



HAL
open science

Evolution des températures de carcasses de porc lors du transport

Onrawee Laguerre, Mouna Merai, Steven Duret, D. Flick, Evelyne Derens-Bertheau, A. Le Roux

► **To cite this version:**

Onrawee Laguerre, Mouna Merai, Steven Duret, D. Flick, Evelyne Derens-Bertheau, et al.. Evolution des températures de carcasses de porc lors du transport. *Revue Générale du Froid et du Conditionnement d’Air*, 2021. ⟨hal-03260725⟩

HAL Id: hal-03260725

<https://hal.inrae.fr/hal-03260725v1>

Submitted on 15 Jun 2021

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.



HAL Authorization

Évolution des températures de carcasses de porc lors du transport

Laguerre O.¹, Merai M.^{1,3}, Duret S.¹, Le Roux A.², Flick D.³, Derens-Bertheau E.¹

¹ Université Paris-Saclay, Inrae, Frise, 92761 Antony, France ;

² Ifip, Institut du Porc, La Motte-au-Vicomte, 35651 Le Rheu Cedex ;

³ Université Paris-Saclay, Inrae, AgroParisTech, UMR SayFood, 91300 Massy, France.

Pour répondre au besoin des professionnels, cet article présente une méthode simple permettant d'estimer le temps de refroidissement d'une carcasse ayant une température initiale, et un poids donné afin d'atteindre une valeur cible.

Résumé

La température de surface et à cœur de 6 demi-carcasses de porc ainsi que la température de l'air ambiant ont été mesurées. Ces enregistrements ont été réalisés sur un quai de chargement réfrigéré d'un abattoir (7 h) et pendant un transport (8 h) dans une semi-remorque réfrigérée, chargé de 200 carcasses. Après abattage et refroidissement dans une chambre froide, la surface des carcasses est plus froide d'environ 2 °C que le cœur. Ces températures sont quasiment stabilisées respectivement à 3,1 °C et 1,4 °C à la fin du transport. Un modèle de transfert thermique unidirectionnel a été développé pour prédire les températures de surface et à cœur des demi-carcasses au cours de l'attente sur le quai et lors du transport. Après validation par comparaison avec les données expérimentales, le modèle a été utilisé pour développer un abaque permettant d'estimer le temps de demi-refroidissement d'une demi-carcasse en fonction de son poids. Ce temps est défini comme la durée nécessaire pour que la température à cœur de produit atteigne la valeur moyenne entre sa température initiale et celle de l'air qui l'entoure. Cet abaque peut être utilisé par les professionnels pour mieux gérer la logistique de la chaîne du froid.

Mots clés : quai de chargement, transport, demi-carcasses, prédiction de température.

Abstract

Surface and core temperature measurements were performed on 6 pork half-carcasses as well as air temperature during waiting on a refrigerated loading dock (7h) and during transport (8h) in a semi-trailer loaded with 200 carcasses. The core and surface temperatures decrease together; the surface was colder than the core by about 2°C at the beginning and reach 3,1°C and 1,4°C for the core and the surface, respectively, at the end of transport. A unidirectional heat transfer model was developed to predict surface and core temperatures of half-carcasses during waiting on dock and during transport. After validation by comparison with the experimental data, the model was used to develop a diagram allowing estimation of the half-cooling time of a half-carcass according to its weight. The professionals can use this diagram for better manage the logistics of the cold chain.

Keywords: loading dock, transport, half carcasses, temperature prediction.

Introduction

Les abattoirs de porc appliquent le guide de bonnes pratiques d'hygiène depuis 1995 (Certiviande, 1995). Une des recommandations de ce guide consiste à refroidir les carcasses le plus vite possible. La maîtrise du refroidissement est un véritable défi dans la filière viande. En effet, un refroidissement trop rapide peut entraîner un durcissement de la viande dû à la contraction des muscles tandis

qu'un refroidissement trop lent peut conduire d'une part, à une prolifération microbienne en profondeur et d'autre part, à une chute de PH rapide préjudiciable à la qualité technologique telle que la couleur et la texture de la viande de porc. Pour bien préserver les qualités sanitaires et organoleptiques du produit, les abattoirs pratiquent en général la réfrigération en deux phases.

	1° expérimentation (Octobre 2017)	2° expérimentation (Août 2018)
Nombre de carcasses	240	200
Poids moyen d'une demi-carcasse (kg)	30	45
Nombre de demi-carcasses instrumentées	8	6
Durée de transport	9 h	8 h
Durée d'attente sur le quai d'expédition avant chargement	2 h (pas de mesure de T ambiante)	7 h (T ambiante 1 °C)
Chargement homogène (uniquement des carcasses)	Oui	Non (présence de 9 palettes non filmées de caisses vides au fond du véhicule)
Nombre de gaines de distribution d'air Positionnement - Cf. Figure 1	Deux gaines de soufflage symétriques et perforées (longueur 11,0 m)	Deux gaines de soufflage dissymétriques (longueur de 5,3 m et 12,0 m)

Tableau 1 : conditions expérimentales de 2 expérimentations sur site.

La première est une phase active de refroidissement (ressuage), durant laquelle les carcasses sont refroidies avec de l'air pouvant être à température négative et avec des vitesses élevées (>2 m/s). Cette phase ne peut se faire que pendant quelques heures afin d'éviter la congélation superficielle du produit et une perte de poids accrue due à l'évaporation d'eau à la surface du produit. De plus, cette phase entraîne une forte consommation énergétique due à une production de froid à plus basse température et à une ventilation élevée. La seconde phase est la phase de stabilisation de la température des carcasses : température d'air voisine de 0 °C et simple brassage de l'ambiance. Dans la pratique, les temps nécessaires pour atteindre 20 °C (température évitant le risque de prolifération microbienne en profondeur et une chute de pH trop rapide) puis 7 °C à cœur (température évitant le risque microbien en profondeur pendant la conservation), sont variables selon le système de réfrigération utilisé et selon le poids des carcasses. D'après une étude de terrain réalisée en 2007 dans 15 abattoirs, il fallait en moyenne 16,5 heures (écart-type d'environ 2 h) pour que les carcasses atteignent 7 °C à cœur (Frotin et al, 2007).

