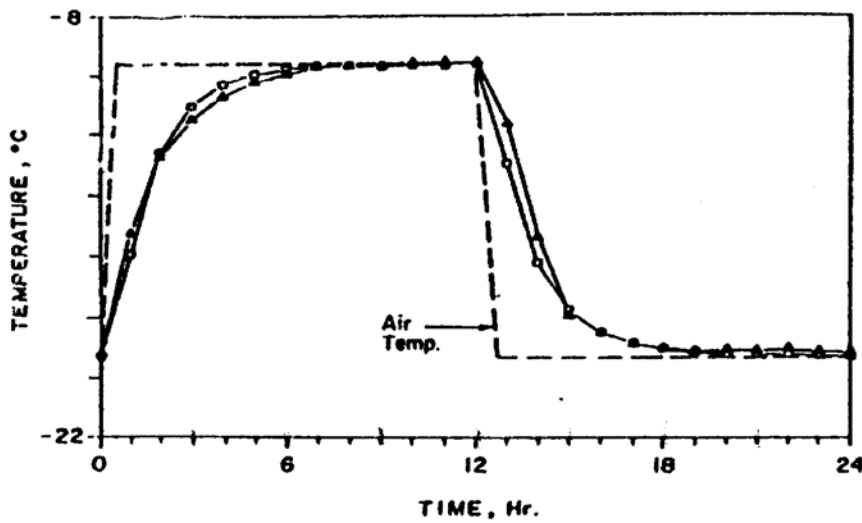


Figure 3 Températures à coeur mesurées et prévues de la crème glacée. Essai sans matériau d'emballage. ▲, Valeurs expérimentales; □, valeurs prévues. $U = 29,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Dans une seconde expérience presque identique à la première, le coefficient moyen de convection est $22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C})$ dans le premier congélateur et $15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C})$ dans le second congélateur.

Ils tracent, pour ce cas, les figures :

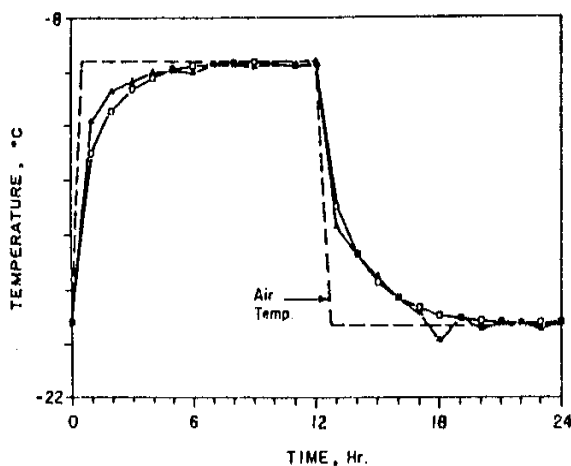


Figure 4 Températures superficielles mesurées et prévues de la crème glacée. Essai sans matériau d'emballage. ▲, Valeurs expérimentales; □, valeurs prévues. $U = 22,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0-12 h), $U = 15,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (12-24 h)

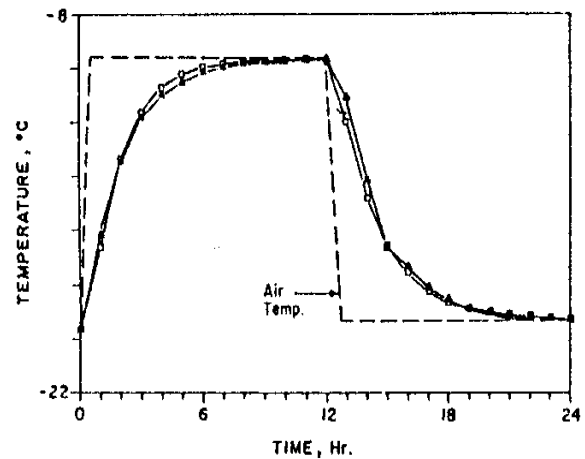


Figure 5 Températures à coeur mesurées et prévues de la crème glacée. Essai avec matériau d'emballage. ▲, Valeurs expérimentales; □, valeurs prévues. $U = 22,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0-12 h), $U = 15,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (12-24 h)

3.4.2 Travaux de Virseda et al.

Les auteurs de cette publication ont étudié la conduction thermique dans les solides multicouches de forme sphérique.

Ils ont réalisé des expériences sur trois oranges de diamètres compris entre 7.73 et 7.89 cm avec une épaisseur d'écorce entre 4.7 et 6.8 mm.

Leurs essais ont consisté en plusieurs chauffages et refroidissements des oranges.

Le refroidissement des oranges, celui qui nous intéresse, a été effectué dans une chambre froide à une température de l'air autour de 5 °C ; régulée par un thermostat à différentiel de 2°C.

Ils ont placé, dans chaque orange, deux sondes de températures en platine (pt-100) ; l'une à la surface de l'écorce, l'autre au centre de l'orange.

Une troisième sonde de température a été mise dans l'air autour des oranges.

L'évolution des températures des oranges et celle de l'air est enregistrée à intervalle régulier de 10 minutes et les valeurs mesurées sont entrées dans un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition de données PCA_90710 (de Desisn Instrumen S.A) pilotée par le logiciel Proasis-Data.

Les températures relatives aux refroidissements des oranges obtenus par les auteurs de cet article sont résumé dans la figure ci-dessous :

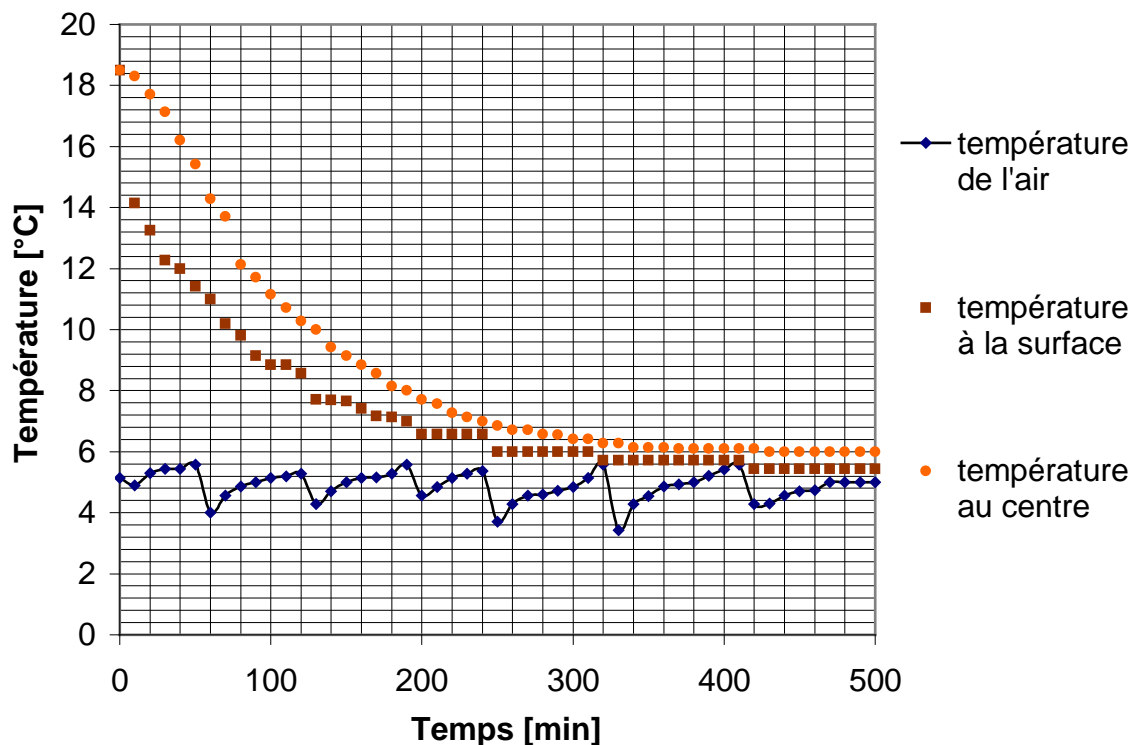


Figure 3.50 Profils mesurés des températures à la surface et au centre des oranges citées dans la référence [31]

Nous comparons les valeurs de températures obtenues par la solution de notre modèle mathématique de conduction thermique aux valeurs expérimentales obtenues par les auteurs de la référence [30], pour une forme cylindrique, et les valeurs empiriques de la référence [31], pour une forme sphérique bicouche.

a) Conformité avec les résultats de Zuritz et al.

Pour simuler la première expérience des travaux de **Zuritz et al**, nous posons $h_{cf}=h_{cn}=29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, $T_{pr}=24 \text{ h}$, $t_f=12\text{h}$, $T_{cfin}=-19.3^\circ \text{ C}$, $T_{cfbas}=-9.6^\circ \text{ C}$ et nous observons sur une durée de 24h ; nous obtenons, alors, la figure suivante :

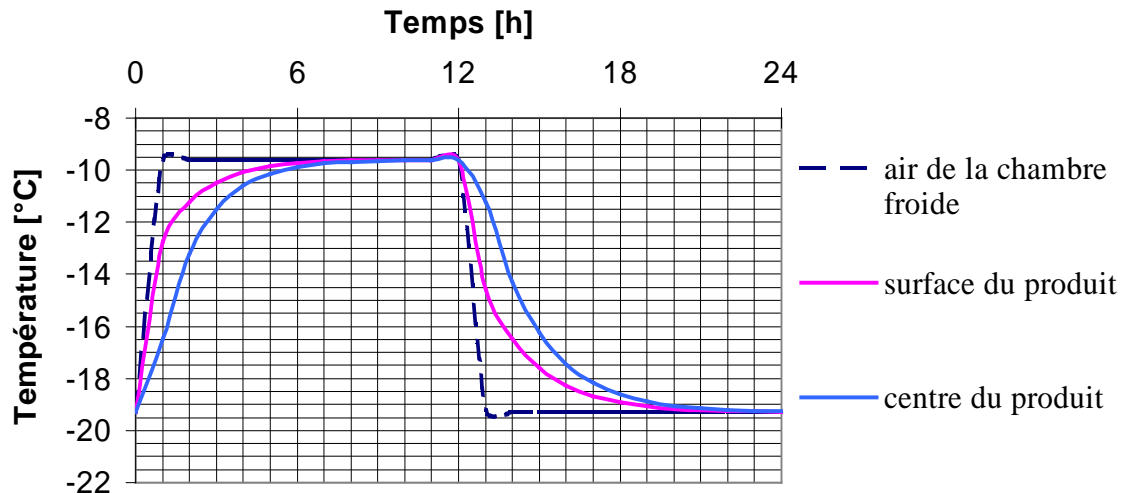


Figure 3.51 Profils des températures dans une crème glacée de 0.19m de long et 0.10 m de diamètre : $T_{pr}=24 \text{ h}$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^\circ \text{C}$, $h_{cf}=29 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{°C})$, $h_{cn}=29 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{°C})$.

Maintenant, si nous comparons la courbe des températures de surface de la crème glacée, obtenue par la solution de notre modèle à la courbe des valeurs expérimentales correspondantes obtenues par les auteurs de la publication [30], nous traçons la figure suivante :

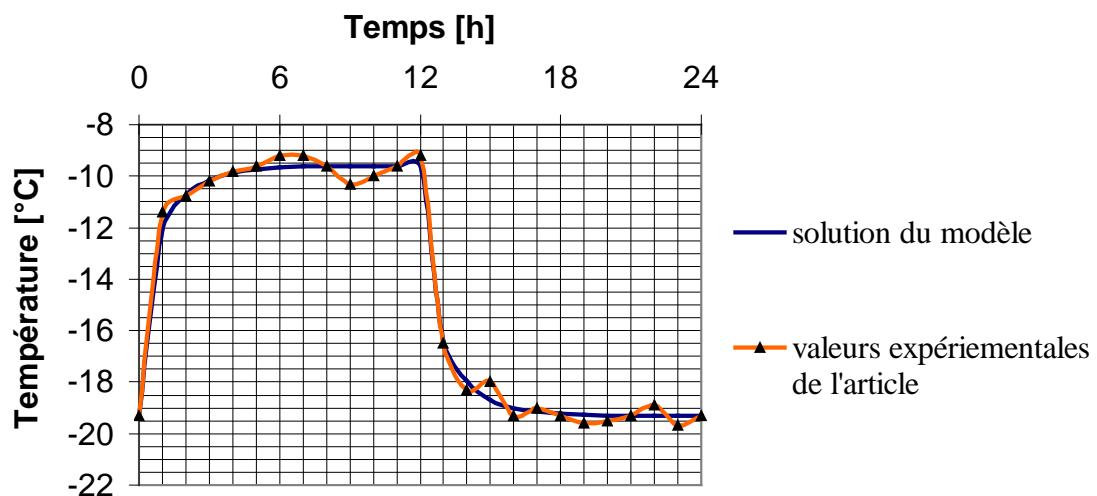


Figure 3.52 Comparaison des profils des températures, mesuré et calculé, de surface d'une crème glacée de 0.10 m de diamètre et 0.19 m de long : $T_{pr}=24\text{h}$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^\circ \text{C}$, $h_{cf}=29\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$, $h_{cn}=29\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$

Pour comparer les profils de températures au centre de la crème, nous traçons la figure ci-dessous :

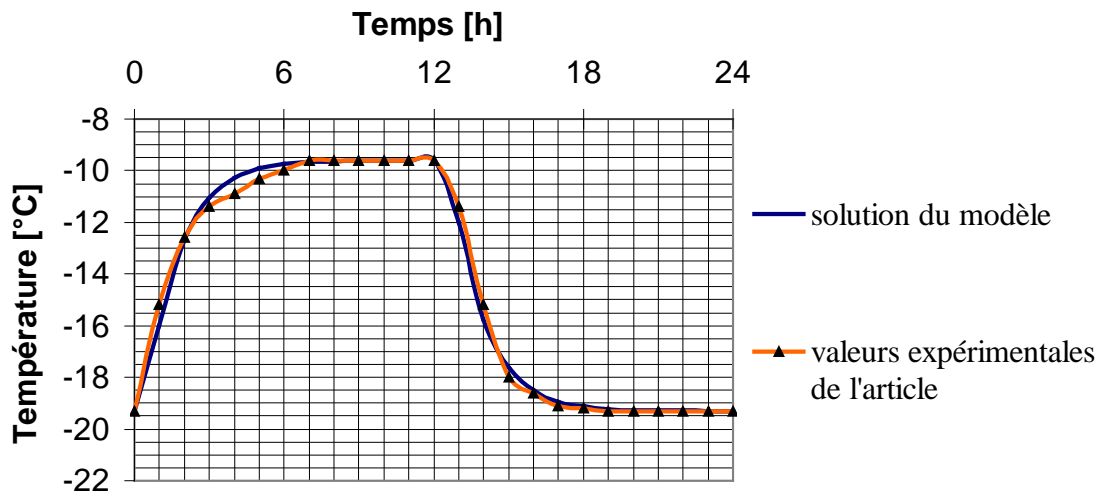


Figure 3.53 Comparaison des profils des températures, mesuré et calculé, au centre d'une crème glacée de 0.10 m de diamètre et 0.19 m de long :

$$T_{pr}=24h, T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}C, h_{cf}=29W/(m^2^{\circ}C), h_{cn}=29W/(m^2^{\circ}C)$$

Pour simuler la seconde expérience, on pose $h_{cf}=22 W/(m^2^{\circ}C)$, $h_{cn}=15 W/(m^2^{\circ}C)$, $T_{pr}=24 h$, $t_f=12h$, $T_{cfin}= -19.3^{\circ} C$, $T_{cfbas} = -9.6^{\circ} C$, et on observe sur une durée de conservation de 24h ; nous obtenons la figure suivante :

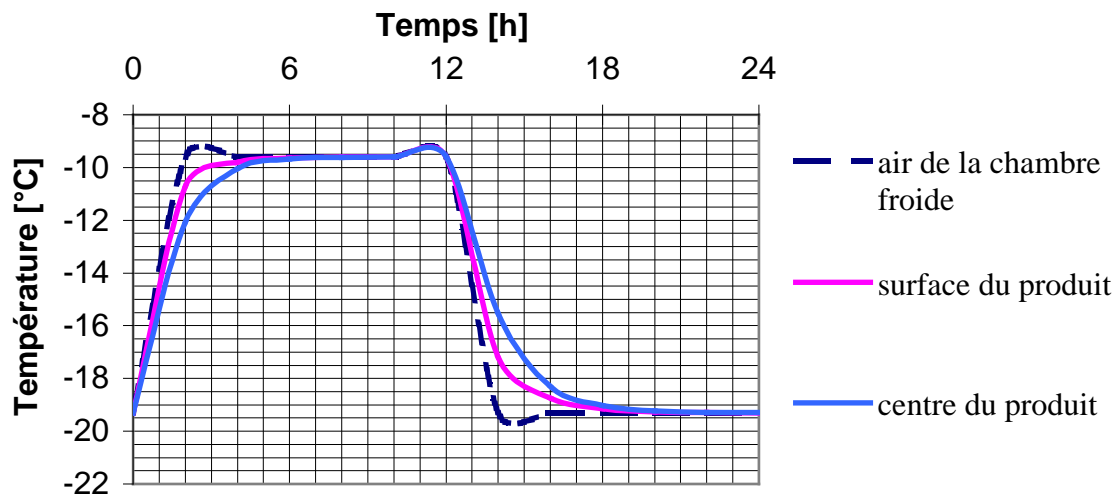


Figure 3.54 Profils des températures dans une crème glacée de 0.19m de long et 0.10 m de diamètre : $T_{pr}=24 h$, $T_{cfin}-T_{cfbas}=9.7^{\circ}C$, $h_{cf}=22 W/(m^2^{\circ}C)$, $h_{cn}=15 W/(m^2^{\circ}C)$.

