



## Des modèles informatiques pour le refroidissement des jambons cuits

### Définition d'abaques de refroidissement pour le jambon cuit supérieur

Ecrit par : PICGIRARD L. (ADIV), DAUDIN J.D et MIRADE P.S (UR370 Qualité des Produits Animaux, INRA)

**La modélisation numérique est un outil efficace et rapide pour définir des abaques de refroidissement et attester de l'efficacité des procédés industriels de refroidissement de jambons cuits.**

### 1. Introduction

Les industriels de la charcuterie ne disposent que de peu d'éléments techniques précis pour justifier de l'efficacité de leur procédure de refroidissement. En France, il n'existe d'ailleurs aucun référentiel concernant cette étape du procédé pour les charcuteries cuites. Par défaut, les clients des industriels ou les services de contrôle officiels utilisent souvent, lors de leurs audits, le critère de refroidissement des plats cuisinés, à savoir une descente de la température à cœur des produits à 10°C en 2 heures (arrêté du 05/01/1998). Or, cette cinétique ne s'applique pas aux charcuteries d'une part, et d'autre part, elle n'est pas envisageable sur des produits volumineux tels que le jambon cuit ou le pâté de campagne, à moins d'utiliser des températures d'air de refroidissement négatives qui risquent de congeler la surface du produit. Par ailleurs, il n'existe à ce jour, aucun référentiel ni réglementation relative au refroidissement des charcuteries cuites sur laquelle les industriels pourraient s'appuyer pour améliorer la maîtrise de cette étape.

De plus, les analyses des dangers microbiologiques effectuées par les industriels lors de la constitution de leur dossier HACCP, ne prennent que rarement en compte le risque A.S.R. (bactéries anaérobies sulfito-réductrices). Cette non prise en considération est souvent critiquée par les services de contrôle officiels et les industriels ne disposent pas d'éléments scientifiques ou techniques leur permettant de justifier leur choix. En effet, *Clostridium perfringens* est un germe sporulé, gram+. Il peut être responsable d'intoxication alimentaire par ingestion d'une quantité de germes sous forme végétative à un taux supérieur à 10<sup>6</sup> UFC. Germe thermorésistant sous sa forme sporulée, les traitements thermiques appliqués aux produits alimentaires sont souvent insuffisants pour l'inactiver (Juneja *et al.*, 2006a-b). Sa température optimale de développement est proche de 42°C et la plage de développement optimale du germe dans les produits carnés

est comprise entre 30 et 45°C. Le refroidissement est donc une phase cruciale à maîtriser pour éviter la croissance de ce germe, lorsque la température des produits est comprise entre 55°C et 10°C.

Si la maîtrise sanitaire de l'opération de refroidissement semble capitale, l'intérêt économique d'une réduction des durées de refroidissement n'est simple à mettre en évidence en industrie. En effet, compte tenu des durées de refroidissement habituellement observées en entreprise (15h à 20h pour du jambon cuit), la réduction des durées de réfrigération ne peut avoir un avantage économique que dans la mesure où celle-ci permet d'économiser a minima un demi-poste de production (soit environ 4 heures) pour transférer les charcuteries refroidies des zones de refroidissement rapide vers celles de stockage et ainsi gagner de la surface immobilisée de refroidissement.

Il semble donc indispensable pour l'industrie charcutière française de disposer d'abaques de refroidissement de leur charcuterie, en particulier, pour le jambon cuit supérieur qui représente la plus grosse production de charcuterie en France (200 000 tonnes en 2007). Or, ce type de données est long et fastidieux à obtenir par l'expérimentation, mais il existe désormais des outils de simulation numérique qui peuvent permettre d'aboutir à cet objectif. En effet, ils autorisent aujourd'hui, par rapport à des modèles créés il y a 20 ans, une meilleure prise en compte, d'une part, de la forme réelle et de la composition des produits et d'autre part, de régimes de traitement thermique variables. De ce fait, les simulations réalisées avec les outils modernes ne demandent plus d'ajustement, par exemple, de facteur de forme qui permettait de passer de la forme géométrique simple utilisée dans le modèle (plaque infini, cylindre, sphère...) à la forme réelle de l'objet d'étude. L'objectif de l'étude était donc de construire, par expérimentation et modélisation numérique, des modèles de refroidissement et des abaques pour le jambon cuit supérieur DD.