Le règlement UE 2017/1981 modifiant l'annexe III du règlement (CE) n° 853/2004 a introduit la température de surface comme nouveau critère en ce qui concerne les conditions de températures à respecter lors du transport. Ainsi, pour les transports d'une durée inférieure à 30 h, la température de surface ne doit pas excéder 7 °C après 16 h et la température à cœur doit être inférieure ou égale à 15 °C au moment du chargement. Pour répondre au besoin des professionnels, cet article présente une méthode simple permettant d'estimer le temps de refroidissement d'une carcasse ayant une température initiale, et un poids donné afin d'atteindre une valeur cible.

Les résultats sont issus de la thèse de Mouna Merai (soutenue en novembre 2018) qui consistait à développer une démarche permettant de prédire l'évolution de la charge microbienne à la surface de carcasses de porcs lors d'un transport frigorifique selon les conditions opératoires (température et humidité de l'air de soufflage) et les conditions initiales (profil de température des pièces de viande en sortie de chambre froide d'abattoir). La croissance microbienne dépend notamment de la température et de l'activité de l'eau en surface, celles-ci jouant donc un rôle déterminant sur la salubrité et la sécurité des viandes. Une étude numérique des transferts de chaleur et d'eau de type diffusif au sein des carcasses et de type convectif autour des carcasses a été réalisée. Les écoulements d'air et les échanges convectifs ont été mesurés dans une maquette reproduisant une remorque de camion frigorifique chargée de carcasses de porcs à l'échelle réduite (Merai et al, 2018, Merai et al, 2019).

Parallèlement, une première étude sur site portant sur le transport de 240 carcasses dans un véhicule semi-remorque a été réalisée en 2017. Les résultats ont permis d'estimer le coefficient de transfert convectif entre les carcasses et l'air à différentes positions dans le chargement (Merai et al, 2019). Le présent article concerne une deuxième série de mesures sur site réalisées en août 2018. Les températures ont été relevées à la fois sur le quai d'expédition réfrigéré avant chargement et lors d'un transport de 200 carcasses. Le tableau 1 compare les conditions de réalisation de ces deux essais.

En complément de la première expérimentation sur site, les objectifs des investigations faisant l'objet du présent article sont :

- d'analyser les mesures de terrain de température (air, produit) et d'humidité relative de l'air sur le quai d'expédi-

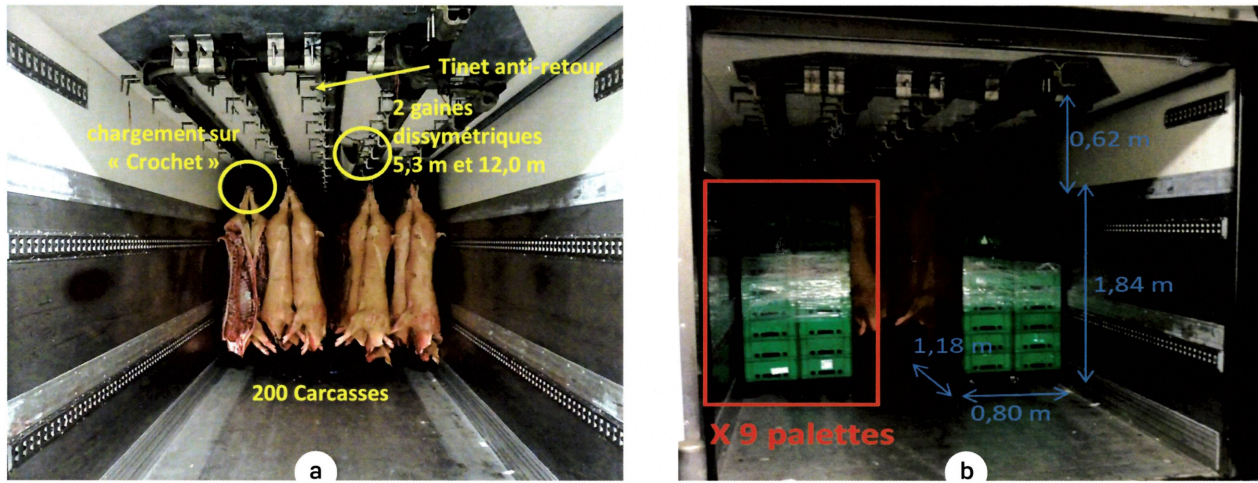


Figure 1: (a) semi-remorque chargée de 200 carcasses à l'avant et (b) arrière du véhicule chargé de 9 palettes vides.



tion et lors du transport ;

- de développer un modèle thermique simplifié pour prédire l'évolution des températures de surface et à cœur lors de ces étapes ;
- de proposer un abaque donnant le temps de demi-refroidissement ($t_{1/2}$) en fonction de la vitesse d'air et du poids carcasses. Ce temps est défini comme la durée nécessaire pour que la température à cœur de produit atteigne la valeur moyenne entre sa température initiale et celle de l'air qui l'entoure.

Matériels et méthodes

Semi-remorque chargée de carcasses de porcs

La mesure sur site a eu lieu en août 2018 en utilisant une semi-remorque de camion frigorifique de dimensions 13,3(l) x 2,5(L) x 2,5(h) m avec un débit d'air au soufflage de 5000 m³.h⁻¹.

Cette remorque est équipée de 5 rails de suspension, mais seulement 4 rails ont été utilisés (rail au milieu vide) pour suspendre les carcasses de porcs (Figure 1).

