



HAL
open science

Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermique/hydrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc

Mouna Merai

► **To cite this version:**

Mouna Merai. Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermique/hydrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc. Génie des procédés. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2018. Français. NNT : 2018IAVF0014 . tel-02457519

HAL Id: tel-02457519

<https://pastel.hal.science/tel-02457519>

Submitted on 28 Jan 2020

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.

NNT° : 2018IAVF0014

THESE DE DOCTORAT

préparée à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech)

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier de France

Spécialité : Génie des procédés

École doctorale n° 581

Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Mouna MERAI

Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermique/hydrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc

Directeur de thèse : Onrawee LAGUERRE ; Co-directeur : Denis FLICK

Co-encadrement de la thèse : Laurent GUILLIER et Steven DURET

Thèse présentée et soutenue à « AgroParisTech », le « 08 novembre 2018 » :

Composition du jury :

M. Patrick PERRE, Professeur, Ecole Centrale Paris	Président
M. Philippe BOHUON, Professeur, SupAgro Montpellier	Rapporteur
M. Alain KONDOYAN, Directeur de recherche, INRA	Rapporteur
Mme Onrawee LAGUERRE, Directrice de recherche, Irstea	Directeur de thèse
M. Denis FLICK, Professeur, AgroParisTech	Codirecteur de thèse
M. Laurent GUILLIER, Chargé de projets de recherche, Anses	Invité
M. Steven DURET, Docteur, Irstea	Invité
M. Brice Minvielle, Responsable de projet, Idele	Invité

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Hayat Benkhalifa de m'avoir encourager à postuler à ce projet de thèse. Je remercie Onrawee Laguerre, Denis Flick et Laurent Guillier de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet de thèse et d'accomplir un objectif personnel et professionnel. Je les remercie également pour leur accompagnement, leur professionnalisme et rigueur scientifique qui ont fait avancé le projet et l'amener jusqu'au bout. Je remercie également Steven Duret qui a participé à mon encadrement et qui a toujours été présent pour me booster quand il le fallait.

J'exprime toute ma gratitude à Mr Philippe BOHUON, professeur à SupAgro de Montpellier, et Mr Alain KONDJAYAN, directeur de recherche à l'INRA-Theix, pour avoir accepté de rapporter cette thèse, ainsi que Mr Patrick PERRE, professeur à Ecole Centrale Paris, pour avoir présidé mon jury de thèse. Je remercie également Mr Brice Minvielle, de l'Idel, Mme Nathalie Veauclin de Culture Viande et Mr Pierre-Sylvain Mirade de l'INRA de Theix pour avoir suivie mon travail de thèse et pour les discussions très intéressantes et les suggestions très utiles.

Je remercie l'ensemble de l'unité GPAN d'Irstea, au sein de laquelle les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés, pour leur accueil très chaleureux et leurs parties de tarot qui m'ont permis de m'intégrer très facilement. Je remercie Jean Moureh, qui m'a accompagné lors de mes premiers pas sur Fluent et Evelyne Derens pour sa bienveillance, ses conseils et sa présence pour les mesures de terrains. Je remercie également l'ensemble de l'équipe technique pour leur disponibilité et leur bonne humeur et plus particulièrement Gerôme pour l'assistance technique, Sébastien et Elyamine pour le travail acharné pour préparer les carcasses en mousse.

Je tiens également à remercier tous mes collègues doctorants. Thomas et Jeremy pour leur accueil convivial, leur soutien, leur bonne humeur et les discussions diverses et variées. Ronia et Mahdjouba que j'ai appris à connaître et qui m'ont soutenu sur le plan personnel. Violette et Anh Thu pour leur gentillesse, leur générosité et leur bonne humeur communicative. Et je tiens aussi à remercier Fabien, qui m'a beaucoup écouté, soutenu et encourager pour finir au mieux ce projet de thèse.

Je souhaite également remercier Ameni, ma sœur et ma meilleure amie, d'être toujours présente pour me soutenir et m'encourager. Et enfin, je tiens à remercier mes parents qui ont beaucoup investi dans mes décisions les plus folles et mon petit frère qui ne cesse de me rappeler à quel point on est semblables mais différents et uniques.

Table des matières

Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	13
Introduction.....	15
1. Introduction générale.....	17
2. Le contexte réglementaire	18
3. Objectif.....	21
4. Démarche	23
5. Valorisation de la thèse.....	26
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	29
1. La chaîne du froid dans l'agroalimentaire	31
1.1. Généralités.....	31
1.2. Filière viande.....	33
2. Etat de l'art des transports frigorifiques des carcasses de porc en France	34
2.1. Répartition géographique	34
2.2. Durée des transports.....	36
2.3. Caractérisation des températures pendant le transport des abattoirs vers les ateliers de découpe.....	37
2.4. Chargement et typologie de transport	37
3. Ecoulements et transferts (chaleur/matière) au niveau des carcasses de viande	40
4. Ecoulements et transferts dans les véhicules frigorifiques	45
4.1. Modélisation des écoulements et des transferts	46
4.2. Equations de transfert dans les carcasses	47
4.3. Conditions aux limites.....	48
5. Evolution de la qualité des aliments dans une enceinte réfrigérée	48
5.1. Généralités.....	48
5.2. Microbiologie prévisionnelle	49
6. Conclusions	53
Chapitre 2 : Caractérisation des écoulements d'air dans un camion frigorifique chargé de carcasses de porc	55
1. Introduction	57

2. Principaux résultats	57
3. Perspectives.....	57
4. Article 1.....	59
Chapitre 3 : Caractérisation des transferts convectifs dans un camion frigorifique chargé de carcasses de porc	83
1. Introduction	85
2. Principaux résultats et perspectives	85
3. Article 2.....	87
Chapitre 4 : Modélisation des transferts thermique et hydrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique des carcasses de porc	107
1. Introduction	109
2. Principaux résultats	109
3. Perspectives.....	109
4. Article 3.....	111
Chapitre 5 : Caractérisation expérimentale et modélisation du refroidissement des carcasses de porc au cours d'un transport frigorifique dans les conditions réelles	141
1. Introduction	143
2. Principaux résultats	143
3. Article 4.....	145
Chapitre 6 : Conclusions et perspectives	165
1. Bilan des travaux.....	167
2. Limites des travaux	168
3. Perspectives.....	171
Références.....	175
Annexes.....	189
Annexe 1: Présentation orale au congrès international « The 3rd International conference on Food and Biosystems Engineering », 1-4 June, Rhodes, Greece.....	191

Annexe 2: Présentation orale au congrès international « FoodSim'2018 », 8-12 Avril 2018, Leuven, Belgium.....	201
Annexe 3: Présentation d'un poster au 26^{ème} congrès français de thermique, 29 Mai au 1 Juin 2018, Pau, France.....	209
Annexe 4: Communication au congrès international « International Congress of Refrigeration » 27-30 August 2019, Montreal, Canada	221
Annexe 5: Article pour la Revue Générale du Froid	229

Liste des figures

Figure 0-1 : Principe de l'analyse de risques (AQR=Analyse Quantitative des Risques).	19
Figure 0-2: Organisation de la thèse	25
Figure 1-1 : Répartition géographique des abattoirs de porc en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports).....	35
Figure 1-2: Répartition géographique des transports de carcasses de porc en France. (a) transports de plus de 200 carcasses et (b) transports de moins de 200 carcasses (données du SNIV 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).....	35
Figure 1-3: Répartition de la durée de transport des carcasses en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).	36
Figure 1-4: Exemples de conduits d'air dans les semi-remorques frigorifiques destinés au transport des carcasses de viande.	38
Figure 1-5: Exemples de chargements des demi-carcasses de porc dans les semi-remorques frigorifiques.....	39
Figure 1-6: Courbe de la croissance d'une culture bactérienne avec ses différentes phases (Delhalle et al. 2012).....	50
Figure 2-1 : Photo of a refrigerated trailer with 5 rails loaded with pork carcasses as the studied configuration.	63
Figure 2-2 : Schematic view of the trailer loaded with carcasses showing the inlet and outlet positions: without air ducts (a), with air ducts (b).....	65
Figure 2-3 : (a): Steps in the production of reduced-scale carcasses from the X-ray scan of a real pork carcass (b): Side view of the reduced-scale trailer loaded with reduced-scale carcasses (b).....	66
Figure 2-4 : Measurement of the air velocity above the carcasses in the reduced-scale trailer by Laser Doppler Velocimetry (LDV).	67
Figure 2-5 : Measurement positions (a) in the symmetry plane of the trailer, and (b) in the vertical planes above and under the carcasses.	68
Figure 2-6: Velocity magnitude field in the symmetry plane without air ducts where discontinuous black lines present the border between the zones of high ($> 2 \text{ m.s}^{-1}$) and low ($< 2 \text{ m.s}^{-1}$) velocities (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).....	71
Figure 2-7 : Longitudinal velocity along the trailer at two distances from the ceiling ($y = 0.10 \text{ m}$ and $y = 0.17 \text{ m}$) with air ducts (points in red "AD") and without air ducts (points in black "WAD") (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).....	72
Figure 2-8 : (a) Schematic top view of the velocity evolution after the air ducts; (b) Velocity magnitude in the symmetry plane with an air duct where discontinuous black lines present the border between the zones of high ($2\text{-}3 \text{ m.s}^{-1}$) and low ($\sim 2 \text{ m.s}^{-1}$) velocities (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).....	73

Figure 2-9 : Longitudinal velocity field above the carcasses in four transversal planes (a) without air ducts, (b) with air ducts (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).	75
Figure 2-10 : Vertical velocity in four transversal planes (positive = downward) just above the carcasses (at $y = 0.33$ m and $y = 0.40$ m) (a): without air ducts, and (b): with air ducts. Dark arrows show the vertical airflow direction (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).....	77
Figure 2-11 : Dimensionless airflow rate estimation in the loaded trailer above and under the carcasses (a): without air ducts, (b): with air ducts (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).....	78
Figure 2-12 : Schematic airflow rate distribution in the loaded trailer (a): without air ducts, (b): with air ducts. Values represent Q^* . Bold values correspond to the airflow rates calculated from the measurements; grey values correspond to the airflow calculated in the flow direction (+), opposite direction (-); italic blue values are deduced from the variations in the bold values, italic orange values are deduced by mass balance on the internal nodes, red circles are potential risk zones.....	81
Figure 3-1: Loaded trailer; (a) real scale of the chosen configuration; (b) front view and (c) side view with characteristic dimensions.	91
Figure 3-2 : (a) Steps in the production of reduced-scale carcasses based on the X-ray scan of a real pork carcass; (b) Side view of the reduced-scale trailer loaded with reduced-scale carcasses.	92
Figure 3-3 : Instrumentation of the plaster half-carcasses (a) location of the heating panels, heat flux sensors, surface thermocouples and ambient air; (b) positions of the plaster half-carcass and the polyurethane ones.....	94
Figure 3-4 : Top view of half of the trailer loaded with half-carcasses showing the measurement positions used to measure the CHTC using instrumented plaster half-carcasses.....	95
Figure 3-5 : Local CHTC measured on the muscle and rind surfaces of the ham, loin and shoulder parts of the instrumented half-carcasses in the trailer (a) without air ducts and (b) with air ducts.	98
Figure 3-6 : Mean CHTC values (W. m – 2. K – 1) along the trailer and their standard deviation at different positions of the instrumented half-carcass. (a) without air ducts, and (b) with air ducts.	99
Figure 3-7 : (a) CHTC (mean values for rind and muscle sides of carcasses located near the symmetry plane and near the wall) along the trailer without air ducts at the surface of ham (blue ♦), loin (red ■) and shoulder (green ▲), (b) Simplified airflow pattern in the trailer loaded with carcasses without air ducts (values represent dimensionless airflow rates).....	101
Figure 3-8 : (a) CHTC at muscle side of ham of the carcasses near the side wall (red ●) and near the symmetry plane (blue ■), (b) Vertical time averaged velocity (positive downwards) on the top of carcasses at $x^* = 1/8$ and (c) at $x^* = 5/8$	102
Figure 3-9 : (a) CHTC (mean values for rind and muscle sides of carcasses located near the symmetry plan and near the side wall) along the trailer with air ducts at the surface of ham (bleu ♦), loin (red ■) and shoulder (green ▲), (b) Simplified airflow direction in the trailer loaded with carcasses with air ducts (values represent dimensionless airflow rates).....	104

Figure 4-1 : Views of (a) the pork ham part (b) the 3D ham geometry and its dimensions, (c) the volumetric tetrahedral mesh with the different components of the ham imported into Comsol ® Multiphysics software (d) two considered zones on the ham with boundary conditions (from Harkouss et al. 2018).....	118
Figure 4-2: Diagram of refrigeration steps after carcass slaughtering and conditions used in numerical simulation.....	122
Figure 4-3: Temperature evolution inside pork during transport according to the reference scenario ($T_{air} = 6^{\circ}\text{C}$ and $\text{RH} = 90\%$) for 4 scenarios. scenario1: regulation $\text{CHTC} = h_{\text{mean}}$, scenario 2: regulation $\text{CHTC} = h_{\text{min}}$, scenario 3: derogation $\text{CHTC} = h_{\text{mean}}$ and scenario 4: derogation $\text{CHTC} = h_{\text{min}}$ placed in a cold trailer. The empty zones correspond to the bone. Values at the bottom of each graph present core (dark cross as shown in scenario 1) and maximum surface temperatures.....	125
Figure 4-4: Surface temperature ($^{\circ}\text{C}$), water content (kg water/kg dry matter) and microbial growth on the muscle surface of pork's ham after 10 hours of refrigerated transport at the reference scenario ($T_{air} = 6^{\circ}\text{C}$ and $\text{RH} = 90\%$).....	128
Figure 4-5: Evolution of mean temperature, water content and microbial growth on the surface of pork's ham muscle as well as weight loss during 10 hours of refrigerated transport for different scenarios.....	129
Figure 4-6 : (a) Mean values of muscle surface temperature and (b) mean and maximum microbial growth profiles on the surface of pork's ham muscle during refrigeration in both the cold room and the transportation for both regulation and derogation scenarios.....	133
Figure 5-1 : Geographic distribution of pork carcass transport in France (a) - transport of > 200 carcasses by vehicle from the North-West to other regions; (b) - transport of ≤ 200 carcasses by vehicle from the North-West to other regions; and (c) - other transport operations, whatever the number of carcasses in the semi-trailer (Source: French meat industrial group, 2013, Statistics concerning 188 transport operations).....	148
Figure 5-2 : Distribution of duration of carcass transport in France from slaughterhouses to processing plants (Source: French meat industrial group, 2013, Statistics concerning 188 transport operations).....	148
Figure 5-3 : Positions of measurements in a semi-trailer loaded with pork carcasses (a) - Top view; (b) - Side view.....	150
Figure 5-4 : Photo of an instrumented carcass at the ham and shoulder positions.....	153
Figure 5-5 : (a) - Product and air temperature changes during transport of the carcass C3; (b) - Product surface temperature at the beginning and at the end of transport with a duration of 9 h; (c) - Product core temperature at the beginning and the end of transport with a duration of 9 h.....	155
Figure 5-6 : Average air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and air water content (kg water/kg dry air) during transport with a duration of 9 h at different positions: (a) - air near ham (at top) and shoulder (at bottom); (b) - air near side walls; (c) - Air temperature change at the inlet, the outlet and near the carcass C3.....	157
Figure 5-7 : Dimensionless core temperature (Tc^*) of a carcass (C3) as a function of dimensionless time (Fo) (a) Ham part; (b) Shoulder part; (c) Values of convective heat transfer coefficient (h , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) between the air and the carcass surfaces (value near ham/value near shoulder).....	159

Figure 5-8 : Carcass core and average temperature changes during refrigeration: (a)-in a cold room of a slaughterhouse; and (b)-in a semi-trailer (*Dotted lines show the corresponding temperatures of carcasses transferred from a cold room to a semi-trailer*).161

Liste des tableaux

Table 0-1 : Récapitulatif du règlement (UE) 2017/1981 du 31 octobre 2017, modifiant l'annexe III du règlement 853/2004.....	21
Table 1-1 : Récapitulatif des valeurs moyennes des températures au moment du chargement et déchargement des carcasses de porc (SNIV-SNCP 2013).	37
Table 1-2 : Liste des travaux réalisés sur la modélisation des transferts thermique et hydrique et des écoulements dans une chambre froide chargée de carcasses de bœuf et de porc.	42
Table 4-1 : Studied transportation scenarios.	123
Table 5-1 : Conditions governing derogations for meat transport in France.	147
Table 5-2: Weight of instrumented half-carcasses (W).....	152
Table 5-3: Thermophysical properties of pork.....	162

Introduction

1. Introduction générale

La chaîne du froid ou chaîne frigorifique correspond à l'ensemble des opérations logistiques et domestiques (transport, manutention, stockage) visant à maintenir des produits alimentaires ou pharmaceutiques à une température donnée afin d'en préserver la salubrité et les qualités gustatives (Gac 1991). L'intérêt du terme *chaîne* est de souligner l'importance de la continuité des étapes ; aucun maillon ne devant céder et anéantir l'essentiel de l'effort général déployé pour aboutir en fin de chaîne à un produit préservé de tout échauffement. La maîtrise de la chaîne du froid ainsi que de ses différents aspects logistiques est donc d'une importance capitale. Cette tâche est d'autant plus compliquée, qu'elle impose la connaissance de l'évolution de la qualité du produit alimentaire tout au long de la chaîne du froid (Dabbene et al. 2008a, Dabbene et al. 2008b). Le terme *qualité* fait référence à l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins exprimés ou implicites des consommateurs (NF X50-120). Dans le cas des produits alimentaires cette notion englobe la qualité nutritionnelle, organoleptique, sanitaire et technologique.

Dans le cas des produits carnés et plus précisément des carcasses de viande, la chaîne du froid peut être divisée en deux catégories selon le procédé frigorifique mis en place. La première catégorie correspond au refroidissement de l'animal après l'abattage. Cette étape est essentielle pour la maîtrise des dangers microbiologiques particulièrement pour les carcasses de viande de grande taille (bœuf et porc). La deuxième catégorie correspond au stockage dans une chambre froide, le transport frigorifique et la vente en détail qui permet de maintenir la température initiale du produit (James 1996). En effet, extraire la quantité de chaleur nécessaire des carcasses nécessite beaucoup de temps et d'énergie. L'ultime objectif de cette étape est de stabiliser la qualité sanitaire des carcasses tout en respectant leur qualité technologique (Monin 2003, Savell et al. 2005, Kinsella et al. 2006).

La bonne compréhension des besoins de chaque étape de la chaîne du froid pour les carcasses de viande permet d'éviter une perte de poids excessive, une grande consommation énergétique, une diminution de la durée de vie du produit et une perte de sa qualité (James 1996). Pour cette raison, la réglementation européenne a fixé la température des carcasses de viande pour chaque maillon de la chaîne du froid (CE 852/2004).

2. Le contexte réglementaire

La mise en place de la chaîne du froid au cours des années 70 a permis à la filière viande de s'industrialiser et de codifier les conditions d'hygiène applicables aux transports de carcasses de viande (Décret n° 71-636).

La mise en application de la réglementation européenne de la Food Law et du Paquet hygiène en 2006 a modifié la philosophie générale de la réglementation, philosophie initiée déjà en 1993 par la première directive Hygiène. Les systèmes de gestion de la sécurité des aliments historiquement basés sur les dangers (réglementation prescriptive, obligation de moyens, contrôles des produits finis, ...) ont évolué vers des systèmes basés sur le risque (responsabilité des professionnels, obligation de résultats, démarche préventive basée sur les bonnes pratiques d'hygiène, sur le système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques (HACCP pour « Hazard Analysis and Critical Control Point » en anglais) et, en France, sur le plan de maîtrise sanitaire.

Cette évolution donne une place importante à l'analyse des risques dans la sécurité sanitaire des produits alimentaires (Zwietering 2015). Le principe de l'analyse des risques est présenté sur la Figure 0-1. Cette analyse est généralement conduite pour répondre à une question sanitaire identifiée par le gestionnaire du risque. L'objectif principal du gestionnaire du risque est de protéger la santé publique par la sélection et la mise en œuvre de mesures appropriées (FAO/OMS 1997). Le fait que la gestion du risque repose sur la prise en compte de l'ensemble de la chaîne de production alimentaire (« de la fourche à la fourchette »), est un concept important de l'approche réglementaire européenne. L'importance de l'appréciation des risques est primordiale dans l'analyse du risque. Elle fournit une description objective et scientifique des risques d'origine alimentaire. Elle représente ainsi la composante scientifique de l'analyse des risques. Les estimations du risque qu'elle produit sont utilisées par le gestionnaire du risque.