## 2. Matériels et méthodes

### ▶ 2.1. Méthodologie générale

La définition d'abaques de refroidissement complets qui puissent couvrir l'ensemble des conditions de refroidissement nécessiterait un nombre d'expérimentations très élevé. Ainsi, la définition d'un modèle informatique de refroidissement peut permettre de couvrir l'ensemble de ces conditions.

La construction de ce modèle réalisé à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics® v3.5a, pour le jambon cuit supérieur a nécessité toutefois :

- de réaliser quelques cinétiques de refroidissement expérimentales dans des conditions choisies et maîtrisées représentatives de la réalité industrielle,
- de connaître les caractéristiques propres au produit : caractéristiques chimiques (humidité, taux de lipides, ...), et physiques (densité, géométrie, conductivité thermique  $k$ , ...),

- de connaître les caractéristiques de l'environnement de réfrigération, en particulier les conditions de transfert de chaleur à l'interface milieu de refroidissement/produit représentées par le coefficient de transfert convectif moyen  $h_m$ .

La détermination des abaques de refroidissement pour le jambon cuit DD a été suivie par l'étude de conditions optimales de refroidissement. L'optimisation a été surtout centrée sur les conditions de douchage des produits : effet de la durée de douchage continu, intérêt d'un douchage intermittent. En effet, le douchage est souvent pratiqué en industrie pour accélérer le refroidissement des charcuteries préalablement au refroidissement à l'air.

Conditions de douchage préalables	Température de l'air (°C)	Vitesse de l'air (m.s-1)
Absence de douchage	-4,5 °C (T2)	3,4 m/s (Vmax)
	0,5°C (T1)	3,4 m/s (Vmax)
	0,5°C (T1)	1,1 m/s (Vmin)
Douchage 30 min (eau à +12°C)	0,5°C (T1)	1,1 m/s (Vmin)
Douchage 90 min (eau à +12°C)	0,5°C (T1)	1,1 m/s (Vmin)

**Tableau 1 : Conditions de refroidissement expérimentales testées sur les jambons cuits**

### ▶ 2.2. Acquisition de cinétiques de refroidissement expérimentales

Toutes les fabrications ont été réalisées à partir de jambons frais sélectionnés dans une gamme de pH comprise entre 5,6 et 5,9, mesuré dans la grosse noix.

Les jambons frais ont été élaborés 4D (désossé, découenné, dégraissé, dénervé), injectés à un taux de 8% avec une saumure composée de sel, dextrose et érythorbate de sodium, conformément aux prescriptions données dans le Code des Usages et de la Charcuterie dans la rubrique « jambon cuit supérieur », puis barattés pendant 14 heures. Après barattage, les jambons ont été conditionnés sous vide, puis moulés en moule inox de dimensions standardisées à un poids constant de 7,5 kg +/- 50 g. La

cuisson a été réalisée en cellule de cuisson vapeur et le refroidissement a été appliqué immédiatement après cuisson dans une cellule de refroidissement pilote Acfri® programmable en temps et en température. Cinq conditions de refroidissement ont été testées (tableau 1). Pour chacune d'elles, les essais ont été répétés trois fois pour obtenir trois séries de données de.

Pour chaque cycle de cuisson/refroidissement, 3 sondes d'enregistrement de température PT100 ont été positionnées dans les jambons : une sonde à cœur des jambons ( $T_c$ ), une sonde à 1 cm de profondeur ( $T_s$ ), et une sonde au bord des moules à 1 cm de la paroi ( $T_b$ ).

### ▶ 2.3. Estimation des propriétés physiques du jambon cuit

Les propriétés physiques des jambons cuits ont été déterminées à partir de valeurs moyennes mentionnées dans la littérature scientifique. Des valeurs constantes de densité et de chaleur spécifique dans la plage de température de cuisson (0°C à 80°C) de 1043 kg.m<sup>-3</sup>, et de 3100 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, respectivement, ont été choisies. En

revanche, la conductivité thermique  $k$  a été considérée comme variable, de 0,34 à 0,44 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> sur la plage 0°C à 80°C. Pour la modélisation, les variations de la conductivité thermique avec la température des produits ont été intégrées directement dans le modèle numérique bâti avec Comsol®.