Afin de limiter le balancement des carcasses lors du

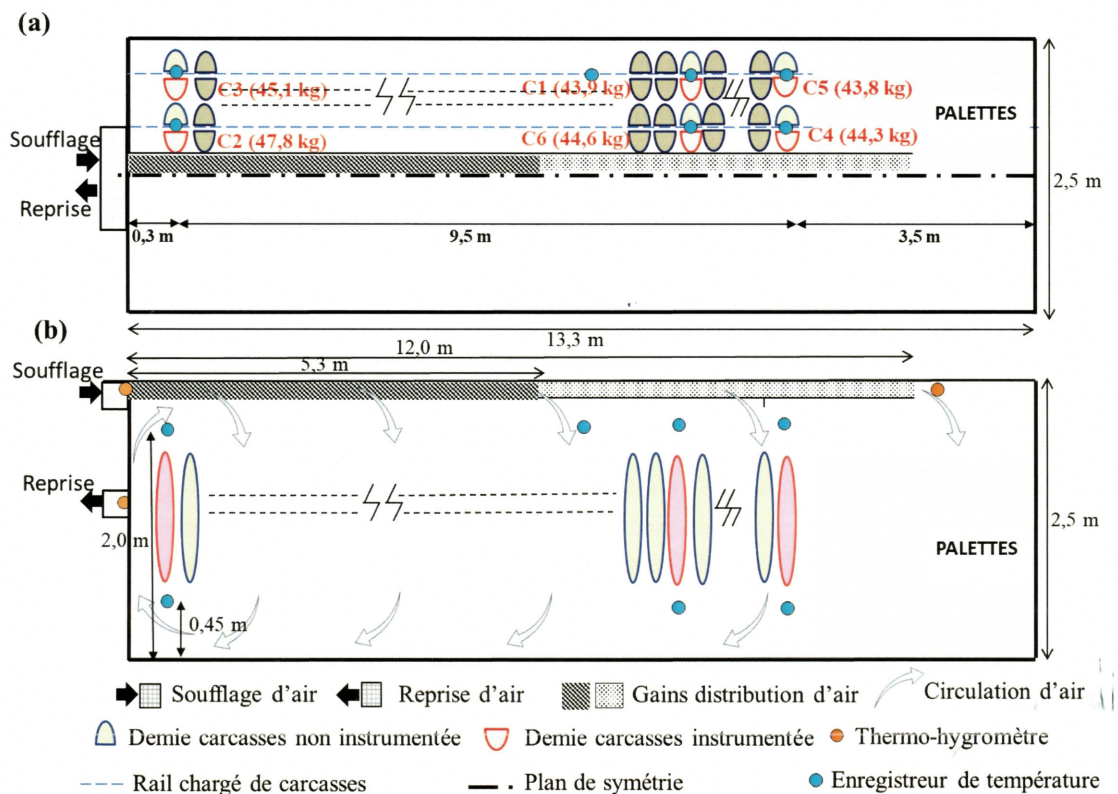


Figure 2: véhicule chargé de 200 carcasses réparties sur 4 rails. (a) Vue du haut montrant uniquement la moitié du chargement, l'autre moitié est chargée de la même manière. (b) Vue du profil.

transport, provoquant frottements et effets de carène néfastes, les 200 carcasses sont disposées par groupe de 40 entre deux tinets anti-retour. Pour respecter le langage professionnel, le nombre de carcasses (non pas demi-carcasses) est utilisé sachant que le produit étudié est sous forme de demi-carcasses. Chaque rail était chargé de 100 demi-carcasses. 6 demi-carcasses ont été instrumentées, le poids et la position de ces carcasses (C1, C2, ..., C6) sont présentés dans la figure 2 (page précédente). Une partie de l'air froid est soufflé à l'avant de la semi-remorque (en haut), l'autre partie est soufflée à mi-longueur (à 5,3 m) et à l'arrière (à 12,0 m) par les deux gaines de distribution situées de part et d'autre du plan médian. L'air revient vers l'avant en traversant les demi-carcasses en se réchauffant, pour être ensuite repris à l'avant du véhicule et refroidi à nouveau par le système frigorifique (Figure 2).

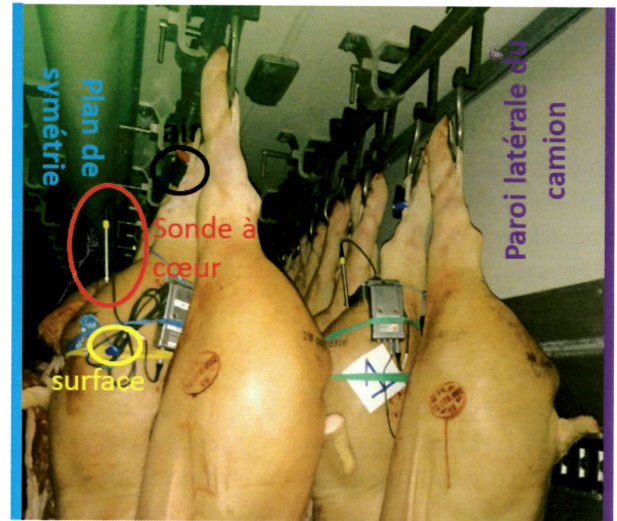


Figure 3 : deux demi-carcasses instrumentées pour le suivi des températures en surface, à cœur ainsi que de l'air dans leur voisinage.