La réglementation relative à la sécurité des viandes et des produits carnés tient une place importante dans le dispositif de sécurité sanitaire des aliments. La réglementation s'applique tout au long de la chaîne de production des aliments. Elle s'intéresse notamment à l'hygiène lors de l'abattage des animaux, à l'inspection des carcasses ou aux conditions relatives aux transports des carcasses.

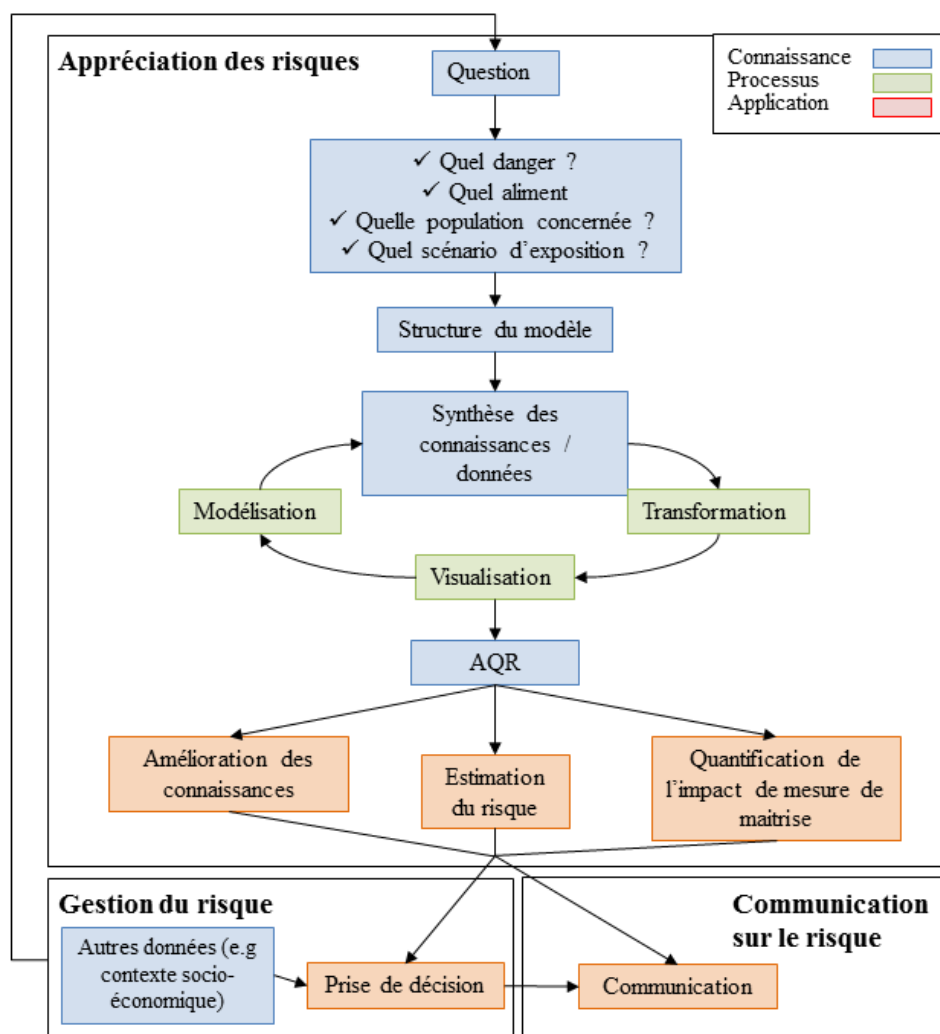


Figure 0-1 : Principe de l'analyse de risques (AQR=Analyse Quantitative des Risques).

Cette réglementation relative à l'aspect sanitaire des viandes est l'une des premières règles d'hygiène alimentaire appliquée au niveau européen (1964). Aujourd'hui, les obligations des professionnels et des services de contrôle sont spécifiés dans deux règlements du « Paquet hygiène » entrés en vigueur en 2006. Les obligations pour les services de contrôle sont spécifiées dans le règlement (CE) n° 854/2004 qui établit des règles spécifiques pour l'organisation des contrôles officiels (inspection) concernant les produits d'origine animale destinés à la consommation humaine.

En fin de ligne d'abattage, la température des carcasses de porc est encore d'environ 30 °C en surface et de 38-40 °C en profondeur (Rossel 2003). Ces températures sont très favorables à la croissance de la plupart des bactéries contaminant les carcasses. Le refroidissement a pour objectif

de réduire le plus rapidement possible la température des carcasses dans le but de préserver la qualité microbiologique des viandes (Monin 2003, Savell et al. 2005, Kinsella et al. 2006).

Le refroidissement influe également sur les réactions biochimiques (glycolyse, chute de pH, activité enzymatique...) et physiques (perte en eau) qui ont lieu après l'abattage des porcs. Ces réactions ont un impact direct sur la qualité organoleptique et technologique des viandes (Springer et al. 2003).

La réglementation relative au refroidissement des carcasses de la première réglementation européenne de 1964 et la réglementation établie en 2006 stipulait un refroidissement à cœur à 7 °C dans les chambres froides avant le transport. Toutefois pour des raisons logistiques (livraison de viandes la plus fraîche possible aux ateliers de découpe, contrainte logistique de la filière), les professionnels en lien avec les instituts techniques ont conduit différentes études afin d'évaluer la conséquence d'une sortie des carcasses des salles de refroidissement à des températures supérieures à 7 °C à cœur. En France, les filières professionnelles et l'Institut de la filière porcine (IFIP) ont réalisé des campagnes de mesure permettant de caractériser la température en surface et au cœur des carcasses de porcs. Ces données ont été essentielles à l'évaluation des risques par les agences sanitaires (Afssa 2010, Anses 2014, Efsa 2014, Efsa 2016). Ces différentes évaluations ont permis de conclure qu'il était possible de déroger à la réglementation existante sans augmenter le niveau de risque des carcasses ainsi transportées.

Le règlement (CE) n°853/2004 a été modifié en conséquence par le règlement (UE) 2017/1981. Ce nouveau règlement européen indique les températures de surface et à cœur à respecter en fonction du temps de séjour des carcasses en chambre froide, la durée du transport et du nombre maximal de colonies aérobies dénombrées par jour (Table 0-1).

Toutefois, les conditions opérationnelles garantissant le respect de ces températures dans les différentes configurations de transports (nombre de carcasses, position dans le camion, typologie et durée de transport...) n'ont pas été prises en compte dans les études conduisant à l'apparition de ce nouveau règlement.

Table 0-1 : Récapitulatif du règlement (UE) 2017/1981 du 31 octobre 2017, modifiant l'annexe III du règlement 853/2004.

Pour une durée de transport maximale de six heures					
Espèce	Température de surface	Durée maximale de réfrigération pour atteindre la température de surface	Température de l'air maximale durant le transport		Nombre de colonies aérobies moyen journalier maximal
Animaux des espèces ovine et caprine	7 °C	8 heures	6 °C		$\log_{10} 3,5$ ufc/cm ²
Animaux de l'espèce bovine		20 heures			$\log_{10} 3,5$ ufc/cm ²
Animaux de l'espèce porcine		16 heures			$\log_{10} 4$ ufc/cm ²
Pour une durée de transport maximale de trente heures					
Espèce	Température de surface	Durée maximale de réfrigération pour atteindre la température de surface	Température à cœur	Température de l'air maximale durant le transport	Nombre de colonies aérobies moyen journalier maximal
Animaux de l'espèce porcine	7 °C	16 heures	15 °C	6 °C	$\log_{10} 4$ ufc/cm ²
Pour une durée de transport maximale de soixante heures					
Espèce	Température de surface	Durée maximale de réfrigération pour atteindre la température de surface	Température à cœur	Température de l'air maximale durant le transport	Nombre de colonies aérobies moyen journalier maximal
Animaux des espèces ovine et caprine	4 °C	12 heures	15 °C	3 °C	$\log_{10} 3$ ufc/cm ²
Animaux de l'espèce bovine		24 heures			

3. Objectif

Dans la filière viande, l'emploi du froid pour stabiliser la qualité sanitaire des carcasses après l'abattage est d'une grande importance. Cette étape a été réglementée par la loi qui exige un abaissement de la température en tout point de la carcasse jusqu'à 7 °C avant toute manutention de celle-ci. C'est pour cette raison que les scientifiques se sont intéressés à l'étude de cette première

étape de refroidissement en abattoir dans le but de réduire sa durée tout en assurant à la fois la qualité organoleptique et sanitaire. L'évolution du contexte réglementaire autorisant le transport de carcasses encore « tièdes » fait qu'il devenait crucial d'étudier également le refroidissement des carcasses dans les véhicules frigorifiques de point de vue des écoulements, des transferts de chaleur et de matière. Ainsi, les positions mal ventilées dans les véhicules susceptibles d'entraîner une température élevée des carcasses peuvent être identifiées et les répercussions sur le développement microbien peuvent être évaluées.

Au sein de l'unité de recherche génie des procédés frigorifiques d'Irstea-Antony (GPAN), des études concernant les véhicules frigorifiques (e.g. Moureh et al. 2009a, Hoang et al. 2012) ont été menées. Ces études portaient sur des véhicules vides ou chargés de palettes de produits de géométrie simple (orange et pomme). Récemment, une thèse (Duret 2014) a été soutenue au laboratoire combinant des modèles thermiques et microbiologiques dans la chaîne du froid des produits réfrigérés : camion frigorifique, chambre froide de magasin, meuble frigorifique de vente, transport par le consommateur après achat et réfrigérateur domestique.

En continuité des travaux précédents de l'équipe, l'objectif scientifique de la thèse est donc de caractériser expérimentalement les écoulements et les transferts ainsi que de coupler des modèles de transferts thermique et hydrique à des modèles microbiologiques pour prédire l'évolution de la température, de l'humidité et de la charge microbienne à la surface des carcasses de viande au cours du transport frigorifique.

D'un point de vue technologique, ce travail a pour but d'améliorer les aspects logistiques, économiques et énergétiques tout en respectant la qualité sanitaire des produits transportés. L'application principale porte sur la possibilité de transporter dans un véhicule frigorifique des carcasses de porc sortant de l'abattoir à une température plus élevée que celle posée par la réglementation actuelle. Ceci permettra de vérifier s'il est possible de réduire le temps de séjour des carcasses dans la chambre froide de l'abattoir et de poursuivre leur refroidissement dans le véhicule frigorifique sans exposer les consommateurs aux risques sanitaires.

4. Démarche

Pour bien comprendre l'approche scientifique utilisée dans ce projet, la Figure 0-2 présente l'organisation du mémoire de thèse.

Le travail de thèse a commencé par une étude bibliographique qui est résumée au début de ce mémoire. Dans un premier temps, un état de l'art des transports frigorifiques des carcasses de porc en France est présenté, puis, les différents aspects scientifiques en relation avec cette thèse sont détaillés (modélisation des écoulements et des transferts thermiques, la microbiologie prévisionnelle).

Le chapitre 2 présente la première partie des travaux expérimentaux réalisés sur la semi-remorque frigorifique chargée de carcasses de porc à l'échelle réduite dans des conditions bien maîtrisées. L'objectif de ces travaux était de comprendre les écoulements d'air autour des carcasses de porc et d'en déduire la circulation au sein du volume de ces carcasses. Pour cela, la LDV (Laser Doppler Velocimetry) a été utilisée pour mesurer la vitesse d'air au sein du camion. Ces mesures ont permis d'identifier les zones à faible vitesse d'air qui pourraient engendrer des zones où les carcasses peuvent présenter des risques sanitaires. Toutefois, la connaissance de la vitesse d'air seule ne permet pas de déterminer directement l'influence des conditions opératoires sur la température des produits, d'où l'importance de mesurer les coefficients de transfert convectif (CHTC).

Le chapitre 3 présente des mesures du coefficient de transfert convectif dans la semi-remorque chargée de carcasses de porc à l'échelle réduite. Il s'agit de mesures locales sur des demi-carcasses instrumentées placées à différentes positions dans le camion. Cette étude a montré que l'intensité des transferts varie de façon significative selon la position sur la carcasse (côté maigre/côté gras, jambon, côtes, épaule) et selon la position dans le véhicule. Ces mesures de coefficients de transfert convectif ont été utilisées dans le chapitre 4.

Le chapitre 4 présente un modèle numérique en 3D d'un jambon de porc afin de prédire le refroidissement de ce dernier dans différentes conditions opératoires rencontrées lors d'un transport. Le choix du jambon est lié au fait qu'il représente la partie de la carcasse de porc la plus difficile à refroidir compte-tenu de son grand volume. Différents scénarios ont été étudiés afin de

comparer le règlement 853/2004 (température des carcasses à 7 °C avant le transport) au règlement 2017/1981 du 31 octobre 2017 (transport des carcasses à une température de 15 °C à cœur et 7 °C en surface) modifiant les annexes du précédent. Ces scénarios ont été choisis en se basant sur des données de mesure sur site de température et d'humidité d'air au cours d'un transport frigorifique. De point de vue de la sécurité sanitaire, un couplage des modèles thermique et hydrique avec un modèle de microbiologie prévisionnelle validé expérimentalement, a permis de prédire la croissance de *Pseudomonas* à la surface du muscle du jambon.

Le chapitre 5 présente des mesures effectuées sur site. Une estimation de l'intensité des transferts convectifs a été réalisée en utilisant la cinétique de refroidissement des carcasses situées à différentes positions dans un véhicule. Les valeurs estimées sont en bon accord avec les mesures effectuées sur la maquette. Un modèle simplifié permet d'estimer la puissance frigorifique nécessaire pour qu'un véhicule frigorifique puisse transporter une proportion donnée de carcasses « tièdes ».

Les résultats de ces différentes parties ont fait l'objet de quatre articles (un publié, un soumis et deux à soumettre prochainement) qui constituent le cœur du mémoire de thèse (chapitres 2, 3, 4 et 5). Ces articles sont précédés d'une analyse bibliographique qui positionne le travail de thèse par rapport à l'état de l'art (chapitre 1). Une conclusion générale synthétise les principales avancées et enfin, quelques perspectives sont proposées (chapitre 6).

L'annexe regroupe cinq communications dont une porte sur une étude de simulation numérique en 3D des écoulements dans une semi-remorque frigorifique chargée de carcasses de porc (ICR 2019). Elle contient aussi un article qui sera prochainement publié dans une revue technique nationale (Revue générale du froid) portant sur le transport frigorifique des carcasses de porc en France et les enjeux liés aux changements de la réglementation Européenne.

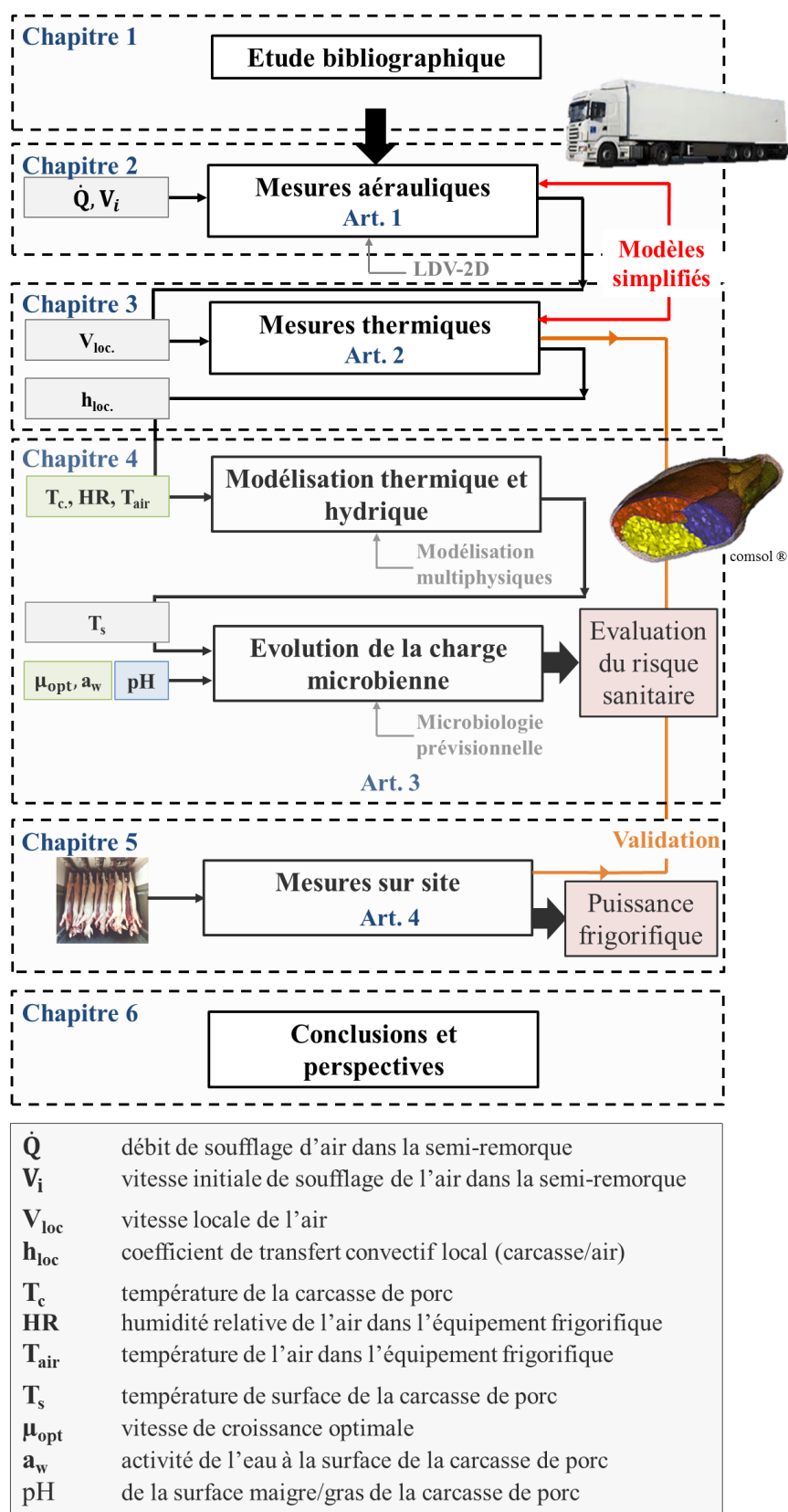


Figure 0-2: Organisation de la thèse

5. Valorisation de la thèse

Articles dans une revue internationale :

Article 1 :

Titre	<i>Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses</i>
Auteurs	Mouna Merai, Denis Flick, Laurent Guiller, Steven Duret, Onrawee Laguerre
Journal	International Journal of Refrigeration
Statu	Paru (v. 88, p. 337-346)

Article 2 :

Titre	<i>Experimental characterization of heat transfer inside a refrigerated trailer loaded with carcasses</i>
Auteurs	Mouna Merai, Denis Flick, Laurent Guiller, Steven Duret, Onrawee Laguerre
Journal	International Journal of Refrigeration
Statu	In revision

Article 3 :

Titre	<i>Modelling of temperature, water activity and microbial growth on the surface of a pork leg during refrigerated transportation</i>
Auteurs	Mouna Merai, Steven Duret, Laurent Guiller, Jason Sicard, Stéphane Portanguen, Pierre-Sylvain Mirade
Journal	Journal of Food Engineering
Statu	A soumettre en Septembre 2018

Article 4 :

Titre	<i>Experimental characterization and modelling of refrigeration of pork carcasses during transport in field conditions</i>
Auteurs	Mouna Merai, Steven Duret, Evelyne Derens, Alain Leroux, Denis Flick, Onrawee Laguerre
Journal	International Journal of Refrigeration
Statu	A soumettre en Septembre 2018

Article dans une revue technique :

Titre	<i>Le transport frigorifique des carcasses de porc en France, enjeux liés aux changements de la réglementation européenne</i>
Auteurs	Mouna Merai, Steven Duret, Onrawee Laguerre, Denis Flick, Nathalie Veauclin, Franck Bellaca, Brice Minvielle, Laurent Guillier
Revue	Revue Générale du Froid
Statu	A soumettre en Septembre 2018

Conférences internationales :

Conférence	International Conference of Refrigeration, 24 - 30 August 2019, Montréal
------------	--

Type de présentation	Orale
----------------------	-------

Titre	Experimental characterization and modelling of refrigeration of pork carcasses during transport in field conditions
-------	---

Auteurs	Mouna Merai, Steven Duret, Evelyne Derens, Alain Leroux, Denis Flick, Onrawee Laguerre
---------	--

Conférence	International Conference of Refrigeration, 24 - 30 August 2019, Montréal
------------	--

Type de présentation	Orale
----------------------	-------

Titre	Modelling the airflow inside a refrigerated semitrailer loaded with pork carcasses,
-------	---

Auteurs	Mouna Merai, Steven Duret, Evelyne Derens, Alain Leroux., Denis Flick., Onrawee Laguerre
---------	--

Conférence	FoodSim'2018, 8-12 Avril 2018, Leuven
------------	---------------------------------------

Type de présentation	Orale
----------------------	-------

Titre	Modelling of temperature, water activity and microbial growth on the surface of a pork leg during refrigerated transportation
-------	---

Auteurs	Mouna Merai
---------	-------------

Conférence	3 rd International conference on Food and Biosystems Engineering, 1-4 June, Rhodes, Greece
------------	---

Type de présentation	Orale
----------------------	-------

Titre	Characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses
-------	---

Auteurs	Mouna Merai., Denis Flick, Laurent Guiller, Onrawee Laguerre
---------	--

Conférences nationales :

Conférence	26 ^{ème} congrès français de thermique, 29 Mai au 1 Juin 2018, Pau
------------	---

Type de présentation	Poster
----------------------	--------

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

Auteurs	Mouna Merai., Onrawee Laguerre., Steven Duret, Laurent Guiller, Denis Flick
---------	---

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1. La chaîne du froid dans l'agroalimentaire

1.1. Généralités

L'utilisation du froid est une pratique courante qui permet d'assurer la conservation de la qualité nutritionnelle et sanitaire des aliments. Dans les pays développés, plus de la moitié des achats alimentaires est présentée à la vente sous régime du froid (Billiard and Viard 2002). En France par exemple, 45 % des aliments sont mis en vente sous régime du froid (Rosset et al. 2002) et 120 millions de tonnes de produits réfrigérés sont transportés chaque année (Guilpart and Leducq 2009). Le froid permet aussi bien le ralentissement des phénomènes d'altération que la multiplication des microorganismes dans les aliments, notamment les microorganismes pathogènes. Cette pratique est bénéfique pour tous les acteurs, du fabricant au consommateur final, dans la mesure où elle assure la conservation de la qualité des produits, tout en prolongeant la durée de leur conservation.

