



HAL
open science

Prédiction des transferts et de la croissance microbienne lors du transport de carcasses de porcs

M. Merai, Onrawee Laguerre, Steven Duret, Laurent Guillier, D. Flick

► To cite this version:

M. Merai, Onrawee Laguerre, Steven Duret, Laurent Guillier, D. Flick. Prédiction des transferts et de la croissance microbienne lors du transport de carcasses de porcs. 26eme congrès français de thermique, May 2018, Pau, France. 8 p. hal-01852763

HAL Id: hal-01852763

<https://hal.science/hal-01852763v1>

Submitted on 2 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Prédiction des transferts et de la croissance microbienne lors du transport de carcasses de porcs

Mouna MERAI¹, Onrawee LAGUERRE¹, Steven DURET¹, Laurent GUILLIER², Denis FLICK^{3*}

¹ Irstea, UR GPAN, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony

² Université Paris-Est, Anses, 23 Av du Général de Gaulle, 94706 Maisons-Alfort

³ UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy

*(auteur correspondant : denis.flick@agroparistech.fr)

Résumé - Lors du transport de carcasses de porcs, plusieurs facteurs influencent l'évolution de la charge microbienne notamment la température et l'activité de l'eau qui dépendent des transferts de chaleur et d'eau au sein et autour des carcasses. Une expérimentation a été réalisée sur une maquette à l'échelle ~1/3 d'un camion frigorifique chargé de carcasses pour déterminer l'hétérogénéité des coefficients de transfert. Un modèle a ensuite été développé pour simuler les transferts de chaleur et de matière au niveau du jambon de la carcasse. Enfin, ce modèle de transfert a été couplé à un modèle de microbiologie prédictive.

Nomenclature

c_{sat}	concentration de vapeur saturante kg.m^{-3}	x^*	position adimensionnelle dans le camion
D	diffusivité massique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	X_w	fraction massique en eau
L_v	enthalpie de vaporisation, J.kg^{-1}	ϕ	densité de flux évaporatoire, $\text{kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}$
N	population microbienne, UFC.cm^{-2}		

1. Introduction

Dans le but de prévenir le développement des bactéries pathogènes qui contaminent la viande lors des opérations d'abattage, la législation impose l'utilisation du froid immédiatement après l'inspection post mortem des carcasses. Afin d'assurer une bonne qualité technologique de la viande, il est important de bien maîtriser la cinétique du refroidissement pour permettre une bonne maturation de la viande sans mettre en péril sa qualité sanitaire [1]. Selon la réglementation européenne (CE n°853/2004), la viande doit être réfrigérée dans les chambres froides de l'abattoir pour atteindre une température à cœur ne dépassant pas 7°C avant toute opération de manutention des carcasses comme le transport ou la découpe.

Toutefois, dans le cas des carcasses de porc, les microorganismes sont essentiellement aérobies et se développent quasi exclusivement à la surface de la viande. De ce fait, l'EFSA a adopté en 2014 un nouvel avis scientifique qui a conclu que la température de surface est un indicateur plus approprié de la croissance bactérienne. Par conséquent, des dérogations ont été adoptées pour permettre le transport de carcasses n'ayant pas atteint la température réglementaire à cœur (< 7°C) mais pour des durées de transport n'excédant pas les 2 heures.

Plusieurs études ont porté sur l'estimation des coefficients de transfert au niveau d'une carcasse de viande [2,3,4] mais à notre connaissance aucune n'a investigué le cas d'un chargement complet. Par ailleurs, des hétérogénéités de température ont été constatées selon la position dans un camion frigorifique [5]: produit plus froid près du soufflage d'air et plus chaud en arrière du camion. Du point de vue de la sécurité sanitaire des carcasses de viande, il est donc nécessaire de pouvoir identifier les zones mal ventilées où les coefficients de transfert convectif sont les plus faibles. Connaissant la valeur de ces coefficients de transfert,

il est possible de modéliser les transferts de chaleur et d'eau au sein des carcasses. Un modèle de microbiologie prédictive permet ensuite d'estimer la croissance microbienne en fonction des évolutions de température et d'activité de l'eau en surface.