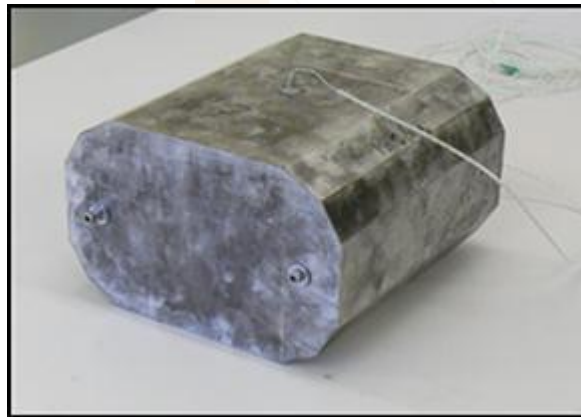
#### ► 2.4. Coefficient de transfert de chaleur à l'interface air/produit, $h_m$

L'évolution du champ de température dans un solide entouré par un fluide nécessite de connaître les caractéristiques précises de l'écoulement. Ces dernières sont très difficiles à calculer et le problème est souvent simplifié dans la littérature. Ainsi, on définit le coefficient  $h_m$ , coefficient de transfert de chaleur convectif, comme traduisant de manière empirique les échanges de chaleur à la surface d'un objet avec un fluide extérieur. Ce coefficient est donc directement lié aux conditions de refroidissement, il peut être considéré comme un terme fondamental de la thermique. Dans le cadre de cette étude, les coefficients de transfert moyens ont été déterminés par méthode inverse à l'aide de formes en aluminium (figure 1), dont la géométrie était quasi-identique à celle des

jambons cuits et dont les caractéristiques physiques (densité, chaleur spécifique, conductivité thermique) étaient parfaitement connues.

L'ensemble des mesures a été effectué en utilisant le même matériel et les mêmes conditions de refroidissement que lors des essais expérimentaux de mesures de cinétiques de refroidissement, hormis la cuisson. En effet, celle-ci a été simulée par trempage du bloc d'aluminium dans un bain d'eau chaude thermostatée. L'utilisation de la centrale DaqPRO « 5300 », à laquelle les thermocouples de type K étaient connectés, a permis d'enregistrer, la cinétique de température à cœur du bloc en aluminium, qui a servi de base de calcul à la détermination de  $h_m$ .

**Figure 1 : Objet en aluminium ayant une forme de jambon usiné et utilisé pour déterminer expérimentalement le coefficient de transfert thermique  $h_m$**

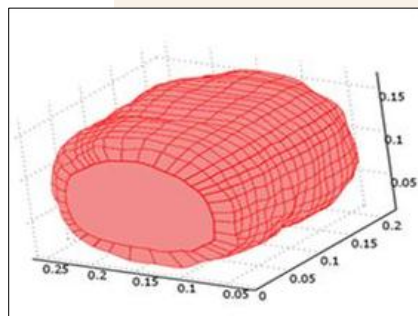


#### ► 2.5. Modélisation de la forme des produits

Afin de pouvoir réaliser les calculs sur des formes représentatives de la réalité, deux programmes implémentés sous Matlab® ont été utilisés. Le premier permet de numériser la forme d'un produit à partir de photographies de tranches, dans un repère bidimensionnel. Le second permet de recréer la structure en trois

dimensions, puis d'exporter la géométrie dans Comsol®. Il permet d'intégrer les données relatives à chaque tranche, dont la masse et l'épaisseur (qui donnera l'axe z), puis d'assembler les matrices les unes avec les autres, en créant une structure dans un repère (O, x, y, z) (figure 2).