On obtient la figure suivante, en comparant les profils de températures à la surface de la crème :

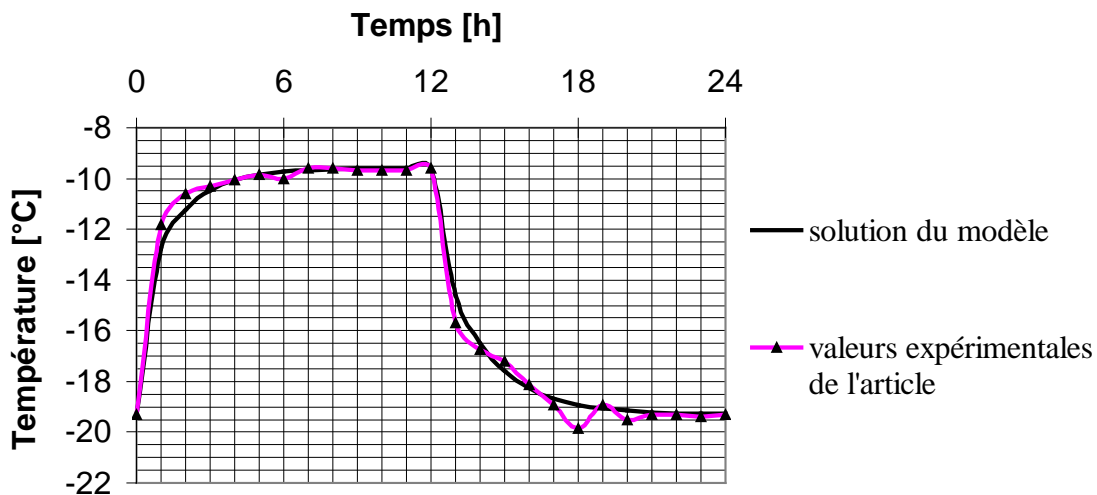


Figure 3.55 Comparaison des profils des températures, mesuré et calculé, à la surface d'une crème glacée de 0.19 m de long et 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=24$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=9.7^{\circ}\text{C}$, $h_{cf}=22$ W/(m²°C), $h_{cn}=15$ W/(m²°C).

On obtient la figure suivante, en comparant les profils de températures au centre de la crème :

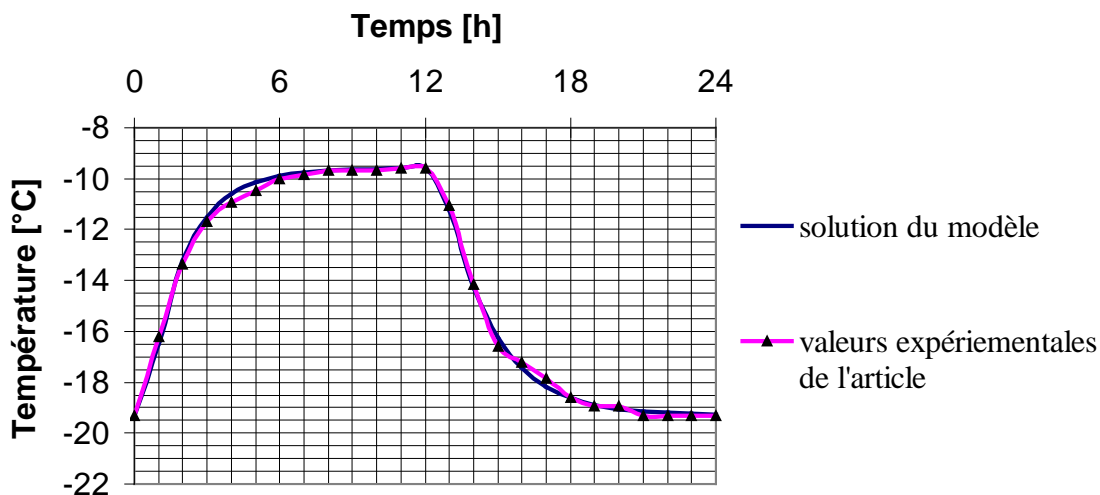


Figure 3.56 Comparaison des profils des températures, mesuré et calculé, au centre d'une crème glacée de 0.19 m de long et 0.1m de diamètre :
 $T_{pr}=24$ h, $T_{cf\text{fin}}-T_{cf\text{bas}}=9.7^{\circ}\text{C}$, $h_{cf}=22$ W/(m²°C), $h_{cn}=15$ W/(m²°C)

La comparaison entre les courbes des valeurs expérimentales et celles des valeurs prévues par la solution de notre modèle, dans les deux cas d'expériences de l'article [30], montre que l'erreur en valeur absolue est plus élevée à la surface de la crème qu'elle ne l'est en son centre.

A la surface de la crème, l'erreur maximale observée en certains points est de 1 °C; alors qu' au centre, elle n'est que de 0.5 °C.

Nous pouvons attribuer cette différence entre les mesures de l'article et notre modèle au fait que la crème glacée constituée par une fraction importante d'eau (lait, jus de fruit) subit nécessairement une évaporation à la surface, accompagnée d'une chaleur latente dissipée non négligeable.

Cette évaporation abaisse les températures de surface de la crème pendant la phase de refroidissement et nous voyons alors pourquoi la courbe de notre modèle, qui ne tient pas compte de l'évaporation de l'eau, est légèrement située au-dessus.

Pendant la phase de réchauffement de la crème, la différence peut être due aux effets du rayonnement, entre les parois interne du congélateur et la crème, qui chauffe légèrement sa surface; l'échange net s'effectue dans le sens parois vers crème.

Nous voyons alors pourquoi la courbe de notre modèle, qui ne tient pas compte de l'échange de chaleur par rayonnement, est légèrement située en dessous.

Nous pouvons également attribuer l'écart des profils mesuré et calculé à la précision absolue des thermocouples qu'ils ont utilisé ; celle-ci semble être de 1°C.

b) Conformité avec les résultats de Virseda et al.

Pour simuler les expériences de **Virseda** et al.[31], nous avons remarqué que la température de l'air de leur chambre froide n'était qu'approximativement périodique ; alors afin d'être plus proches de la réalité de leurs essais et plus précis, nous introduisons, à la place de notre modèle périodique de variation de la température moyenne de l'air $\bar{T}_{cf}(t)$, leur profil des températures de l'air.

Nous avons interpolé les 50 points expérimentaux de leur courbes des températures de l'air, par un polynôme du second degré, entre chaque trois points consécutifs.

N'ayant pas la valeur de la vitesse de l'air ni même celle des coefficients de convection avec lesquels ils ont travaillé, nous avons préféré faire un calcul plus rigoureux, qu'une estimation par corrélation, du coefficient de convection de l'air ; en profitant des données expérimentales des températures des oranges.

Le calcul du coefficient de convection, ainsi fait, est exposé dans l'annexe 3.

Nous avons utilisé dans l'expression approchée du coefficient de convection de l'air $\bar{h}_{ef}(t)$ (équation A.3.8) un pas du temps Δt de 10 min afin de pouvoir directement utiliser les valeurs mesurées des températures de l'air, de la surface et du centre des oranges de cet article.

Nous injectons enfin les valeurs ainsi calculées du coefficient de convection, dans la solution de notre modèle à la place de $\bar{h}_{ef}(t)$.

La figure suivante représente la variation du coefficient de convection de l'air calculé par l'équation de l'annexe (A.3.8) en fonction du temps :

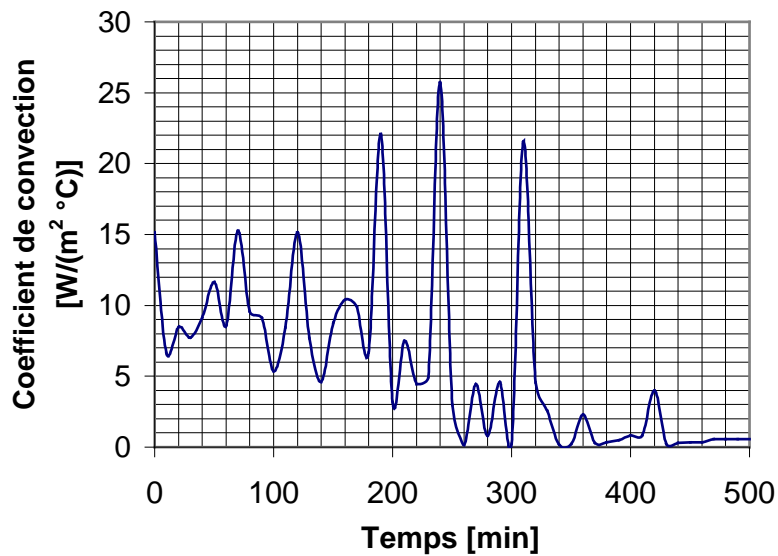


Figure 3.57 Coefficient de convection fonction du temps, calculé pour la réfrigération des oranges de la référence [31]

Les résultats de simulation obtenus à l'aide de la solution de notre modèle sont résumés par la figure suivante :

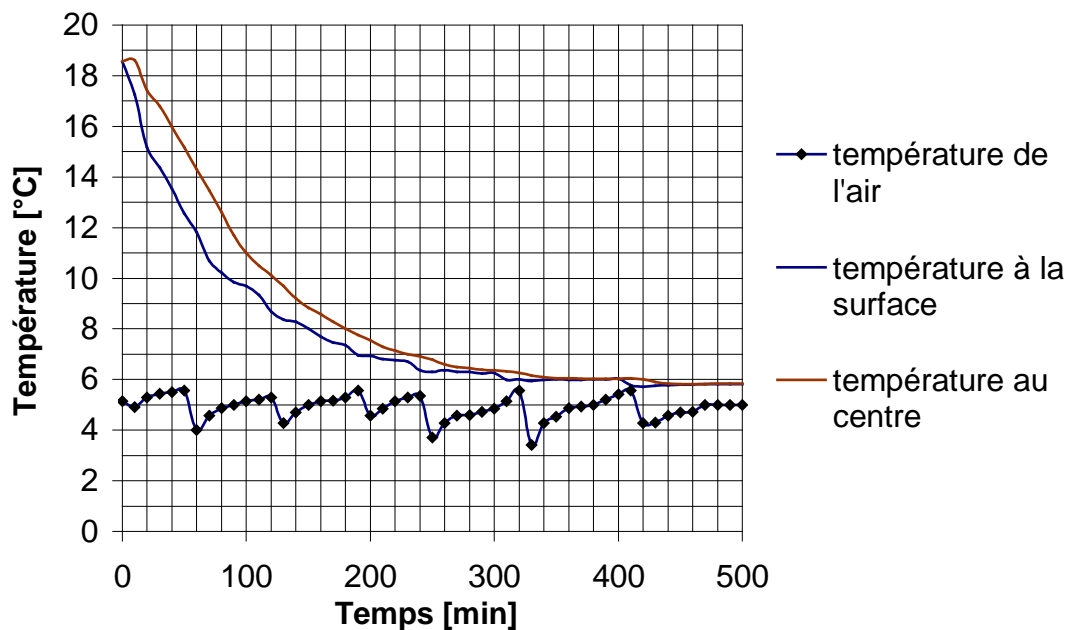


Figure 3.58 Profils des températures calculées pour des oranges de 0.078m de diamètre moyen

Pour pouvoir comparer le profil de températures au centre de l'orange, obtenu par la solution de notre modèle, à son homologue de l'article [31], nous traçons la figure suivante :

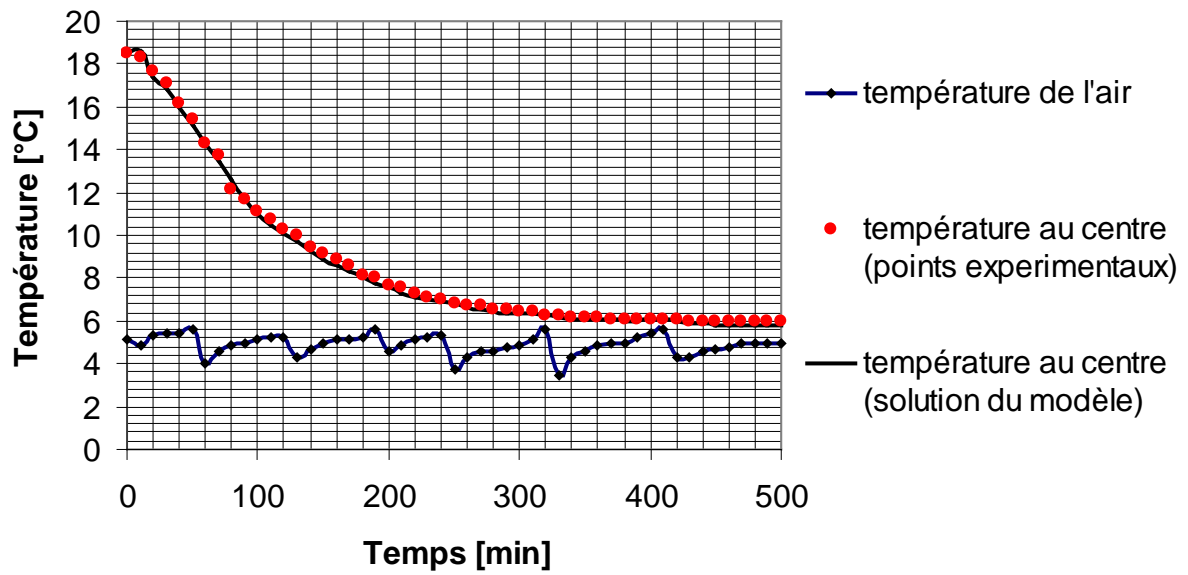


Figure 3.59 Comparaison des profils de températures, calculé et mesuré, aux centres d’oranges de 0.078m de diamètre moyen

Afin de comparer le profil de températures à la surface de l’orange, obtenu par la solution de notre modèle, à son homologue de l’article [31], nous traçons la figure ci-dessous :

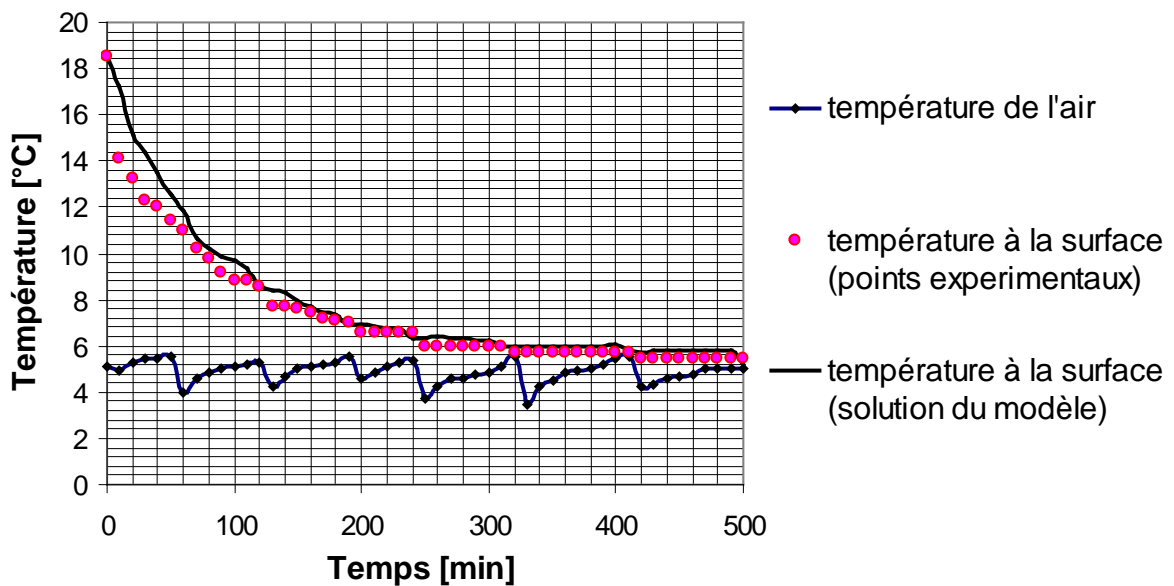


Figure 3.60 Comparaison des profils de températures, calculé et mesuré, aux surfaces d’oranges de 0.078m de diamètre moyen

Nous constatons sur la figure 3.60 une différence entre les deux profils de l’ordre de 2°C dans l’intervalle [0, 40 min], puis cet écart tend à diminuer au fur et à mesure jusqu’à

ce que les deux courbes tendent ensemble vers la même limite d'un régime permanent, et l'écart chute alors à moins de 0.4°C .