On présente ici une méthodologie expérimentale de mesure du coefficient de transfert convectif dans une maquette (échelle $\sim 1/3$) de semi-remorque chargée de carcasses de porc puis un modèle (2D) permettant de prédire l'évolution au cours du transport de la température, de l'activité de l'eau et de la charge microbienne à la surface de la viande (au niveau du jambon) exposée à différentes conditions ambiantes telles que rencontrées dans un camion frigorifique. L'effet du coefficient de transfert convectif, de la diffusivité de l'eau, de la température initiale de la carcasse, de la température et de l'humidité relative de l'air ont été étudiés.

2. Estimation des coefficients de transfert

2.1. Montage expérimental

La configuration de transport étudiée (nombre de rails, disposition) a été choisie en fonction des configurations les plus communément observées dans le transport à longue distance des carcasses de porc (Figure 1a) par nos partenaires (Institut Français du Porc, Culture Viande). La configuration étudiée correspond à une semi-remorque réfrigérée d'une longueur interne de 13,3 m et chargée de 215 carcasses de porc accrochées sur 5 rails.

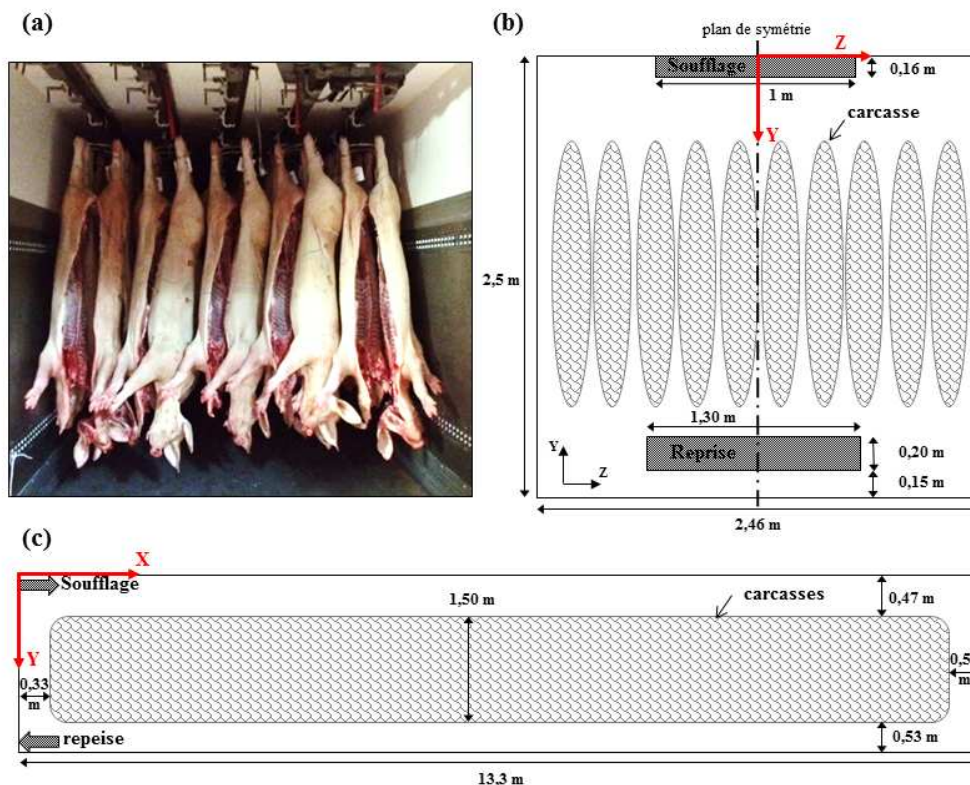


Figure 1 : Semi-remorque chargée de carcasses de porc (a) configuration réelle ; (b) schéma de la vue de face et (c) schéma de la vue de côté.

Pour mener nos expériences en utilisant des dimensions raisonnables, une semi-remorque à l'échelle réduite avec un rapport (échelle réduite / échelle réelle) de $1/3,3$ ($745 \times 757 \times 4000$ mm) a été utilisée.