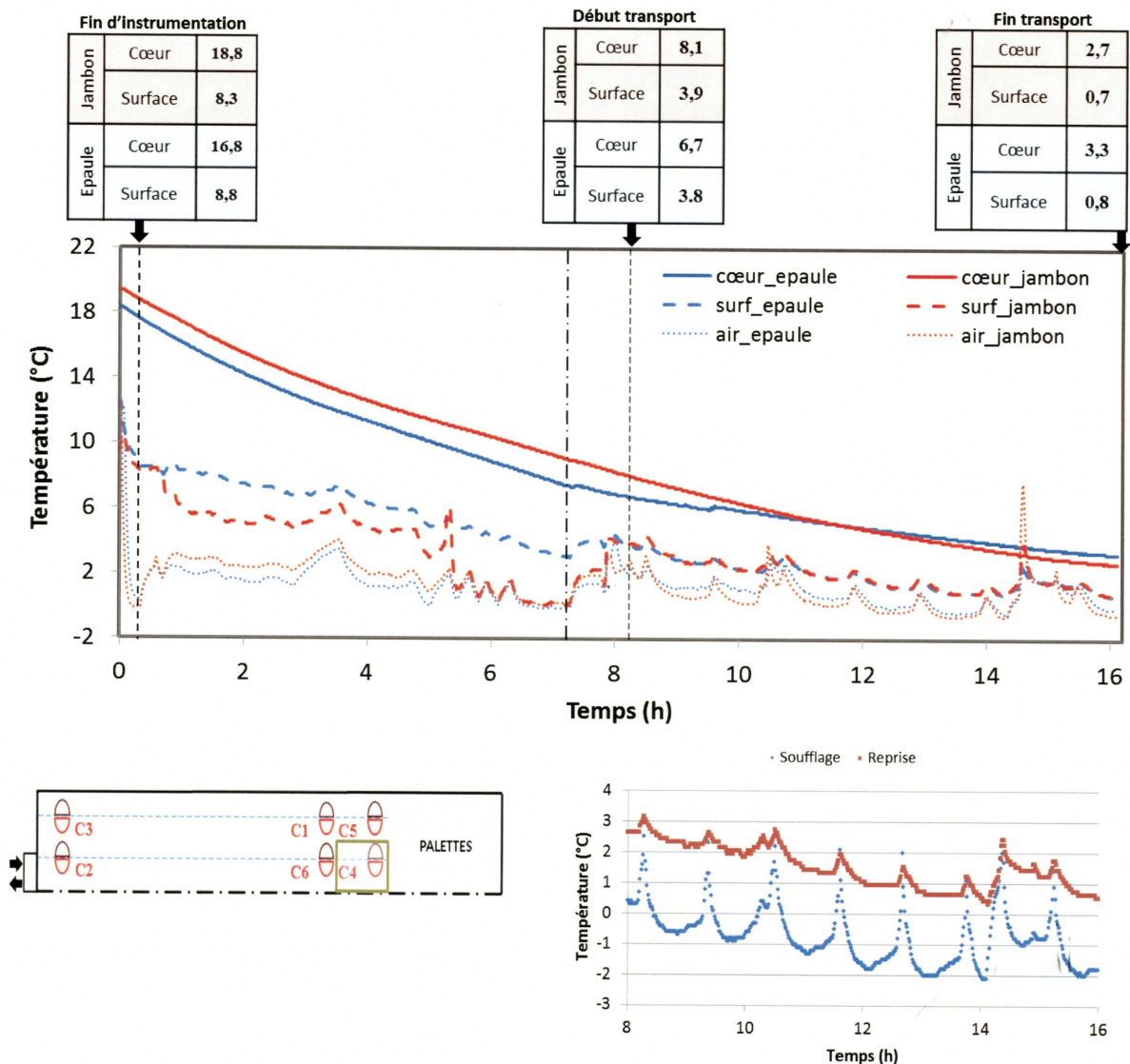


Figure 4 : évolution des températures de surface et à cœur de la demi-carcasse C4 située à l'arrière du véhicule près du plan médian et de l'air au voisinage.

>>> Instrumentation

La Figure 3 (page précédente) montre une photo des demi-carcasses sur 2 rails : une demi-carcasse instrumentée sur chaque rail dont une près de la paroi latérale du véhicule et l'autre près du plan médian. La température à cœur est mesurée par des sondes de pénétration reliées à des enregistreurs à sonde externe (Testo 171-4, thermocouple Type-T, précision $\pm 0,2$ °C) insérées en profondeur (à 12 cm pour le jambon et à 6 cm pour l'épaule). La température de surface est mesurée par un enregistreur de température à sonde interne (*thermo-button*, type 22 L, précision $\pm 0,5$ °C) fixé à la surface de la couenne. Ces mesures ont été effectuées aussi bien sur le jambon que sur l'épaule, au total 4 positions de mesure par demi-carcasse. La température d'air près de chaque demi-carcasse instrumentée a été mesurée en plaçant un enregistreur de température sur un crochet en haut du jambon et un autre enregistreur en bas de l'épaule (*thermo-button*). La température et l'hygrométrie de l'air au soufflage, à la reprise et à la sortie d'une gaine de distribution (à 12 m de profondeur) ont été mesurées par des thermo-hygromètres (Testo 174 H, précision $\pm 0,5$ °C, ± 3 % RH). L'acquisition des données a été faite toutes les minutes sur une durée totale de 16 h (7 h d'attente sur le quai d'expédition, 1 h de chargement et 8 h de transport). Il est à noter que 9 palettes de caquettes vides ont été placées au fond du véhicule ; elles servent en général à transporter d'autres types de produits, par exemple, des abats ou des morceaux de viande.