Nous pouvons interpréter l'écart des deux profils par l'existence d'une écorce de l'orange suffisamment épaisse, de l'ordre de 0.6 cm, qui agit comme un isolant *retardant* le refroidissement de la surface de la pulpe de l'orange.

Puisque, comme hypothèse de notre modèle, nous n'étudions que les solides monochouches, le profil des températures à la surface de l'orange obtenu par la solution de notre modèle va, en fait, correspondre à la surface de la pulpe de l'orange (orange sans écorce) ; et cette différence entre les deux profils est donc tout à fait logique.

Si nous connaissions les propriétés physiques de cette écorce, nous aurions pu estimer cette différence ; cependant la figure 3.60 montre quelle est de l'ordre du différentiel du thermostat.

Sur la figure 3.59, les deux profils au centre de l'orange se superposent presque exactement, une légère différence de l'ordre de 0.4°C maximum, n'existe qu'en deux ou trois points, cette petite différence peut être due au calcul approximatif, que nous avons fait, du coefficient de convection fonction du temps.

Le retard de refroidissement que subit l'orange avec écorce par rapport à une orange sans écorce n'est donc que légèrement transmis vers le centre de l'orange, il s'amortit.

En conséquence à ces deux cas de figures de comparaison, nous pouvons conclure que la solution de notre modèle peut donner un *accord satisfaisant* avec les valeurs expérimentales ; ce qui montre le bon degré de validité du modèle dans la prédiction des températures des denrées.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

- L'objectif de notre étude était de déterminer les effets, par calcul, des fluctuations de températures de l'air, de sa vitesse et des durées des phases de fonctionnement et d'arrêt du processus de refroidissement (période), sur la distribution des températures des denrées alimentaires pendant leurs conservations à l'état réfrigéré ou congelé.
- L'originalité de notre étude est le fait de considérer le coefficient de convection de l'air de la chambre froide variable dans le temps et de tenir compte du terme de source, chaleur de respiration, propre à chaque produit.
- Nous avons utilisé les équations mathématiques décrivant le transfert thermique (loi de conduction de Fourier, principe de conservation de l'énergie) pour établir les équations différentielles et les conditions aux limites du modèle mathématique.
- Pour déterminer la forme analytique de la solution du problème, nous avons formulé des hypothèses simplificatrices, notamment le caractère *linéaire* et monodimensionnel de conduction de chaleur dans le produit.
- Le transfert de chaleur dans la denrée s'accompagnant de transfert de masse (évaporation d'eau) par la surface (interface avec l'air), nous nous sommes placé dans des conditions permettant de négliger cette perte afin de simplifier les conditions aux limites et ne considérer que la solution d'un seul problème à la fois.
- Les résultats de simulation obtenus au chapitre 3, montrent que les denrées sont *rapidement* influencées par les variations des paramètres opératoires ; néanmoins, lorsqu'on effectue un *pré refroidissement* de la denrée aux conditions initiales de la chambre froide, les fluctuations de températures au sein de la denrée ne dépassent pas les limites de températures de l'air, imposés par le thermostat ($T_{cf\text{fin}}$ et $T_{cf\text{bas}}$).
- Il convient alors de savoir choisir une combinaison de ces paramètres afin de maintenir la denrée alimentaire en bon état.
- La comparaison faite, au chapitre 3, avec les résultats des travaux d'autres chercheurs montre que la solution de notre modèle peut donner un accord *satisfaisant*, pour la prévision des températures des denrées refroidies.
- L'exactitude et la précision des résultats de notre simulation dépendent des valeurs des coefficients moyens de convection qui règnent dans les locaux réfrigérés.
- Nous n'avons pas utilisé une méthode de résolution purement numérique du problème [32-35], et ceci afin de cerner et mettre bien en évidence les paramètres importants dans la solution analytique.

- Les difficultés rencontrées, dans notre étude, étaient de trois sortes : modéliser avec précision les phénomènes de transfert dans la denrée, résoudre avec précision le modèle

obtenu, disposer de données physiques précises concernant chaque denrée afin de pouvoir faire des simulations précises.

- Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à une denrée seule ; il convient de considérer l'effet de plusieurs produits de même nature les uns sur les autres lorsqu'ils sont conservés ensembles dans le même local.
- On recommande de considérer, dans le cas d'un ensemble de denrées, la température de l'air de la chambre froide comme fonction aussi des températures de surface des produits entreposés et de changer la condition aux limites de type Fourier pour tenir compte de la chaleur latente d'évaporation de l'eau [36-37]; on pourra ainsi tenir compte conjointement de l'apport du transfert de masse dans le transfert thermique.
- Nous devons, en outre, voir s'il y a lieu d'envisager, toujours dans la condition aux limites de type Fourier, les termes d'échange de chaleur par rayonnement : Parois de la chambre froide-produits, air-produits [36-37], produit-produit.
- Le transfert thermique dans les denrées emballés ou qui possèdent des écorces relativement épaisses peut être modélisé de façon plus précise en considérant le problème de conduction multicouches [31].
- Lorsque la denrée à ses dimensions du même ordre de grandeur, l'hypothèse de la conduction mono dimensionnelle entraîne l'utilisation de la température moyenne sur les directions non considérées ; pour s'affranchir de cette hypothèse, considérez la conduction *tridimensionnelle* dans la plaque et *bidimensionnelle* dans le cylindre (selon l'axe longitudinal, et perpendiculairement à lui).
- Pour une lecture supplémentaire sur les caractéristiques de qualité des produits et sur d'autres modèles traitant de la réfrigération et de la congélation des denrées, consultez les références [38-44].
- Nous souhaitons que notre modeste travail serve de base à une modélisation plus raffinée, surtout avec l'avènement d'ordinateurs plus performants.
- Il serait intéressant de poursuivre cette étude pour des denrées de formes plus complexes et avec des propriétés physiques variables, en traitant aussi bien la phase de congélation.



ANNEXES

Détails de calcul du coefficient de convection de l'air fonction du temps

Nous partons de l'équation différentielle de conduction de la chaleur pour une forme sphérique avec terme de source en exponentielle de la température :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] + q_0 \rho \exp(kT) \quad (\text{A.1})$$

Multiplions membre à membre (A.1) par ξ^2 , intégrons membre à membre par rapport à ξ entre 0 et R, puis divisons par R^2 ; nous obtenons l'équation :

$$\rho c_p \frac{\partial \left[\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 T(\xi, t) d\xi \right]}{\partial t} = \lambda \int_0^R \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] d\xi + q_0 \rho \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \exp(kT(\xi, t)) d\xi \quad (\text{A.2})$$

$$\blacksquare \int_0^R \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] d\xi = \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} - \frac{0}{R} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R}, \quad (\text{A.3})$$

- d'après le théorème de la valeur moyenne d'une fonction continue ($T(\xi, t)$), on peut exprimer les deux autres intégrales comme :

$$\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 T(\xi, t) d\xi = \bar{T}_1(t) \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 d\xi = \bar{T}_1(t) \left(\frac{R}{3} \right), \quad (\text{A.4})$$

$$\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \exp(kT(\xi, t)) d\xi = \exp(k\bar{T}_2(t)) \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 d\xi = \exp(k\bar{T}_2(t)) \left(\frac{R}{3} \right). \quad (\text{A.5})$$

Si nous connaissons les températures à la surface et les températures au centre, et si nous admettons l'approximation $\bar{T}_1(t) \approx \bar{T}_2(t) \approx \frac{1}{2}(T(0, t) + T(R, t))$, nous aurons,

à l'aide de la condition aux limites de Fourier, l'équation :

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} = \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) \approx -\frac{\rho c_p}{2} \frac{\partial \{T(0, t) + T(R, t)\}}{\partial t} \frac{R}{3} + q_0 \rho \frac{R}{3} \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right)$$

$$\Rightarrow \bar{h}_{ef}(t) \approx \frac{-\frac{\rho c_p}{2} \frac{\partial \{T(0, t) + T(R, t)\}}{\partial t} \frac{R}{3} + q_0 \rho \frac{R}{3} \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right)}{T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)}.$$

Nous utilisons enfin les *différences finis* pour discrétiser la dérivée par rapport au temps avec un pas Δt :

$$\bar{h}_{ef}(t) \approx \frac{R}{3} \left\{ \frac{-\frac{\rho c_p}{2} \frac{\{T(0, t + \Delta t) + T(R, t + \Delta t) - T(0, t) - T(R, t)\}}{\Delta t} + q_0 \rho \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right)}{T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)} \right\} \quad (\text{A.6})$$

Algorithme de la méthode numérique de résolution d'une équation de Voltera

Soit à résoudre une équation intégrale de la forme:

$$f(t) = g(t) + \int_0^t K(t, \tau) f(\tau) d\tau. \quad (\text{A1.1})$$

Tel que $f(t)$ est la seule fonction inconnue à déterminer sur un intervalle $[0, b]$.

Remarquez que la fonction f est aussi présente sous le signe intégrale, d'où vient le nom d'*équation intégrale*.

La façon la plus simple de procéder est de résoudre l'équation précédente sur une subdivision de l'intervalle, constituée de nœuds à pas uniforme Δt :

$$t_i = i\Delta t, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad \Delta t = \frac{b}{n}; \quad \text{alors, on cherche les valeurs } \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$$

correspondantes respectivement au temps $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$.

On doit choisir une méthode de quadrature, pour évaluer l'intégrale.

$$\text{Par la règle des trapèzes, } \int_0^{t_i} K(t_i, \tau) f(\tau) d\tau \cong \Delta t \left(\frac{1}{2} K_{i0} f_0 + \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} f_j + \frac{1}{2} K_{ii} f_i \right). \quad (\text{A1.2})$$

Ainsi, la méthode des trapèzes appliquée à l'équation précédente donne l'algorithme :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 = g_0 = g(0), \\ \left\{ t_i = i\Delta t, \quad g_i = g(t_i), \quad \{ \tau_j = j\Delta t, \quad K_{ij} = K(t_i, \tau_j) \}_{j=1, \dots, i} \right\} \\ f_i = \frac{\Delta t \left(\frac{1}{2} K_{i0} f_0 + \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} f_j \right) + g_i}{1 - \frac{1}{2} \Delta t K_{ii}} \end{array} \right\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (\text{A1.3})$$

Si le noyau de l'équation, $K(t, \tau)$, possède une singularité sur la diagonale $\tau = t$, on l'élimine, en faisant une soustraction : $\int_0^t K(t, \tau) f(\tau) d\tau = \int_0^t K(t, \tau) [f(\tau) - f(t)] d\tau + f(t) \int_0^t K(t, \tau) d\tau$. (A1.4)

On évalue $r(t) = \int_0^t K(t, \tau) d\tau$ numériquement ou analytiquement ; l'algorithme devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 = g_0 = g(0), \\ \left\{ t_i = i\Delta t, \quad g_i = g(t_i), \quad r_i = \int_0^{t_i} K(t, \tau) d\tau, \quad \underbrace{\tau_j = j\Delta t, \quad K_{ij} = K(t_i, \tau_j)}_{j=1, \dots, i-1} \right\} \\ f_i = \frac{\Delta t \left(\frac{1}{2} K_{i0} f_0 + \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} f_j \right) + g_i}{1 + \Delta t \left(\frac{K_{i0}}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} \right) - r_i} \end{array} \right\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (\text{A1.5})$$

Solution analytique d'une équation de Voltera

Une équation de la forme $f(t) = g(t) + \int_0^t K(t, \tau)f(\tau)d\tau$ (A.1.6) a, d'après [20], la solution :

$$f(t) = g(t) + \int_0^t R(t, \tau)g(\tau)d\tau, \quad (\text{A.1.7})$$

$$\text{tel que } R(t, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} K_{n+1}(t, \tau) \text{ et } \begin{cases} K_1(t, \tau) = K(t, \tau), \\ K_n(t, \tau) = \int_0^t K_{n-1}(t, t_1)K(t_1, \tau)dt_1, n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

Si on pose par identification entre l'équation (2.40) et l'équation (A1.6) :

$$\begin{cases} K(t, \tau) = \frac{\left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \psi_j(R, \mu'_j) C(\mu'_j, R) \exp(-\mu_j^2(t-\tau)) \right\} \bar{h}_{cf}(\tau)}{V(R, t)}, \\ g(t) = \frac{\sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{N_j} \exp(-\mu_j^2 t) \psi_j(R, \mu'_j) [\tilde{T}_i(0) + A(\mu'_j, R, t)] \bar{T}_{cf}(t)}{V(R, t)}, \end{cases} \quad (\text{A.1.8})$$

la température à la surface de la denrée aura pour expression :

$$T(R, t) = \bar{T}_{cf}(t) + g(t) + \int_0^t \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} K_{n+1}(t, \tau) \right\} g(\tau) d\tau \quad (\text{A.1.9})$$

Expressions de certaines fonctions dont dépends la solution du modèle mathématique

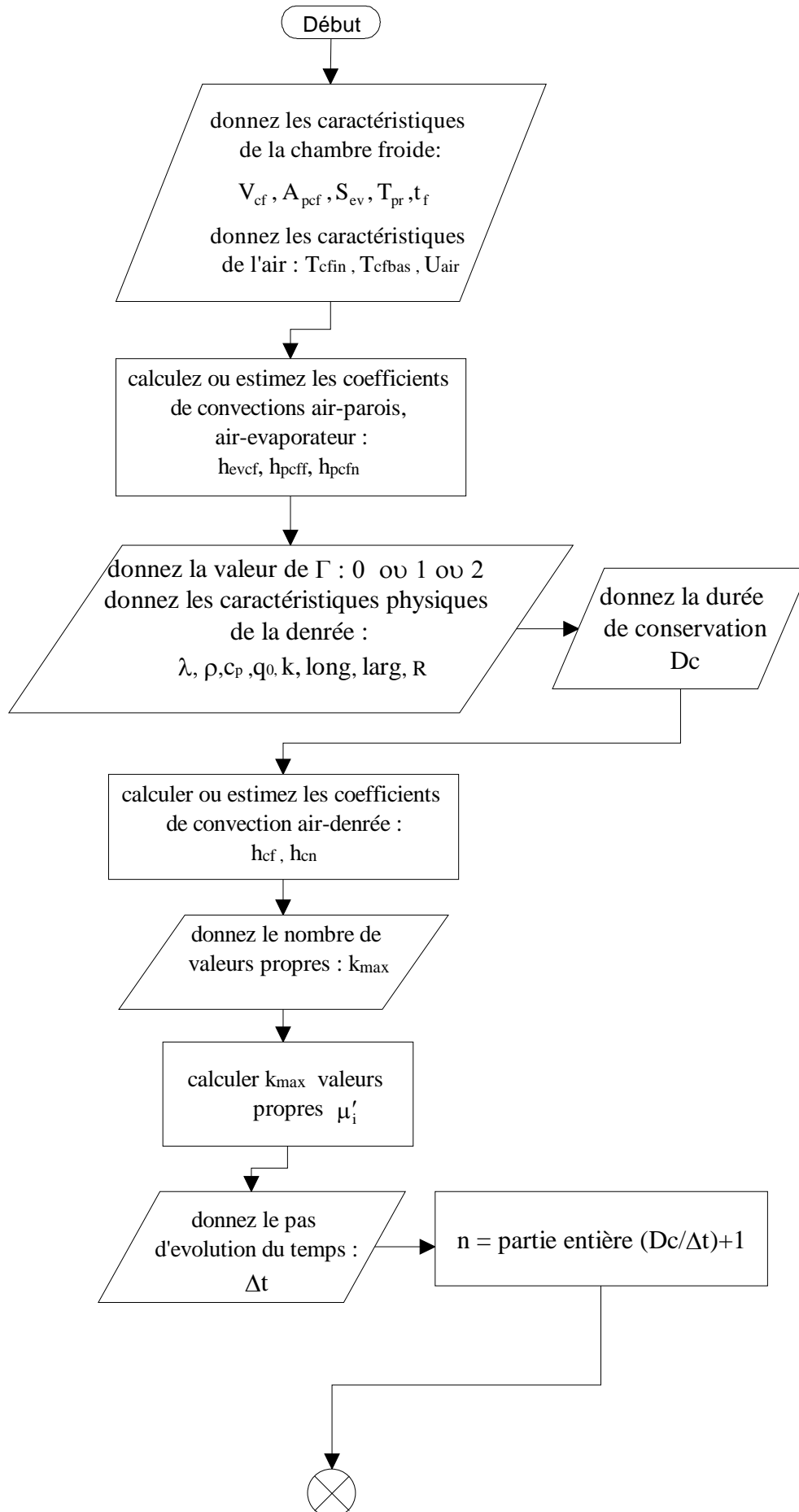
Le tableau ci-dessous résume certaines expressions mathématiques déjà données au chapitre 2 et complète celles qui ne le sont pas :