**Figure 2 : Forme numérisée d'un jambon cuit ayant servi à la modélisation du refroidissement.**



## ▸ 2.6. Modélisation de la cinétique de refroidissement

Les outils qui permettent de créer des modèles numériques, utilisent des codes de calcul complexes qui intègrent les lois physiques régissant l'ensemble des phénomènes impliqués, selon la nature du processus étudié. Dans le cas du refroidissement du jambon cuit, le problème consiste à réaliser un bilan thermique du produit, en écrivant l'égalité entre le flux interne de chaleur qui se fait par conduction et le flux de chaleur à l'interface air/produit qui se fait, majoritairement, par convection, soit :

$$k \text{ grad}(T) = h_m (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \quad (1)$$

Où :  $k$  représente la conductivité thermique du produit ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) ;  $T$  est la température du produit ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;  $h_m$  est le coefficient de transfert thermique convectif à l'interface air/produit ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) ;  $T_{\text{air}}$  est la température de l'air de refroidissement ( $^{\circ}\text{C}$ ) ; et  $T_{\text{surf}}$  est la température à la surface du produit ( $^{\circ}\text{C}$ ). Il convient de préciser que, du fait que les

jambons ont été directement refroidis dans les sacs plastiques dans lesquels ils ont été cuits, le transfert de chaleur par évaporation d'eau à la surface du produit n'a pas lieu d'être pris en compte, lors du refroidissement.

A partir des données expérimentales acquises : cinétiques de refroidissement sur produit réel en conditions maîtrisées, détermination des caractéristiques physiques du produit (densité, chaleur spécifique, conductivité thermique) et détermination des coefficients de transfert moyen  $h_m$ , le logiciel Comsol Multiphysics® v3.5a a permis de résoudre l'équation (1) et ainsi, de construire un modèle de refroidissement. Une fois le modèle construit, il a été alors possible d'étudier l'incidence de n'importe quelle condition de refroidissement non étudiée sur la cinétique de descente en température en tout point du produit.

## 3. Résultats et discussions

### ▸ 3.1. Estimation des propriétés physiques du jambon cuit

Les durées moyennes de refroidissement obtenues pour chacune des conditions de refroidissement testées sont portées dans le tableau 2. Pour rappel,  $V_{\text{max}}$  correspond à une vitesse d'air moyenne de 3,4 m/s et  $V_{\text{min}}$  à une vitesse d'air moyenne de 1,1 m/s.

Dans des conditions idéales de refroidissement ( $-4^{\circ}\text{C}$  et 3,4 m/s), le tableau 2 montre qu'il faut 9,2 heures au minimum pour refroidir des jambons DD à  $+4^{\circ}\text{C}$  à cœur. Ce type de cinétique ne peut être obtenu en condition industrielle, les équipements de ventilation étant souvent inadaptés pour atteindre de tels niveaux de vitesse d'air. En conditions

plus représentatives de la réalité industrielle ( $0,5^{\circ}\text{C} / V_{\text{min}}$ ), même si la vitesse d'air choisie reste encore élevée par rapport aux installations industrielles, le durée de refroidissement à  $+4^{\circ}\text{C}$  est rallongé de 4,8h. Dans ces conditions, le douchage de 30 min avec de l'eau du réseau à  $+12^{\circ}\text{C}$  après cuisson n'accélère pas la cinétique de réfrigération à cœur des jambons. Un douchage de 1h 30, en revanche, permet de gagner 0,5 heure et 0,6 heure pour atteindre, respectivement,  $+10^{\circ}\text{C}$  et  $+4^{\circ}\text{C}$  à cœur des jambons, ce qui est faible au regard des quantités d'eau consommées ( $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ), lorsque ce douchage est continu.

Barème de refroidissement	Durée refroidissement $10^{\circ}\text{C}$ (h)	Durée refroidissement $4^{\circ}\text{C}$ (h)	Durée refroidissement $2^{\circ}\text{C}$ (h)
$0,5^{\circ}\text{C } V_{\text{min}}^{(1)}$	9,87 +/- 0,24 (a)	14,00 +/- 0,29 (a)	17,44 +/- 0,65 (a)
$0,5^{\circ}\text{C } V_{\text{max}}^{(2)}$	8,33 +/- 0,24 (b)	11,59 +/- 0,48 (b)	14,16 +/- 0,72 (b)
$-4,5^{\circ}\text{C } V_{\text{max}}$	7,32 +/- 0,22 (c)	9,21 +/- 0,24 (c)	10,16 +/- 0,26 (c)
30 min douchage <sup>(3)</sup>	9,64 +/- 0,16 (ad)	13,72 +/- 0,16 (ad)	17,1 +/- 0,14 (a)
1h30 min douchage <sup>(3)</sup>	9,36 +/- 0,31 (d)	13,39 +/- 0,51 (d)	16,58 +/- 1,06 (a)