Résultats expérimentaux et discussion

Pour éviter une redondance des graphiques, seuls les résultats de la demi-carcasse C4 (au fond du véhicule près du plan médian et juste devant les palettes) sont présentés à titre d'exemple. L'évolution des températures des autres demi-carcasses instrumentées est similaire. La figure 4 (page précédente) montre l'évolution des tem-

pératures en surface, à cœur des carcasses et de celle de l'air au voisinage pendant l'attente sur le quai d'expédition (8 h), durant le chargement (1 h) et le transport (7 h) ; elle montre également la température de soufflage et de reprise de l'air froid durant le transport. Il est à souligner que ces demi-carcasses ont été refroidies préalablement dans une chambre froide après l'abattage (pendant environ 9 h). Au cours de cette période, la surface s'est refroidie plus vite que le cœur. Cela explique qu'au début de l'attente avant le chargement, la température de la surface (moyenne des carcasses instrumentées pour le jambon et l'épaule : 9,1 °C) est inférieure à celle à cœur (moyenne des carcasses instrumentées pour le jambon et l'épaule : 18,6 °C) ; le jambon étant plus volumineux que l'épaule, il est plus difficile à refroidir et sa température à cœur est donc plus élevée que celle de l'épaule.

Ces températures de produit (surface/cœur du jambon et de l'épaule) diminuent progressivement pendant les 2 étapes qui suivent (attente sur le quai d'expédition et transport) où la température ambiante fluctue légèrement autour de 1 °C pour les deux étapes. À la fin du transport, les températures de surface sont quasiment stabilisées alors que celles à cœur continuent à diminuer légèrement. Notons que la température de surface fluctue plus fortement que celle à cœur car elle subit directement la fluctuation de la température d'air dépendante des cycles marche-arrêt du compresseur.

Pendant l'attente avant chargement, la température ambiante moyenne était de 1 °C. La figure 4 présente également la température de l'air au soufflage et à la reprise du véhicule au cours du transport. Le cycle de fonctionnement du compresseur de cette semi-remorque est d'environ 30 minutes de refroidissement pour 30 minutes d'arrêt avec maintien de la ventilation.

Les températures de surface et à cœur de toutes les demi-carcasses instrumentées au début et à la fin du transport sont présentées sur la figure 5. Les valeurs manquantes de la température de surface de produit à

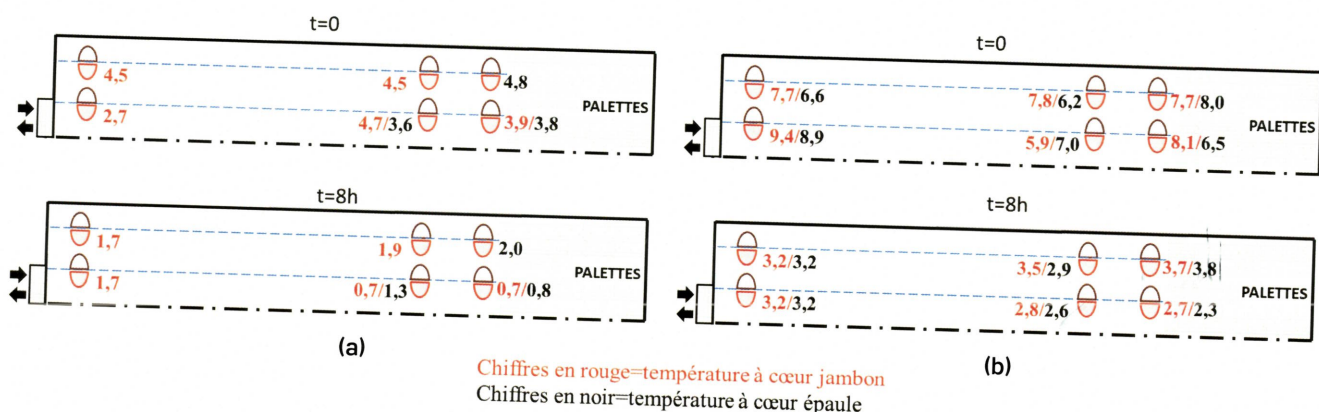


Figure 5 : Température des demi-carcasses instrumentées en début (t=0) et à la fin du transport (8 h).

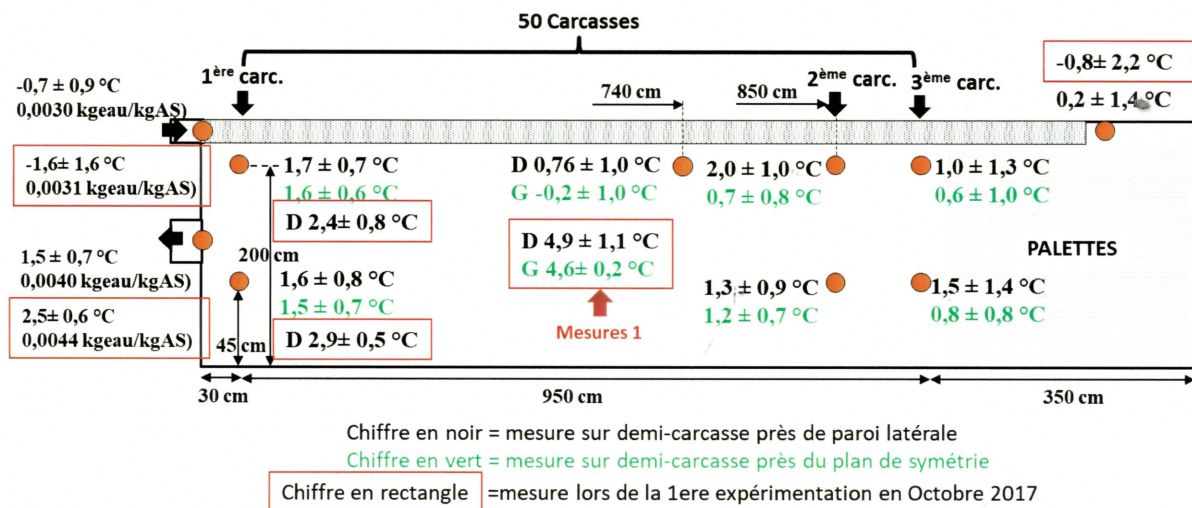


Figure 6 : température moyenne de l'air à différentes positions lors du transport.

certaines positions (Figure 5a) sont dues au décrochage de l'enregistreur de température de surface lors du transport, la mesure ne pouvait donc pas être utilisée. Pour la température à cœur (Figure 5b), la température hétérogène au début de transport (min 5,9 °C, max 9,4 °C, soit $\Delta T = 3,5$ °C et moyenne 7,5 °C avec un écart type 1,1 °C) devient plus homogène à la fin (min 2,3 °C, max 3,8 °C, soit $\Delta T = 1,5$ °C et moyenne 3,1 °C avec un écart type 0,5 °C). Cette homogénéité est favorisée par les gaines de distribution d'air à 5,3 m et à 12,0 m.