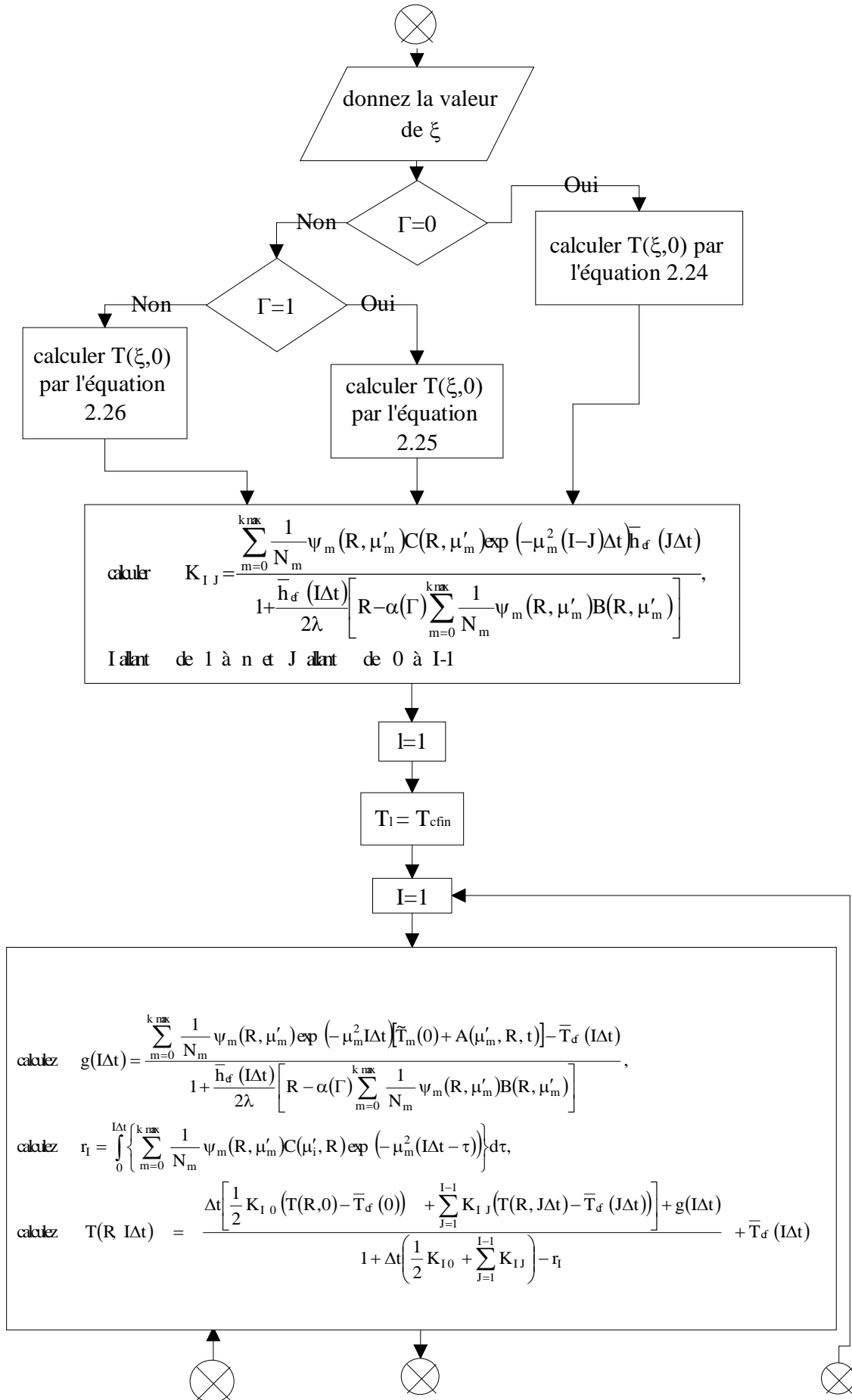
	$\Gamma = 0$	$\Gamma = 1$	$\Gamma = 2$
Equation transcendante	$\sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}R\right) = 0$	$J_1\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}R\right) = 0$	$\sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}R\right) - \left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}R\right)\cos\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}R\right) = 0$
Fonction propre $\psi(\xi, \mu')$	$\cos\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}\xi\right)$	$J_0\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}\xi\right)$	$\frac{\sin\left(\frac{\mu'}{\sqrt{a}}\xi\right)}{\xi}$
$\alpha(\Gamma)$	Long L arg	2π Long	4π
N_j	$\frac{1}{2}R \text{ Long L arg } \rho c_p \cos^2\left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}}R\right)$	$\pi R \text{ Long } \rho c_p J_0^2\left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}}R\right)$	$2\pi R^3 \rho c_p \sin^2\left(\frac{\mu'_j}{\sqrt{a}}R\right)$
$A(\mu'_j, R, t)$	$\text{Long larg} \left(\frac{q_0 \exp(kT_i) \frac{(\exp(\mu_j^2 t) - 1)}{c_p} \int_0^R \cos\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) d\xi}{-\frac{\bar{h}_{ef}(0)(T(R,0) - T_{cf}(0))}{\lambda R} B(\mu'_j, R)} \right)$	$2\pi \text{ Long} \left(\frac{q_0 \exp(kT_i) \frac{(\exp(\mu_j^2 t) - 1)}{c_p} \int_0^R J_0\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi}{-\frac{\bar{h}_{ef}(0)(T(R,0) - T_{cf}(0))}{\lambda R} B(\mu'_j, R)} \right)$	$4\pi \left(\frac{q_0 \exp(kT_i) \frac{(\exp(\mu_j^2 t) - 1)}{c_p} \int_0^R \sin\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi}{-\frac{\bar{h}_{ef}(0)(T(R,0) - T_{cf}(0))}{\lambda R} B(\mu'_j, R)} \right)$
$B(\mu'_j, R)$	$\int_0^R \cos\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^2 d\xi$	$\int_0^R J_0\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi$	$\int_0^R \sin\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi^3 d\xi$
$C(\mu'_j, R)$	$\frac{-\text{Long larg}}{\lambda R} \left(a \int_0^R \cos\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) d\xi + \mu_j^2 B(\mu'_j, R) \right)$	$\frac{-\pi \text{ Long}}{\lambda R} \left(4a \int_0^R J_0\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi + \mu_j^2 B(\mu'_j, R) \right)$	$\frac{-2\pi}{\lambda R} \left(6a \int_0^R \sin\left(\frac{\mu_j \xi}{\sqrt{a}}\right) \xi d\xi + \mu_j^2 B(\mu'_j, R) \right)$

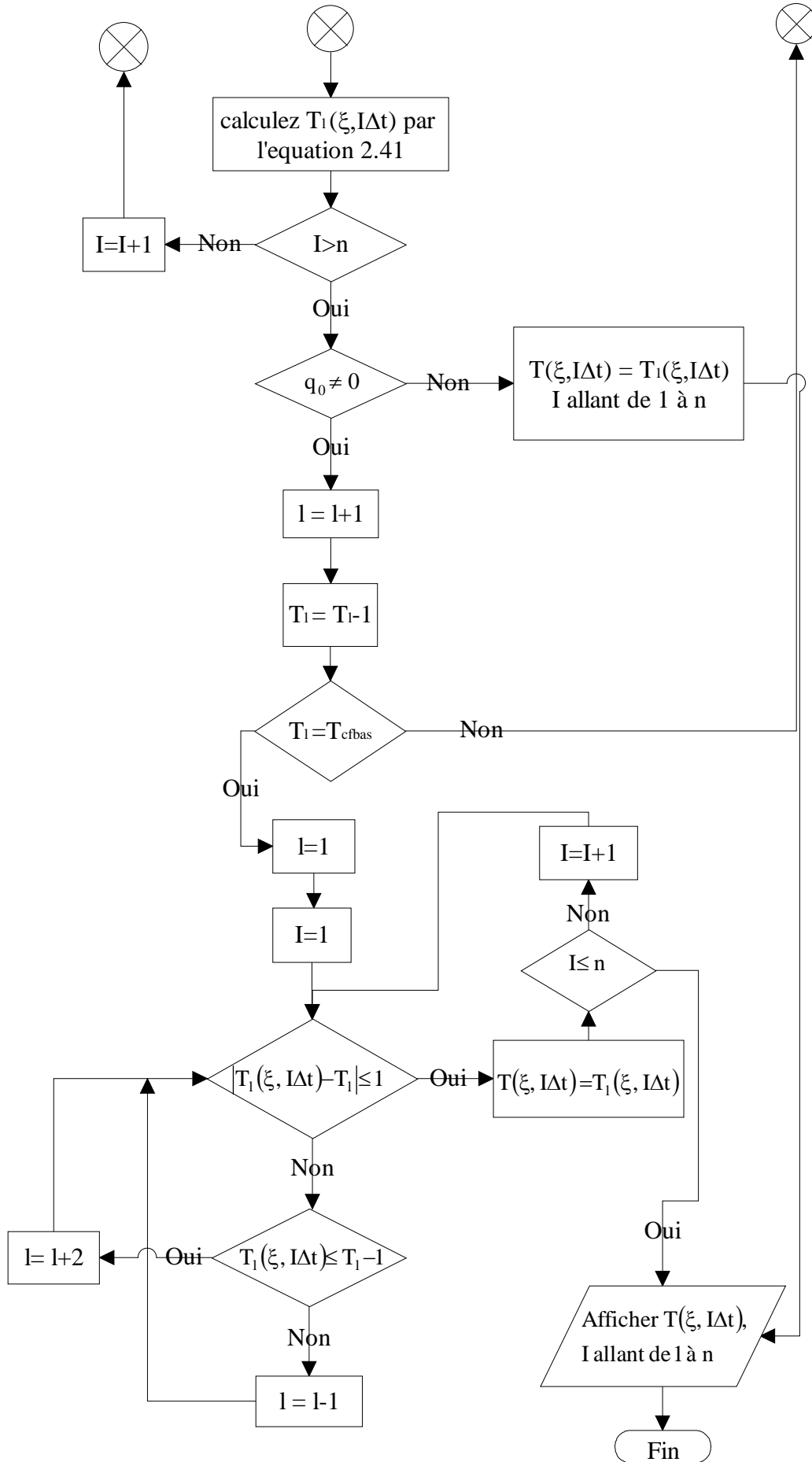
Propriétés physiques des denrées utilisées dans la simulation

Produit	Masse volumique [kg/m ³]	Chaleur spécifique [J/(kg°C)]	Conductivité thermique [W/(m°C)]	Chaleur de respiration à 0°C q ₀ [J/(kg h)]	Coefficient de température k [°C ⁻¹]
Pomme	840	3850	0.513	43.5	0.0932
Orange	1030	3850	0.580	38.1	0.0733
Tomate	1010	3850	0.462	39.8	0.1144
Banane	980	3560	0.481	76.6	0.0782
Carotte	1040	3600	0.605	48.6	0.1319
Crème glacée	630	5000	0.547	-	-
Beurre	1000	2302	0.233	-	-

Organigramme de la solution du modèle







Détails du calcul approché du coefficient de convection fonction du temps de l'air pour le cas des oranges de la référence[31]

Nous partons de l'équation différentielle de conduction de la chaleur pour une forme sphérique avec terme de source en exponentielle de la température :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] + q_0 \rho \exp(kT) \quad (\text{A3.1})$$

Multiplions membre à membre (A3.1) par ξ^2 , intégrons membre à membre par rapport à ξ entre 0 et R, puis divisons par R^2 ; nous obtenons l'équation :

$$\rho c_p \frac{\partial \left[\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 T(\xi, t) d\xi \right]}{\partial t} = \lambda \int_0^R \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] d\xi + q_0 \rho \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \exp(kT(\xi, t)) d\xi \quad (\text{A3.2})$$

$$\blacksquare \int_0^R \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] d\xi = \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} - \frac{0}{R} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R}, \quad (\text{A3.3})$$

- d'après le théorème de la valeur moyenne d'une fonction continue ($T(\xi, t)$), on peut exprimer les deux autres intégrales comme :

$$\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 T(\xi, t) d\xi = \bar{T}_1(t) \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 d\xi = \bar{T}_1(t) \left(\frac{R}{3} \right), \quad (\text{A3.4})$$

$$\int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \exp(kT(\xi, t)) d\xi = \exp(k\bar{T}_2(t)) \int_0^R \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 d\xi = \exp(k\bar{T}_2(t)) \left(\frac{R}{3} \right). \quad (\text{A3.5})$$

- si nous connaissons les températures mesurées à la surface au centre,

$$\text{et si nous admettons l'approximation } \bar{T}_1(t) \approx \bar{T}_2(t) \approx \frac{1}{2}(T(0, t) + T(R, t)), \quad (\text{A3.6})$$

nous aurons, à l'aide de la condition aux limites de Fourier, l'équation :

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=R} = \bar{h}_{ef}(t) (T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)) \approx -\frac{\rho c_p}{2} \frac{\partial \{T(0, t) + T(R, t)\}}{\partial t} \frac{R}{3} + q_0 \rho \frac{R}{3} \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right) \\ \Rightarrow \bar{h}_{ef}(t) \approx \frac{-\frac{\rho c_p}{2} \frac{\partial \{T(0, t) + T(R, t)\}}{\partial t} \frac{R}{3} + q_0 \rho \frac{R}{3} \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right)}{T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t)}. \quad (\text{A3.7})$$

Nous utilisons enfin les *différences finis* pour discrétiser la dérivée par rapport au temps avec un pas Δt :

$$\bar{h}_{ef}(t) \approx \frac{R}{3} \left\{ \frac{-\frac{\rho c_p}{2} \{T(0, t + \Delta t) + T(R, t + \Delta t) - T(0, t) - T(R, t)\}}{\Delta t} + q_0 \rho \exp\left(\frac{k}{2} \{T(0, t) + T(R, t)\}\right) \right\} \Bigg/ \left(T(R, t) - \bar{T}_{cf}(t) \right) \quad (\text{A3.8})$$

Corrélations utilisées pour l'estimation des coefficients moyens de convections

Pour le cas de l'écoulement perpendiculaire à l'axe du cylindre, les références [14,17] proposent la corrélation :

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{ tel que } \begin{cases} \text{Nu} = \frac{2\bar{h}_{cf} R}{\lambda_{air}}, \text{ nombre de Nusselts} \\ \text{Re} = \frac{2\bar{u}_{air} R}{v_{air}}, \text{ nombre de Reynolds.} \end{cases}$$

Les coefficients c et n dépendent du nombre de Reynolds :

Re	c	n
0.4-4	0.891	0.330
4-40	0.821	0.385
40-4000	0.615	0.466
4000-40000	0.174	0.618
40000-400000	0.0239	0.805

Cette corrélation nous est utile pour l'estimation du coefficient moyen de convection de l'air avec la denrée, \bar{h}_{cf} , pendant la marche de la ventilation en fonction de la vitesse de l'air \bar{u}_{air} pour les denrées de forme cylindrique ; $\bar{h}_{cf} \approx \bar{h}_c$.