Pour une bonne maîtrise de la chaîne de froid, les premières règles à respecter sont (1) l'utilisation de produits sains, (2) l'application du froid le plus tôt possible et (3) le maintien du produit à la température recommandée tout au long de sa durée de vie, tout en limitant les fluctuations de cette dernière (Commère and Billiard 1999). Ces règles ont été définies par Alexandre Monvoisin (1928), sous le vocable de « trépied frigorifique de MONVOISIN » (Rosset et al. 2002). Toutefois, selon le type d'aliments, ces principes généraux peuvent être aménagés ou complétés par d'autres précautions.

Dans le cas de la viande et après l'abattage, une étape de maturation est nécessaire afin de permettre le développement des propriétés organoleptiques attendues par le consommateur. Au cours de cette étape, qui peut atteindre une semaine, un ensemble de réactions biochimiques et enzymatiques ont lieu et donnent à la viande sa tendreté, sa succulence et sa couleur rouge (Savell et al. 2005). Toutefois, il est indispensable de ralentir en même temps les réactions microbiologiques, qui peuvent altérer le produit ou encore le rendre insalubre. Pour cela, l'application du froid dans le cas de la viande est indispensable pour sa conservation. Dans le cas des carcasses de porc, l'application d'un froid intense (la température de l'air allant jusqu'à -8 °C) juste après l'abattage ne présente aucun effet indésirable sur les propriétés organoleptiques de la viande (Savell et al. 2005). Concernant les carcasses bovines et ovines, ces mêmes paramètres peuvent entraîner le durcissement irréversible de la viande ainsi que la

perte de la couleur rouge. Un froid plus modéré, aux alentours de 0°C, est appliqué pour ce type de carcasse (Savell et al. 2005).

Le maintien du produit à la température recommandée pendant toute la durée de vie du produit n'est pas facile à réaliser tout le long d'une chaîne logistique. En effet, des enquêtes menées sur différents produits réfrigérés à travers la chaîne de froid en France ont révélé des hétérogénéités de température dans les meubles frigorifiques de vente et les réfrigérateurs ménagers dans lesquels on observe des zones chaudes et des zones froides (Derens-Bertheau et al. 2015). Dans les premiers maillons de la chaîne, correspondant généralement à l'entreposage des produits dans des chambres froides et sous forme de palettes, les études ont montré que la température du produit évolue différemment en fonction de son emplacement dans la palette. Par exemple, une étude menée par Redier et al. (2009) sur le refroidissement des endives a montré que celles entreposées au cœur et dans la partie basse d'une palette atteignent la température souhaitée bien après celles situées en haut de la palette (après 2,5 heures et 1 heure respectivement). L'hétérogénéité des conditions de stockage d'un produit conduit à une variabilité de l'évolution de sa qualité et de son niveau de risque sanitaire (Commère and Billiard 1999). Ce phénomène peut être expliqué par le réchauffement de l'air à travers la palette et par la variation du coefficient d'échange de chaleur entre l'air et le produit (Alvarez and Flick 1999).

Ces hétérogénéités sont également observées au cours du transport frigorifique dues à la variation du transfert convectif dans les camions frigorifiques. Les zones froides se situent à proximité des groupes frigorifiques et les zones chaudes correspondent aux zones où l'air est moins renouvelé ou aux zones soumises à d'autres sources de chaleur souvent observées près de la porte (Moureh and Flick 2004, Chourasia and Goswami 2007). L'hétérogénéité des températures dans la plupart des équipements frigorifiques est directement liée aux écoulements d'air dans l'équipement (Smale et al. 2006). D'autres sources d'hétérogénéité de la température ont été aussi identifiées, comme la respiration des produits (Hoang et al. 2012), le rayonnement des parois chaudes (Amara et al. 2004) ou encore l'ouverture des portes (Hoang et al. 2012).

Au moment de la vente, les produits sont placés dans des meubles frigorifiques. Leurs températures varient en fonction de leurs positions et selon la conception du meuble. La température à l'arrière du meuble est généralement plus basse que celle à l'avant. Cette dernière est en effet soumise aux transferts de chaleur par convection due à l'infiltration de l'air ambiant du magasin et au rayonnement (Cortella 2007, Laguerre et al. 2012). L'emplacement du meuble frigorifique dans le magasin (en face d'un autre meuble ou non) peut aussi affecté la température des produits placés à l'avant (Laguerre et al. 2012).

L'enquête menée sous forme de questionnaire auprès de 116 consommateurs en Slovénie par Ovca et Jevšnik (2009) a montré que les consommateurs n'ont pas conscience de leur rôle et place la responsabilité sur les maillons situés en amont. Il a été estimé que plus de 44 % des consommateurs ne connaissent pas la température de conservation recommandée des denrées périssables (Jevšnik et al. 2008). Par ailleurs, une enquête en France a montré que 40 % des produits dans les réfrigérateurs domestiques ont une température > 6 °C, trop élevée pour garantir la sécurité des aliments (Derens et al. 2001).

1.2. Filière viande

La température des carcasses de porc après l'étape d'abattage est de 38-40 °C à cœur et environ 30 °C à la surface. Après environ 1 à 2 heures, ces valeurs atteignent un maximum avec une augmentation de 3 °C due aux activités métaboliques post mortem (Coulter et al. 1995). L'application des procédés frigorifiques pour le refroidissement des carcasses à cette étape a donc pour objectifs d'assurer la sécurité sanitaire, l'optimisation de la durée de conservation et la réduction de la perte de poids tout en gardant la tendreté et la couleur du produit fini.

Les coûts associés à la réfrigération ont un impact significatif sur le prix du produit fini (Létang and Frencia 2008). En outre, la variabilité biologique inévitable au sein des produits (carcasses) et la variabilité des conditions de la chaîne du froid (flux d'air, température, débit de chargement, durée de livraison, fréquence d'ouverture des portes...), rendent la gestion de cette phase encore plus complexe (Dabbene et al. 2008a, Dabbene et al. 2008b). Ainsi, il est d'une grande importance de bien comprendre et d'analyser les procédés de réfrigération et de distribution afin d'assurer la qualité des produits.

A l'échelle industrielle, la technique la plus utilisée pour réduire les temps de réfrigération et diminuer les pertes de poids est le refroidissement rapide. Il s'agit de diminuer rapidement la température de l'air de refroidissement en dessous de 0 °C pour abaisser le plus vite possible la température de la surface des carcasses. La cinétique d'abaissement de température dépend de l'intensité d'échanges thermiques et de l'évaporation d'eau en surface du produit (Kuitche et al. 1995). Une autre technique moins utilisée est la pulvérisation des carcasses avec de l'eau par intermittence (Létang 1990, Savell et al., 2005). Dans ce cas, la maîtrise du flux d'eau évaporée est essentielle pour optimiser la fréquence des pulvérisations.

En plus de la température de l'air, l'épaisseur du gras joue un rôle important dans la vitesse de refroidissement et la perte de poids des carcasses. La présence de gras sous cutané permet la diminution des échanges thermique et hydrique, d'où l'allongement du temps de

refroidissement. Néanmoins, cette limitation des échanges favorise l'activité enzymatique et donc améliore la tendreté de la viande (Savell et al. 2005). Pour la viande maigre, les échanges thermique et hydrique sont plus importants d'où une perte d'eau plus accentuée. Cette perte peut atteindre 2 % du poids initial (carcasse chaude) après 24 heures de refroidissement mais diminue toutefois au cours du temps (sur une durée totale de 72 heures de refroidissement, 92 % du poids est perdu dans les premières 36 heures) (Savell et al. 2005).

La réglementation européenne exige une température à cœur de 7 °C dans les carcasses avant toute manutention et avant de les sortir des cellules de refroidissement. Ainsi, la phase de transport n'est pas sensée abaisser la température des carcasses mais la maintenir constante au cours du déplacement. Toutefois, certains pays européens, comme l'Italie, ont des lois nationales (DL n°286/1994) stipulant que les carcasses peuvent être transportées avant d'atteindre la température de 7 °C pour des déplacements de courtes distances (Kuffi et al. 2013).

La température à cœur n'est pas forcément le meilleur critère de suivi pour définir les temps de réfrigération des carcasses de viande. Il est donc plus judicieux d'optimiser la durée du refroidissement intense et atteindre la température recommandée suite à l'équilibre thermique (Kuitche et al. 1995).

2. Etat de l'art des transports frigorifiques des carcasses de porc en France

Sur la base d'une étude conduite par la filière en 2013 et d'une enquête réalisée à Rungis en 2016, un état de lieux du transport frigorifique des carcasses de porc a pu être dressé.

2.1. Répartition géographique

Les abattoirs de porc en France métropolitaine sont principalement localisés dans le nord-ouest (Figure 1-1). D'après une étude réalisée par le SNIV (Syndicat National des Industriels de Viande) en 2013, 79 % des abattoirs de porc recensés sont situés en Bretagne, contre 10,1 % dans les Pays de la Loire, 7,5 % en Occitanie et 3,2 % en Normandie.

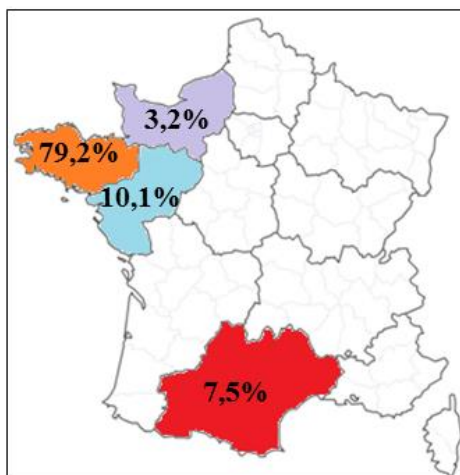


Figure 1-1 : Répartition géographique des abattoirs de porc en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports).

Cette enquête a montré que la Normandie fournit des demi-carcasses de porc uniquement à l'île de France. Quant à l'Occitanie, elle fournit un mélange de demi-carcasses et des pièces de découpe à la Nouvelle Aquitaine (Figure 1-2).

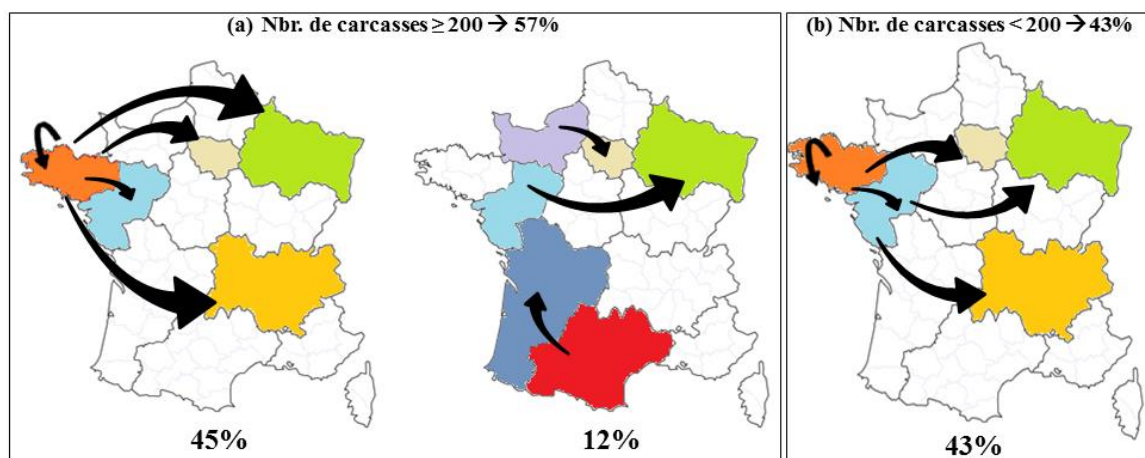


Figure 1-2: Répartition géographique des transports de carcasses de porc en France. (a) transports de plus de 200 carcasses et (b) transports de moins de 200 carcasses (données du SNIV SNCP 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).

La majorité des transports contiennent plus de 200 carcasses de porc (57 %). Parmi ces transports 45 % partent de la région de Bretagne à destination des régions Ile-de-France, Pays de la Loire, Grand Est et Auvergne-Rhône-Alpes, et 12 % partent des régions Normandie, Pays de la Loire et Occitanie (Figure 1-2a). Les transports avec un chargement inférieur à 200 carcasses de porc présentent 43 % des transports totaux. Ils peuvent correspondre à des transports de produits mixtes (demi-carcasses de porc transportées avec des pièces de découpe)

ou à des transports dans des petits camions frigorifiques. L'ensemble des transports avec un chargement inférieur à 200 carcasses partent des régions Bretagne et Pays de la Loire (Figure 1-2b).

2.2. Durée des transports

Avec des abattoirs localisés majoritairement dans le nord-ouest du territoire, la durée de transport varie en fonction de la destination de la viande transportée. Dans 27 % des cas, les ateliers de découpe sont localisés dans la région Pays de la Loire, ce qui correspond à une durée de transport de 6 heures en moyenne. Toutefois, en pratique, la durée de transport est beaucoup plus longue et peut atteindre 16 heures ou plus. Ceci est principalement lié à l'attente des camions frigorifiques en quai de réception. A cette attente s'ajoute les weekends et les jours fériés qui peuvent prolonger la durée du transport jusqu'à 60 heures. La distribution des durées de transport est présentée dans la Figure 1-3.

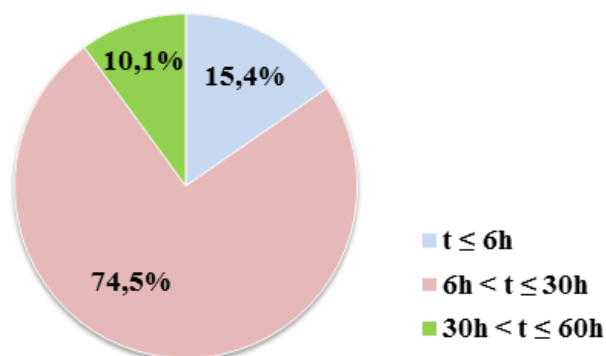


Figure 1-3: Répartition de la durée de transport des carcasses en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).

Dans la majorité des cas, 74,5 % la durée des transports est comprise entre 6 et 30 heures. Ceci prend en compte les transports de courte durée (~6 heures) comme entre la Bretagne et le Pays de la Loire, ceux de durée moyenne (~9 heures) entre la Bretagne et l'île de France et les imprévus liés aux weekends et jours fériés. Les transports de très courte durée (< 6 heures), principalement des transports vers des abattoirs de la même région, sont assez fréquents et représentent 15,4 % des transports.

Les transports de très longue durée existent aussi, ils représentent 10,1 % des transports et concernent généralement des transports entre les régions de l'ouest et de l'est.

2.3. Caractérisation des températures pendant le transport des abattoirs vers les ateliers de découpe

En ce qui concerne le suivi de l'évolution de la température des carcasses au cours du transport frigorifique, les carcasses ont été chargées avec des températures à cœur supérieures à 7 °C (< 15 °C) mais qui correspondent aux pratiques autorisées par la DGAL. L'enquête réalisée sur un nombre total de 6352 carcasses réparties dans 881 camions et placées par des lots de 3 demi-carcasses placées dans le premier 1/3, au milieu et à l'arrière du chargement. Les moyennes globales des températures à cœur du jambon et des températures à la surface de l'épaule sont montrées dans la Table 1-1. Il est important de noter que les valeurs moyennes globales des températures ne tiennent pas compte de la durée des transports, du nombre total de carcasses et de la typologie de chargement.

Pour des températures à cœur du jambon de $11,3 \pm 2,9$ °C au moment du chargement des carcasses, un abaissement de 5,8 °C a pu être observé à la fin du transport avec une température moyenne de $5,7 \pm 2,5$ °C.

Table 1-1 : Récapitulatif des valeurs moyennes des températures au moment du chargement et déchargement des carcasses de porc (SNIV-SNCP 2013).

	Cœur jambon		Surface poitrine	
	Chargement	Déchargement	Chargement	Déchargement
Nombre de camions	881	407	881	407
Température moyenne (°C)	11,3	5,7	4,4	3,9
Ecart-moyen	2,9	1,8	2,3	1,4

La même tendance a été observée au niveau de la température de surface mesurée au niveau de la poitrine (Tableau 2). Toutefois, cette diminution de température reste difficile à interpréter vu le manque d'informations relatives à la durée de transport, la typologie de chargement, le nombre total de carcasses par camion ainsi que le type de camion (capacité frigorifique du camion et type de soufflage d'air).

2.4. Chargement et typologie de transport

Pour garantir la qualité sanitaire des carcasses, les camions frigorifiques soufflent de l'air à une température inférieure à 6 °C pour maintenir les produits transportés à une température

constante. Dans le cas des transports de plus de 200 carcasses de porc, les industriels font appel à des camions frigorifiques de type semi-remorque. Avec une longueur de 13,3 m, ils peuvent contenir jusqu'à 250 carcasses. Toutefois, l'inconvénient majeur de ce type de camion est l'hétérogénéité des écoulements d'air et donc de la température. En effet, des études ont montré que la deuxième moitié d'une semi-remorque (près des portes) est souvent mal ventilée et des zones d'air stagnant peuvent y exister (Zertal-Ménia 2001, Tapsoba et al. 2006, Merai et al. 2018). Ceci peut induire un réchauffement des carcasses au cours du transport et avoir des conséquences sur leur qualité sanitaire. Afin de remédier à cette problématique, différents dispositifs de distribution d'air ont été proposés (Figure 1-4: Exemples de conduits d'air dans les semi-remorques frigorifiques destinés au transport des carcasses de viande.).

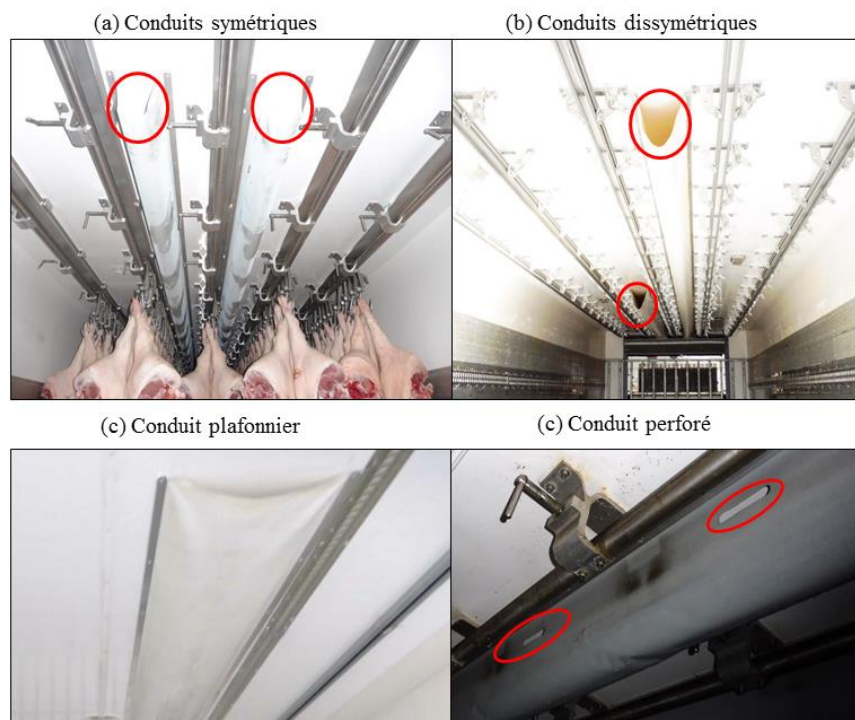


Figure 1-4: Exemples de conduits d'air dans les semi-remorques frigorifiques destinés au transport des carcasses de viande.