Deux demi-carcasses en plâtre (à l'échelle 1/3,3) incluant chacune un panneau chauffant (Vulcanic-France, puissance max 96 W) ont été fabriquées. La forme des panneaux a été choisie pour obtenir un chauffage assez uniforme. Des capteurs de flux thermique (Captec-France) circulaires (30 mm de diamètre) à surface cuivrée (sensibilité nominale $0,6 \mu V/(W/m^2)$) ont été collés à la surface des demi-carcasses en plâtre. Des thermocouples de type T préalablement étalonnés ont également été insérés dans le plâtre à 1 cm de la résistance chauffante (2 au niveau du jambon et de l'épaule et 1 au niveau de la longe). De même à la surface du plâtre proche des fluxmètres, et dans l'air ambiant du côté du jambon et de l'épaule des thermocouples ont été fixés pour suivre l'évolution de la température. Toutes les autres demi-carcasses ont été fabriquées en mousse de polyuréthane.

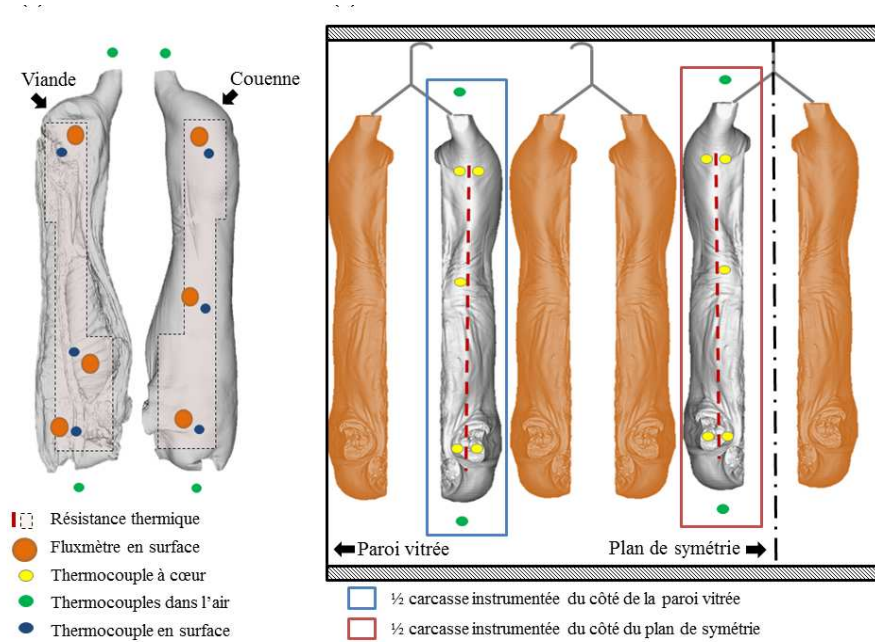


Figure 2 : Instrumentation des demi-carcasses en plâtre

Les deux demi-carcasses chauffées à une puissance de 45 W ont été placées à différentes positions dans la maquette de camion. Les acquisitions de température et de flux ont été réalisées toutes les minutes à l'aide d'une centrale de mesure (Keysight 34970A) et d'un logiciel d'acquisition (Agilent bench link data). Après environ 6h, le régime permanent est atteint et l'on effectue une moyenne des données sur une durée d'une heure. Des essais préliminaires ont été réalisés dans la position $x^* = 3/8$ dans l'objectif de vérifier la reproductibilité des mesures. Sans que l'on touche aux carcasses, de nouvelles mesures donnent des coefficients très proches des premières (écart $\leq 3\%$). Si l'on décroche et raccroche les carcasses chauffantes, les nouvelles mesures varient un peu par rapport aux premières (écarts $\leq 13\%$).

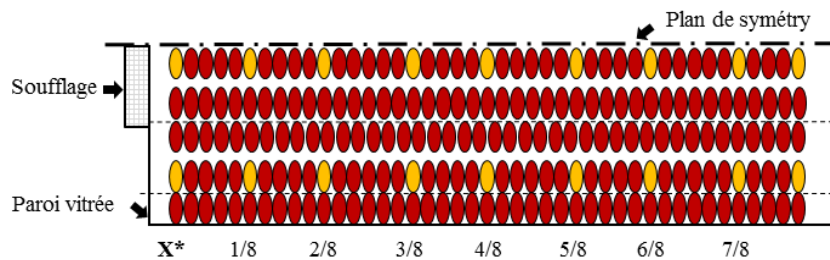


Figure 3 : Vue de dessus de la moitié du camion chargé de carcasses de porc montrant la position (en jaune) des demi-carcasses instrumentées pour la mesure du coefficient de transfert convectif