Pour ce qui est de l'écoulement de l'air vers les tubes de l'évaporateur, nous utilisons la corrélation de [14], due à Grimison pour 10 rangées de tubes:

$$\frac{\bar{h}_c d_o}{\lambda_{air}} = b \left(\frac{d_o G_{max}}{\mu_{air}} \right)^n, \begin{cases} G_{max} \text{ est le produit de la masse volumique de l'air par la vitesse} \\ \text{à la section minimale de la rangée de tubes,} \\ d_o \text{ est le diamètre extérieur des tubes,} \\ \mu_{air} \text{ est la viscosité dynamique de l'air,} \\ n = 0.482, b = 0.556, \text{ pour un arrangement des tubes en quiconce,} \\ n = 0.632, b = 0.229, \text{ pour un arrangement des tubes en ligne.} \end{cases}$$

Pour avoir l'estimation du coefficient moyen de convection \bar{h}_{evcf} , nous multiplions \bar{h}_c par un facteur qui dépend du rapport du nombre de rangées a 10 rangées.

Pour l'écoulement autour d'une sphère, [29] rapporte la corrélation (due à Incopera and de Witt) :

$$\frac{2\bar{h}_c R}{\lambda_{air}} = 2 + (0.4 \text{Re}^{1/2} + 0.06 \text{Re}^{2/3}) \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu_{air}}{(\mu_{air})_s} \right)^{1/4}, \text{Pr} = \frac{c_{p,air} \mu_{air}}{\lambda_{air}} \text{ est le nombre de Prandtl ;}$$

$$\bar{h}_{cf} \approx \bar{h}_c$$

Pour l'écoulement de l'air le long d'une forme parallélépipédique, [17] propose la corrélation :

$$\begin{cases} \text{Re} \leq 500000 \Rightarrow \frac{\bar{h}_c L}{\lambda_{air}} = 0.664 \text{Re}_L^{1/2} \text{Pr}^{1/3}, \\ \text{Re} > 500000 \Rightarrow \frac{\bar{h}_c L}{\lambda_{air}} = 0.036 \text{Pr}^{1/3} (\text{Re}_L^{0.8} - 23.2) \end{cases}, \text{Re}_L = \frac{\bar{u}_{air} L}{v_{air}}.$$

Cette corrélation est aussi bien utilisée pour une denrée de forme parallélépipédique, dans ce cas $L = \text{Long}$, $\bar{h}_{cf} \approx \bar{h}_c$ ou alors pour estimer le coefficient de convection moyen des parois de la chambre froide, alors L est la longueur de la paroi et $\bar{h}_{pcff} \approx \bar{h}_c$.

Pour l'estimation des coefficients moyens de convection de l'air avec les denrées ou les parois de la chambre froide, pendant les phases d'arrêt de la ventilation (convection libre), nous utilisons les corrélations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_c = 0.18\Delta T^{1/3}, 10^9 < Gr = \frac{\rho_{\text{air}}^2 g \beta \Delta T D^3}{\mu_{\text{air}}} < 10^{12}, \beta \text{ coefficient de dilatation thermique,} \\ \bar{h}_c = 0.27 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}, 10^3 < Gr < 10^9. \end{array} \right. ;$$

\bar{h}_c en kcal/(h m²°C), pour une forme cylindrique ou sphérique en remplaçant le diamètre D du cylindre par le rayon R de la sphère,

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_c = 0.29\Delta T^{1/4}, 10^5 < Gr = \frac{\rho_{\text{air}}^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu_{\text{air}}} < 10^7, \\ \bar{h}_c = 0.28 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4}, 10^3 < Gr Pr < 10^9, \\ \bar{h}_c = 0.18\Delta T^{1/3}, Gr Pr > 10^9 \end{array} \right\} \text{pour une plaque verticale de hauteur L} ;$$

\bar{h}_c en Btu/(h ft²°F), pour une forme parallélépipédique.

Tableaux des valeurs numériques solutions du modèle

Pour l'ensemble des tableaux ci-après les caractéristiques de légendes sont identiques aux figures du chapitre 3 ayant le même numéro d'ordre

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	5.00	5.02	5.03
2.00	4.00	4.15	4.30
4.00	4.00	4.04	4.08
6.00	4.00	4.02	4.04
8.00	4.00	4.02	4.03
10.00	4.00	4.02	4.03
12.00	4.00	4.02	4.03
14.00	5.00	4.15	4.12
16.00	5.00	4.26	4.23
18.00	5.00	4.35	4.33
20.00	5.00	4.44	4.43
22.00	5.00	4.53	4.51
24.00	5.00	4.67	4.59
26.00	4.00	4.10	4.20
28.00	4.00	4.03	4.06
30.00	4.00	4.02	4.04
32.00	4.00	4.02	4.03
34.00	4.00	4.02	4.03
36.00	4.00	4.02	4.03
38.00	5.00	4.15	4.12
40.00	5.00	4.26	4.23
42.00	5.00	4.35	4.33
44.00	5.00	4.44	4.43
46.00	5.00	4.53	4.51
48.00	5.00	4.67	4.59

Tableau A 5.1. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une période de 24 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	5.00	5.02	5.03
2.00	4.00	4.15	4.30
4.00	4.00	4.04	4.08
6.00	4.00	4.03	4.04
8.00	5.00	4.15	4.12
10.00	5.00	4.26	4.24
12.00	5.00	4.48	4.34
14.00	4.00	4.07	4.14
16.00	4.00	4.03	4.05
18.00	4.00	4.02	4.04
20.00	5.00	4.15	4.12
22.00	5.00	4.26	4.23
24.00	5.00	4.47	4.33
26.00	4.00	4.07	4.13
28.00	4.00	4.03	4.05
30.00	4.00	4.02	4.04
32.00	5.00	4.15	4.12
34.00	5.00	4.26	4.23
36.00	5.00	4.47	4.33
38.00	4.00	4.07	4.13
40.00	4.00	4.03	4.05
42.00	4.00	4.02	4.04
44.00	5.00	4.15	4.12
46.00	5.00	4.26	4.23
48.00	5.00	4.47	4.33

Tableau A 5.2. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une période de 12 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	5.00	5.02	5.03
2.00	4.00	4.15	4.30
4.00	5.00	4.17	4.14
6.00	5.00	4.41	4.25
8.00	4.00	4.06	4.11
10.00	5.00	4.11	4.08
12.00	5.00	4.36	4.20
14.00	4.00	4.05	4.10
16.00	5.00	4.11	4.08
18.00	5.00	4.36	4.19
20.00	4.00	4.05	4.10
22.00	5.00	4.11	4.08
24.00	5.00	4.36	4.19
26.00	4.00	4.05	4.10
28.00	5.00	4.11	4.08
30.00	5.00	4.36	4.19
32.00	4.00	4.05	4.10
34.00	5.00	4.11	4.08
36.00	5.00	4.36	4.19
38.00	4.00	4.05	4.10
40.00	5.00	4.11	4.08
42.00	5.00	4.36	4.19
44.00	4.00	4.05	4.10
46.00	5.00	4.11	4.08
48.00	5.00	4.36	4.19

Tableau A 5.3. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une période de 6 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	5.00	5.02	5.03
2.00	4.00	4.15	4.30
4.00	4.00	4.04	4.08
6.00	4.00	4.02	4.04
8.00	4.00	4.02	4.03
10.00	5.00	4.15	4.12
12.00	5.00	4.26	4.23
14.00	5.00	4.35	4.33
16.00	5.00	4.55	4.43
18.00	4.00	4.08	4.16
20.00	4.00	4.03	4.05
22.00	4.00	4.02	4.04
24.00	4.00	4.02	4.03
26.00	5.00	4.15	4.12
28.00	5.00	4.26	4.23
30.00	5.00	4.35	4.33
32.00	5.00	4.55	4.43
34.00	4.00	4.08	4.16
36.00	4.00	4.03	4.05
38.00	4.00	4.02	4.04
40.00	4.00	4.02	4.03
42.00	5.00	4.15	4.12
44.00	5.00	4.26	4.23
46.00	5.00	4.35	4.33
48.00	5.00	4.55	4.43

Tableau A 5.4. Distributions de températures au centre et à la surface d'une pomme pour une période de 16 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	10.00	10.03	10.06
2.00	7.00	7.19	7.42
4.00	7.00	7.07	7.15
6.00	7.00	7.04	7.08
8.00	7.00	7.03	7.06
10.00	7.00	7.03	7.06
12.00	7.00	7.03	7.06
14.00	10.00	7.39	7.26
16.00	10.00	7.68	7.57
18.00	10.00	7.94	7.84
20.00	10.00	8.17	8.09
22.00	10.00	8.39	8.31
24.00	10.00	8.72	8.51
26.00	7.00	7.28	7.62
28.00	7.00	7.09	7.19
30.00	7.00	7.04	7.09
32.00	7.00	7.03	7.06
34.00	7.00	7.03	7.06
36.00	7.00	7.03	7.06
38.00	10.00	7.39	7.26
40.00	10.00	7.68	7.57
42.00	10.00	7.94	7.84
44.00	10.00	8.17	8.09
46.00	10.00	8.39	8.31
48.00	10.00	8.72	8.51

Tableau A 5.5. Distributions de températures au centre et à la surface d'une tomate pour une période de 24 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	10.00	10.03	10.06
2.00	7.00	7.19	7.42
4.00	7.00	7.07	7.15
6.00	7.00	7.04	7.08
8.00	10.00	7.40	7.28
10.00	10.00	7.69	7.58
12.00	10.00	8.15	7.85
14.00	7.00	7.17	7.39
16.00	7.00	7.06	7.14
18.00	7.00	7.04	7.08
20.00	10.00	7.40	7.28
22.00	10.00	7.69	7.58
24.00	10.00	8.15	7.85
26.00	7.00	7.17	7.38
28.00	7.00	7.06	7.14
30.00	7.00	7.04	7.08
32.00	10.00	7.40	7.28
34.00	10.00	7.69	7.58
36.00	10.00	8.15	7.85
38.00	7.00	7.17	7.38
40.00	7.00	7.06	7.14
42.00	7.00	7.04	7.08
44.00	10.00	7.40	7.28
46.00	10.00	7.69	7.58
48.00	10.00	8.15	7.85

Tableau A 5.6. Distributions des températures au centre et à la surface d'une tomate pour une période de 12h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	10.00	10.03	10.06
2.00	7.00	7.19	7.42
4.00	9.99	7.34	7.23
6.00	10.00	7.87	7.52
8.00	7.00	7.12	7.27
10.00	9.99	7.29	7.18
12.00	10.00	7.83	7.48
14.00	7.00	7.12	7.26
16.00	9.99	7.29	7.17
18.00	10.00	7.83	7.47
20.00	7.00	7.12	7.26
22.00	9.99	7.29	7.17
24.00	10.00	7.83	7.47
26.00	7.00	7.12	7.25
28.00	9.99	7.29	7.17
30.00	10.00	7.83	7.47
32.00	7.00	7.12	7.25
34.00	9.99	7.29	7.17
36.00	10.00	7.83	7.47
38.00	7.00	7.12	7.25
40.00	9.99	7.29	7.17
42.00	10.00	7.83	7.47
44.00	7.00	7.12	7.25
46.00	9.99	7.29	7.17
48.00	10.00	7.83	7.47

Tableau A 5.7. Distributions de températures au centre et à la surface d'une tomate pour une période de 6h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	10.00	10.03	10.06
2.00	7.00	7.19	7.42
4.00	7.00	7.07	7.15
6.00	7.00	7.04	7.08
8.00	7.00	7.03	7.06
10.00	10.00	7.39	7.27
12.00	10.00	7.68	7.57
14.00	10.00	7.94	7.84
16.00	10.00	8.36	8.09
18.00	7.00	7.21	7.47
20.00	7.00	7.07	7.16
22.00	7.00	7.04	7.08
24.00	7.00	7.03	7.06
26.00	10.00	7.39	7.27
28.00	10.00	7.68	7.57
30.00	10.00	7.94	7.84
32.00	10.00	8.36	8.09
34.00	7.00	7.21	7.47
36.00	7.00	7.07	7.16
38.00	7.00	7.04	7.08
40.00	7.00	7.03	7.06
42.00	10.00	7.39	7.27
44.00	10.00	7.68	7.57
46.00	10.00	7.94	7.84
48.00	10.00	8.36	8.09

Tableau A 5.8. Distributions de températures au centre et à la surface d'une tomate pour une période de 16h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	2.00	2.20	2.37
4.00	2.00	2.06	2.11
6.00	2.00	2.03	2.04
8.00	2.00	2.02	2.03
10.00	2.00	2.02	2.03
12.00	2.00	2.02	2.03
14.00	4.00	2.26	2.18
16.00	4.00	2.46	2.39
18.00	4.00	2.64	2.58
20.00	4.00	2.80	2.75
22.00	4.00	2.95	2.90
24.00	4.00	3.23	3.05
26.00	2.00	2.22	2.41
28.00	2.00	2.06	2.12
30.00	2.00	2.03	2.05
32.00	2.00	2.02	2.03
34.00	2.00	2.02	2.03
36.00	2.00	2.02	2.03
38.00	4.00	2.26	2.18
40.00	4.00	2.46	2.39
42.00	4.00	2.64	2.58
44.00	4.00	2.80	2.75
46.00	4.00	2.95	2.90
48.00	4.00	3.23	3.05

Tableau A 5.9. Distributions de températures au centre et à la surface d'une orange pour une période de 24h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	2.00	2.19	2.36
4.00	2.00	2.06	2.11
6.00	2.00	2.03	2.04
8.00	4.00	2.23	2.17
10.00	4.00	2.40	2.34
12.00	4.00	2.67	2.50
14.00	2.00	2.11	2.21
16.00	2.00	2.04	2.07
18.00	2.00	2.02	2.04
20.00	4.00	2.22	2.16
22.00	4.00	2.39	2.34
24.00	4.00	2.67	2.50
26.00	2.00	2.11	2.21
28.00	2.00	2.04	2.07
30.00	2.00	2.02	2.04
32.00	4.00	2.22	2.16
34.00	4.00	2.39	2.34
36.00	4.00	2.67	2.50
38.00	2.00	2.11	2.21
40.00	2.00	2.04	2.07
42.00	2.00	2.02	2.04
44.00	4.00	2.22	2.16
46.00	4.00	2.39	2.34
48.00	4.00	2.67	2.50

Tableau A 5.10. Distributions de températures au centre et à la surface d'une orange pour une période de 12h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	2.00	2.19	2.36
4.00	3.99	2.23	2.18
6.00	4.00	2.54	2.35
8.00	2.00	2.08	2.16
10.00	3.99	2.17	2.11
12.00	4.00	2.48	2.28
14.00	2.00	2.07	2.14
16.00	3.99	2.16	2.10
18.00	4.00	2.48	2.28
20.00	2.00	2.07	2.13
22.00	3.99	2.16	2.10
24.00	4.00	2.48	2.28
26.00	2.00	2.07	2.13
28.00	3.99	2.16	2.10
30.00	4.00	2.48	2.28
32.00	2.00	2.07	2.13
34.00	3.99	2.16	2.10
36.00	4.00	2.48	2.28
38.00	2.00	2.07	2.13
40.00	3.99	2.16	2.10
42.00	4.00	2.48	2.28
44.00	2.00	2.07	2.13
46.00	3.99	2.16	2.10
48.00	4.00	2.48	2.28

Tableau A 5.11. Distributions de températures au centre et à la surface d'une orange pour une période de 6h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	2.00	2.19	2.36
4.00	2.00	2.06	2.11
6.00	2.00	2.02	2.04
8.00	2.00	2.02	2.03
10.00	4.00	2.22	2.16
12.00	4.00	2.39	2.33
14.00	4.00	2.54	2.49
16.00	4.00	2.80	2.64
18.00	2.00	2.13	2.25
20.00	2.00	2.04	2.08
22.00	2.00	2.02	2.04
24.00	2.00	2.02	2.03
26.00	4.00	2.22	2.16
28.00	4.00	2.39	2.33
30.00	4.00	2.54	2.49
32.00	4.00	2.80	2.64
34.00	2.00	2.13	2.25
36.00	2.00	2.04	2.08
38.00	2.00	2.02	2.04
40.00	2.00	2.02	2.03
42.00	4.00	2.22	2.16
44.00	4.00	2.39	2.33
46.00	4.00	2.54	2.49
48.00	4.00	2.80	2.64