**Tableau 2 : Durées de refroidissement des jambons cuits DD (heure)**

a,b,... : deux lettres différentes dans une même colonne signifient une différence statistiquement significative des moyennes au seuil de 5%

(1) :  $V_{\text{min}}$  : 1.1m/s – (2) :  $V_{\text{max}}$  : 3.4 m/s – (3) : Le douchage est appliqué immédiatement après cuisson avec de l'eau à une température de  $+12^{\circ}\text{C}$ . La condition de refroidissement à l'air  $0.5^{\circ}\text{C} / 1.1 \text{ m/s}$  est appliquée immédiatement après le douchage de 30 min ou 1h30.

### ▶ 3.2. Coefficient de transfert de chaleur à l'interface air/produit, $h_m$

Le tableau 3 indique les valeurs de coefficient de transfert thermique moyen  $h_m$ , calculés expérimentalement pour le jambon cuit. Ce coefficient varie entre 19 et 145  $W.m^{-2}.K^{-1}$ , la valeur maximale correspondant au cas du doucheage.

En théorie, le coefficient de transfert convectif devrait varier uniquement avec la vitesse. Or, on observe, à vitesse constante ( $V_{max}$ ), que ce dernier augmente légèrement entre T1 et T2 de 5% pour les blocs de jambon. Du fait du contexte expérimental, ce paramètre ne tient pas uniquement compte du phénomène de convection thermique, mais aussi vraisemblablement du rayonnement thermique avec les différentes parois de la cellule frigorifique, ce qui pourrait expliquer cette faible variation. Il ne s'agit donc pas d'un coefficient de transfert purement convectif, mais plutôt d'un coefficient de transfert effectif. Cependant, l'effet d'un changement de vitesse est beaucoup plus important. Le coefficient varie de 50% pour des vitesses augmentant de 65% environ. A la suite de ces

résultats, la relation suivante entre «  $h_m$  » et la vitesse de l'air a été établie :

$$\Delta h_m (\%) / \Delta v (\%) \approx 0,7$$

Un doublement de la vitesse moyenne de l'air autour du produit conduit donc à une augmentation du coefficient d'échange thermique d'environ 40%. Cette relation liant le coefficient de transfert à la vitesse de l'air, permet de faciliter les discussions avec les industriels qui ont pour habitude de raisonner en vitesse d'air moyenne plutôt qu'en coefficient de transfert effectif. Or, la mesure de vitesses moyennes est souvent très critiquable. En effet, il est difficile d'installer un capteur de vitesse dans les zones les plus chargées des cellules de refroidissement. De plus, les valeurs de vitesse autour d'un objet peuvent présenter un écart-type très élevé. Il faut donc faire plusieurs dizaines de points de mesure pour obtenir une valeur moyenne stable.

Conditions h moyen	H moyen [ $W/m^2/K$ ]
T1 Vmin	19
T1 Vmax	39
T2 Vmax	41
Douchage	145

**Tableau 3 : Valeurs du coefficient de transfert thermique  $h_m$  déterminées expérimentalement pour la forme « jambon ».**

T1 Vmin : 0.5°C / 1.1m/s – T1 Vmax : 0.5°C / 3.4 m/s  
T2 Vmax : -4.5°C / 3.4 m/s - Douchage : pulvérisation d'eau à +12°C en pluie.