Les conduites de distribution d'air sont des gaines qui ont pour objectif d'amener l'air soufflé de l'avant du camion (côté chauffeur) jusqu'à l'arrière du camion (côté portes). On peut avoir une, deux ou trois gaines par camion. Elles peuvent avoir différentes longueurs (3, 6, 9 et 11 m), être symétriques ou dissymétriques, être situées ou non au plafond, perforées ou non.

Des études réalisées par l'unité de recherche Génie des Procédés Frigorifiques d'Irstea (ex-CEMAGREF), ont montré l'efficacité de ces gaines de distribution dans l'amélioration de la

circulation d'air au fond du camion pour des camions chargés de palettes (Moureh and Flick 2004).

Les transports sont généralement réalisés dans des camions frigorifiques spécialement conçus pour des carcasses de viande. Ils disposent de rails (5 rails en général) et de dispositifs d'accrochage des carcasses afin de suspendre les carcasses et de faciliter la manutention lors du chargement dans le camion avant le transport et de leur déchargement sur le quai après le transport. L'accrochage des carcasses se fait de deux manières différentes : en crochet ou en tinet (Figure 5). Le type du système d'accrochage utilisé dépend de l'abattoir.

Pour le système des crochets, chaque demi-carcasse est placée sur un crochet, puis le côté couenne est placé contre le côté muscle de la demi carcasse voisine (Figure 1-5). Ceci est fait dans le but d'éviter le contact entre les muscles de deux demi-carcasses et le risque potentiel de contaminations. Dans cette configuration, les carcasses sont placées presque en quinconce, l'espace créé permettra le passage d'air entre des carcasses et leur refroidissement potentiel.

(a) Système de suspension par des crochets



(b) Système de suspension par des tinets



Figure 1-5: Exemples de chargements des demi-carcasses de porc dans les semi-remorques frigorifiques.

Sur les tinets, les deux demi-carcasses provenant d'une même carcasse sont accrochées muscle contre muscle ou couenne contre couenne. Dans cette configuration, un espace vide est créé, soit entre les deux demi-carcasses sur le même crochet, soit entre les deux carcasses placées sur deux crochets côte à côte. Cet espace, bien que très petit, permettra la circulation de l'air et empêchera le réchauffement des carcasses au cours du transport. Souvent pour ce type de suspension, le rail au milieu du camion reste vide afin d'améliorer la circulation de l'air entre les carcasses.

3. Écoulements et transferts (chaleur/matière) au niveau des carcasses de viande

Dans les équipements frigorifiques, la chaleur est transférée principalement par convection, par conséquent, la distribution de la température ainsi que son homogénéité sont directement liées à l'écoulement de l'air (Smale et al. 2006).

En fonction du refroidissement et des caractéristiques de la carcasse, le temps de refroidissement peut aller de 15 à 20 heures pour les carcasses de porc et de 20 à 40 heures pour les carcasses de bœuf. Afin de prédire les cinétiques de refroidissement, les chercheurs ont eu recours à des méthodes expérimentales, analytiques et de modélisation (Table 1-2). Comparé à l'expérimentation et la résolution analytique, la modélisation numérique permet une résolution rapide et fiable des équations de Navier Stokes gouvernant les écoulements d'air. En outre, les hypothèses, les généralisations et les approximations associées aux modèles analytiques affectent souvent la résolution des équations (Norton and Sun 2006). Parmi les méthodes de modélisation, la CFD (Computational Fluid Dynamics) est très largement utilisée pour résoudre les problèmes d'écoulement de fluides rencontrés dans les industries alimentaires tels que le mélange, le séchage, la stérilisation, le refroidissement et le stockage (Wang and Sun 2003). De plus, avec des fonctionnalités telles que le maillage non structuré et adaptatif, les couches limites et les différents modèles physiques, la résolution de nombreux problèmes d'écoulements est désormais possible (Fluent 2000). La CFD a été utilisée dans la prédiction des écoulements d'air dans différents équipements frigorifiques tels que les chambres froides, les camions de transport et les meubles frigorifiques de vente. De nombreuses études se sont focalisées sur l'estimation de l'efficacité thermique et de la distribution de l'air dans les chambres froides vides ou chargées avec des denrées alimentaires (Hoang et al. 2000, Foster et al. 2002, Mirade et al. 2002, Nahor et al. 2001, Sajadiye et al. 2012, Kuffi et al. 2016, Hoang et al. 2015, Kolodziejczyk et al. 2016, Gruyters et al. 2018). Ces études ont été pour la plupart

validées expérimentalement, d'où la possibilité de réaliser des études paramétriques permettant d'apprécier l'effet de modification des paramètres opératoires et leur impact sur l'efficacité thermique des enceintes réfrigérées étudiées. La même méthode a été utilisée dans le cas des camions frigorifiques dans le but d'évaluer leurs efficacités thermiques ainsi que la distribution de l'air dans le cas des enceintes vides et chargées (Zertal-Ménia et al. 2002, Tapsoba et al. 2007a, 2007b, Moureh et al. 2009a, 2009b).

La modélisation dans le domaine de l'agroalimentaire est complexe à cause de la forme des produits et leur composition hétérogène. De plus, le refroidissement des produits riches en eau implique un couplage entre les transferts de chaleur et de matière. L'évaporation de l'eau à la surface des carcasses modifie sensiblement l'évolution thermique des produits. La perte de poids due à l'évaporation de l'eau dans le cas des carcasses chaudes de bœuf par exemple, est de 1,5 % à 2,3 % du poids total (Gigiel and Collett 1989).

Pour une carcasse de viande, la composition hétérogène (muscle, os, gras) entraîne des différences des propriétés thermo-physiques. La caractérisation d'une carcasse par un paramètre global n'est donc pas appropriée. En effet, des études ont montré que l'épaisseur du gras de couverture influence nettement le temps de réfrigération. Schneider et al. (1982) et James and Swan (1983) ont pu montrer qu'une couche de 1 cm de gras recouvrant une plaque de 16 cm de muscle de bœuf, allonge le temps de refroidissement d'environ 30 %, lorsque le transfert interne est limitant.

Les coefficients de transfert de chaleur et de matière dépendent très fortement de la position de produit dans l'équipement, ce qui entraîne des différences locales de température et en activité d'eau. Ces différences peuvent générer des zones plus chaudes et plus humides où une croissance bactérienne pourrait avoir lieu (Pham et al. 2009). Kondjoyan and Daudin (1993) ont modélisé une carcasse de viande par un cylindre et ont démontré que les valeurs des coefficients de transfert de chaleur par convection déviaient de ± 40 % de la valeur moyenne. D'autres travaux menés sur un quartier entier de porc ont montré que les valeurs des coefficients de transfert de chaleur varient selon la position de mesure sur la surface (Kondjoyan and Daudin 1997).

La variation des coefficients de transfert dépend du type des installations. La vitesse de l'air, et donc le coefficient de transfert, dépend de l'emplacement des ventilateurs, ou des bouches de soufflage d'air et du chargement des carcasses sur les rails (Schneider et al. 1982). La température de l'air fortement dépendante aux infiltrations d'air extérieur et à la charge thermique à évacuer influe aussi sur le processus de refroidissement.

Table 1-2 : Liste des travaux réalisés sur la modélisation des transferts thermique et hydrique et des écoulements dans une chambre froide chargée de carcasses de bœuf et de porc.

Références	Produit étudié	Mesures	Géométrie étudiée dans le modèle	Outil numérique	Equations	Remarques
Kuitche et al. (1995) Daudin and Kuitche (1996)	Cartier arrière d'une carcasse de porc	T_c, T_i, m_c	Cylindre infini	Analytique	1D conduction	Prise en compte des variabilités dans la chambre de refroidissement : T_{air} et HR_{air}
Mallikarjunan and Mittal (1994)	½ carcasse de bœuf	$V_{air}, T_{air},$ HR_{air} T_s, T_c, m_c	5 coupes transversales en 2D	2D éléments finis (fortran)	2D conduction avec génération de chaleur interne 2D transfert de matière	Coefficients de transfert obtenus par corrélation empirique pour une plaque verticale
Davey and Pham (1997) Davey and Pham (2000)	Carcasse de bœuf	Flux de chaleur, $V_{air}, T_{air},$ HR_{air}	Combinaison de plaques et cylindres infinis Coupes transversales en 2D	Différences finies 2D éléments finis	2D conduction	Prise en compte du gras pour les transferts de chaleur

Mirade and Picgirard (2001)	½ carcasses de bœuf	V_{air}	2D	CFD (fluent)	Écoulement turbulent	Chambres froides industrielles chargées en carcasses
Trujillo and Pham (2006) Trujillo and Pham (2007)	½ carcasse de bœuf	Flux de chaleur, T_s , T_c , m_c , a_w^2	Reconstruction 3D à partir de coupes transversales en 2D	CFD (fluent)	3D/2D transfert de chaleur 1D transfert de matière Écoulement turbulent	Protocole de simulation sur 3 étapes (Hu and Sun 2000) Coefficients de transfert locaux constants Prise en compte du changement de l' a_w à la surface RNG-k- ϵ
Pham et al. (2009)	½ carcasse de bœuf	T_s , a_w^1 V_{air} , T_{air} , HR_{air}	Reconstruction 3D à partir de coupes transversales en 2D	3D-CFD (fluent) 2D-elements finis	3D/2D transfert de chaleur 1D transfert de matière Ecoulement turbulent	Coefficients de transfert locaux calculés par une régression obtenue par CFD Prise en compte du gras Pas d'évaporation dans les zones couvertes de gras RNG-k- ϵ

Kuffi et al. (2013)	Carcasse de bœuf	T_c $V_{air}, T_{air},$ HR_{air}	Reconstruction 3D par un scanner laser	CFD (ANSYS)	3D transfert de chaleur et de matière Ecoulement turbulent	Essais sur 4 carcasses Pas d'effet de la direction du flux d'air sur la cinétique de refroidissement RANS-k- ω
------------------------	---------------------	--	--	-------------	--	---

¹L'activité de l'eau a été mesurée sur des prélèvements de viande de la surface de la carcasse d'une épaisseur de 1-2 mm avec un appareil de mesure de l'activité de l'eau (Aqualab Series 3).

²L'activité de l'eau à la surface de la carcasse est calculée par l'équation de Lewicki: $X_m = \frac{0.0488}{(1-a_w)^{0.8761}} - \frac{0.0488}{1+a_w^{-34.7794}}$ où X_m la fraction massique de l'eau à la surface de la carcasse [g d'eau/g matière sèche].

4. Écoulements et transferts dans les véhicules frigorifiques

Les travaux de recherche sur l'aérodynamique dans les véhicules frigorifiques sont peu nombreux. Ces travaux expérimentaux ou de modélisation ont été réalisés dans le but de caractériser les écoulements d'air dans ce type d'équipement frigorifique et de prédire l'évolution de la température des produits lors du transport. Les premiers travaux de Gögüs et Yavuzkurt en 1974, ont permis de mesurer la température de l'air autour d'un chargement conditionné dans des cartons et placés sur un caillebotis dans une semi-remorque équipée de deux gaines de distribution d'air à $\frac{3}{4}$ de la longueur total du chargement. Cette étude a montré que la distribution de l'air n'était pas homogène au sein de la semi-remorque étudiée. Les auteurs ont proposé des solutions pour améliorer la circulation de l'air dans ce type de camion avec cette typologie de chargement. Il s'agissait d'ajouter une ouverture au milieu de la gaine et d'augmenter la hauteur des caillebotis. Des constats similaires ont été mis en évidence par LeBlanc et al. (1994) et Savoie et al. (1996) qui ont étudié la même configuration pour le transport des produits surgelés.

De ce fait, des études supplémentaires ont été conduites pour optimiser le système de distribution d'air notamment en France. Parmi ces études, Bennahmias et Labonne (1993) ont mesuré la température de l'air autour de produits rangés sur des palettes dans une semi-remorque. Ces mesures ont été réalisées à différents niveaux dans le chargement et ont permis d'identifier les zones de température élevée où l'air est stagnant. Des solutions techniques ont été proposées pour améliorer la circulation de l'air au sein du chargement. Les mêmes auteurs ont étudié l'effet des conduits de distribution d'air sur le profil de vitesse et de température de l'air au sein d'un véhicule frigorifique (Bennahmias et Labonne 1991).

Toutes ces études expérimentales dans les semi-remorques frigorifiques ont été réalisées dans des conditions réelles de chargement et ont nécessité un investissement important pour ce qui est du matériel de mesure. En tenant compte de ces difficultés de mesures en conditions réelles, des études similaires ont été réalisées sur une maquette de semi-remorque à l'échelle réduite (Zertal-Ménia 2001, Tapsoba 2005). Ces auteurs ont étudié l'aérodynamique dans la maquette vide ou chargée d'obstacles représentant les palettes de produits mais sans échange thermique avec l'air. Les mêmes auteurs ont réalisé une étude à échelle réelle et des résultats similaires ont été obtenus quant à l'hétérogénéité des écoulements d'air autour et au sein du chargement. L'amélioration de ce phénomène grâce à l'utilisation des gaines de distribution d'air a été proposée.

4.1. Modélisation des écoulements et des transferts

Une bonne compréhension des transferts de chaleur et de matière lors du refroidissement des carcasses de viande contribue à l'optimisation du procédé tout en garantissant la qualité (sanitaire et technologique) de la viande et en réduisant les pertes d'énergie (Mirade and Picgirard 2001). Différents phénomènes physiques interviennent lors du refroidissement : transferts de chaleur et de matière, écoulements d'air. Au cours du refroidissement, l'exposition de la surface des carcasses à un flux d'air froid implique le développement d'une couche limite autour de la carcasse où s'effectue le transfert de chaleur par convection. La réduction de la température de la surface entraîne une diffusion thermique au sein du produit, du cœur vers la surface. Ainsi, la température de la surface est déterminée par l'équilibre entre la chaleur prélevée de la surface par l'air froid et celle qui diffuse à la surface de l'intérieur de la carcasse.

Au début du refroidissement, la surface de la carcasse est humide et sa température est supérieure à celle de l'air. Par conséquent, un transfert d'eau de la carcasse à l'air se produit par évaporation, dont le flux est proportionnel à la différence de concentration d'humidité entre la surface et l'air. À l'instar du transfert de chaleur, l'eau évaporée de la surface provoque la diffusion de l'eau du cœur du produit vers la surface (Cepeda et al. 2013). L'équilibre entre l'eau évaporée de la surface et la diffusion de la surface à l'intérieur de la carcasse détermine l'activité de l'eau de surface (Trujillo and Pham 2006).

Les transferts de chaleur et de masse en surface dépendent du champ d'écoulement de l'air autour des carcasses, lequel dépend de la forme et de la dimension de la carcasse, de la vitesse de l'air en amont, de la rugosité de surface du produit et de la configuration (par exemple, disposition de la carcasse par rapport au flux d'air et position de carcasse dans la chambre froide). En effet, au soufflage de l'air d'un équipement frigorifique, la vitesse de l'air est la plus élevée et est associée à une forte intensité de turbulence (Kondjoyan and Daudin 1997). Dans d'autres positions dans l'équipement, l'air peut être relativement stagnant (c'est-à-dire que sa vitesse et sa fluctuation sont très faibles). Cette hétérogénéité des conditions d'écoulement dans les chambres froides peut créer des variations de la vitesse de l'air comprises entre 0,5 et 5,0 m.s⁻¹, alors que l'intensité de la turbulence avoisine 40% (Kondjoyan and Daudin 1997, Kondjoyan and Daudin 1993). Cela signifie que les carcasses situées à différents endroits dans la chambre froide peuvent avoir des taux de refroidissement différents.

Pour une carcasse placée dans une enceinte réfrigérée, un ensemble d'équations de transport doivent être résolues. Chacune de ces équations peut être écrite sous la forme suivante :

Accumulation + Convection = Diffusion + Création/Destruction

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{v}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (1)$$

où ϕ peut être égale à : (1) dans l'équation de continuité, la vitesse (\vec{v}) dans l'équation de quantité de mouvement, l'énergie cinétique turbulente (k), et le taux de dissipation turbulent (ε) dans les équations de transport de la turbulence (k - ε), la température (T) dans l'équation de transfert de chaleur ou la concentration en vapeur d'eau dans l'air dans l'équation de transfert de matière. Les profils d'écoulement d'air sont calculés à partir des équations de continuité, de la quantité de mouvement, de l'énergie turbulente (k) et du taux de dissipation turbulent (ε). Ces équations sont couplées aux équations correspondantes aux transferts de chaleur et de matière si la convection naturelle n'est pas négligeable.

4.2. Equations de transfert dans les carcasses

Dans la carcasse, seules les équations de transfert de chaleur et de matière doivent être résolues.

Pour le transfert de chaleur, l'équation a la forme suivante :

$$c_{p,m} \frac{\partial (\rho_m T)}{\partial t} = \nabla (k_m \nabla T) \quad (2)$$

où ρ_m , $c_{p,m}$ et k_m correspondent respectivement à la masse volumique, la capacité thermique et la conductivité thermique dans la viande.

En ce qui concerne l'équation de transfert de matière, elle a la forme suivante :

$$\frac{\partial (\rho_m Y_m)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_m D_m \nabla Y_m) \quad (3)$$

où Y_m est la fraction massique d'eau contenue dans la viande et D_m la diffusivité de l'eau.

Dans la majorité des cas, la résolution des équations est réalisée sur un seul côté de la carcasse de bœuf puisque l'hypothèse de symétrie est prise en compte. Par ailleurs, Davey and Pham (1997) et Trujillo and Pham (2006) se sont focalisées sur le calcul de la conduction dans une demi-carcasse de bœuf en régime transitoire en prenant en compte l'hétérogénéité des propriétés thermiques, i.e. la présence des os, du gras et des muscles. Concernant le calcul de la diffusion de l'eau à travers la viande, Trujillo et al. (2007) ont proposé une équation (Eq. 4) qui a été formulée en ajustant un modèle mathématique à des données expérimentales de séchage d'une viande maigre de bœuf.

$$D_m = 4.67 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{-3757.26}{T}\right) \quad (4)$$

où D_m est en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et T en K.

4.3. Conditions aux limites

A l'interface air-carcasse, une condition limite thermique particulière doit être imposée de façon à calculer la densité de flux de chaleur à la surface de la carcasse, en prenant en compte les phénomènes de convection thermique et d'évaporation de l'eau. Cette condition limite peut être traduite comme suit :

$$q = h(T_{\text{air}} - T_{\text{surface}}) + \varphi_{\text{eau}} \cdot L_v \quad (5)$$

Dans cette équation h correspond au coefficient de transfert de chaleur convectif. Cette valeur peut être déterminée expérimentalement ou numériquement. De plus, elle peut être globale ou locale (Kondjoyan 2006). Le terme L_v correspond à la chaleur latente de vaporisation de l'eau et φ_{eau} correspond à la densité de flux d'eau qui s'évapore de la surface de la carcasse. Cette grandeur est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi_{\text{eau}} = k \left(a_{w,\text{surface}} P_{\text{sat},T_{\text{surface}}} - \frac{HR_{\text{air}}}{100} P_{\text{sat},T_{\text{air}}} \right) \quad (6)$$

Dans cette équation, k est le coefficient de transfert d'eau qui peut être calculé à partir du coefficient de transfert de chaleur convectif h grâce à une relation donnée par Kondjoyan and Daudin (1997) :

$$k = \frac{h M_{\text{eau}}}{c_{p,\text{air}} P_{\text{atm}} M_{\text{air}} Le^{2/3}} \quad (7)$$

avec Le est le nombre de Lewis qui vaut 0,777 pour l'air.