Les expérimentations ont été réalisées en respectant l'analogie de Reynolds, ce qui fait que les vitesses ont été multipliées par 3,3. En toute rigueur, il faudrait tenir compte des différences de propriétés physique de l'air entre la température réelle ($\sim 4^{\circ}\text{C}$) et celle des expérimentations ($\sim 20^{\circ}$) mais cet effet est faible comparé aux autres approximations faites; ainsi on suppose que le nombre de Prandtl reste quasiment inchangé. Du point de vue de la convection forcée, on obtient donc les mêmes valeurs du nombre de Nusselt au niveau de la maquette qu'à l'échelle réelle puisque $\text{Nu}=\text{f}(\text{Re},\text{Pr})$. Il en découle que l'estimation du coefficient de transfert à l'échelle réelle est 3,3 plus faible que celle mesurée sur la maquette. La convection naturelle n'a pas pu être prise en compte dans cette étude, car la conservation du nombre de Grashoff se traduirait par des écarts de températures 36 ($3,3^3$) fois plus élevés qu'en réalité ce qui est inenvisageable.

Les valeurs du coefficient du transfert convectif (transposé à l'échelle réelle) au niveau des jambons à différentes positions dans la semi-remorque sont présentées dans la figure 4.

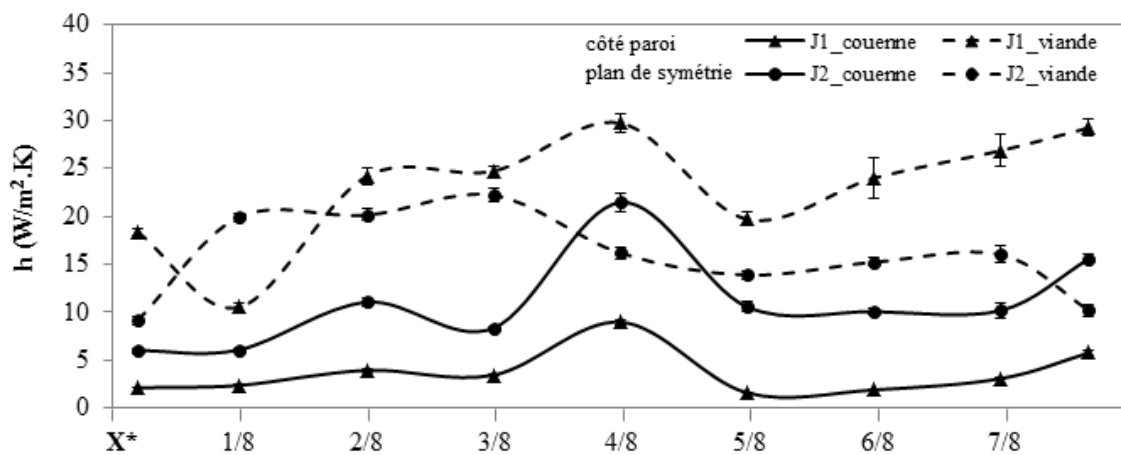


Figure 4. Coefficient de transfert convectif à la surface des jambons le long de la semi-remorque.

Les résultats des mesures du coefficient du transfert convectif montrent de grandes variations : de $1,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ à $29,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. On observe que, presque partout, le coefficient de transfert du côté de la couenne est plus faible que côté viande. Cela s'explique essentiellement par le fait qu'avec le système de suspension retenu, les jambons sont à touche-touche du côté de la couenne alors que l'espace libre pour la circulation d'air est plus important entre les demi-carcasses (d'un même animal) côté viande. Le risque bactériologique étant plus élevé pour la viande que pour la couenne ce système d'accrochage semble adapté puisqu'il permet d'avoir partout un bon échange avec l'air côté viande ($h > 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). De grands écarts sont observés aussi bien d'un endroit à un autre d'une demi-carcasse (couenne vs viande) qu'entre deux localisations, même assez voisines dans le véhicule ($x^*=4/8$ vs $x^*=5/8$). Ces variations sont principalement liées aux caractéristiques de l'écoulement d'air autour du produit (vitesse et turbulence) et aux caractéristiques du produit lui-même (forme, dimensions, position par rapport à la direction de l'air [6]).

Ces observations sont similaires à celles de [7]: certaines parties du produit sont exposées à de grandes valeurs de vitesse d'air alors que d'autres sont dans des positions où l'air est quasiment stagnant.

3. Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'eau ; impact sur la croissance microbienne

Les transferts de chaleur et d'eau ainsi que l'impact sur la croissance microbienne ont été simulés sur une section horizontale de la carcasse à mi-hauteur du jambon. Cette section a été approchée par une forme elliptique ($d_1=16\text{cm}$, $d_2=24\text{cm}$), avec une épaisseur de couenne ($\sim 1\text{cm}$) d'un côté et un os près du centre. L'approche 2D est justifiée par le fait que la carcasse est à ce niveau assez proche d'un cylindre. Le modèle tient compte de la conduction dans tout le domaine (avec des propriétés différentes pour la couenne, la viande et l'os), de la diffusion de l'eau (uniquement dans la viande), des échanges couplés de chaleur et de matière (évaporation) au niveau de la surface. Côté couenne on ne considère pas d'évaporation de l'eau. Un coefficient de transfert convectif uniforme a été appliqué car bien que l'expérimentation ait montré des différences entre deux positions particulières (côté muscle /côté couenne) nous ne connaissons pas la variation du coefficient tout autour de la forme elliptique de la section de jambon. L'analogie de Chilton-Colburn a été utilisée pour estimer le coefficient de transfert de matière à partir du coefficient de transfert de chaleur. Le modèle primaire de croissance microbienne est du premier ordre sans latence.

3.1. Equations constitutives

Les équations de diffusion de l'eau et de conduction s'écrivent :

$$\frac{\partial X_w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} X_w) ; \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) \quad (1-2)$$

Les conditions aux limites s'écrivent :

$$\phi = -\rho D \vec{\nabla} X_w \cdot \vec{n} = k(a_w(X_w) c_{sat}(T) - H_r c_{sat}(T_a)) ; \quad -\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T - T_a) + L_v \phi \quad (3-4)$$

(coté couenne, il n'y a pas évaporation $\phi = 0$)

L'activité de l'eau est fonction de la fraction massique en eau en surface de la viande [8]

$$a_w = 0,993 \exp(-0,0204 X_w^{-1,96}) \quad (6)$$

La croissance microbienne est supposée proportionnelle à $(T - T_{min})^2$ où T_{min} est la température en-dessous de laquelle la croissance est nulle et à $(a_w - a_{w,min})$ où $a_{w,min}$ est l'activité de l'eau en-dessous de laquelle la croissance s'arrête.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha (T - T_{min})^2 \frac{a_w - a_{w,min}}{1 - a_{w,min}} N \quad (7)$$

La simulation a été d'abord réalisée dans un cas de référence avec les valeurs suivantes (couramment rencontrées dans la pratique et/ou dans la littérature) :

$$h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}, T_a = 0^\circ\text{C}, HR = 90 \%, \text{ (conditions opératoires)}$$

$$T_i = 15^\circ\text{C} \text{ (uniforme)}, X_{w,i} = 0,75 \text{ kg eau / kg total (conditions initiales)}$$

$$D = 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1} [9], \alpha = 0,003 \text{ h}^{-1}\text{K}^{-2}, T_{min} = 0^\circ\text{C}, a_{w,min} = 0,90 .$$

puis l'influence de plusieurs paramètres a été étudié : coefficient de transfert convectif ($h=3$ et $h=20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), diffusivité de l'eau dans le muscle ($D=0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$), humidité relative ($HR=75 \%$), température d'air ($T_a=5^\circ\text{C}$) et température initiale ($T_i=10^\circ\text{C}$).

3.2. Résultats des simulations

La figure 5 montre l'évolution du champ de température dans le cas de référence. La température de surface décroît rapidement (~2h) en-dessous de la température recommandée de 7°C. En réalité, au début de l'étape de transport la température n'est pas uniforme, pour affiner l'analyse on pourrait simuler préalablement le refroidissement en chambre froide d'abattoir. Le point le plus chaud met par contre plus de 6h pour atteindre 7°C (~9h). La dissymétrie observée provient, d'une part, du fait que le gras a une conductivité moindre que le muscle, d'autre part du refroidissement lié à l'évaporation du côté muscle. On observe d'ailleurs que si on ne prend pas en compte l'effet évaporatif, la dissymétrie est beaucoup plus réduite et la température de surface nettement plus élevée à la surface de la viande (4,9°C après 6h au lieu de 3,8°C). Il est donc indispensable de prendre en compte le couplage des transferts.