Tableau A 5.12. Distributions de températures au centre et à la surface d'une orange pour une période de 16h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	15.00	15.02	15.03
2.00	11.00	11.02	11.03
4.00	11.00	11.02	11.02
6.00	11.00	11.02	11.02
8.00	11.00	11.02	11.02
10.00	11.00	11.02	11.02
12.00	11.00	11.02	11.02
14.00	15.00	12.07	12.02
16.00	15.00	12.90	12.87
18.00	15.00	13.55	13.53
20.00	15.00	14.01	14.00
22.00	15.00	14.41	14.40
24.00	15.00	14.71	14.66
26.00	11.00	11.03	11.04
28.00	11.00	11.02	11.02
30.00	11.00	11.02	11.02
32.00	11.00	11.02	11.02
34.00	11.00	11.02	11.02
36.00	11.00	11.02	11.02
38.00	15.00	12.07	12.02
40.00	15.00	12.90	12.87
42.00	15.00	13.55	13.53
44.00	15.00	14.01	14.00
46.00	15.00	14.41	14.40
48.00	15.00	14.71	14.66

Tableau A 5.13. Distributions de températures au centre et à la surface d'une banane pour une période de 24h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	15.00	15.02	15.03
2.00	11.00	11.02	11.03
4.00	11.00	11.02	11.02
6.00	11.00	11.02	11.02
8.00	15.00	12.07	12.02
10.00	15.00	12.90	12.87
12.00	15.00	13.74	13.54
14.00	11.00	11.03	11.04
16.00	11.00	11.02	11.02
18.00	11.00	11.02	11.02
20.00	15.00	12.07	12.02
22.00	15.00	12.90	12.87
24.00	15.00	13.74	13.54
26.00	11.00	11.03	11.04
28.00	11.00	11.02	11.02
30.00	11.00	11.02	11.02
32.00	15.00	12.07	12.02
34.00	15.00	12.90	12.87
36.00	15.00	13.74	13.54
38.00	11.00	11.03	11.04
40.00	11.00	11.02	11.02
42.00	11.00	11.02	11.02
44.00	15.00	12.07	12.02
46.00	15.00	12.90	12.87
48.00	15.00	13.74	13.54

Tableau A 5.14. Distributions de températures au centre et à la surface d'une banane pour une période de 12h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	15.00	15.02	15.03
2.00	11.00	11.02	11.03
4.00	14.99	11.55	11.49
6.00	15.00	12.84	12.49
8.00	11.00	11.02	11.03
10.00	14.99	11.55	11.49
12.00	15.00	12.84	12.49
14.00	11.00	11.02	11.03
16.00	14.99	11.55	11.49
18.00	15.00	12.84	12.49
20.00	11.00	11.02	11.03
22.00	14.99	11.55	11.49
24.00	15.00	12.84	12.49
26.00	11.00	11.02	11.03
28.00	14.99	11.55	11.49
30.00	15.00	12.84	12.49
32.00	11.00	11.02	11.03
34.00	14.99	11.55	11.49
36.00	15.00	12.84	12.49
38.00	11.00	11.02	11.03
40.00	14.99	11.55	11.49
42.00	15.00	12.84	12.49
44.00	11.00	11.02	11.03
46.00	14.99	11.55	11.49
48.00	15.00	12.84	12.49

Tableau A 5.15. Distributions de températures au centre et à la surface d'une banane pour une période de 6 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	15.00	15.02	15.03
2.00	11.00	11.02	11.03
4.00	11.00	11.02	11.02
6.00	11.00	11.02	11.02
8.00	11.00	11.02	11.02
10.00	15.00	12.07	12.02
12.00	15.00	12.90	12.87
14.00	15.00	13.55	13.53
16.00	15.00	14.19	14.05
18.00	11.00	11.03	11.04
20.00	11.00	11.02	11.02
22.00	11.00	11.02	11.02
24.00	11.00	11.02	11.02
26.00	15.00	12.07	12.02
28.00	15.00	12.90	12.87
30.00	15.00	13.55	13.53
32.00	15.00	14.19	14.05
34.00	11.00	11.03	11.04
36.00	11.00	11.02	11.02
38.00	11.00	11.02	11.02
40.00	11.00	11.02	11.02
42.00	15.00	12.07	12.02
44.00	15.00	12.90	12.87
46.00	15.00	13.55	13.53
48.00	15.00	14.19	14.05

Tableau A 5.16. Distributions de températures au centre et à la surface d'une banane pour une période de 16 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.01	6.01
2.00	4.00	4.02	4.02
4.00	4.00	4.01	4.01
6.00	4.00	4.01	4.01
8.00	4.00	4.01	4.01
10.00	4.00	4.01	4.01
12.00	4.00	4.01	4.01
14.00	6.00	4.44	4.43
16.00	6.00	4.81	4.80
18.00	6.00	5.10	5.09
20.00	6.00	5.33	5.32
22.00	6.00	5.51	5.51
24.00	6.00	5.69	5.65
26.00	4.00	4.02	4.02
28.00	4.00	4.01	4.01
30.00	4.00	4.01	4.01
32.00	4.00	4.01	4.01
34.00	4.00	4.01	4.01
36.00	4.00	4.01	4.01
38.00	6.00	4.44	4.43
40.00	6.00	4.81	4.80
42.00	6.00	5.10	5.09
44.00	6.00	5.33	5.32
46.00	6.00	5.51	5.51
48.00	6.00	5.69	5.65

Tableau A 5.17. Distributions de températures au centre et à la surface d'une carotte pour une période de 24 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.01	6.01
2.00	4.00	4.02	4.02
4.00	4.00	4.01	4.01
6.00	4.00	4.01	4.01
8.00	6.00	4.44	4.43
10.00	6.00	4.81	4.80
12.00	6.00	5.21	5.10
14.00	4.00	4.02	4.02
16.00	4.00	4.01	4.01
18.00	4.00	4.01	4.01
20.00	6.00	4.44	4.43
22.00	6.00	4.81	4.80
24.00	6.00	5.21	5.10
26.00	4.00	4.02	4.02
28.00	4.00	4.01	4.01
30.00	4.00	4.01	4.01
32.00	6.00	4.44	4.43
34.00	6.00	4.81	4.80
36.00	6.00	5.21	5.10
38.00	4.00	4.02	4.02
40.00	4.00	4.01	4.01
42.00	4.00	4.01	4.01
44.00	6.00	4.44	4.43
46.00	6.00	4.81	4.80
48.00	6.00	5.21	5.10

Tableau A 5.18. Distributions de températures au centre et à la surface d'une carotte pour une période de 12 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.01	6.01
2.00	4.00	4.02	4.02
4.00	5.99	4.23	4.21
6.00	6.00	4.80	4.63
8.00	4.00	4.01	4.02
10.00	5.99	4.23	4.21
12.00	6.00	4.80	4.63
14.00	4.00	4.01	4.02
16.00	5.99	4.23	4.21
18.00	6.00	4.80	4.63
20.00	4.00	4.01	4.02
22.00	5.99	4.23	4.21
24.00	6.00	4.80	4.63
26.00	4.00	4.01	4.02
28.00	5.99	4.23	4.21
30.00	6.00	4.80	4.63
32.00	4.00	4.01	4.02
34.00	5.99	4.23	4.21
36.00	6.00	4.80	4.63
38.00	4.00	4.01	4.02
40.00	5.99	4.23	4.21
42.00	6.00	4.80	4.63
44.00	4.00	4.01	4.02
46.00	5.99	4.23	4.21
48.00	6.00	4.80	4.63

Tableau A 5.19. Distributions de températures au centre et à la surface d'une carotte pour une période de 6 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.01	6.01
2.00	4.00	4.02	4.02
4.00	4.00	4.01	4.01
6.00	4.00	4.01	4.01
8.00	4.00	4.01	4.01
10.00	6.00	4.44	4.43
12.00	6.00	4.81	4.80
14.00	6.00	5.10	5.09
16.00	6.00	5.41	5.33
18.00	4.00	4.02	4.02
20.00	4.00	4.01	4.01
22.00	4.00	4.01	4.01
24.00	4.00	4.01	4.01
26.00	6.00	4.44	4.43
28.00	6.00	4.81	4.80
30.00	6.00	5.10	5.09
32.00	6.00	5.41	5.33
34.00	4.00	4.02	4.02
36.00	4.00	4.01	4.01
38.00	4.00	4.01	4.01
40.00	4.00	4.01	4.01
42.00	6.00	4.44	4.43
44.00	6.00	4.81	4.80
46.00	6.00	5.10	5.09
48.00	6.00	5.41	5.33

Tableau A 5.20. Distributions de températures au centre et à la surface d'une carotte pour une période de 16 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-12.20	-14.20
4.00	-9.60	-10.57	-11.32
6.00	-9.60	-9.96	-10.24
8.00	-9.60	-9.74	-9.84
10.00	-9.60	-9.65	-9.69
12.00	-9.60	-9.62	-9.63
14.00	-19.30	-10.56	-10.16
16.00	-19.30	-11.30	-10.93
18.00	-19.30	-11.97	-11.64
20.00	-19.30	-12.59	-12.28
22.00	-19.30	-13.16	-12.88
24.00	-19.30	-14.12	-13.42
26.00	-9.60	-10.68	-11.50
28.00	-9.60	-10.00	-10.31
30.00	-9.60	-9.75	-9.87
32.00	-9.60	-9.66	-9.70
34.00	-9.60	-9.62	-9.64
36.00	-9.60	-9.61	-9.61
38.00	-19.30	-10.55	-10.15
40.00	-19.30	-11.29	-10.92
42.00	-19.30	-11.96	-11.63
44.00	-19.30	-12.58	-12.27
46.00	-19.30	-13.15	-12.87
48.00	-19.30	-14.12	-13.41

Tableau A 5.21. Distributions de températures au centre et à la surface d'une crème glacée cylindrique pour une période de 24 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-12.20	-14.20
4.00	-9.60	-10.57	-11.32
6.00	-9.60	-9.98	-10.24
8.00	-19.30	-10.98	-10.61
10.00	-19.30	-11.68	-11.34
12.00	-19.30	-12.88	-12.01
14.00	-9.60	-10.31	-10.86
16.00	-9.60	-9.87	-10.07
18.00	-9.60	-9.70	-9.78
20.00	-19.30	-10.66	-10.27
22.00	-19.30	-11.39	-11.03
24.00	-19.30	-12.63	-11.73
26.00	-9.60	-10.24	-10.73
28.00	-9.60	-9.84	-10.02
30.00	-9.60	-9.69	-9.76
32.00	-19.30	-10.65	-10.25
34.00	-19.30	-11.38	-11.02
36.00	-19.30	-12.62	-11.71
38.00	-9.60	-10.23	-10.72
40.00	-9.60	-9.84	-10.02
42.00	-9.60	-9.69	-9.76
44.00	-19.30	-10.65	-10.25
46.00	-19.30	-11.38	-11.02
48.00	-19.30	-12.62	-11.71

Tableau A 5.22. Distributions de températures au centre et à la surface d'une crème glacée cylindrique pour une période de 12 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-12.20	-14.20
4.00	-19.23	-12.16	-11.90
6.00	-19.30	-13.30	-12.48
8.00	-9.60	-10.43	-11.07
10.00	-19.23	-10.79	-10.44
12.00	-19.30	-12.14	-11.16
14.00	-9.60	-10.09	-10.47
16.00	-19.23	-10.52	-10.15
18.00	-19.30	-11.91	-10.90
20.00	-9.60	-10.02	-10.35
22.00	-19.23	-10.47	-10.10
24.00	-19.30	-11.86	-10.85
26.00	-9.60	-10.01	-10.33
28.00	-19.23	-10.46	-10.09
30.00	-19.30	-11.86	-10.84
32.00	-9.60	-10.01	-10.32
34.00	-19.23	-10.45	-10.09
36.00	-19.30	-11.85	-10.84
38.00	-9.60	-10.01	-10.32
40.00	-19.23	-10.45	-10.09
42.00	-19.30	-11.85	-10.84
44.00	-9.60	-10.01	-10.32
46.00	-19.23	-10.45	-10.09
48.00	-19.30	-11.85	-10.84

Tableau A 5.23. Distributions des températures au centre et à la surface d'une crème glacée cylindrique pour une période de 6 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-12.20	-14.20
4.00	-9.60	-10.57	-11.32
6.00	-9.60	-9.96	-10.24
8.00	-9.60	-9.74	-9.84
10.00	-19.30	-10.70	-10.31
12.00	-19.30	-11.43	-11.07
14.00	-19.30	-12.09	-11.76
16.00	-19.30	-13.23	-12.40
18.00	-9.60	-10.41	-11.04
20.00	-9.60	-9.90	-10.14
22.00	-9.60	-9.71	-9.80
24.00	-9.60	-9.64	-9.68
26.00	-19.30	-10.59	-10.19
28.00	-19.30	-11.32	-10.96
30.00	-19.30	-12.00	-11.66
32.00	-19.30	-13.15	-12.31
34.00	-9.60	-10.39	-10.99
36.00	-9.60	-9.89	-10.12
38.00	-9.60	-9.71	-9.79
40.00	-9.60	-9.64	-9.67
42.00	-19.30	-10.59	-10.19
44.00	-19.30	-11.32	-10.96
46.00	-19.30	-12.00	-11.66
48.00	-19.30	-13.15	-12.31

Tableau A 5.24. Distributions de températures au centre et à la surface d'une crème glacée cylindrique pour une période de 16 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.13	6.20
4.00	6.00	6.01	6.02
6.00	6.00	6.00	6.00
8.00	6.00	6.00	6.00
10.00	6.00	6.00	6.00
12.00	6.00	6.00	6.00
14.00	8.00	6.19	6.16
16.00	8.00	6.36	6.33
18.00	8.00	6.51	6.49
20.00	8.00	6.65	6.63
22.00	8.00	6.78	6.76
24.00	8.00	7.05	6.88
26.00	6.00	6.06	6.09
28.00	6.00	6.01	6.01
30.00	6.00	6.00	6.00
32.00	6.00	6.00	6.00
34.00	6.00	6.00	6.00
36.00	6.00	6.00	6.00
38.00	8.00	6.19	6.16
40.00	8.00	6.36	6.33
42.00	8.00	6.51	6.49
44.00	8.00	6.65	6.63
46.00	8.00	6.78	6.76
48.00	8.00	7.05	6.88

Tableau A 5.25. Distributions de températures au centre et à la surface d'un beurre pour une période de 24 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.13	6.20
4.00	6.00	6.01	6.02
6.00	6.00	6.00	6.00
8.00	8.00	6.19	6.16
10.00	8.00	6.36	6.34
12.00	8.00	6.73	6.49
14.00	6.00	6.04	6.05
16.00	6.00	6.00	6.01
18.00	6.00	6.00	6.00
20.00	8.00	6.19	6.16
22.00	8.00	6.36	6.33
24.00	8.00	6.73	6.49
26.00	6.00	6.04	6.05
28.00	6.00	6.00	6.01
30.00	6.00	6.00	6.00
32.00	8.00	6.19	6.16
34.00	8.00	6.36	6.33
36.00	8.00	6.73	6.49
38.00	6.00	6.04	6.05
40.00	6.00	6.00	6.01
42.00	6.00	6.00	6.00
44.00	8.00	6.19	6.16
46.00	8.00	6.36	6.33
48.00	8.00	6.73	6.49

Tableau A 5.26. Distributions de températures au centre et à la surface d'un beurre pour une période de 12 h

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.13	6.20
4.00	7.99	6.15	6.12
6.00	8.00	6.56	6.29
8.00	6.00	6.02	6.04
10.00	7.99	6.11	6.08
12.00	8.00	6.53	6.26
14.00	6.00	6.02	6.03
16.00	7.99	6.11	6.08
18.00	8.00	6.53	6.26
20.00	6.00	6.02	6.03
22.00	7.99	6.11	6.08
24.00	8.00	6.53	6.26
26.00	6.00	6.02	6.03
28.00	7.99	6.11	6.08
30.00	8.00	6.53	6.26
32.00	6.00	6.02	6.03
34.00	7.99	6.11	6.08
36.00	8.00	6.53	6.26
38.00	6.00	6.02	6.03
40.00	7.99	6.11	6.08
42.00	8.00	6.53	6.26
44.00	6.00	6.02	6.03
46.00	7.99	6.11	6.08
48.00	8.00	6.53	6.26

Tableau A 5.27. Distributions de températures au centre et à la surface d'un beurre pour une période de 6 h

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.13	6.20
4.00	6.00	6.01	6.02
6.00	6.00	6.00	6.00
8.00	6.00	6.00	6.00
10.00	8.00	6.19	6.16
12.00	8.00	6.36	6.33
14.00	8.00	6.51	6.49
16.00	8.00	6.85	6.63
18.00	6.00	6.04	6.07
20.00	6.00	6.00	6.01
22.00	6.00	6.00	6.00
24.00	6.00	6.00	6.00
26.00	8.00	6.19	6.16
28.00	8.00	6.36	6.33
30.00	8.00	6.51	6.49
32.00	8.00	6.85	6.63
34.00	6.00	6.04	6.07
36.00	6.00	6.00	6.01
38.00	6.00	6.00	6.00
40.00	6.00	6.00	6.00
42.00	8.00	6.19	6.16
44.00	8.00	6.36	6.33
46.00	8.00	6.51	6.49
48.00	8.00	6.85	6.63