5. Evolution de la qualité des aliments dans une enceinte réfrigérée

5.1. Généralités

Les études de suivi de la qualité des produits alimentaires au cours de la chaîne du froid sont souvent effectuées en laboratoire, et dans la plupart des cas, elles consistent à exposer le produit à une température ambiante constante. La qualité d'un produit alimentaire peut désigner la qualité physicochimique, organoleptique ou sanitaire (microbiologique). De nombreux modèles cinétiques ont été développés pour étudier l'évolution de la qualité de divers types de produits alimentaires. Par exemple pour étudier la croissance de bactéries pathogènes (Ratkowsky et al. 1983, Cornu et

al. 2006, Mejlholm et al. 2010, Stahl et al. 2012) ou d'altération (Koutsoumanis and Nychas 2000, Koutsoumanis et al. 2000) dans les aliments, la fermeté ou la couleur des pommes (Gwanpua et al. 2012, Gwanpua et al. 2014), la vitamine C dans les végétaux (Giannakourou and Taoukis 2003, Gonçalves et al. 2011, Dermesonluoglu et al. 2012), la croissance des cristaux dans la crème glacée (Ben-Yoseph and Hartel 1998, Dermesonluoglu et al. 2012, Ndoye and Alvarez 2015). Dans cette thèse, nous nous intéressons à la croissance microbienne à la surface de la carcasse de viande. Les évaluations des agences sanitaires ont montré que la modélisation des flores pathogènes (*Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Yersinia enterocolitica*) et d'altération (*Pseudomonas*, flores lactiques) permettaient d'évaluer différents scénarios de refroidissement. Les niveaux d'accroissement sont différents entre les flores, mais les comparaisons de scénarios de refroidissement sont toujours concordantes pour les différentes flores microbiennes (Anses 2014, Efsa 2014, Efsa 2016)

5.2. Microbiologie prévisionnelle

La microbiologie prévisionnelle a pour but de prédire l'évolution des microorganismes dans les aliments par des modèles mathématiques. Elle est basée sur l'hypothèse que les réponses de populations de microorganismes à des conditions environnementales identiques sont reproductibles. Il est donc possible, à partir d'observations disponibles sur la croissance, la survie ou l'inactivation des bactéries en fonction des facteurs environnementaux, de prédire les réponses des microorganismes sous d'autres conditions, en suivant les facteurs environnementaux plutôt qu'en réalisant des analyses microbiologiques lourdes et coûteuses (Delhalle et al. 2012).

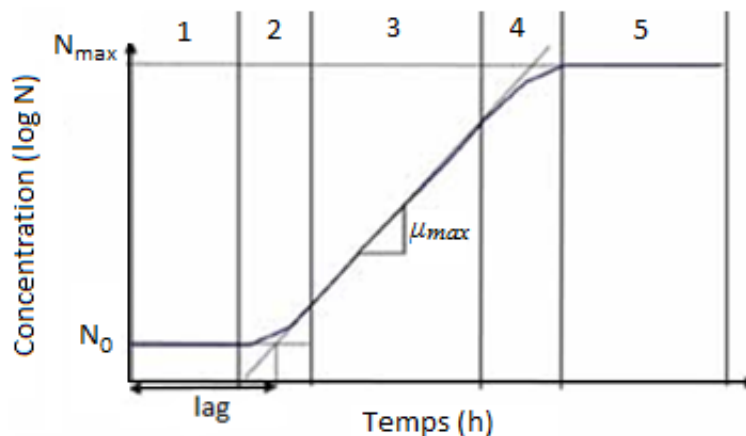


Figure 1-6: Courbe de la croissance d'une culture bactérienne avec ses différentes phases (Delhalle et al. 2012).

La croissance d'une culture bactérienne se fait, généralement, selon les phases suivantes (Figure 1-6) :

1. la phase de latence (*lag*) : cette phase correspond à l'adaptation de l'inoculum (N_0) à son nouvel environnement. Durant cette période, la vitesse de croissance est nulle ($\mu = 0$),
2. la phase d'accélération : les bactéries commencent à se multiplier pour atteindre progressivement la vitesse maximale de croissance (μ_{max}) ($0 < \mu < \mu_{max}$),
3. la phase exponentielle : la vitesse de croissance des bactéries est maximale ($\mu = \mu_{max}$),
4. la phase de décélération : la vitesse de croissance devient progressivement nulle ($\mu_{max} > \mu > 0$),
5. la phase stationnaire : la vitesse de croissance est nulle ($\mu = 0$) et la culture atteint sa densité maximale ($N = N_{max}$) avec, parfois, une phase ultérieure de décroissance de la population.

Afin de modéliser le comportement des microorganismes des modèles primaires, secondaires et tertiaires existent dans la littérature. Les modèles primaires permettent de prédire l'évolution de la population microbienne au cours du temps dans des conditions environnementales données. Pour décrire l'influence de ces facteurs environnementaux, les modèles secondaires sont utilisés. Enfin, des systèmes experts sont disponibles pour faire le lien entre les modèles primaires et secondaires. Il s'agit des modèles tertiaires (Whiting and Buchanan 1993).

5.2.1. Les modèles primaires

En 1993, Buchanan a décrit le premier modèle primaire de croissance en microbiologie prévisionnelle. Il s'agit d'un modèle exponentiel qui décrit la phase exponentielle mais ne tient pas compte de la phase de latence ni de la phase stationnaire. Actuellement, le modèle logistique avec délai et rupture fait partie des modèles les plus utilisés. Ce modèle, développé par Rosso et al. (1995) suppose que lors de la phase de latence, la croissance microbienne n'est pas possible et qu'il n'y a pas de transition entre la phase de latence et la phase exponentielle (Eq. 8).

$$\ln[N(t)] = \begin{cases} \ln(N_0) & \text{si } t \leq lag \\ \ln(N_{max}) - \ln \left[1 + \left(\frac{N_{max}}{N_0} - 1 \right) e^{[-\mu(t-lag)]} \right] & \text{si } t > lag \end{cases} \quad (8)$$

Avec N_0 (CFU.g⁻¹) le niveau initial, N_{max} (CFU.g⁻¹) la densité maximale de la population, lag (h) le temps de latence, μ (h⁻¹) le taux de croissance et t (h) le temps. D'autres modèles primaires ont été décrits dans la littérature, tels que le modèle de Gompertz modifié proposé par Zwietering et al. (1990) et celui élaboré par Baranyi and Roberts (1994). Ce dernier est basé sur une équation différentielle, correspondant à la phase exponentielle de croissance, et est complété par deux fonctions d'ajustement pour décrire la phase de latence et de freinage (Eq. 9).

$$\ln[N(t)] = \ln(N_0) + \mu A(t) - \ln\left[1 + \frac{e^{[\mu A(t)]} - 1}{e^{(N_{max} - N_0)}}\right]$$

$$\text{où } A(t) = t + \frac{\ln(e^{(-\mu t)} + e^{(-\mu \text{lag})} - e^{(-\mu t - \mu \text{lag})})}{\mu} \quad (9)$$

Sa forme différentielle est un véritable avantage pour réaliser des modélisations en conditions dynamiques (McKellar and Lu 2004) qui sont les conditions réelles de conservation des aliments (Eq. 10).

$$\frac{dY(t)}{dt} = \frac{1}{1 + e^{-Q(t)}} \times \mu_{max} \times (1 - e^{(N(t) - N_{max})})$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \mu_{max} \quad (10)$$

où μ_{max} et Y_{max} ($Y = \ln(N)$) dépendent du milieu et notamment de sa température.

5.2.2. Les modèles secondaires

La croissance des microorganismes dépend des facteurs environnementaux. Dans un produit alimentaire, ces facteurs sont souvent complexes et dynamiques car ils doivent tenir compte à la fois des facteurs intrinsèques (pH, activité de l'eau, interactions entre les microorganismes) et extrinsèques (température, humidité relative). Les modèles secondaires permettent de décrire l'effet des conditions environnementales sur les paramètres du modèle primaire (Whiting and Buchanan 1993). Au cours de la chaîne du froid, un produit alimentaire peut subir des étapes de transformation, de stockage et de distribution au cours desquelles sa température peut varier considérablement et inclure des périodes d'abus de température (Likar and Jevšnik 2006, Duret 2014). La température est le facteur environnemental qui a le plus d'impact sur la croissance des microorganismes dans les aliments.

5.2.2.1. Les modèles secondaires pour la vitesse de croissance

Zwietering et al. (1990) ont introduit le « gamma concept » qui s'appuie sur deux principes.

1. Tous les facteurs mesurables, ayant une influence sur le taux de croissance (μ), sont indépendants et interviennent de façon multiplicative :

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \times \gamma(\text{température}) \times \gamma(a_w) \times \gamma(pH) \times \gamma(X_i)$$

2. L'effet de chaque facteur sur la vitesse de croissance peut être représenté par une fraction du taux de croissance maximum :

$$\gamma_i = \frac{\mu_i}{\mu_{max}} \text{ compris entre 0 et 1} \quad (11)$$

où γ présente une fonction prenant en compte le ou les facteurs ayant une influence sur μ_{max} , la vitesse de croissance maximale.

Parmi les modèles secondaires dédiés à la vitesse de croissance, on trouve des modèles purement empiriques tels que les modèles de type racine carrée (Ratkowsky et al. 1983), les modèles cardinaux (Le Marc et al. 2002, Van Derlinden et al. 2008) et les modèles polynomiaux (Luning and Devlieghere 2006).

Dans les modèles de type racine carrée, les taux de croissance ont été transformés par une racine carrée afin de stabiliser leurs variances.

Les modèles cardinaux sont basés sur le même principe d'utilisation du « gamma concept », à savoir que l'influence de chaque facteur environnemental peut être intégré dans une fonction par des facteurs multiplicatifs. L'avantage du modèle est qu'il permet de tenir compte de la vitesse de croissance en fonction de la température différemment selon que l'on soit au-dessus ou en dessous de la température optimale (Le Marc et al. 2002).

Les modèles polynomiaux, permettent de décrire la vitesse de croissance d'un microorganisme donné en fonction de plusieurs facteurs environnementaux (Delignette-Muller et al. 1995). Ces modèles sont largement utilisés pour déterminer les taux de croissance maximaux compte-tenu de la facilité de leur utilisation et de la simplicité de leur ajustement aux données expérimentales par régression linéaire. Toutefois, ces modèles nécessitent la connaissance d'un nombre élevé de paramètres et n'apportent aucune signification biologique aux paramètres calculés. De plus, l'extrapolation des résultats hors conditions expérimentales est impossible (McKellar and Lu 2004) et la variabilité intra-espèce n'est pas prise en compte (Delignette-Muller and Rosso 2000).

6. Conclusions

L'étude bibliographique a mis en avant, dans un premier temps, l'importance de la chaîne du froid dans la préservation de la qualité des produits alimentaires, notamment les carcasses de viande. Pour cette raison, à l'échelle européenne et française, des réglementations régulent les conditions de refroidissement de ces produits périssables.

L'analyse bibliographique met en avant la difficulté pour les modélisateurs de mettre au point des modèles qui permettent de décrire avec précision les phénomènes d'écoulements et de transferts dans des équipements chargés de produits alimentaires de formes complexes tels que les carcasses de viande. Il ressort qu'un couplage entre des mesures expérimentales et des modèles numériques pourrait répondre à cette problématique mais ce type d'approche est rare dans la littérature et quasi inexistant pour les camions frigorifiques.

La littérature présente de nombreux modèles permettant de prédire l'évolution de la qualité organoleptique et sanitaire des produits alimentaires notamment en microbiologie prévisionnelle.

Enfin, il a été démontré en se basant sur une étude de terrain et étant donnée l'hétérogénéité des modalités de transport et de chargement des carcasses de viande dans les camions frigorifiques, qu'il est important d'étudier le cas le plus fréquent de point de vue du chargement et le plus favorable à l'altération de la qualité sanitaire du produit de point de vue conditions environnementales.

Au regard de cette analyse bibliographique, notre ambition a été de contribuer à :

- analyser expérimentalement et numériquement un équipement frigorifique : une semi-remorque chargée de carcasses en laboratoire et sur site,
- développer un modèle numérique permettant d'étudier l'influence des conditions opératoires sur la température d'une partie de carcasse de porc (jambon) tout au long d'un transport frigorifique,
- coupler cette approche thermique avec un modèle d'évolution de la qualité microbiologique (plus particulièrement la croissance des bactéries pathogènes),
- analyser les facteurs d'influence pour une meilleure maîtrise de la qualité et de la sécurité des aliments.

Chapitre 2 : Caractérisation des écoulements d'air dans un camion frigorifique chargé de carcasses de porc

1. Introduction

L'objectif de ce premier travail expérimental, est de caractériser les écoulements et la distribution du flux d'air dans une maquette de semi-remorque à échelle réduite (1/3.3) chargée de carcasses de porc modèles (en mousse polyuréthane). La distribution du flux d'air a été mesurée à l'aide d'un LDV-2D (Laser Doppler Velocimetry) pour deux configurations différentes. Dans la première configuration, l'air est soufflé à l'avant du camion sans gaine de distribution d'air tandis que dans la seconde, deux gaines de soufflage d'une longueur de 6 m ont été installées. Au total, 2060 points de mesures ont été réalisés dans chaque configuration.

2. Principaux résultats

Ce travail a permis d'établir les schémas d'écoulement et d'estimer l'ordre de grandeur de la vitesse de l'air autour des carcasses pour les deux configurations. Des zones de faibles vitesses ont été identifiées pour les deux configurations. Ces zones peuvent induire des coefficients de transfert convectif plus faibles et ainsi un mauvais refroidissement des carcasses et une dégradation sanitaire plus importante. La présence des gaines permet de réduire légèrement les hétérogénéités de la circulation de l'air au sein des carcasses.

3. Perspectives

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude peuvent être comparés à ceux obtenus par des simulations CFD. Les modèles validés pourront être utilisés, pour la suite de la thèse, pour étudier d'autres typologies de chargement (nombre de rails chargés, nombre de carcasses, présence/absence de gaines ...). Par ailleurs, ces résultats expérimentaux peuvent être utilisés pour interpréter l'intensité des échanges thermiques entre les carcasses et l'air. Cette intensité a été caractérisée expérimentalement à différentes positions dans la semi-remorque en mesurant le coefficient de transfert convectif (chapitre 3). Un modèle combinant le transfert de chaleur par convection avec l'air et la conduction à l'intérieur des carcasses ainsi que la microbiologie prédictive a ensuite été développée afin d'évaluer les risques sanitaires (chapitre 4).

4. Article 1

Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses

M. Merai^{1,2,*}, D. Flick², L. Guillier³, S. Duret¹, O. Laguerre¹

¹ Irstea, UR GPAN, Refrigeration Process Engineering Research Unit, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony, France

² UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

³ Université Paris-Est, Anses, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety, Food Safety Laboratory, 23 avenue du Général de Gaulle, 94706 Maisons-Alfort Cedex, France

* (mouna.merai@irstea.fr)

Abstract

After slaughtering, pork carcasses should be cooled down in chilled rooms (for 15-20 hours) as fast as possible to reach a core temperature of 7°C before transport to inhibit the growth of spoilage and pathogenic microorganisms. To reduce the time interval between slaughtering and the cutting plant, an alternative solution involving the loading of carcasses with core temperatures higher than 7°C directly into trailers has been proposed. However, whether or not such a practice will lead to a sanitary risk has to be assessed.

Experimental investigation was carried out in order to characterize airflow distribution in a reduced-scale trailer loaded with reduced-scale polyurethane carcass models. Velocity measurements were conducted using 2D-LDV all around the carcasses. This made it possible to deduce the flow pattern and the order of magnitude of the velocity inside the region occupied by the carcasses.

Key words: refrigerated transport, pork carcasses, airflow, Laser Droplet Velocimetry.

Nomenclature:

R_e	Reynolds number
ρ_m	air density [kg.m ⁻³] in the reduced-scale trailer
ρ_r	air density [kg.m ⁻³] in the real-scale trailer
V_m	air velocity [m.s ⁻¹] in the reduced-scale trailer
V_r	air velocity [m.s ⁻¹] in the real-scale trailer
L_m	characteristic length [m] of the reduced-scale trailer
L_r	characteristic length [m] of the real-scale trailer
μ_m	air dynamic viscosity [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹] in the reduced-scale trailer
μ_r	air dynamic viscosity [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹] in the real-scale trailer
L	trailer length [m]
x^*	dimensionless length (x/L)
Q	calculated airflow rate [m ³ .h ⁻¹]
Q_0	inlet airflow rate [m ³ .h ⁻¹]
Q^*	dimensionless airflow rate (Q/Q_0)
u	longitudinal velocity [m.s ⁻¹]
v	vertical velocity [m.s ⁻¹]
\bar{u}	time-averaged longitudinal velocity [m.s ⁻¹]
\bar{v}	time-averaged vertical velocity [m.s ⁻¹]
ε	porosity
A	normal section [m ²]
G_r	Grashof number
β	coefficient of thermal expansion of air
g	gravity acceleration [m.s ⁻²]
ΔT_r	temperature difference between wall of the real trailer and internal air [°C]
ΔT_m	temperature difference between wall of the reduced scale trailer and internal air [°C]

1. Introduction

Meat carcasses are highly perishable products and their quality depends on the refrigeration conditions used after slaughtering. To prevent quality loss, since 1964 in the European Union, carcasses must be chilled immediately after the post-mortem inspection and kept at a constant core temperature below 7°C until consumption. The first step in the cooling process in slaughterhouses is designed to lower, as fast as possible, the core temperature of carcasses to prevent the growth of undesirable microorganisms (Kinsella et al., 2006; Savell et al., 2005). Different techniques, e.g. using air or spray chilling, are used, and differ from one slaughterhouse to another. The main challenge in this step is to lower the core temperature without affecting the color, tenderness and water content of carcasses (Létang, 1990; Kuitche et al., 1995; Savell et al., 2005). As a consequence of this regulation, carcasses can be stored in the chilled rooms of slaughterhouses for 15-20 hours.

During this operation, heat conduction occurs within the carcass, while heat and water exchanges take place at the air-product interface. These phenomena vary with time and depend on the air parameters. For instance, the temperature difference between the air and the carcass surface affects the heat and moisture fluxes which are also affected by the airflow characteristics (velocity and turbulent intensity) (Mirade et al., 2002). Thus, different studies have been conducted in order to characterize experimentally the airflow distribution inside chilled rooms, to suggest solutions enabling the control of the chilling parameters and to minimize the weight loss of carcasses by means of different modeling approaches (Mirade and Picgirard, 2001; Mirade 2007).

In France, most slaughterhouses are located in the western regions, while cutting facilities are located all over the country. In order to provide their clients with acceptable product quality within an acceptable delay, slaughterhouses are now asking for an easing of this regulation. Such a request has been accepted in other European countries, for example in Italy where a national regulation has been created (DL n.286, 1994) and allows carcass transportation prior to the reaching of the European regulatory temperature ($\leq 7^{\circ}\text{C}$). In this case, only brief transport is allowed (Kuffi et al. 2013). The Belgium Scientific Committee of the FASFC used predictive microbiology to conclude that the transport of pork carcasses at temperatures above the regulatory temperature was acceptable for 2 hours if carcasses are loaded in the trailer at a surface temperature of 9°C, or for 3 hours with a surface temperature of 7°C and a core temperature of 12°C (CE n°853/2004 and Efsa 2008).

However, those studies were conducted using either empirical studies or predictive microbiological tests without taking into account the variability of the transportation step. The refrigerated equipment characteristics, the loading technique, the number of carcasses and the duration of transportation exert an important impact on the airflow pattern and as a consequence, an impact on the core and surface temperature evolution that could affect microbial growth. Non-uniform air distribution inside the trailer was identified by James (1996) as the main problem in refrigerated transport. It is thus necessary to understand the airflow pattern in refrigerated trailers loaded with carcasses.

The airflow distribution in refrigerated trailers used for meat carcass transportation is challenging because of the high length to height ratio, the compact loading and the small air spaces between carcasses. Cold air is blown at the top front of the trailer and warm air return at the bottom. Low air velocity and high product temperature are often observed at the rear (near the doors) and may lead to a sanitary risk. On the contrary, high air velocity and low air temperature at the front may lead to partial product chilling injury (Savell et al, 2005). To avoid these problems, certain trailers are equipped with air distribution ducts to allow airflow to reach the rear. To our knowledge, no relevant studies have been conducted on the airflow distribution in a trailer loaded with carcasses. The lack of data can be explained by the difficulty encountered when conducting direct measurements of the velocity and airflow rate in such a complex geometry. In order to overcome the complexity when using a real-scale trailer, several studies have been conducted on a reduced-scale trailer loaded with reduced-scale food pallets (Moureh and Flick, 2005, 2004; Moureh et al., 2002, 2009; Tapsoba et al., 2006, 2007). In such studies, the main focus was to analyze the airflow distribution in order to optimize the ventilation efficiency and as a result the refrigeration efficiency within the refrigerated space.

The objective of this experimental work was to study the airflow inside a reduced scale trailer loaded with reduced-scale carcasses arranged in two configurations (with and without air distribution ducts) using 2D Laser Doppler Velocimetry (LDV). From measurements all around the carcasses, the flow pattern inside the region occupied by those obstacles can be estimated and the zones of low air velocity (where a potential microbial risk could occur) can be identified.