### ▶ 3.3. Validation des modèles de refroidissement

A partir des paramètres physiques (conductivité thermique  $k$  et coefficient de transfert  $h_m$ ), une simulation a donc été réalisée pour chacune des 17 conditions expérimentales testées : 9 conditions sans doucheage et 8 conditions avec doucheage. La température initiale des produits, ainsi que la température de l'air, ont été intégrées à partir des données mesurées et enregistrées dans chaque fichier expérimental. Afin de valider l'approche numérique, les deux critères suivants, qui permettent de statuer sur la fiabilité du modèle développé, ont été calculés dans chacun des cas : (i) l'écart moyen absolu des températures, calculé sur l'ensemble des trois cinétiques ( $\Delta t_{moy (total)}$ ) et (ii) l'erreur relative sur la durée de refroidissement ( $t_{ref}$  (°C)), entre la courbe simulée et la courbe expérimentale, pour atteindre 10°C ou 4°C à cœur.

Les résultats acquis sur les jambons sont présentés dans le tableau 4.

Les résultats pour le jambon DD montrent une erreur relative inférieure à 5% et l'écart absolu moyen des températures est inférieur à 2°C pour l'ensemble des fichiers. La précision du modèle est donc acceptable pour modéliser le refroidissement de ces produits. Concernant le doucheage, le modèle intégrait un cycle de doucheage variable entre 30 et 90 min, suivi d'un cycle de refroidissement 'T1Vmin'. Le doucheage était caractérisé par un coefficient de transfert de chaleur effectif (145  $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) bien supérieur à celui d'un refroidissement par l'air (19 à 41  $W.m^{-2}.K^{-1}$ ). Même dans ce cas, le modèle montre des résultats satisfaisants, avec une erreur relative sur la prédiction de la durée de refroidissement inférieure à 4% et un écart moyen absolu sur les cinétiques inférieure à 2°C.

		Erreur relative moyenne tref (10°C)	Erreur relative moyenne tref (4°C)	ΔTmoy (Total)
Jambon DD	T1Vmin	3,6% (± 23 min)	3,6% (± 33 min)	2
	T1Vmax	- 3,2% (± 16 min)	- 2,8% (± 19 min)	1,7
	T2Vmax	- 4,3% (± 19 min)	- 3% (± 16 min)	1,8
		Erreur relative moyenne tref (10°C)	Erreur relative moyenne tref (4°C)	ΔTmoy (Total)
Jambon DD	Douchage 30 minutes	1,4% (± 7 min)	1,7% (± 3 min)	1,5
	Douchage 90 minutes	3% (± 13 min)	3,4% (± 3 min)	0,9

**Tableau 4 : Synthèse et comparaison entre les calculs et les mesures donnant la durée de refroidissement des jambons DD, avec et sans douchage, dans les conditions expérimentales.**

T1 Vmin : 0.5°C / 1.1m/s – T1 Vmax : 0.5°C / 3.4 m/s – T2 Vmax : -4.5°C / 3.4 m/s -

Douchage : pulvérisation d'eau à +12°C en pluie durant 30min ou 1h30 suivi d'un refroidissement à l'air dans les conditions 0.5°C / 1.1 m/s..

### 3.4. Abaques de refroidissement

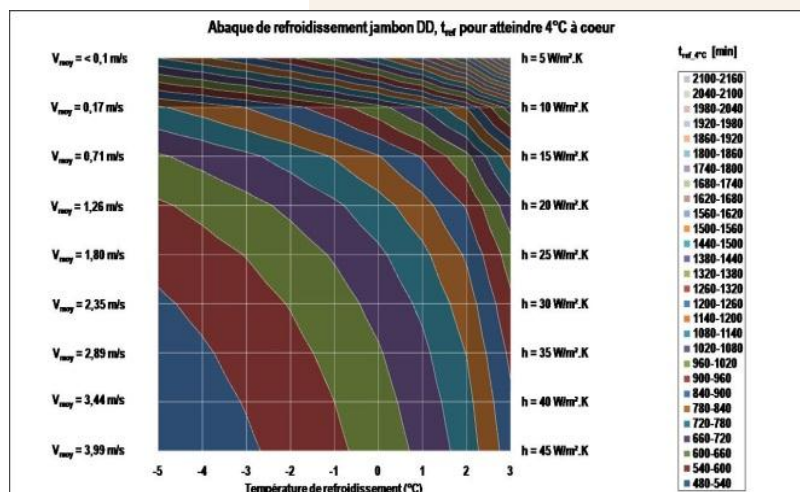
La prédiction des cinétiques de descente en température et des durées totales de refroidissement ( $t_{ref}$ ) pour le jambon cuit supérieur est satisfaisante. Ces résultats révèlent aussi l'efficacité du modèle à reproduire une cinétique complète de refroidissement, à condition, toutefois, de disposer au préalable de mesures précises des paramètres  $k$  et  $h_m$  (ou  $h_{eq}$ ).