La figure 6 présente la température moyenne de l'air à différentes positions dans le véhicule lors du transport de 8 h. La température moyenne de l'air est de -0,7 °C au soufflage et de 1,5 °C à la reprise. L'augmentation de la température entre le soufflage et la reprise est principalement due aux échanges thermiques entre le produit et l'air et entre l'air et les parois du véhicule. Cette figure présente également la teneur en eau dans l'air à 3 positions : soufflage, reprise et à la sortie de la gaine de distribution de 12 m. Cette teneur en eau a été calculée en utilisant le diagramme de l'air humide (Beysens, 1995) d'après la température et l'humidité de l'air mesurées par les thermo-hygromètres.

L'augmentation de la teneur en eau entre le soufflage et

la reprise est due à l'évaporation d'eau de la surface des carcasses entraînant ainsi une perte du poids du produit. Compte tenu du débit d'air de 5 000 m³h⁻¹, la perte de poids est estimée à 0,14 kg par demi-carcasse pour 8 h de transport soit 0,3 à 0,4 %.

La figure 6 présente également la température de l'air et la teneur en eau à certaines positions mesurées lors de la première expérimentation sur site en octobre 2017. Bien que les conditions ne soient pas les mêmes (Tableau 1), cela permet d'avoir une information sur la variabilité des données sur site.

Modélisation des échanges thermiques

Modèle de prédiction de l'évolution des températures d'une demi-carcasse

En première approche, une demi-carcasse peut être assimilée à un long cylindre caractérisé par un rayon équivalent (R_{eq}). La loi de Fourier peut être utilisée pour décrire la conduction thermique au sein de la demi-carcasse et prédire l'évolution de la température en fonction de la position radiale et du temps :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Propriété	Valeur	Référence
Rayon équivalent, R_{eq} (m)	0,1	$R_{eq} = 0,005$ (12,93 + 0,24 W) W : Poids d'une demi-carcasse (kg) Daudin et Kuitche, 1996
Masse volumique, ρ (kg.m ⁻³)	1 072	Harkouss et al., 2018
Conductivité thermique, λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,45	Kondjoyan et al., 2013
Capacité thermique, C (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	3 200	Kondjoyan et al., 2013
Diffusivité thermique, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ (m ² .s ⁻¹)	$1,31 \times 10^{-7}$	

Tableau 2 : propriétés thermo-physiques d'une carcasse de porc.

En négligeant l'évaporation d'eau à la surface de produit, l'échange convectif entre la surface du produit (T_s et $r = R_{eq}$) et l'air au voisinage (T_a) peut être représentée par l'éq. 2 :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_a) \quad (2)$$

où h est le coefficient de transfert par convection.

Le schéma explicite a été appliqué pour résoudre les éq. 1 et 2 en considérant 5 pas d'espace entre le cœur et la surface et un pas de temps de 10 min. Le scénario de la simulation est le suivant.

Le refroidissement des demi-carcasses (température initiale de produit après l'abattage est d'environ 40 °C) a lieu dans une chambre froide (T ambiante moyenne 2 °C, $h = 10 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$) pendant 9 h après l'abattage. Puis, le produit est transféré sur le quai d'expédition réfrigéré (T ambiante moyenne 1 °C, $h = 8 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$) pendant 7 h avant d'être chargé dans un véhicule frigorifique (T ambiante moyenne 1 °C, $h = 15 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$) pendant 9 h avant la livraison. Pour la simplicité, nous considérons que pendant le chargement progressif qui a duré 1 h, toutes les carcasses étaient exposées à la condition ambiante du véhicule. La simulation a été réalisée en utilisant les propriétés thermo-physiques moyennes d'une carcasse de porc, présentées dans le tableau 2 (page précédente).

Les résultats de prédiction sont présentés sur la figure 7 et compte tenu des données de mesure disponibles, seule la comparaison lors de l'attente avant chargement et le transport est possible. Le modèle représente bien la

température à cœur pendant ces 2 étapes, la température de surface est moins bien représentée par le modèle (écart max 3 °C). En effet, la mesure de la température de surface sur site en plaçant un enregistreur de température (diamètre 1 cm) est délicate car le contact avec la surface n'est pas parfait et les conditions de l'air environnant influence la température des produits. Il est à noter que les valeurs de coefficient de transfert convectif (h) dépendent fortement de la ventilation et la valeur moyenne mesurée dans une maquette d'une semi-remorque est de $7,7 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$ (Merai et al, 2019).

Estimation du temps de demi-refroidissement d'une demi-carcasse

Ce temps est défini comme la durée nécessaire pour diviser par 2 l'écart entre la température à cœur et celle de l'air par rapport à sa valeur initiale. Pour estimer ce temps, nous avons utilisé une solution analytique proposée par Carslaw et Jaeger (1959) qui prédit, sous la forme d'une série, l'évolution de la température adimensionnelle à cœur (T_c^*) d'un long cylindre $L \gg 2R$. Le premier terme de la série donne une bonne approximation pour $T_c^* < 0,8$:

$$T_c^* = 2Bi \cdot e^{-\beta_1^2 t^*} \frac{1}{(\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)} \quad (3)$$

$$\ln(T_c^*) = \ln\left(\frac{2Bi}{(\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)}\right) - \beta_1^2 t^* \quad (4)$$

$$\text{où } T_c^* = \frac{T_c(t) - T_a}{T_0 - T_a} \text{ et } t^* = \frac{\alpha t}{r_{eq}^2}$$

β_1 est la première racine de :

$$\beta_1 J_1(\beta_1) - Bi J_0(\beta_1) = 0 \quad (5)$$

J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel d'ordre zéro et d'ordre un.