2. Materials and methods

2.1. Experimental set-up

The studied transport configuration (number of rails and carcasses, layout) was chosen with respect to the most common conditions encountered in the long-distance transport of pork carcasses (Figure 1), as observed by our partners, French Pork Institute (IFIP) and French meat companies (Culture Viande).

In this configuration, the refrigerated trailer had an internal length of 13.3 m and could be loaded with 215 pork carcasses. In order to hang the carcasses, the trailer was equipped with 5 rails (Figure 2-1).



Figure 2-1 : Photo of a refrigerated trailer with 5 rails loaded with pork carcasses as the studied configuration.

$$Re_m = Re_r$$

$$\frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = \frac{\rho_r V_r L_r}{\mu_r}$$

However, to take into account the convection, additionally to Reynold's number conservation, Grashoff number should be also conserved: $G_r = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2}$ with g the gravity acceleration, β the coefficient of thermal expansion, ΔT the temperature difference between the wall of the trailer and the internal air, L the characteristic length (height of trailer) and ν the kinematic velocity of the air.

This conservation implies $\Delta T_m = (L_r/L_m)^3 \approx 36 \Delta T_r$ with ΔT_m and ΔT_r are respectively temperature differences in the model and the real scale trailer and L_r and L_m are respectively the characteristic lengths of the model and the real scale trailer. If we consider a real trailer where the air is introduced at 0 °C and the external air temperature is around 30 °C, then $\Delta T_r = 30$ °C. To respect Grashoff analogy, the temperature difference in the reduced scale trailer should be $\Delta T_m = 1080$ °C which is technically impossible to obtain. Based on this technical constraint and due to the fact that the main heat transfer phenomena between the air and the carcasses in the trailer is forced convection, the experimental work was conducted on isothermal conditions to study airflow pattern.

The fluid used in both the full-scale and reduced-scale trailers was air. Even though in the case of the reduced-scale trailer the air was warmer ($\approx 20^\circ\text{C}$) than that in the refrigerated trailer, the physical properties of air can be considered to be almost the same ($\rho_m \approx \rho_r$ and $\mu_m \approx \mu_r$).

As a consequence, the air velocity in the reduced-scale trailer was 3.3 times higher than in the real trailer ($\frac{V_m}{V_r} = \frac{L_r}{L_m} = 3.3$).

In order to better understand the phenomena in the case of the full-size trailer, all the dimensions, parameters and results are given for the scale of the real trailer, particularly in Figure 2. Both the air inlet and the air outlet were located at the front of the trailer. The air was supplied to the inside of the trailer through a rectangular inlet section (0.12 x 1.1 m), at a velocity of 11 m.s⁻¹.

Two air inlet configurations were studied: without and with an air distribution duct. The choice of the number and geometry of the ducts: two rectangular ducts of 6 m was undertaken because this configuration is close to some of the ones encountered in France for carcasses transportation while being relatively simple. The chosen configuration was symmetric so that the experimental investigation and the numerical simulation (to be presented in the future work) remain relatively easy (Figure 2-2).

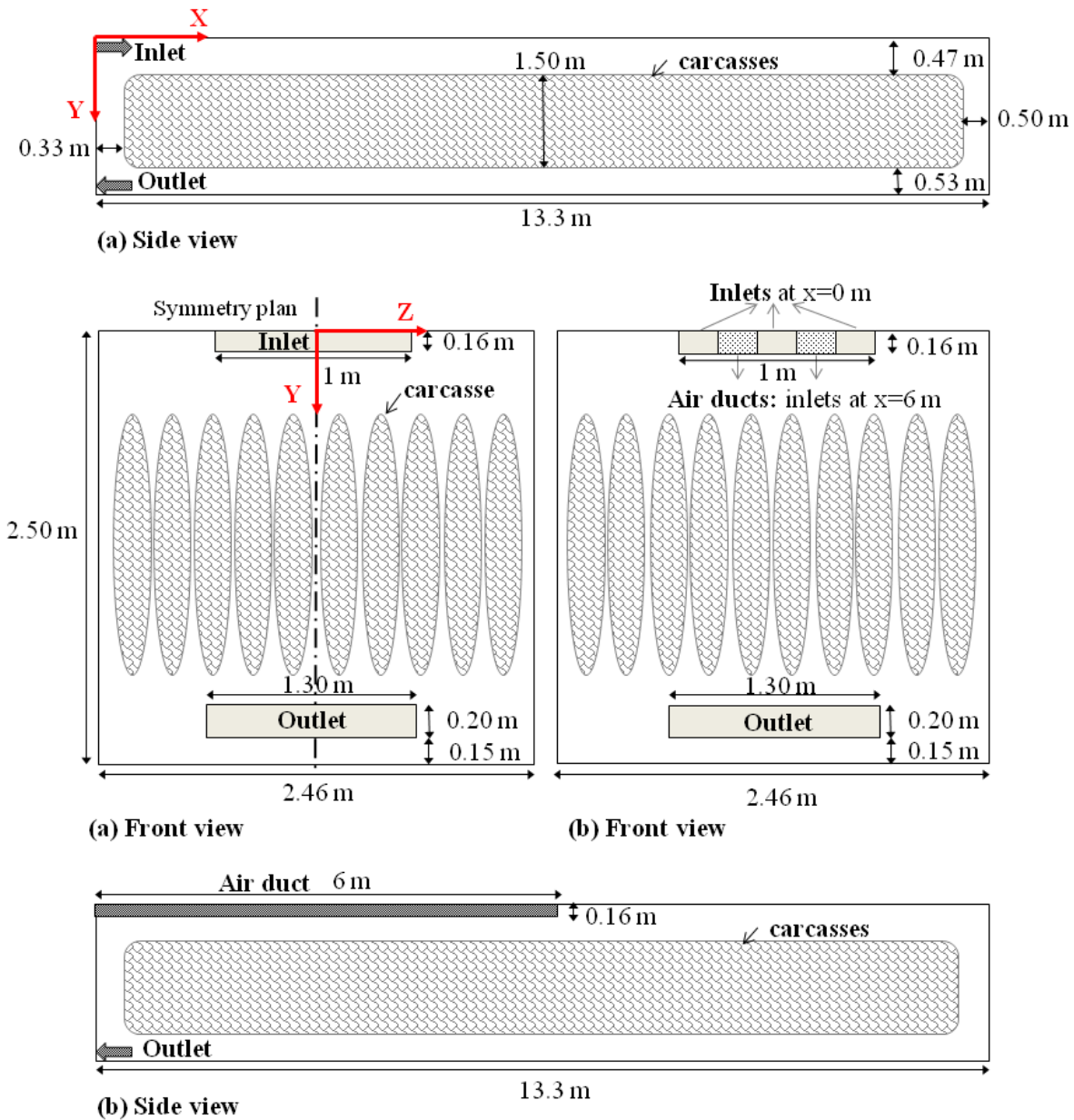


Figure 2-2 : Schematic view of the trailer loaded with carcasses showing the inlet and outlet positions: without air ducts (a), with air ducts (b).

In the first case, the entire airflow is blown at $x = 0$ m (front of the trailer) (Figure 2-2a). In the second case, 63% of the airflow is blown at $x = 0$ m (front) and 37% is blown at $x = 6$ m at the exit of two distribution ducts (Figure 2-2b). These proportions were obtained by air velocity measurements using LDV technique. The time-averaged normal velocity in front of one of the air ducts (12 measurement points, $x^* = 0.45$) was first measured. The airflow rate was then estimated by the integral of these velocities on the surface of the air duct (0.2 m x 0.16 m). The obtained

value was then multiplied by two (two ducts in a symmetrical configuration) and reported to the total airflow. The obtained values correspond roughly to the proportions of the inlet section at $x = 0$ m ($x^* = 3/5$) and at $x = 6$ m ($x^* = 2/5$).

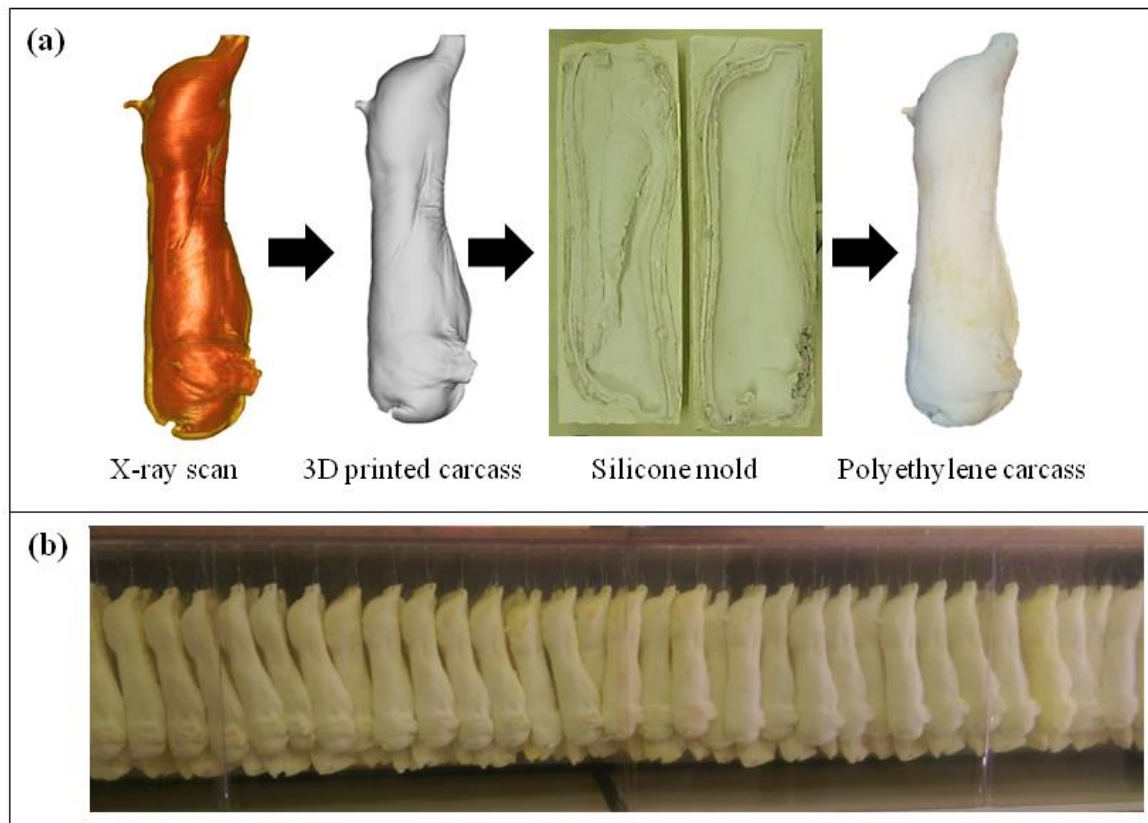


Figure 2-3 : (a): Steps in the production of reduced-scale carcasses from the X-ray scan of a real pork carcass (b): Side view of the reduced-scale trailer loaded with reduced-scale carcasses (b).

The studied pork carcasses were reproduced using the same scale (dimension ratio 1:3.3). Based on X-ray scans, 3D carcass geometry was built up and the scale was reduced before printing the two half-carcasses on a polyamide structure (Figure 2-3a). The structure obtained was used to create a silicone mold and to prepare 430 half-carcasses (215 carcasses) using expanded polyethylene. Once all the reduced scale carcasses had been prepared, they were placed in the reduced-scale trailer in accordance with a loading configuration observed in real pork carcass refrigerated transport (Figure 2-3b). It is to be emphasized that the carcasses made of expanded polyethylene were only used as obstacles to the airflow; there was no heat exchange between the air and the carcasses.

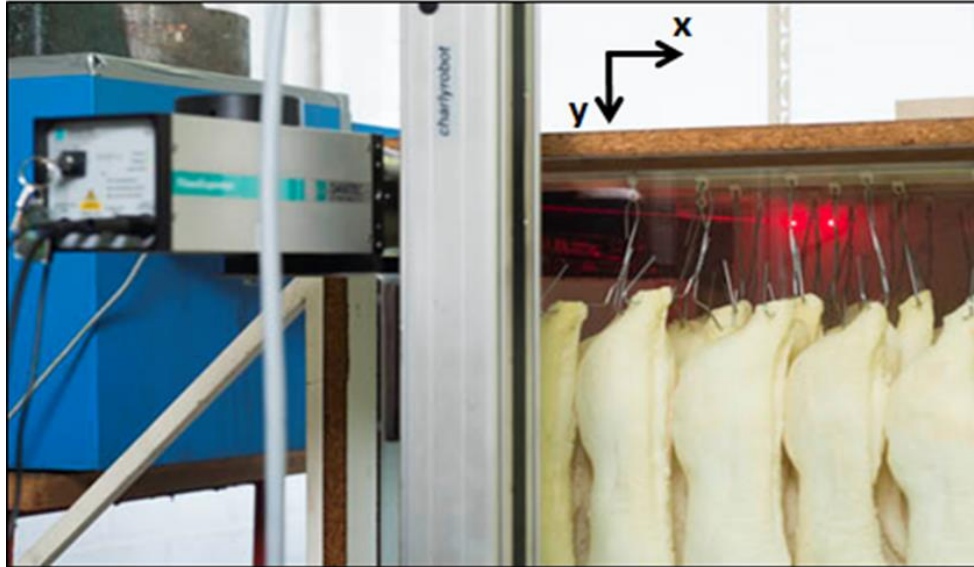


Figure 2-4 : Measurement of the air velocity above the carcasses in the reduced-scale trailer by Laser Doppler Velocimetry (LDV).

The reduced-scale trailer was made of wood, with the exception of one side wall made of glass to allow measurements of the internal air velocity using two-dimensional Laser Doppler Velocimetry (LDV, Dantec Dynamics, Flow explorer-2D), Figure 2-4. The upper wall was perforated to allow air velocity measurements using a hot wire anemometer (TESTO US Patent N° 5412983) associated with the recorder multifunction TESTO 435-4, in regions near to the walls where LDV measurements could not be performed.

2.2 Velocity measurements

2.2.1. LDV measurements

The penetration of the laser beam inside the trailer through the glass wall made it possible to measure the internal air velocity by LDV. The laser device was placed on a displacement system that allowed automation and control of movement according to the x, y and z axes (Figure 2-4).

The air velocity was determined by measuring the displacement velocity of very small particles of paraffin oil (diameter $\approx 1 \mu\text{m}$) injected into the blowing device. Because of their small diameter, the velocity of these particles is very close to the air velocity. The uncertainty of velocity measurement of one tracer particle is estimated to be less than 1% (manufacturer data) and less

than 2.3% for the time-averaged velocity (taking into account the standard deviation of the measured velocity of more than 2000 particles for each measurement position).

The 2D LDV device provided time-averaged values and the standard deviations of two velocity components in the trailer: u (longitudinal in x direction) and v (vertical in y direction). The device is composed of two 70 mW laser diodes emitting two laser beams at 660 nm and 785 nm, a beam-splitter, a Bragg cell, a focusing and receiving lens, a pinhole arrangement to collect scattered light, and a photomultiplier. Measurements were conducted in a coincidence mode in which both laser beams converged in the same measurement volume (0.17 mm x 2.8 mm).

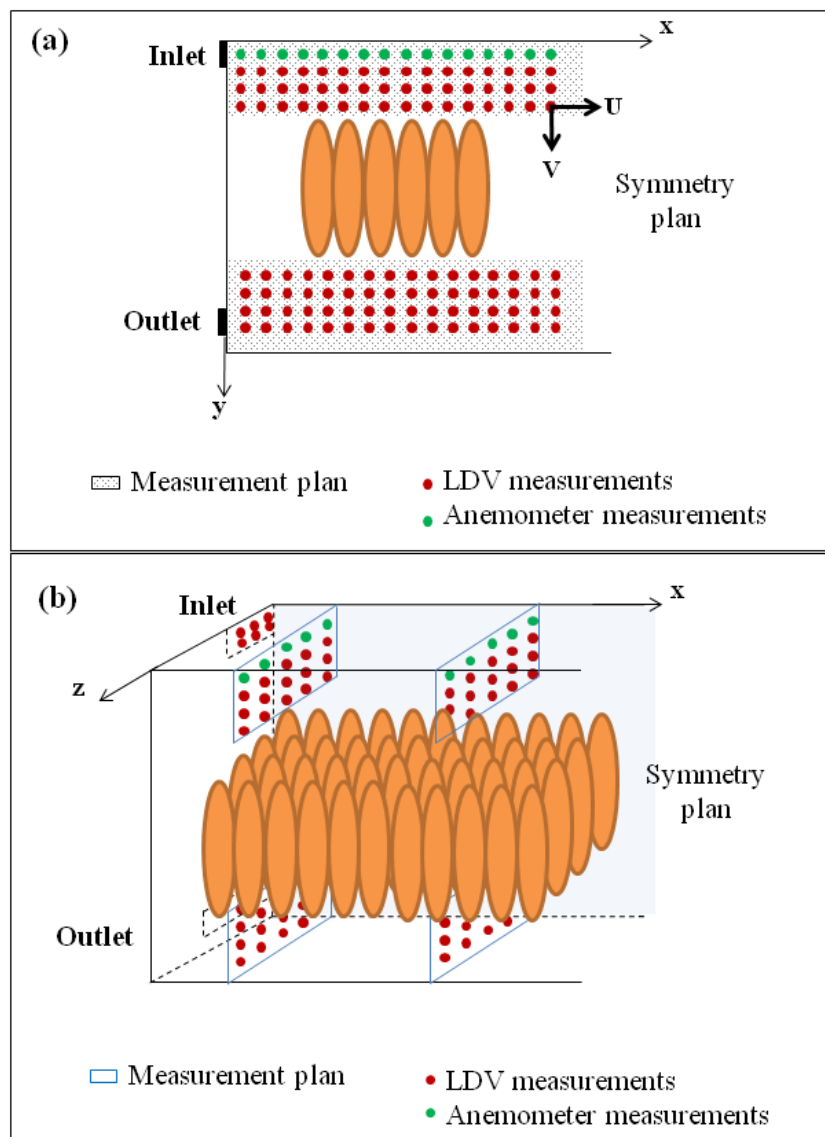


Figure 2-5 : Measurement positions (a) in the symmetry plane of the trailer, and (b) in the vertical planes above and under the carcasses.

Measurements of air velocity were carried out in the symmetry plane of the trailer filled with carcasses, above and under the carcasses in both configurations (with and without air distribution ducts) as shown in Figure 2-5a.

1140 measurement points were undertaken to describe the airflow pattern in the symmetry plane of the configuration without air distribution ducts and 920 measurement points for the configuration with air ducts.

In addition to the measurements on the symmetry plane, measurements in four vertical planes at $x^* = x/L = 1/8, 3/8, 5/8, 7/8$ of the reduced-scale trailer length were performed above and under the carcasses. Figure 2-5b shows the measurement portions only at $x^* = 1/8$ and $3/8$. Measurements were also conducted in two horizontal planes at mid-height at the front and the rear of the trailer where no carcasses were present (measurement points not shown in the figure). The airflow rate was then calculated in those planes by estimating the integral of the time-averaged normal velocity.

2.2.2. Hot wire anemometer measurements

The 2D LDV technique is not applicable in the zones located near to walls because the laser beam converges to the measurement volume with a non-negligible angle. In addition to LDV measurement, a hot wire anemometer (precision $\pm 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for the range of 0 to $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) was used to measure the air velocity near the walls.

Velocity measurements were performed using the hot wire anemometer at 23 locations in the symmetry plane in the two studied configurations of the reduced-scale filled trailer (Figure 2-5). For each point, velocity was measured in the main direction of the airflow by orienting the sensor in the x direction. Those values were then used along with those measured by LDV to reconstruct the airflow pattern in the symmetry plane.

In addition to those measurements, the hot wire anemometer was also used to measure the air velocity near the ceiling in the four vertical planes above the carcasses to increase the accuracy of the airflow rate calculation.

3. Results and discussion

In order to acquire a better understanding of the phenomena occurring in the real trailer, the air velocities measured in the reduced-scale trailer were transposed to the real scale using Reynolds analogy.

3.1. Airflow on the symmetry plane

Figure 2-6 shows the time-averaged velocity magnitude around the carcasses in the trailer without an air distribution duct. The zones above and under the carcasses were expanded vertically in this graph in order to better highlight the velocity field. Above the carcasses, the air velocity decreased from $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at the front to less than $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at the rear. In the rear zone ($x > 10 \text{ m}$), the air velocity was lower than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Under the carcasses, the region in which the velocity magnitude is lower than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was larger than that above them, and begins at $x = 7.5 \text{ m}$ (Figure 2-6).