Tableau A 5.28. Distributions de températures au centre et à la surface d'un beurre pour une période de 16 h

Temps [h]	Température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	9.00	9.02	9.04
2.00	4.00	4.14	4.29
4.00	4.00	4.04	4.07
6.00	4.00	4.02	4.04
8.00	9.00	4.70	4.49
10.00	9.00	5.26	5.08
12.00	9.00	6.08	5.59
14.00	4.00	4.22	4.47
16.00	4.00	4.05	4.11
18.00	4.00	4.02	4.04
20.00	9.00	4.70	4.49
22.00	9.00	5.26	5.08
24.00	9.00	6.08	5.59
26.00	4.00	4.22	4.47
28.00	4.00	4.05	4.11
30.00	4.00	4.02	4.04
32.00	9.00	4.70	4.49
34.00	9.00	5.26	5.08
36.00	9.00	6.08	5.59
38.00	4.00	4.22	4.47
40.00	4.00	4.05	4.11
42.00	4.00	4.02	4.04
44.00	9.00	4.70	4.49
46.00	9.00	5.26	5.08
48.00	9.00	6.08	5.59

Tableau A 5.29. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une amplitude de 5 °C

Temps [h]	Température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	3.00	3.14	3.29
4.00	3.00	3.04	3.08
6.00	3.00	3.02	3.04
8.00	4.00	3.15	3.12
10.00	4.00	3.25	3.23
12.00	4.00	3.41	3.33
14.00	3.00	3.06	3.12
16.00	3.00	3.02	3.04
18.00	3.00	3.02	3.03
20.00	4.00	3.14	3.11
22.00	4.00	3.25	3.22
24.00	4.00	3.41	3.32
26.00	3.00	3.06	3.12
28.00	3.00	3.02	3.04
30.00	3.00	3.02	3.03
32.00	4.00	3.14	3.11
34.00	4.00	3.25	3.22
36.00	4.00	3.41	3.32
38.00	3.00	3.06	3.12
40.00	3.00	3.02	3.04
42.00	3.00	3.02	3.03
44.00	4.00	3.14	3.11
46.00	4.00	3.25	3.22
48.00	4.00	3.41	3.32

Tableau A 5.30. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une amplitude de 1 °C

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.03
2.00	2.00	2.15	2.29
4.00	2.00	2.04	2.08
6.00	2.00	2.02	2.04
8.00	4.00	2.26	2.19
10.00	4.00	2.46	2.40
12.00	4.00	2.78	2.59
14.00	2.00	2.10	2.20
16.00	2.00	2.03	2.06
18.00	2.00	2.02	2.03
20.00	4.00	2.26	2.19
22.00	4.00	2.46	2.40
24.00	4.00	2.78	2.59
26.00	2.00	2.10	2.20
28.00	2.00	2.03	2.06
30.00	2.00	2.02	2.03
32.00	4.00	2.26	2.19
34.00	4.00	2.46	2.40
36.00	4.00	2.78	2.59
38.00	2.00	2.10	2.20
40.00	2.00	2.03	2.06
42.00	2.00	2.02	2.03
44.00	4.00	2.26	2.19
46.00	4.00	2.46	2.40
48.00	4.00	2.78	2.59

Tableau A 5.31. Distributions des températures au centre et à la surface d'une pomme pour une amplitude de 2 °C

Tableau A 5.32 identique à A5.6.

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	7.00	7.02	7.05
2.00	6.00	6.20	6.43
4.00	6.00	6.07	6.15
6.00	6.00	6.04	6.08
8.00	7.00	6.17	6.14
10.00	7.00	6.28	6.25
12.00	7.00	6.44	6.36
14.00	6.00	6.09	6.18
16.00	6.00	6.04	6.09
18.00	6.00	6.03	6.06
20.00	7.00	6.16	6.13
22.00	7.00	6.27	6.24
24.00	7.00	6.43	6.35
26.00	6.00	6.09	6.18
28.00	6.00	6.04	6.08
30.00	6.00	6.03	6.06
32.00	7.00	6.16	6.13
34.00	7.00	6.27	6.24
36.00	7.00	6.43	6.35
38.00	6.00	6.09	6.18
40.00	6.00	6.04	6.08
42.00	6.00	6.03	6.06
44.00	7.00	6.16	6.13
46.00	7.00	6.27	6.24
48.00	7.00	6.43	6.35

Tableau A 5.33. Distributions des températures au centre et à la surface d'une tomate pour une amplitude de 1 °C

temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	7.00	7.02	7.05
2.00	1.00	1.19	1.41
4.00	1.00	1.06	1.13
6.00	1.00	1.03	1.05
8.00	7.00	1.76	1.47
10.00	7.00	2.35	2.08
12.00	7.00	3.25	2.63
14.00	1.00	1.33	1.72
16.00	1.00	1.10	1.21
18.00	1.00	1.04	1.07
20.00	7.00	1.78	1.48
22.00	7.00	2.36	2.09
24.00	7.00	3.26	2.64
26.00	1.00	1.33	1.72
28.00	1.00	1.10	1.21
30.00	1.00	1.04	1.08
32.00	7.00	1.78	1.48
34.00	7.00	2.36	2.09
36.00	7.00	3.26	2.64
38.00	1.00	1.33	1.72
40.00	1.00	1.10	1.21
42.00	1.00	1.04	1.08
44.00	7.00	1.78	1.48
46.00	7.00	2.36	2.09
48.00	7.00	3.26	2.64

Tableau A 5.34. Distributions des températures au centre et à la surface d'une tomate pour une amplitude de 6 °C

Tableau A 5.35 identique à A 5.18.

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.01
2.00	3.00	3.01	3.02
4.00	3.00	3.01	3.01
6.00	3.00	3.01	3.01
8.00	4.00	3.21	3.20
10.00	4.00	3.40	3.39
12.00	4.00	3.60	3.54
14.00	3.00	3.01	3.01
16.00	3.00	3.01	3.01
18.00	3.00	3.01	3.01
20.00	4.00	3.21	3.20
22.00	4.00	3.40	3.39
24.00	4.00	3.60	3.54
26.00	3.00	3.01	3.01
28.00	3.00	3.01	3.01
30.00	3.00	3.01	3.01
32.00	4.00	3.21	3.20
34.00	4.00	3.40	3.39
36.00	4.00	3.60	3.54
38.00	3.00	3.01	3.01
40.00	3.00	3.01	3.01
42.00	3.00	3.01	3.01
44.00	4.00	3.21	3.20
46.00	4.00	3.40	3.39
48.00	4.00	3.60	3.54

Tableau A 5.36. Distributions des températures au centre et à la surface d'une carotte pour une amplitude de 1°C

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.01
2.00	1.00	1.01	1.02
4.00	1.00	1.01	1.01
6.00	1.00	1.01	1.01
8.00	4.00	1.64	1.61
10.00	4.00	2.20	2.18
12.00	4.00	2.79	2.62
14.00	1.00	1.02	1.02
16.00	1.00	1.01	1.01
18.00	1.00	1.01	1.01
20.00	4.00	1.64	1.61
22.00	4.00	2.20	2.18
24.00	4.00	2.79	2.62
26.00	1.00	1.02	1.02
28.00	1.00	1.01	1.01
30.00	1.00	1.01	1.01
32.00	4.00	1.64	1.61
34.00	4.00	2.20	2.18
36.00	4.00	2.79	2.62
38.00	1.00	1.02	1.02
40.00	1.00	1.01	1.01
42.00	1.00	1.01	1.01
44.00	4.00	1.64	1.61
46.00	4.00	2.20	2.18
48.00	4.00	2.79	2.62

Tableau A 5.37. Distributions des températures au centre et à la surface d'une carotte pour une amplitude de 3°C

Tableau A 5.38 identique à A 5.22.

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-20.30	-20.30	-20.30
2.00	-19.30	-20.24	-20.26
4.00	-19.30	-20.19	-20.22
6.00	-19.30	-20.11	-20.17
8.00	-20.30	-20.26	-20.23
10.00	-20.30	-20.29	-20.28
12.00	-20.30	-20.29	-20.29
14.00	-19.30	-20.23	-20.26
16.00	-19.30	-20.19	-20.21
18.00	-19.30	-20.11	-20.17
20.00	-20.30	-20.26	-20.23
22.00	-20.30	-20.29	-20.28
24.00	-20.30	-20.29	-20.29
26.00	-19.30	-20.23	-20.26
28.00	-19.30	-20.19	-20.21
30.00	-19.30	-20.11	-20.17
32.00	-20.30	-20.26	-20.23
34.00	-20.30	-20.29	-20.28
36.00	-20.30	-20.29	-20.29
38.00	-19.30	-20.23	-20.26
40.00	-19.30	-20.19	-20.21
42.00	-19.30	-20.11	-20.17
44.00	-20.30	-20.26	-20.23
46.00	-20.30	-20.29	-20.28
48.00	-20.30	-20.29	-20.29

Tableau A 5.39. Distributions des températures au centre et à la surface d'une crème glacée pour une amplitude de 1°C

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-22.30	-22.30	-22.30
2.00	-19.30	-22.06	-22.16
4.00	-19.30	-21.89	-21.98
6.00	-19.30	-21.61	-21.80
8.00	-22.30	-22.16	-22.05
10.00	-22.30	-22.25	-22.21
12.00	-22.30	-22.28	-22.27
14.00	-19.30	-22.04	-22.13
16.00	-19.30	-21.87	-21.95
18.00	-19.30	-21.59	-21.78
20.00	-22.30	-22.16	-22.04
22.00	-22.30	-22.25	-22.21
24.00	-22.30	-22.28	-22.27
26.00	-19.30	-22.04	-22.13
28.00	-19.30	-21.87	-21.95
30.00	-19.30	-21.59	-21.78
32.00	-22.30	-22.16	-22.04
34.00	-22.30	-22.25	-22.21
36.00	-22.30	-22.28	-22.27
38.00	-19.30	-22.04	-22.13
40.00	-19.30	-21.87	-21.95
42.00	-19.30	-21.59	-21.78
44.00	-22.30	-22.16	-22.04
46.00	-22.30	-22.25	-22.21
48.00	-22.30	-22.28	-22.27

Tableau A 5.40. Distributions des températures au centre et à la surface d'une crème glacée pour une amplitude de 3°C

Tableau A 5.41 identique à A 5.26.

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.00	6.00
2.00	5.00	5.06	5.10
4.00	5.00	5.01	5.01
6.00	5.00	5.00	5.00
8.00	6.00	5.07	5.06
10.00	6.00	5.13	5.12
12.00	6.00	5.31	5.18
14.00	5.00	5.01	5.02
16.00	5.00	5.00	5.00
18.00	5.00	5.00	5.00
20.00	6.00	5.07	5.06
22.00	6.00	5.13	5.12
24.00	6.00	5.31	5.18
26.00	5.00	5.01	5.02
28.00	5.00	5.00	5.00
30.00	5.00	5.00	5.00
32.00	6.00	5.07	5.06
34.00	6.00	5.13	5.12
36.00	6.00	5.31	5.18
38.00	5.00	5.01	5.02
40.00	5.00	5.00	5.00
42.00	5.00	5.00	5.00
44.00	6.00	5.07	5.06
46.00	6.00	5.13	5.12
48.00	6.00	5.31	5.18

Tableau A 5.42. Distributions des températures au centre et à la surface d'un beurre pour une amplitude de 1°C

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	6.00	6.00	6.00
2.00	2.00	2.28	2.43
4.00	2.00	2.03	2.04
6.00	2.00	2.00	2.00
8.00	6.00	2.53	2.45
10.00	6.00	2.98	2.91
12.00	6.00	3.73	3.31
14.00	2.00	2.10	2.15
16.00	2.00	2.01	2.01
18.00	2.00	2.00	2.00
20.00	6.00	2.52	2.45
22.00	6.00	2.97	2.91
24.00	6.00	3.73	3.31
26.00	2.00	2.10	2.15
28.00	2.00	2.01	2.01
30.00	2.00	2.00	2.00
32.00	6.00	2.52	2.45
34.00	6.00	2.97	2.91
36.00	6.00	3.73	3.31
38.00	2.00	2.10	2.15
40.00	2.00	2.01	2.01
42.00	2.00	2.00	2.00
44.00	6.00	2.52	2.45
46.00	6.00	2.97	2.91
48.00	6.00	3.73	3.31

Tableau A 5.43. Distributions des températures au centre et à la surface d'un beurre pour une amplitude de 4°C

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.02
2.00	2.00	2.19	2.36
4.00	2.00	2.06	2.11
6.00	2.00	2.03	2.04
8.00	4.00	2.23	2.17
10.00	4.00	2.40	2.34
12.00	4.00	2.67	2.50
14.00	2.00	2.11	2.21
16.00	2.00	2.04	2.07
18.00	2.00	2.02	2.04
20.00	4.00	2.22	2.16
22.00	4.00	2.39	2.34
24.00	4.00	2.67	2.50
26.00	2.00	2.11	2.20
28.00	2.00	2.04	2.07
30.00	2.00	2.02	2.04
32.00	4.00	2.22	2.16
34.00	4.00	2.39	2.34
36.00	4.00	2.67	2.50
38.00	2.00	2.11	2.20
40.00	2.00	2.04	2.07
42.00	2.00	2.02	2.04
44.00	4.00	2.22	2.16
46.00	4.00	2.39	2.34
48.00	4.00	2.67	2.50

Tableau A 5.44. Distributions des températures au centre et à la surface d'une orange pour une vitesse de l'air de 2 m/s

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	4.00	4.01	4.02
2.00	2.00	2.07	2.21
4.00	2.00	2.02	2.04
6.00	2.00	2.01	2.02
8.00	4.00	2.20	2.14
10.00	4.00	2.37	2.32
12.00	4.00	2.75	2.48
14.00	2.00	2.04	2.12
16.00	2.00	2.01	2.03
18.00	2.00	2.01	2.02
20.00	4.00	2.20	2.14
22.00	4.00	2.37	2.32
24.00	4.00	2.75	2.48
26.00	2.00	2.04	2.12
28.00	2.00	2.01	2.03
30.00	2.00	2.01	2.02
32.00	4.00	2.20	2.14
34.00	4.00	2.37	2.32
36.00	4.00	2.75	2.48
38.00	2.00	2.04	2.12
40.00	2.00	2.01	2.03
42.00	2.00	2.01	2.02
44.00	4.00	2.20	2.14
46.00	4.00	2.37	2.32
48.00	4.00	2.75	2.48

Tableau A 5.45. Distributions des températures au centre et à la surface d'une orange pour une vitesse de l'air de 6 m/s

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	14.50	14.52	14.53
2.00	11.50	11.52	11.53
4.00	11.50	11.52	11.52
6.00	11.50	11.52	11.52
8.00	14.50	12.26	12.22
10.00	14.50	12.88	12.86
12.00	14.50	13.54	13.38
14.00	11.50	11.53	11.53
16.00	11.50	11.52	11.52
18.00	11.50	11.52	11.52
20.00	14.50	12.26	12.22
22.00	14.50	12.88	12.86
24.00	14.50	13.54	13.38
26.00	11.50	11.53	11.53
28.00	11.50	11.52	11.52
30.00	11.50	11.52	11.52
32.00	14.50	12.26	12.22
34.00	14.50	12.88	12.86
36.00	14.50	13.54	13.38
38.00	11.50	11.53	11.53
40.00	11.50	11.52	11.52
42.00	11.50	11.52	11.52
44.00	14.50	12.26	12.22
46.00	14.50	12.88	12.86
48.00	14.50	13.54	13.38

Tableau A 5.46. Distributions des températures au centre et à la surface d'une banane pour une vitesse de l'air de 2 m/s

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	14.50	14.51	14.52
2.00	11.50	11.51	11.52
4.00	11.50	11.51	11.52
6.00	11.50	11.51	11.52
8.00	14.50	12.25	12.22
10.00	14.50	12.88	12.85
12.00	14.50	13.64	13.38
14.00	11.50	11.51	11.52
16.00	11.50	11.51	11.52
18.00	11.50	11.51	11.52
20.00	14.50	12.25	12.22
22.00	14.50	12.88	12.85
24.00	14.50	13.64	13.38
26.00	11.50	11.51	11.52
28.00	11.50	11.51	11.52
30.00	11.50	11.51	11.52
32.00	14.50	12.25	12.22
34.00	14.50	12.88	12.85
36.00	14.50	13.64	13.38
38.00	11.50	11.51	11.52
40.00	11.50	11.51	11.52
42.00	11.50	11.51	11.52
44.00	14.50	12.25	12.22
46.00	14.50	12.88	12.85
48.00	14.50	13.64	13.38