A partir des modèles développés, des abaques de refroidissement ont été construits, en fonction de la température requise à cœur du produit (10°C ou 4°C), et ce, pour différentes valeurs de températures de l'air (de -5°C à +3°C/+4°C) et de  $h_m$  (de 5 ou 15 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> à 45 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>), correspondant à différentes vitesses de l'air. Un programme automatisé, implémenté sous Matlab® a permis d'extraire « automatiquement » les durées de refroidissement à 10°C ( $t_{ref,10°C}$ ) et 4°C ( $t_{ref,4°C}$ ). Sur chaque abaque, le coefficient de transfert thermique  $h_m$  (noté  $h$ ) est représenté en ordonnée et la température de l'air de refroidissement, en abscisse. Chaque zone, qui correspond à un intervalle de temps de refroidissement, est délimitée par une couleur. L'abaque de refroidissement du

jambon cuit à +4°C à cœur, sans douchage préalable, est donné sur la figure 3.

Il est à noter que l'abaque est relié aux coefficients de transfert de chaleur effectif et que ces derniers ont été déterminés suite aux essais réalisés au sein de la cellule de refroidissement de l'ADIV, dans des conditions aérodynamiques connues. Pour permettre une exploitation de ces abaques en vue d'une amélioration de conditions de refroidissement ou tout simplement afin de positionner l'efficacité d'un refroidissement industriel, une seconde échelle de l'axe des ordonnées permettant d'obtenir une correspondance entre coefficient d'échange thermique et vitesse moyenne de l'air autour du produit est proposée à titre indicatif. Des abaques plus précises et spécifiques à une configuration industrielle donnée peuvent toutefois être produites sous réserve d'appliquer la démarche employée dans ce projet à savoir mesurer la cinétique de refroidissement d'objets en aluminium ayant une forme de jambon (elle aussi spécifique) et en déduire le coefficient de transfert convectif moyen  $h_m$ .

**Figure 3 : Abaque donnant la durée de refroidissement prédite pour obtenir une température de 4°C à cœur d'un jambon DD ( $t_{ref,4°C}$ ), pour différentes conditions aérodynamiques de refroidissement.**

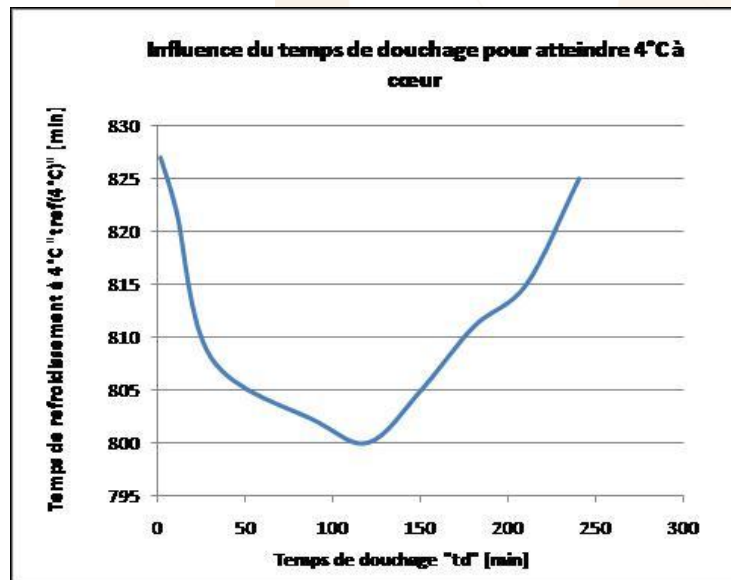


► **3.5. Exploitation des méthodes expérimentale et numérique développées pour optimiser les process de refroidissement**