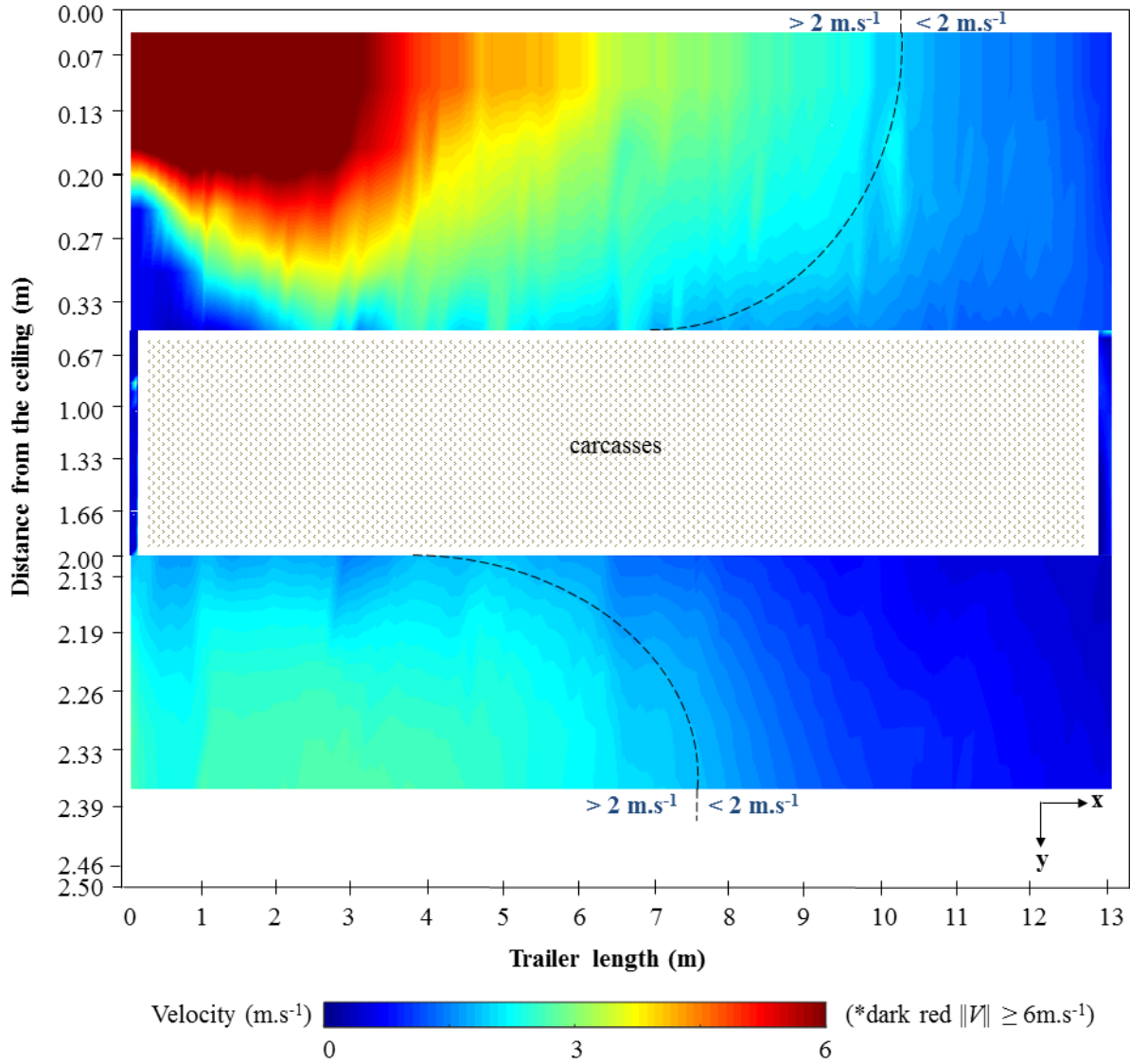


Figure 2-6: Velocity magnitude field in the symmetry plane without air ducts where discontinuous black lines present the border between the zones of high ($> 2 \text{ m.s}^{-1}$) and low ($< 2 \text{ m.s}^{-1}$) velocities (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

To achieve better visualization of the wall-jet which developed from the inlet, Figure 2-7 shows the evolution of the longitudinal air velocity in the symmetry plane along the trailer without and with air ducts at $y = 0.1 \text{ m}$ (at about mid-height of the air inlet section) and at $y = 0.17 \text{ m}$ (at the bottom of the air inlet section).

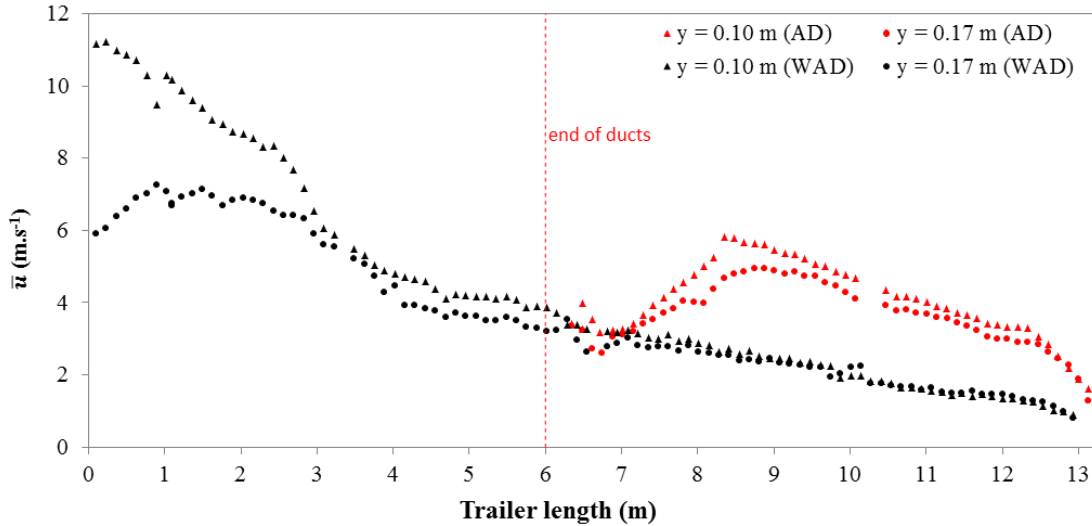


Figure 2-7 : Longitudinal velocity along the trailer at two distances from the ceiling ($y = 0.10$ m and $y = 0.17$ m) with air ducts (points in red “AD”) and without air ducts (points in black “WAD”) (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

At $y = 0.1$ m and without air duct, the air velocity decreased rapidly in the front of the trailer ($x \leq 4$ m) from 11 m.s^{-1} to 5 m.s^{-1} , then slowly from 5 m.s^{-1} to 1 m.s^{-1} in the rear of the trailer. The air velocity decreases less rapidly at $y=0.17$ m. Some studies on the airflow in a trailer loaded with porous pallets have demonstrated different results (Moureh et al., 2008; Tapsoba et al., 2006): the air velocity decreased in the front part of the trailer and reached zero at 5 m of length; in the rear part of the trailer, negative air velocity was observed due to air recirculation. These differences with respect to our results may be related to the difference in porosity between the volume occupied by the carcasses and that of the pallets.

Concerning the trailer with air distribution ducts, the time-averaged velocity magnitude in the symmetry plane is shown in Figure 8. In this configuration, the air was introduced into the trailer through two inlets at 0 m and 6 m of length. In the symmetry plane, only the airflow under the air ducts could be characterized in the front part of the trailer ($x \leq 6$ m) (Figure 2-8b).

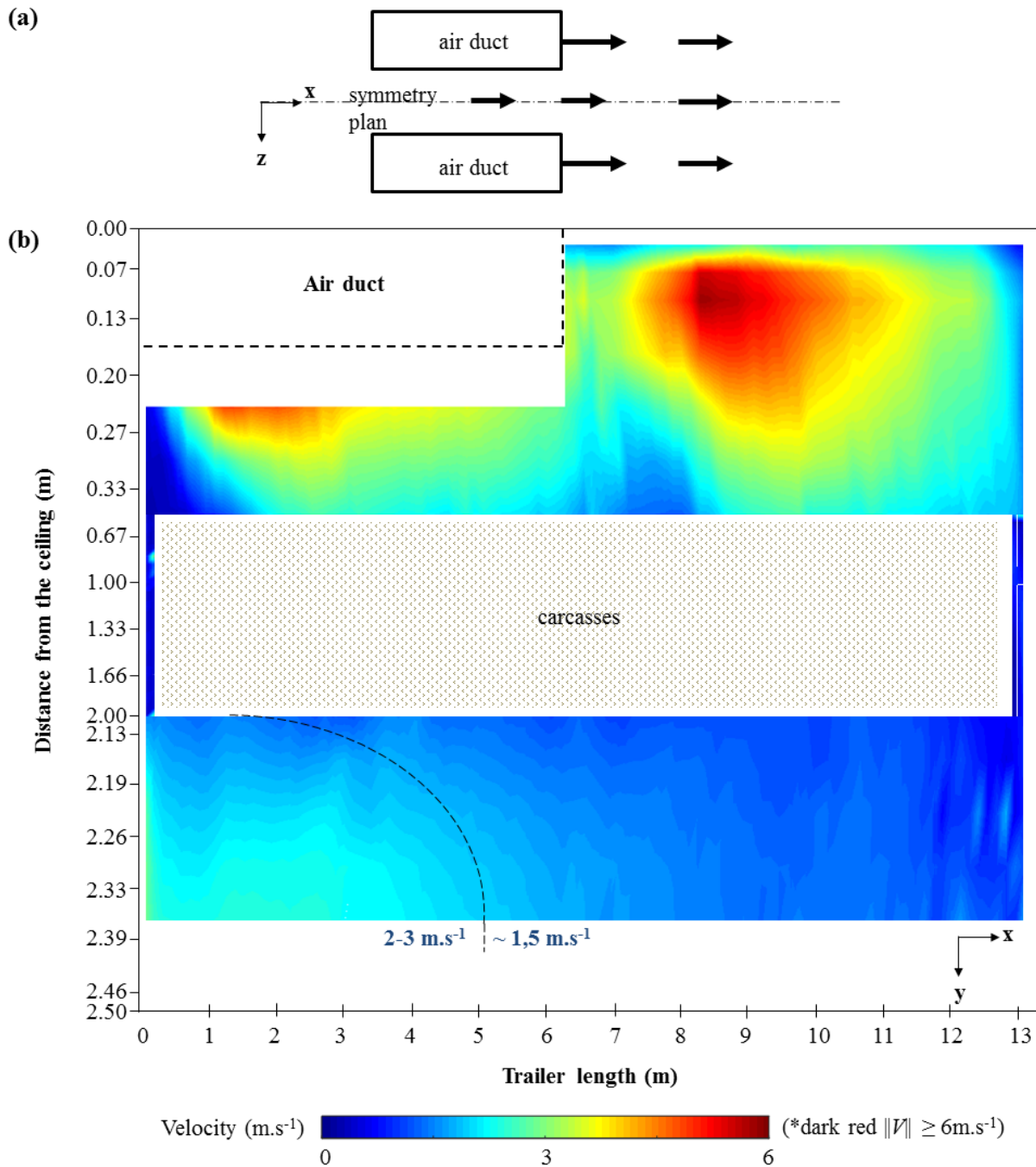


Figure 2-8 : (a) Schematic top view of the velocity evolution after the air ducts; (b) Velocity magnitude in the symmetry plane with an air duct where discontinuous black lines present the border between the zones of high (2-3 m.s-1) and low (~2 m.s-1) velocities (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

Just after the section equipped with air ducts, the velocity magnitude was about 3 m.s^{-1} in the symmetry plane which is located between the two ducts (Figure 2-8a). Then it increased to around 5 m.s^{-1} due to air entrainment by the jets flowing out of the ducts. Finally, the air velocity decreased to about 2 m.s^{-1} above the carcasses at the rear of the trailer. Underneath the carcasses, the trailer can be divided into two zones: the first zone ($0 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m}$) in which the air velocities are around $2\text{-}3 \text{ m.s}^{-1}$, and the second zone ($5 \text{ m} < x \leq 13.3 \text{ m}$) in which the air velocity is around 1.5 m.s^{-1} .

The presence of air ducts significantly increases the air velocity at the rear part ($x > 8\text{m}$) at both $y=0.10 \text{ m}$ and $y=0.17\text{m}$. The zones in which the velocity was lower than 2 m.s^{-1} were almost non-existent (at least in the symmetry plane). From a sanitary point of view, the air velocities without and with air ducts should be compared in the region of the carcasses. This can only be performed indirectly, in particular by estimating the evolution of the flow rate above the carcasses.

3.2. Airflow above the carcasses

For a better understanding of the airflow behavior above the carcasses, the time-averaged longitudinal velocity was represented in four transversal planes ($x^* = 1/8, 3/8, 5/8, 7/8$). The results, presented in the real scale, are shown in Figure 2-9.

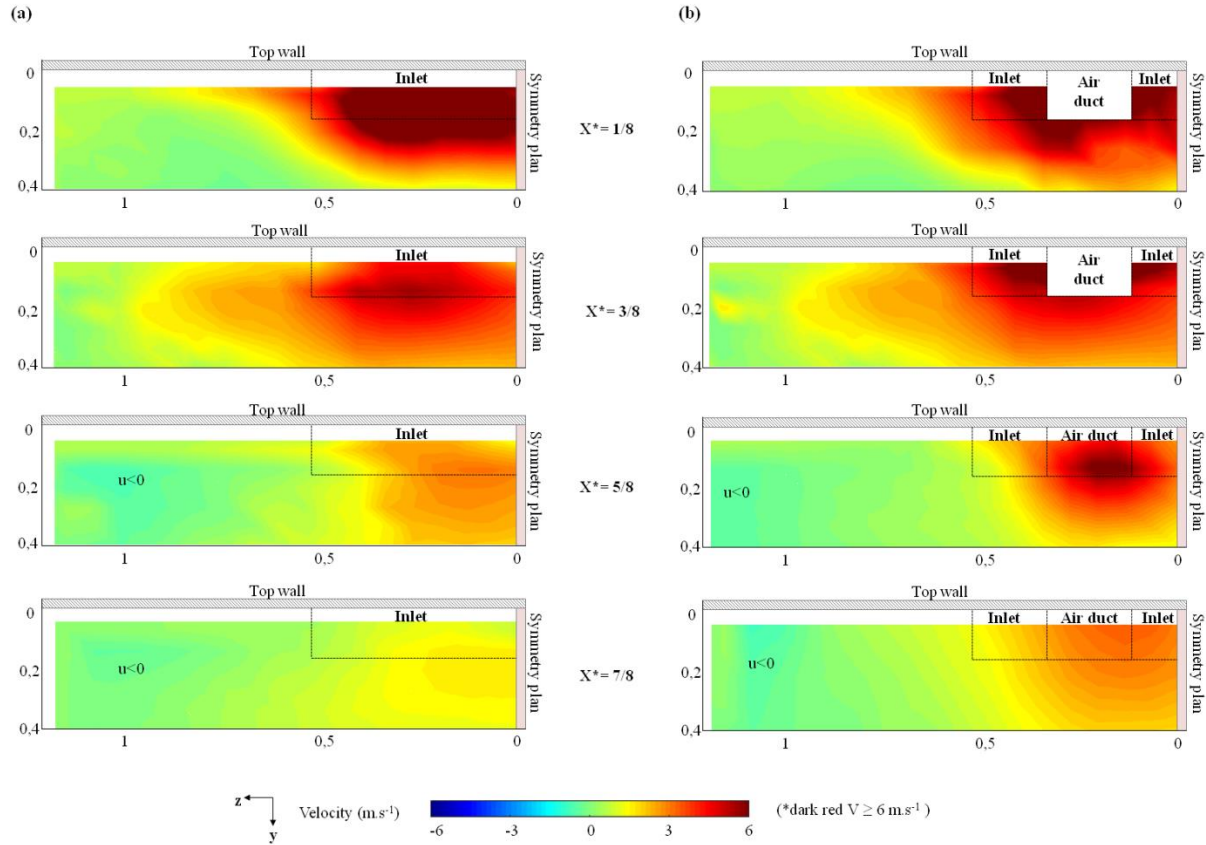


Figure 2-9 : Longitudinal velocity field above the carcasses in four transversal planes (a) without air ducts, (b) with air ducts (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

In both configurations, air was blown along the ceiling of the trailer.

Without air ducts, the wall-jet diffused laterally (z direction) and vertically (y direction) from the first plane ($x^* = 1/8$) to the second plane ($x^* = 3/8$). In the last two planes, $x^* = 5/8$ and $7/8$, on the average, the longitudinal velocity decreased because of downward air infiltration between the carcasses. Negative velocities were observed next to the lateral wall but with a low intensity denoting horizontal recirculation at the rear of the trailer above the carcasses.

In trailers equipped with an air duct, the pattern was relatively similar, except that a second wall-jet was detected in front of the air duct in the two last planes.

In order to study the air infiltration from the top region to the porous volume occupied by the carcasses, the time-averaged vertical velocity (\bar{v}) was represented just above the carcasses along the trailer in the symmetry plane (Figure 2-10) and in the four lateral planes (Figure 2-11).

The results at two vertical positions were shown to better determine the vertical flow direction because the measurement points were sometimes just above a carcass, sometimes above a gap between two carcasses. The differences observed near the inlet in Figure 9 can be related to the strong velocity gradients due to the proximity of the air inlet. In Figure 2-10 differences between two vertical positions were not significant.

The vertical velocities above the carcasses were rather low in comparison with the longitudinal velocities. With the exception of the front and the rear of the trailer where there were no carcasses, the vertical velocity varied typically between $\pm 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, which means that the air circulation was almost horizontal (Figure 2-10 and Figure 2-11). According to the measured velocity value, the airflow direction can be obtained: if $\bar{v} > 0$, air flows downwards from the top region to the carcasses and if $\bar{v} < 0$, air flows upwards between the carcasses towards the top region (Figure 2-10).

Vertical flow was mainly downward as expected. However, in the two configurations, there is upward flow near $x = 0 \text{ m}$, where all or a part of the blown air is injected at a high velocity. Here, the surrounding air was subjected to an entrainment effect by the wall jets. This explains why air is 'sucked' through the carcasses in this zone ($x^* < 1/8$) (Figure 2-10).

There were also other zones in which the vertical velocity was negative (upward flow), without air ducts (e.g. near the lateral wall: $y > 0.8 \text{ m}$ at $x^* = 7/8$, Figure 2-10a) or with air ducts (e.g. at intermediate lateral position: $0.3 \text{ m} < y < 0.8 \text{ m}$ at $x^* = 7/8$, Figure 2-10b). This denotes complex 3D flow patterns, possibly with air recirculation in the lateral planes (Figure 2-11).