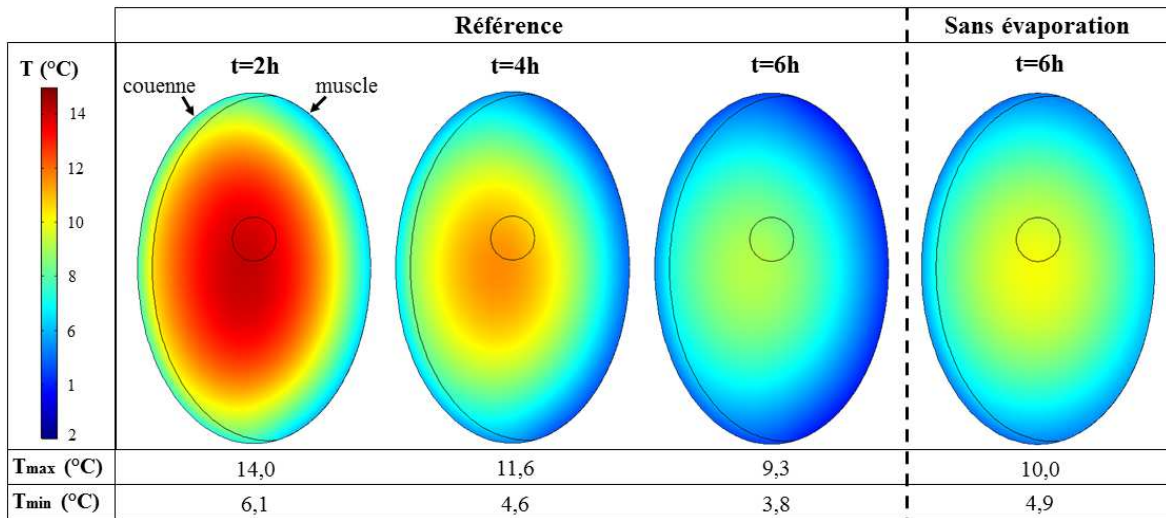


Figure 5 : Champ de température : cas de référence avec/sans prise en compte de l'évaporation

La figure 6 montre l'évolution de la fraction massique en eau. On observe que la déshydratation est très localisée en surface (~2 mm au bout de 6h). Pour la valeur considérée d'humidité relative (90 %) la fraction massique en eau reste toujours assez élevée en surface ($X_w > 0,5$).

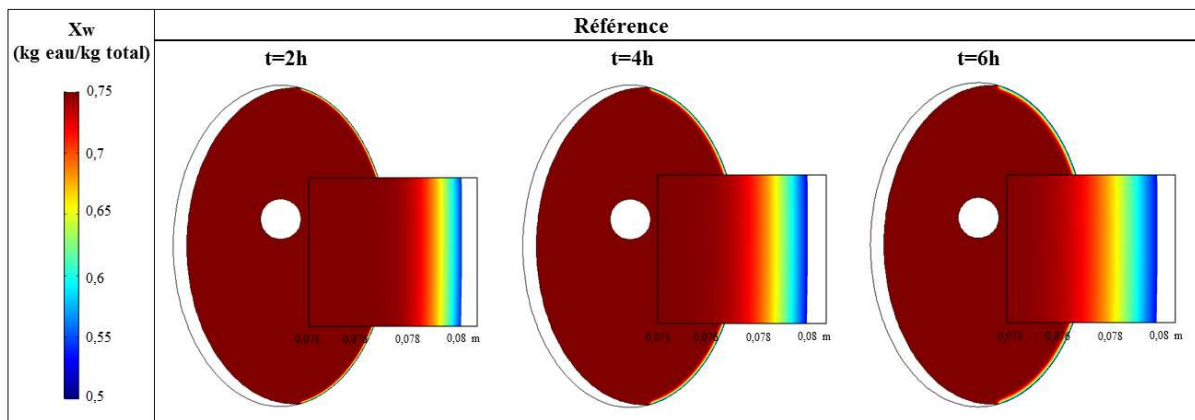


Figure 6 : Champ de la fraction massique en eau dans le muscle : cas de référence

La figure 6 montre l'évolution de plusieurs variables en fonction du temps pour différentes conditions. A chaque fois, un seul paramètre a été modifié par rapport au cas de référence.