Les méthodes expérimentales et numériques développées ont été exploitées, afin d'optimiser le refroidissement du jambon cuit et du pâté de campagne. L'influence de la durée et du mode (continu ou discontinu) de douchage sur le refroidissement du jambon DD a été testée. Les industriels qui utilisent le douchage appliquent des conditions variables de durée de douchage dans leur procédé de refroidissement des jambons. Jusqu'à aujourd'hui, aucun élément quantitatif n'existait sur l'impact réel de cette étape du procédé. L'influence de la durée de douchage ( $t_d$ ) sur la durée de refroidissement d'un jambon DD a donc été testée. La figure 4 montre que le douchage ne permet pas de gain de temps énorme pour refroidir un jambon DD à 4°C à cœur. Au mieux, un douchage continu de 2 h permet de réduire la durée de refroidissement d'une trentaine de minutes.

Ensuite, il se produit un effet inverse et au-delà de 150 min, la durée de douchage retarde le refroidissement. Ceci s'explique par le fait que la température de l'eau de douchage correspond à la température de l'eau du réseau (environ 12°C), soit une température très nettement supérieure à la température de l'air de refroidissement. Toutefois, cette étape qui est couteuse en eau pourrait s'avérer intéressante si un système de refroidissement était intégré à l'arrivée de l'eau. Enfin, le douchage selon des cycles marche/arrêt (douchage discontinu), qui pourrait être une solution pour économiser de l'eau, diminue le coefficient de transfert par 2, ce qui réduit grandement l'intérêt du douchage (Tableau 5).

**Figure 4 : Évolution de la durée de refroidissement prédite par modélisation pour obtenir une température de 4°C à cœur d'un jambon DD ( $t_{ref\_4°C}$ ), soumis à différentes durées de douchage.**



Types de cycles	$h$ moyen [ $W/m^2/K$ ]	$h_{douchage\_continu} = 145 W/m^2/K$
Douchage 5-5 [min]	84,5	
Douchage 2-2 [min]	89	
Douchage 5-10 [min]	60,5	

**Tableau 5 : Variations du coefficient de transfert convectif moyen  $h_m$  déterminées expérimentalement en fonction du type de cycle de douchage discontinu.**

### 3. Conclusion

Les travaux conduits dans le cadre de ce projet ont permis de développer des modèles de refroidissement pour le jambon cuits DD moulé individuellement, avec une erreur moyenne de prédiction faible, de l'ordre de 4%. Ces modèles ont permis de créer des abaques de refroidissement qui peuvent désormais permettre aux industriels de juger la performance de leur phase de réfrigération ou alors de justifier leurs cinétiques de refroidissement.

Ces modèles constituent également un moyen rapide et précis pour expérimenter numériquement des cycles de

refroidissement plus complexes ou personnaliser à la demande des cinétiques de refroidissement, projets qui prendraient beaucoup de temps en industrie pour être appréciés au moyen de mesures. En effet, la rapidité des calculs permet d'obtenir des résultats beaucoup plus nombreux. Par exemple, 80 cycles de refroidissement peuvent être simulés en une nuit sur une machine multiprocesseur dotée de 32 Go de mémoire vive, alors qu'expérimentalement, il faudrait compter une journée pour un seul cycle.

---

### Remerciements

L'étude a été conduite grâce au soutien financier de FranceAgrimer. Les partenaires de l'étude remercient les entreprises Madrange, ABC Industries, Aoste et Monique Ranou ainsi que la FICT pour leur participation assidue au comité de pilotage de ce projet.

---

### Bibliographie

- Arrêté du 05 janvier 1998. Conditions d'hygiène relatives à la préparation, la conservation la distribution et la vente des plats cuisinés à l'avance - JORF du 13/01/1998
- JUNEJA, V.K., Thippareddi H., Friedman M. (2006a). Journal of Food Protection, 69, 1546-1551.
- JUNEJA, V.K., Huang L., Thippareddi HH. (2006b). International Journal of Food Microbiology, 110, 85-92.
- US Department of Agriculture (USDA) (1999) Performance standards for the production of certain meat and poultry products. Final rule, Federal Register, 64, 732-749. USDA (2001). Performance standards for the production of meat and poultry products. Proposed rule, Federal Register, 66, 12529-12636.