Lors de la première étape de refroidissement, c'est-à-dire dans la chambre froide de l'abattoir, la température met un certain temps avant de commencer à diminuer (le froid met un certain temps à diffuser dans l'épaisseur du jambon ou de l'épaule), le premier terme de l'équation 4 n'est alors pas négligeable. Il y a aussi production de chaleur car le métabolisme du muscle n'a pas disparu. Cependant pour les étapes ultérieures, c'est à dire l'attente avant chargement et le transport, bien que le coefficient de transfert et/ou la température de l'air puissent être différents de l'étape précédente, on peut considérer en première approche que ce terme est négligeable car le froid a déjà commencé à pénétrer à cœur.

L'estimation approximative du temps de demi-refroidissement de demi-carcasses de différents poids en fonction

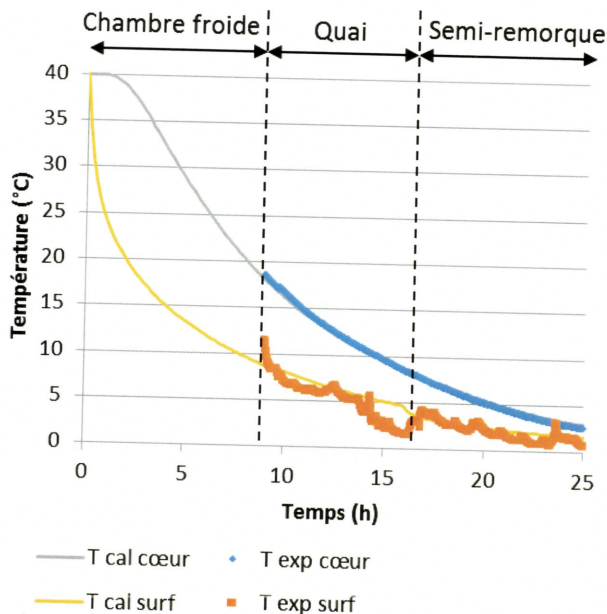


Figure 7 : comparaison entre les résultats expérimentaux (T_{exp}) et prédicts par le modèle (T_{cal}) pour l'évolution des températures de surface et à cœur d'une demi-carcasse lors de l'attente avant chargement et le transport dans une semi-remorque.

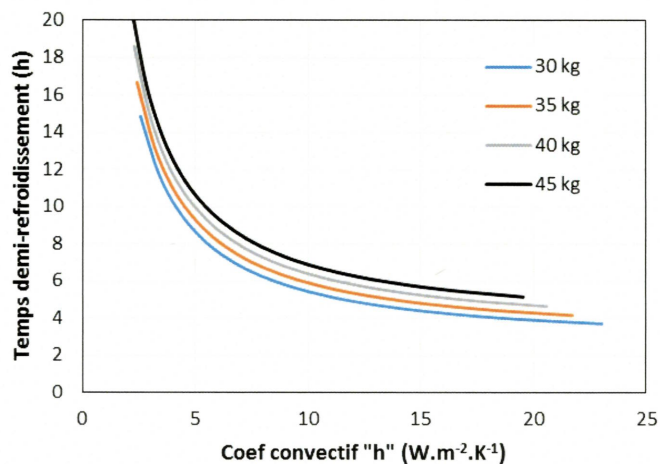


Figure 8 : temps de demi-refroidissement de demi-carcasses de différents poids en fonction du coefficient de transfert convectif entre le produit et l'air dans l'équipement frigorifique.

du coefficient de transfert peut alors être réalisée de la façon suivante :

- Le rayon équivalent du cylindre (R_{eq}) est calculé d'après le poids de la demi-carcasse selon une corrélation proposée par Daudin et Kuitche, 1996 (voir Tableau 2, page précédente) ;
- le nombre de Biot est calculé en fonction du coefficient de transfert convectif, puis on en déduit la valeur de β_1 ;
- d'après le second terme de l'éq. 4 (pour $T_c^* = 0,5$), on détermine le temps de demi-refroidissement

$$(t_{1/2} = \frac{R_{eq}^2 \ln(2)}{\alpha \beta^2})$$

La figure 8 présente l'estimation du temps de refroidissement de demi-carcasses de poids variant de 30 à 45 kg en fonction de la valeur du coefficient de transfert convectif « h ». En augmentant le coefficient de transfert, le temps de demi-refroidissement diminue rapidement jusqu'à ce que « h » atteigne une valeur d'environ $8 \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Au-delà de cette valeur de « h », le temps de demi-refroidissement diminue toujours mais d'une manière beaucoup plus lente. Il semble peu intéressant de

dépasser une valeur de $15 \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ car c'est alors uniquement la conduction au sein de la viande qui devient le phénomène limitant. Il faut cependant remarquer que ces calculs ne tiennent pas compte de l'effet de refroidissement dû à l'évaporation de l'eau sur la partie sans couenne des carcasses.

Le coefficient de transfert convectif dépend essentiellement de la vitesse de l'air au voisinage de la carcasse. L'écoulement de l'air autour des carcasses est complexe et est influencé localement par la géométrie des carcasses. Néanmoins pour obtenir un ordre de grandeur de la vitesse nécessaire pour atteindre un coefficient de transfert donné, on peut considérer une des corrélations proposées dans la littérature pour un cylindre exposé à l'écoulement d'air transverse (e.g. Zukauskas, 1972).