La température à cœur reste quasiment inchangée pendant environ 2h alors que celle de surface descend très rapidement durant la première heure. Toute deux décroissent évidemment d'autant plus vite que le coefficient de transfert est grand et que l'air est froid. La diffusivité de l'eau et l'humidité relative ont peu d'influence sur la température à cœur. Par contre, la température de surface est plus faible lorsqu'on réduit l'humidité de l'air (pour $a_w=1$ elle tendrait vers la température du bulbe humide d'autant plus basse que HR est bas).

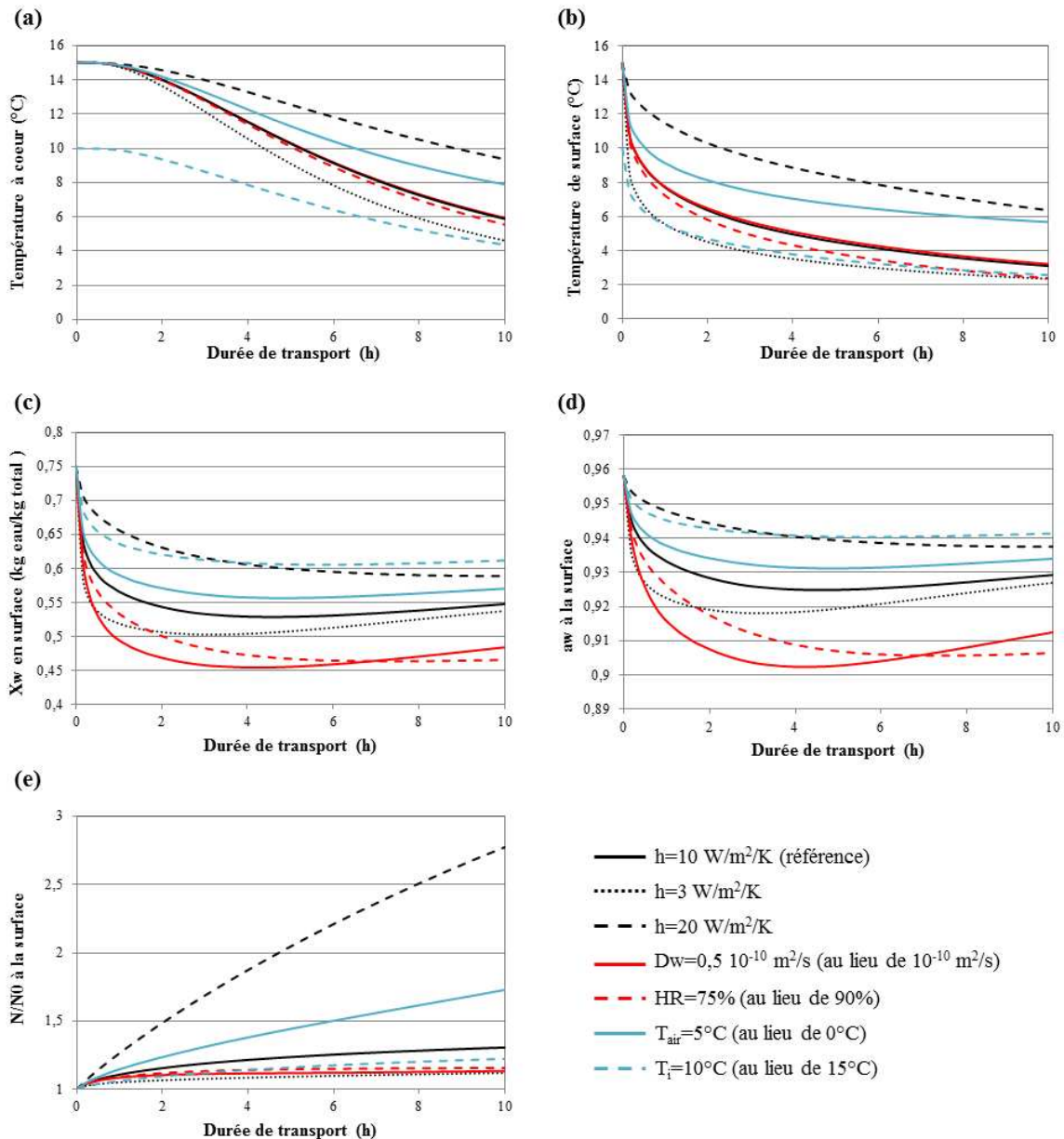


Figure 7 : Evolution au cours du temps de la température à cœur (centre de l'ellipse) de la température en surface du muscle (à mi-hauteur), de la fraction massique et de l'activité de l'eau en surface et de l'augmentation relative de la charge microbienne en surface de la viande.