Tableau A 5.47. Distributions des températures au centre et à la surface d'une banane pour une vitesse de l'air de 6 m/s

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.45	6.94
4.00	6.00	6.18	6.37
6.00	6.00	6.08	6.15
8.00	8.00	6.24	6.18
10.00	8.00	6.32	6.27
12.00	8.00	6.62	6.35
14.00	6.00	6.09	6.18
16.00	6.00	6.04	6.07
18.00	6.00	6.02	6.03
20.00	8.00	6.15	6.09
22.00	8.00	6.24	6.18
24.00	8.00	6.55	6.27
26.00	6.00	6.07	6.14
28.00	6.00	6.03	6.06
30.00	6.00	6.01	6.02
32.00	8.00	6.14	6.09
34.00	8.00	6.23	6.18
36.00	8.00	6.55	6.26
38.00	6.00	6.07	6.14
40.00	6.00	6.03	6.06
42.00	6.00	6.01	6.02
44.00	8.00	6.14	6.09
46.00	8.00	6.23	6.18
48.00	8.00	6.55	6.26

Tableau A 5.48. Distributions des températures au centre et à la surface d'un beurre pour une vitesse de l'air de 2 m/s

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	8.00	8.00	8.00
2.00	6.00	6.31	6.80
4.00	6.00	6.10	6.26
6.00	6.00	6.04	6.09
8.00	8.00	6.19	6.13
10.00	8.00	6.28	6.22
12.00	8.00	6.67	6.31
14.00	6.00	6.05	6.14
16.00	6.00	6.02	6.05
18.00	6.00	6.01	6.02
20.00	8.00	6.14	6.08
22.00	8.00	6.23	6.17
24.00	8.00	6.63	6.26
26.00	6.00	6.05	6.12
28.00	6.00	6.02	6.04
30.00	6.00	6.01	6.01
32.00	8.00	6.14	6.08
34.00	8.00	6.22	6.17
36.00	8.00	6.62	6.26
38.00	6.00	6.05	6.12
40.00	6.00	6.02	6.04
42.00	6.00	6.01	6.01
44.00	8.00	6.14	6.08
46.00	8.00	6.22	6.17
48.00	8.00	6.62	6.26

Tableau A 5.49. Distributions des températures au centre et à la surface d'un beurre pour une vitesse de l'air de 6 m/s

Temps [min]	température de l'air [°C]	température à la surface de l'écorce [°C]	température au centre de la pulpe [°C]
0	5.14	18.5	18.5
10	4.9	15.14	18.3
20	5.3	13.25	17.71
30	5.43	12.28	17.14
40	5.44	12	16.21
50	5.57	11.42	15.42
60	4	11	14.28
70	4.57	10.2	13.71
80	4.86	9.8	12.14
90	5	9.14	11.72
100	5.14	8.85	11.15
110	5.2	8.84	10.71
120	5.28	8.57	10.28
130	4.28	7.71	10
140	4.71	7.69	9.42
150	5	7.66	9.14
160	5.14	7.42	8.85
170	5.16	7.16	8.57
180	5.28	7.14	8.14
190	5.57	7	8
200	4.57	6.57	7.71
210	4.85	6.57	7.57
220	5.14	6.57	7.28
230	5.28	6.57	7.14
240	5.36	6.57	7
250	3.71	6	6.86
260	4.28	6	6.71
270	4.57	6	6.71
280	4.6	6	6.57
290	4.72	6	6.55
300	4.85	6	6.42
310	5.14	6	6.42
320	5.57	5.72	6.28
330	3.42	5.72	6.27
340	4.28	5.72	6.14
350	4.54	5.72	6.14
360	4.86	5.72	6.14
370	4.93	5.72	6.1
380	5	5.72	6.1
390	5.21	5.72	6.1
400	5.42	5.72	6.1
410	5.57	5.72	6.1
420	4.28	5.43	6.1
430	4.3	5.43	6
440	4.57	5.43	6
450	4.71	5.43	6
460	4.73	5.43	6
470	5	5.43	6
480	5	5.43	6
490	5	5.43	6
500	5	5.43	6

Tableau A 5.50. Distributions des températures mesurées pour des oranges de 7.8 cm de diamètre moyen et 0.6 cm d'épaisseur moyenne d'écorce [31]

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-11.25	-13.23
4.00	-9.60	-10.06	-10.61
6.00	-9.60	-9.73	-9.88
8.00	-9.60	-9.64	-9.68
10.00	-9.60	-9.61	-9.62
12.00	-9.60	-9.60	-9.61
14.00	-19.30	-16.48	-14.28
16.00	-19.30	-18.26	-17.45
18.00	-19.30	-18.92	-18.62
20.00	-19.30	-19.16	-19.05
22.00	-19.30	-19.25	-19.21
24.00	-19.30	-19.28	-19.27

Tableau A 5.51. Distributions des températures au centre et à la surface d'une crème glacée pour $h_{cf}=29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, $h_{cn}=29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$

Temps [h]	température [°C]		
	air de la chambre froide	surface du produit	centre du produit
0.00	-19.30	-19.30	-19.30
2.00	-9.60	-10.72	-12.07
4.00	-9.60	-9.80	-10.05
6.00	-9.60	-9.64	-9.68
8.00	-9.60	-9.61	-9.62
10.00	-9.60	-9.60	-9.60
12.00	-9.60	-9.60	-9.60
14.00	-19.30	-17.18	-15.53
16.00	-19.30	-18.74	-18.30
18.00	-19.30	-19.15	-19.03
20.00	-19.30	-19.26	-19.23
22.00	-19.30	-19.29	-19.28
24.00	-19.30	-19.30	-19.29

Tableau A 5.54. Distributions des températures au centre et à la surface d'une crème glacée pour $h_{cf}=22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, $h_{cn}=15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$

ANNEXE 5

Temps [min]	température de l'air [°C]	température à la surface de l'écorce [°C]	température au centre de la pulpe [°C]
0	5.14	18.54	18.56
10	4.9	17.25	18.61
20	5.3	15.17	17.42
30	5.43	14.37	16.79
40	5.44	13.53	15.97
50	5.57	12.56	15.16
60	4	11.83	14.31
70	4.57	10.69	13.44
80	4.86	10.22	12.58
90	5	9.84	11.68
100	5.14	9.70	10.99
110	5.2	9.33	10.47
120	5.28	8.68	10.08
130	4.28	8.36	9.66
140	4.71	8.28	9.18
150	5	8.00	8.81
160	5.14	7.69	8.54
170	5.16	7.45	8.26
180	5.28	7.35	7.98
190	5.57	6.97	7.74
200	4.57	6.94	7.51
210	4.85	6.81	7.27
220	5.14	6.76	7.11
230	5.28	6.71	6.97
240	5.36	6.36	6.87
250	3.71	6.30	6.75
260	4.28	6.37	6.57
270	4.57	6.30	6.47
280	4.6	6.31	6.42
290	4.72	6.23	6.36
300	4.85	6.25	6.32
310	5.14	6.00	6.28
320	5.57	6.00	6.23
330	3.42	5.95	6.12
340	4.28	5.98	6.06
350	4.54	6.01	6.01
360	4.86	5.98	6.00
370	4.93	5.99	5.99
380	5	6.01	5.99
390	5.21	6.01	5.99
400	5.42	6.02	5.99
410	5.57	5.77	5.98
420	4.28	5.71	5.95
430	4.3	5.76	5.86
440	4.57	5.78	5.80
450	4.71	5.80	5.81
460	4.73	5.81	5.82
470	5	5.81	5.82
480	5	5.82	5.82
490	5	5.82	5.82
500	5	5.82	5.82

Tableau A 5.58. Distributions des températures prévues par la solution du modèle pour des oranges de 7.8 cm de diamètre moyen et 0.6 cm d'épaisseur moyenne d'écorce [31]

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Jamet Y.** Transfert de chaleur et de masse au cours du refroidissement des denrées périssables à bord des navires, durées minimale de refroidissement des cargaisons de fruits et légumes. *Revue Internationale du Froid*, vol 7, N° 5, pp 299-307,1984
- [2] **Sastry S. K., Buffington D. E.** Transpiration rate of stored perishable commodities: a mathematical model and experiments on tomatoes. *Revue Internationale du froid*, vol 6, N° 2, p84-96, 1983
- [3] **Becker B. R., Fricke B. A.** Transpiration and respiration of fruit and vegetables. *Comptes rendus science et technique du froid intitulé « derniers progrès en matière du froid pour la sécurité et la qualité alimentaire »* pp110-121 ; édité par l'Institut International du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1996
- [4] **Fikiin A. G., Fikiin K. A., Bojkov T. N.** Thermal behavior of fruits and vegetables in industrial packages and transport units during quick precooling, *Comptes rendus science et technique du froid intitulé « derniers progrès en matière du froid pour la sécurité et la qualité alimentaire »*, pp254-266 ; édités par l'Institut International du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1996
- [5] **Fikiin A.** The precooling an important factor for the long-term preservation of fruits and vegetables. *Refrigeration Ingeneering*, 11, pp 44-48, 1990
- [6] **Jadan V.** Thermo physical bases of storage of fresh vegetable raw materials in food enterprises, food industry, Moscow, 325 pp, 1976
- [7] **Mickely H. S., Sherwood T. K., Reid C. E.** Applied mathematics in chemical engineering, McGraw-Hill, New York, 1984
- [8] **Rapin P. J., Jacquard P.** Formulaire du froid, 11^{ième} édition, Dunod, Paris,1999
- [9] **Willatzen M, Pettit N. B. O. L., Ploug-sorensen L.** A general dynamic simulation model for evaporators and condensers in refrigeration; part I: Moving boundary formulation of two-phase flows without exchange. *Revue Internationale du Froid*, vol 21, N°5, pp398-403; part II: Simulation and control of an evaporator. *Revue Internationale du Froid*, vol 21, N °5 pp404-414, 1998
- [10] **Nyers J., Stoyan G.** A dynamical model adequate for controlling the evaporator of a heat pump. *Revue Internationale du Froid*, Vol 17, N° 2, p101-108,1994
- [11] **Lovatt S. J., Loeffen M. P. F., Cleland A. C.** Improved dynamic simulation of multi-temperature Industrial refrigeration systems for food chilling, freezing and cold storage. *Revue Internationale du Froid*, Vol 21, N° 3, pp247-260, 1998
- [12] **Hasse H., Becker M., Grossmann K., Maurer G.** Top-down model for dynamic simulation of cold-storage plants. *Revue International du froid*, Vol 19, pp.10-18, 1996

- [13] **Van Pee M., Beckmans D., De Moor M., Van De Weyer K.** Visualisation and quantification of the air flow pattern in ventilated spaces by using image analysis. Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais» pp433-440 ; édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [14] **Bennett C.O., Myers J. E.** Momentum, heat, and mass transfer McGraw-Hill, Singapore, 1985
- [15] **McCabe W. L., Smith J. C., Hariot P.** Units operations of chemical engineering, McGraw-Hill, New York, 1985
- [16] **Smirnov V.** Cours de mathématiques supérieures tome II, O.P.U, 1988
- [17] **Kreith F.** Transmission de la chaleur et thermodynamique, Masson et Cie, Paris, 1967
- [18] **Mikhailov M. D., Özisik M. N.** Unified analysis and solution of heat and mass diffusion, John Wiley and Sons, U.S.A, 1984
- [19] **Spiegel M. R.** Analyse de Fourier et application aux problèmes de valeurs aux limites, Mc Graw-Hill, U.S.A, 1974
- [20] **Smirnov V.** Cours de mathématiques supérieurs, tome IV, O.P.U, 1988
- [21] **Press W. H, Teukolsky S. A., Vetterling W. T, Flannery B. P.** Numerical recipes in fortran 77 the art of scientific computing, University of Cambridge press, USA, 1997
- [22] **Spiegel, M.R.** Transformées de Laplace cours et problèmes, Mc Graw-Hill, U.S.A, 1980
- [23] **Marchouk G., Shaydourov V.** Raffinement des solutions des schémas aux différences, Mir, Moscou,1983
- [24] **Sweat, V.E.** Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of food science, vol 39, pp1080-1083, 1974
- [25] **Anon** Thermal properties of foods. ASHRAE fundamentals handbook., 31.1-31.28, 1985
- [26] **Mohsenin N. N.** Thermal properties of food and agricultural materials, Gordon and Breach, London, 1980
- [27] **Ansari F. A., Charan V., Varma H. K.,** Heat and Mass transfer in fruit and vegetables and mesurement of thermal diffusivity. Int Commun Heat Mass Transfer, vol 11, N° 6, pp 583-590, 1984
- [28] **Hayes G. D.** Food engineering data Handbook, John Wiley and Sons, New York, 1987

- [29] **Bart M. N., Bert V., Beuselinck A., Jancsock P., Quenon V., Scheerlinck N., Verboven P., De Baerdemacker J.** Propagation of stochastic temperature fluctuations in refrigerated fruits. *Revue Internationale du Froid*, vol 22, N° 2, pp 81-90,1999
- [30] **Zuritz C. A., Sastry S. K., Mccoy S. C.** Modelling of temperature fluctuations within frozen foods stored in cylindrical containers. *Revue International du froid*, Vol 9, pp.215-219, juillet 1986
- [31] **Viseda P., Pinazo J. M.** Heat conduction in multilayer spherical products by transfer functions. *Revue Internationale du Froid*, Vol 21, N°4, pp285-294, 1998
- [32] **Fikin K. A.** Solution numérique généralisée du problème de la conduction thermique dans les solides de diverse configuration lors d'un refroidissement convectif. *Revue Internationale du Froid*, vol 15, N°4, pp221-226, 1992
- [33] **Fikin K. A.** Generalized numerical modelling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy method and quasi-one-dimensional formulation. *Revue Internationale du Froid*, Vol 19, N° 2, pp132-140,1996
- [34] **Chumak I. G., Onistchenko V. P., Gomowsky S. E., Zheliba Y. A.** The method of prediction for characteristics of cooling and freezing processes of foodstuffs. *Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais»* pp361-366; édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [35] **Bart M. N., De Baerdemeker J.** Stochastic analysis of heat transfer in stored produce related to chilling injury risks. *Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais »* pp387-394 ; édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [36] **Kuitche A., Daudin J. D.** Analyse expérimentale et modélisation cinétiques de température et de perte de poids de carcasses de lapin pendant la réfrigération. *Revue Internationale du Froid*, vol 18, N° 4, pp258-271, 1995
- [37] **Davey L. M., Pham Q. T.** Predicting the dynamic product heat load and weight loss during beef chilling using a multi-region finite difference approach. *Revue Internationale du Froid*, Vol 20, N° 7, pp470-481, Elsevier Science Ltd, 1998
- [38] **Shewfelt R. L., Philips R. D.** Seven principles for better quality of refrigerated fruits and vegetables. *Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais »* pp231-236, édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [39] **Sajid H. A., Rabi H. M., Vierendra M. P.** A coupled finite element and microbial growth model for listeria monocytogene. *Comptes rendus science et technique du froid intitulé «derniers progrès en matière du froid pour la sécurité et la qualité alimentaire »* pp30-41, édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1996

- [40] **Tijskens L. M. M., Otma E. C., Van Kooten O.** A dynamic model on chilling Injury in vegetables during cold storage. Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais » pp403-411, édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [41] **Damarli E., Teymour M., Pala M., Alikasifoglu.** Model for modified atmosphere packaging of fresh fruit and vegetables. Comptes rendus science et technique du froid intitulé « le froid et la qualité des légumes frais » pp413-432, édité par l'Institut Internationale du Froid (France) et l'American Society of Agricultural Engineers (USA), 1994
- [42] **Ranjit Kumar Sdhoo.** Mathematical modelling of transient responses of refrigeration storage systems with internal heat generation. Revue Internationale du Froid, Vol 14, May, pp126-131, 1991
- [43] **Reynoso R. O., De Michelis A.** Simulation of cryogenic batch freezers. Revue Internationale du Froid, Vol 11, N°1, pp6-10, 1988
- [44] **Evans J., Russell S., James S.** Chilling of recipe dish meals to meet cook-chill guidelines. Revue Internationale du Froid, Vol 14, N°2, pp79-86, 1996