On trouve alors qu'il faut une vitesse d'air de l'ordre de 1 m/s pour obtenir un coefficient de transfert de $8 \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ et de 3 m/s pour atteindre $15 \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Les courbes présentées sur la figure 8 peuvent être utilisées, par exemple, pour estimer la durée de refroidissement d'une carcasse placée dans une ambiance à 0°C . Le temps de demi-refroidissement t correspond dans ce cas à la durée nécessaire pour refroidir une carcasse de porc de sa température initiale à la « moitié » de cette valeur (par exemple de $15,0^\circ\text{C}$ à $7,5^\circ\text{C}$ soit $(T_t - T_a) / (T_0 - T_a) = 1/2$). L'estimation de cette durée, pour 2 vitesses d'air de 1 m/s et de 3 m/s, est présentée dans le tableau 3. Il est à noter que le poids de la majorité des carcasses de porc varie entre 35-40 kg.

Conclusion

L'étude terrain réalisée en août 2018 a permis d'étudier les étapes du quai d'expédition réfrigéré et du transport dans un semi-remorque chargé de 200 carcasses. Au début du transport, les températures moyennes de surface des jambons et des épaules sont similaires ($4,1^\circ\text{C}$) et ces températures diminuent jusqu'à $1,4^\circ\text{C}$ à la fin de transport. Au début du transport, la température moyenne à cœur des jambons est légèrement supérieure à celle des

Poids d'une carcasse	Temps (h)	
	Pour vitesse d'air de 1 m/s	Pour vitesse d'air de 3 m/s
30 kg	5,9	4,3
35 kg	6,1	4,8
40 kg	6,8	5,3
45 kg	7,5	5,5

Tableau 3 : temps nécessaire pour refroidir une carcasse de porc de $15,0^\circ\text{C}$ à $7,5^\circ\text{C}$ dans une ambiance à 0°C en fonction du poids.

>>> épaules (jambon : 7,8 °C, épaule : 7,2 °C) et ces températures sont proches à la fin du transport (3,1 °C). Un modèle de transfert thermique unidirectionnel a été développé pour prédire la cinétique de refroidissement des demi-carcasses au cours de l'attente sur le quai et lors du transport. Puis, ce modèle a été utilisé pour développer un abaque permettant d'estimer le temps de demi-refroidissement d'une demi-carcasse en fonction de son poids. Cet abaque est simple à utiliser par les professionnels et elle permet de mieux gérer la logistique de la chaîne du froid ■

Références

- 1 Beysens, D., 1995. The formation of dew. Atmos. Res. 39, 215-237.
- 2 Carslaw H.S. and Jaeger J.C., 1959, Conduction of Heat in Solids, 2nd Edition, Oxford Press.
- 3 Certiviande (Association pour le développement de la certification dans la filière viande), 1995, Guide de bonnes pratiques hygiéniques en abattage et découpe de porcs.
- 4 Daudin J.D., Kuitche A., 1996, Modelling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time variable conditions using an analytical based method - III. Calculations versus measurements on pork carcass hindquarters, Journal of Food Engineering, 39-62.
- 5 Culture Viande, Les entreprises françaises des viandes, 2013.
- 6 Frotin P., Gault E., Chevillon P. Eon Y., 2007, Mise à jour des références techniques et des recommandations sur le process d'abattage dans 15 abattoirs. Étude réalisée avec le concours financier d'Inaporc.
- 7 Kondjoyan, A., S. Ouilic, S. Portanguen, J.B. Gros, 2013. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat, Meat Science 95(2): 336-344.
- 8 Kuitche, A., Daudin, J.D. and Letang, G., 1995. Modélisation des cinétiques de température et de perte de poids des viandes pendant la réfrigération en régime variable. PhD Thesis. École nationale supérieure des industries agricoles et agroalimentaires, France.
- 9 Mouna Merai, 2018. Modélisation des transferts thermique/hydrrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc, thèse de l'Ecole doctorale Abies.
- 10 Merai M., Flick D., Guillier L., Duret S., Laguerre O., 2019, Experimental characterization of heat transfer inside a refrigerated trailer loaded with carcasses, International Journal of Refrigeration, 99, 194-203.
- 11 Merai M., Flick D., Guillier L., Duret S., Laguerre O., 2018, Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses, International Journal of Refrigeration, 88, 337-346.
- 12 Merai M., Duret S., Derens E., Leroux A., Flick D., Laguerre O., 2019, Experimental characterization and modelling of refrigeration of pork carcasses during transport under field conditions, International Journal of Refrigeration, 99, 194-203.
- 13 Zukauskas, A., "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow," in J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr., Eds., Advances in Heat Transfer, Vol. 8, Academic Press, New York, 1972.

Remerciement

Ce travail a été financé par la région Ile-de-France (Domaine d'intérêt majeur) et réalisé en collaboration avec l'Ifip.

Nomenclature

A	Surface d'échange (m ²)
Bi	Nombre de Biot = hR_{eq}/λ
C	Capacité thermique massique moyenne d'une carcasse de porc (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
h	Coefficient de transfert convectif (W.m ⁻² .K ⁻¹)
λ	Conductivité thermique moyenne d'une carcasse de porc (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
m	Masse de produit (kg)
R_{eq}	Rayon équivalent d'une demi-carcasse (m)
T	Température (°C)
T*	Température adimensionnelle = $(T(t)-T_a)/(T_0-T_a)$
t	Temps (s)
t*	Temps adimensionnel (nombre de Fourier) = $\frac{\alpha t}{R_{eq}^2}$

Symbol grec

ρ	Masse volumique moyenne d'une carcasse de porc (kg.m ⁻³)
α	Diffusivité thermique moyenne d'une carcasse de porc (m ² .s ⁻¹)

Indice

a	Air
c	Cœur
0	Initial
s	Surface