La teneur en eau et son activité décroissent rapidement pendant la première heure. Elles peuvent remonter légèrement entre 3h et 6h. Cette allure est liée à la forte évaporation en début de processus lorsque la température de surface est encore élevée. D'ailleurs la

concentration de vapeur d'eau en équilibre avec la surface : $a_w(X_w)c_{sat}(T)$ (non représentée) diminue quant elle de façon monotone. Pour les valeurs de référence de la diffusivité et de l'humidité relative, l'activité de l'eau se situe toujours nettement au-dessus de $a_{w.min}=0,90$. La croissance microbienne est donc modérément ralentie par la déshydratation dans ces cas. Par contre, une diffusivité de l'eau plus faible où une humidité d'air plus faible renforce la déshydratation, l'activité d'eau frôle alors parfois $a_{w.min}$ stoppant quasiment le développement microbien.

C'est bien ce que l'on constate sur les courbes d'augmentation relative de la charge microbienne (N/N_0) : celles correspondant à $D = 0.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (au lieu de $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) ou à $HR=0,75\%$ (au lieu de 90%) sont plus basse que dans le cas de référence. Comme attendu, si la température de l'air est plus élevée (5°C au lieu de 0°C) ou si le coefficient de transfert est plus bas ($3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ au lieu de $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) l'augmentation de la charge microbienne est significativement plus importante. Il faut cependant noter que même dans le pire des cas étudiés ($h = 3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) au bout de 10 h, l'augmentation décimale : $\log_{10}(N/N_0)$, qui est l'unité habituelle en microbiologie, reste inférieure à 1.

4. Conclusion

Le coefficient de transfert convectif à la surface de carcasses de porcs transportées en semi-remorque frigorifique a été déterminé expérimentalement en différentes positions au niveau de la carcasse et au niveau du camion sur une maquette à échelle réduite. Une grande variabilité a été observée ($1,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ à $29,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Les transferts couplés de chaleur et d'eau ont été simulés sur une section de jambon dans différentes conditions. Un modèle microbiologique simple a ensuite permis d'estimer la croissance en fonction de l'évolution de la température et de l'activité de l'eau en surface de la viande. Moyennant l'identification des paramètres spécifiques à la croissance de certains microorganismes, cette approche pourrait être utilisée pour actualiser la réglementation en matière de transport de carcasses de viande.

Références

- [1] J.W.Savel, S.L.Muller, B.E.Baird. The chilling of carcasses. *Meat Science*, 70 (2005), 449-459
- [2] A.Kondjoyan, J.D.Daudin, Heat and mass transfer coefficients at the surface of a pork hinderquarter. *J of Food Eng.* 32 (1997), 225-240.
- [3] M.B.Harris, J.K.Carson, J.Willix, S.J.Lovatris, Local surface heat transfer coefficients on a model lamb carcass. *J of Food Eng.* 61 (2004) 421-429
- [4] J.Willix, M.B.Harris, J.K.Carson, Local surface heat transfer coefficients on a model beef side. *J of Food Eng.* 74 (2006), 561-567
- [5] J.Moureh, M.S.Tapsoba, E.Derens, D.Flick, Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts. *Int. J of Refrig.* 32 (2009) 220-234.
- [6] P.Verboven, B.Nicolai, N.Scheerlinck, J.Baerdemaeker, The local surface heat transfer coefficient in thermal food process circulations: a CFD approach. *J of Food Eng.* 33 (1997) 15-35.
- [7] A. Kondjoyan, A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. *Int. J of Refrig.* 29 (2006) 863-875.
- [8] T Rougier, C.Bonazzi, J.D.Daudin, Modeling incidence of lipid and sodium chloride contents on sortion curves of gelatine in the high humidity range. *LWT* 40 (2007) 1798-1807
- [9] F.J.Trujillo, C.Wiangkaew, Q.T.Pham, Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *J of Food Eng.* 78 (2007) 74-85

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre de DIM ASTREA (Région Ile-de-France)