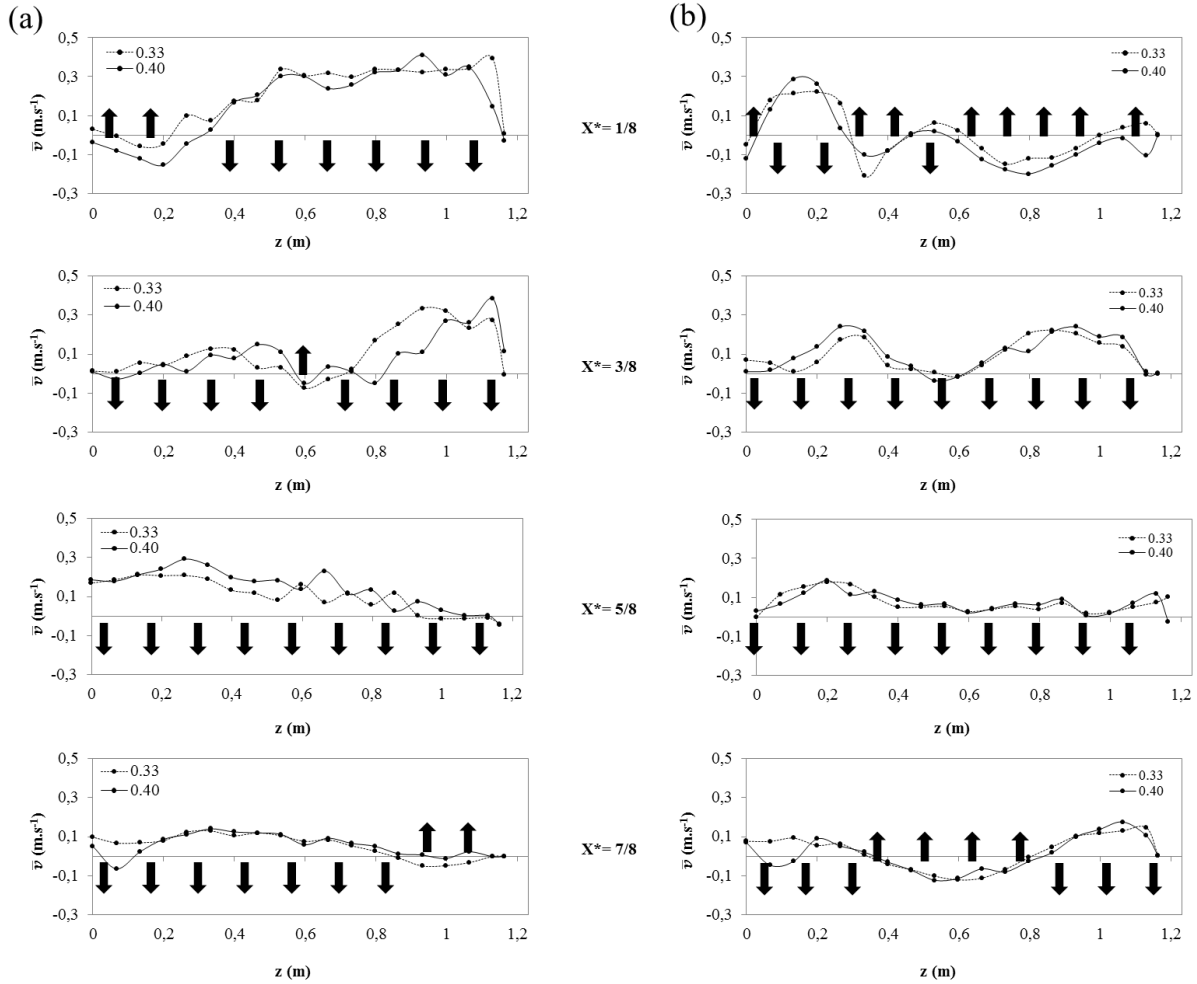


Figure 2-10 : Vertical velocity in four transversal planes (positive = downward) just above the carcasses (at $y = 0.33$ m and $y = 0.40$ m) (a): without air ducts, and (b): with air ducts. Dark arrows show the vertical airflow direction (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

From the point of view of refrigeration of the carcasses, it seems that the most favorable case is downward airflow between the carcasses because cold air is blown at the top. Upward airflow throughout the porous volume occupied by the carcasses is less favorable because the air in the bottom region has already been warmed up by a first passage close to the carcasses. The most problematic case is the absence of flow. So the regions where $\bar{v} \approx 0$ (for example with air ducts at $x^* = 5/8$ at certain lateral positions) could be ‘dead zones’ in which refrigeration is limited. But in fact, even in the case of $\bar{v} \approx 0$ there can be sufficient airflow because of other velocity components, particularly in the longitudinal direction, in the stack of carcasses. This is why we tried to estimate

the vertical and horizontal airflow inside the porous volume occupied by the carcasses based on knowledge of the flow rates above and under the carcasses.

3.3. Airflow rate estimation

The air velocities measured in the lateral planes above and under the carcasses were used to estimate the airflow rate in those regions. Results are shown as dimensionless airflow rates obtained by the expression of the measured airflow divided by the inlet flow ($Q^* = Q/Q_0$) (Figure 2-11) in both the studied configurations (with/without air ducts).

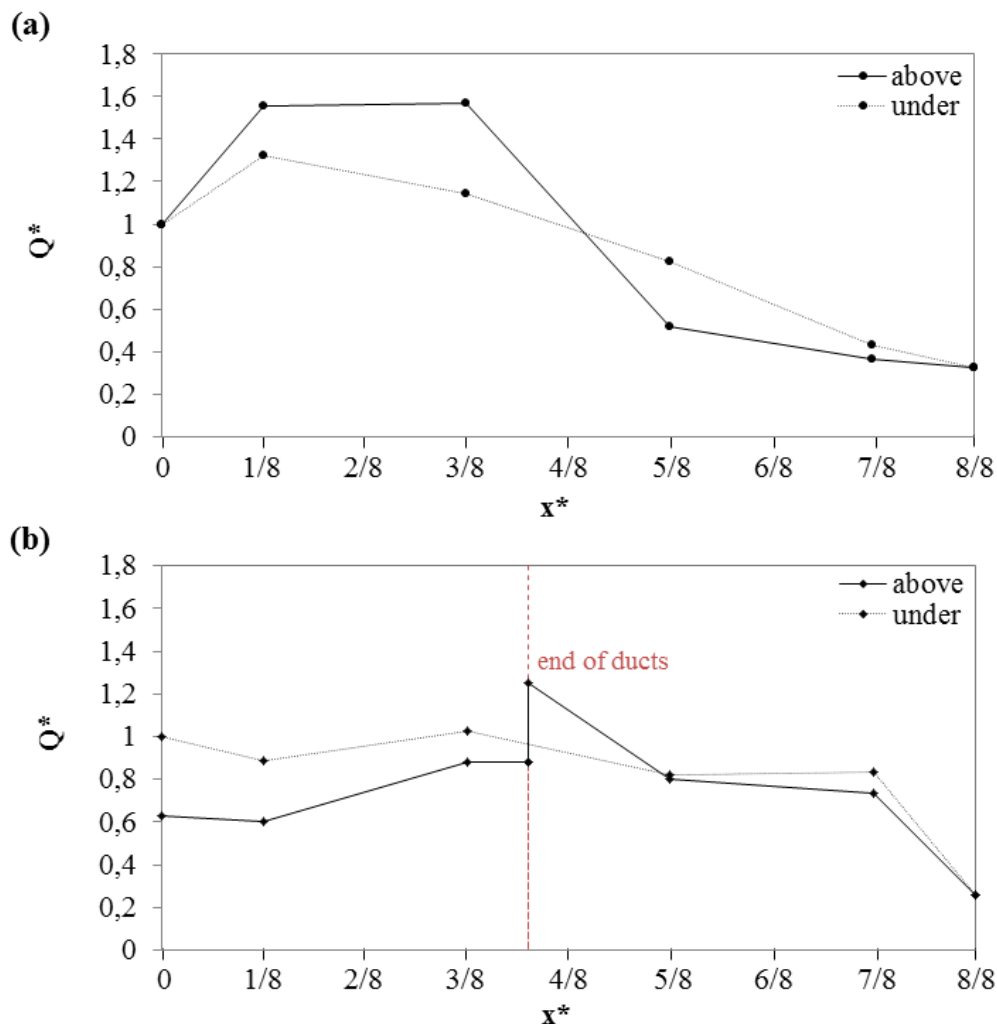


Figure 2-11 : Dimensionless airflow rate estimation in the loaded trailer above and under the carcasses (a): without air ducts, (b): with air ducts (results obtained from LDV measurements and extrapolated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

Without an air duct, in the two first measurement planes ($x^* = 1/8$ and $x^* = 3/8$), the airflow rate is higher than the inlet one. This phenomenon is due to the strong blowing airflow at the inlet of the trailer and the air-entrainment effect of the wall-jet. Between $x^* = 3/8$ and $x^* = 5/8$ the airflow rate decreases rapidly. These results are similar to those obtained in an empty trailer (Zertal-Menia 2001). An increase in the airflow rate above the carcasses along the trailer corresponds to an upward flow throughout the carcasses; inversely, a decrease corresponds to a downward flow. However, above the carcasses and between $x^* = 1/8$ and $x^* = 3/8$ (Figure 2-12a), the dimensionless airflow rate is almost constant (1.55 and 1.57 respectively). This signifies the absence of vertical air flow through the carcasses between those positions. Therefore, one could expect local high temperatures within the carcasses located at this location.

The most problematic position is that of the maximum flow rate which corresponds to no vertical flow ($x^* \approx 2/8$ without an air duct).

Underneath the carcasses, the airflow rate is different from that above the carcasses (Figure 2-12a). Without an air duct, at a given position, the difference in the flow rates above and under the carcasses is due to the horizontal airflow in the porous volume occupied by the carcasses. It can be seen that, without an air duct, fortunately, at the problematic position for the vertical airflow in the carcass zone ($x^* \approx 2/8$), there is a large difference in flow rate above and under the carcasses which corresponds to a significant horizontal flow throughout the carcasses.

In the configuration of the trailer with air ducts, 63% of the airflow was introduced into the trailer at the front ($x = 0$ m), while the remaining 37% was introduced at the outlet of the air ducts ($x = 6$ m). Figure 2-11a shows the estimated dimensionless airflow rate above and under the carcasses.

Above the carcasses and before the end of the air distribution ducts ($0 \text{ m} < x < 6 \text{ m}$), as observed in the first configuration, the airflow rate increased due to the entrainment effect of the air inlet. After the air ducts ($x > 6 \text{ m}$), the airflow rate decreased. Measurements conducted in the horizontal plane at mid-height at the rear of the trailer between the carcasses and the walls showed that about 26% of the total injected airflow by-passed the zone at the rear of the trailer (where no carcasses are present) (Figure 2-12a). This ratio is comparable to the value obtained without an air duct: 32% (Figure 2-12b).

Underneath the carcasses, the dimensionless airflow rate is almost constant, which means that vertical flow from or toward the bottom zone is relatively weak. The rear part ($x^* \approx 6/8$) could be

problematic: the flow rates above and under the carcasses are very similar (indicating that there was no significant longitudinal flow throughout the carcasses) and form a plateau (no significant vertical flow).

In order to quantify the vertical and longitudinal airflow in the region of the carcasses, a simplified equivalent network will now be considered.

3.4. Simplified airflow diagram

Based on the results obtained and described in Section 3.3, a simplified airflow diagram was developed in the loaded trailer with and without air distribution ducts (Figure 2-12). The diagram takes into account the hypothesis of vertical and horizontal air circulation between the carcasses. These two types of circulation were estimated using the difference between the upper and lower airflow rates and their variations along the trailer.

In the front part of both trailer configurations ($x^* \leq 1/2$), the horizontal or vertical dimensionless airflows were relatively high. Only two values were lower than 0.1, which means that less than 10% of the injected airflows throughout the zone of carcasses under consideration in the horizontal or in the vertical direction. Without an air duct, the low vertical flow at $x^* = 2/8$ (0.02) is offset by a high horizontal flow (0.23/0.43). With air ducts, the low horizontal air flow at $x^* = 1/8$ (0.09) was offset by higher vertical flow values.

In the rear part of both trailer configurations, there were zones in which both vertical and horizontal dimensionless flow rates are weak: without an air duct, at $x^* \approx 7/8$ (0.04 vertically, 0.07 longitudinally); with air ducts, at $x^* \approx 6/8$ (0.07/0.03 vertically, 0.00 longitudinally). As suggested in Section 3.2, recirculation in the lateral planes may offset the low vertical and longitudinal velocity components. It should also be borne in mind that the simplified airflow diagram is based only on the net flow rates, and this gives a 2D description (averaged in the z direction). In fact, in the rear of the trailer, there was reverse flow in part of the section above the carcasses (for example at $x^* = 5/8$, without an air duct, the net flow rate was 0.52, resulting from 0.59 direct flow and 0.07 reverse flow). Finally, the precision of the flow rate estimation could be improved by using a greater number of measuring positions.

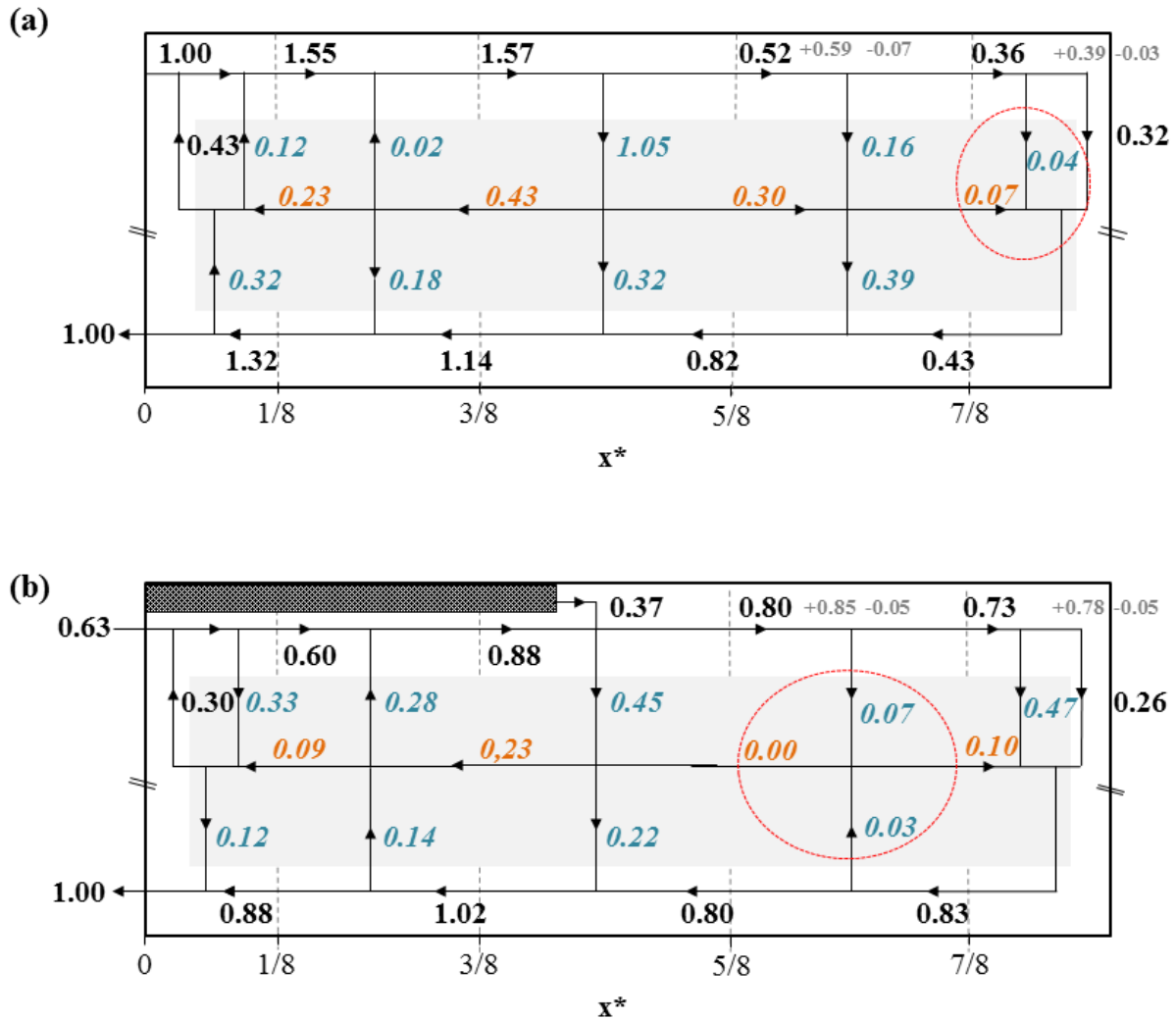


Figure 2-12 : Schematic airflow rate distribution in the loaded trailer (a): without air ducts, (b): with air ducts. Values represent Q^* . Bold values correspond to the airflow rates calculated from the measurements; grey values correspond to the airflow calculated in the flow direction (+), opposite direction (-); italic blue values are deduced from the variations in the bold values, italic orange values are deduced by mass balance on the internal nodes, red circles are potential risk zones.

The volume occupied by carcasses is considered as a porous media. The porosity is defined as the volume fraction occupied by the fluid: the void volume within the carcasses divided by the total volume of the porous medium. Using the X-ray scan, the volume of the 215 carcasses loaded in the trailer was estimated to 19.3 m^3 . Knowing that the carcasses occupied about 45.9 m^3 of the trailer volume, the obtained porosity (ϵ) was around 0.58. In this case an average interstitial air velocity

can be evaluated using the following equation: $V_{\text{int}} = Q/(A\varepsilon)$ where Q is the flow rate, A the normal section and ε the porosity.

In the vertical direction, a dimensionless vertical flow rate of 0.1 corresponds to an interstitial velocity of about $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; in the horizontal direction, it corresponds to an interstitial velocity of about $0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

If one can evaluate the minimal interstitial velocity capable of ensuring acceptable refrigeration of the carcasses, analysis of the airflow (vertical velocities just above the carcasses, dimensionless flow rates in the simplified airflow diagram) can determine whether or not a given configuration is appropriate.

3. Conclusion

Using a reduced-scale trailer loaded with pork carcasses (1:3.3) with respect to the Reynolds number and a 2D LDV technique, airflow was successfully characterized in two trailer configurations (with/without air ducts). Air circulation around the carcasses was less heterogeneous with air ducts. However, in both configurations, a zone of low air velocity was identified in the rear part of the trailer. In these zones, low heat transfer intensity and increased air temperature could reduce the refrigeration rate, which in turn could affect the sanitary quality of the carcasses. In future studies, the experimental results will be compared with CFD simulations, making it possible to investigate other configurations (number of rails, number of carcasses...) and to validate them using a CFD model. Also, the heat transfer intensity between carcasses and the air will be characterized experimentally at different positions in the trailer. A model combining heat transfer by convection with air and conduction inside the carcasses as well as predictive microbiology will then be applied in order to perform risk evaluation.

Chapitre 3 : Caractérisation des transferts
convectifs dans un camion frigorifique
chargé de carcasses de porc

1. Introduction

Afin de compléter les informations sur les écoulements d'air présentés dans le chapitre 2, des mesures de coefficients de transfert convectif entre l'air et la surface des carcasses de porc au sein de la maquette de semi-remorque ont été réalisées. Ces données sont essentielles pour la prédiction du refroidissement des carcasses pendant le transport. Pour cela, deux demi-carcasses en plâtre ont été fabriquées, sur lesquels trois fluxmètres ont été disposés sur les côtés couenne et trois sur les côtés viande (sur chaque côté les fluxmètres ont été placés sur le jambon, sur les côtes et sur l'épaule). Chaque demi-carcasse est par ailleurs pourvue d'une résistance chauffante et instrumentée par 12 thermocouples. Les mesures ont été réalisées à 10 positions de carcasses dans la maquette en utilisant deux configurations (avec et sans gaines).

2. Principaux résultats et perspectives

Les valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection varient considérablement le long de la remorque dans les deux configurations (avec ou sans gaines). Des différences ont été observées entre la couenne et le muscle pour toutes les positions. Les coefficients de transfert convectifs mesurés au niveau des jambons sont plus élevés que ceux mesurés au niveau des côtes et de l'épaule. Un lien a été établi entre les coefficients de transfert de chaleur par convection mesurés par fluxmètres et les vitesses d'air estimées d'après les mesures par LDV (Laser Doppler Velocimetry). Les valeurs de coefficient de transfert convectif ont été utilisées dans le chapitre 4 afin de prédire l'évolution de la température du jambon au cours de transport.

3. Article 2

Experimental characterization of heat transfer inside a refrigerated trailer loaded with pork carcasses

M. Merai^{1,2,*}, D. Flick², L. Guillier³, S. Duret¹, O. Laguerre¹

¹ Irstea, UR GPAN, Refrigeration Process Engineering Research Unit, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony, France

² UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

³ Université Paris-Est, Anses, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety, Food Safety Laboratory, 23 avenue du Général de Gaulle, 94706 Maisons-Alfort Cedex, France

* (mouna.merai@irstea.fr)

Abstract

Measurements of convective heat transfer coefficients on reduced-scale replicates of half pork carcasses were conducted. Measurements were performed on both the muscle and rind sides at three positions: ham, loin and shoulder. The carcasses were placed in the symmetry plane and near the wall of a reduced-scale refrigerated trailer with or without air distribution ducts. The convective heat transfer coefficient values varied significantly along the trailer in both configurations (with or without air duct). Differences were observed between the rind and muscle sides for all positions. The heat transfer coefficients of the ham part were higher than those of the loin and shoulder parts. An analysis was conducted by correlating the measured convective heat transfer coefficients with the air velocity fields measured by Laser Doppler Velocimetry presented in a previous study.

Keywords: convective heat transfer coefficient, pork carcass, refrigeration, transport, trailer

Nomenclature

a	Nusselt's correlation coefficient
A	heat transfer surface area [m^2]
b	Nusselt's correlation exponent
g	gravitational acceleration [$m.s^{-2}$]
Gr	Grashof number
h	convective heat transfer coefficient (CHTC) [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
L	characteristic length [m]
Nu	Nusselt number
Pr	Prandtl number
q	heat flow through the surface [W]
Re	Reynolds number
T_{air}	air temperature [K]
T_s	carcass surface temperature [K]
v	air velocity [$m.s^{-1}$]
x^*	dimensionless position along the trailer length ($x^* = x/L$)
x^*_{max}	dimensionless maximum loading position in the trailer
x^*_{min}	dimensionless minimum loading position in the trailer
ν	kinematic viscosity of air [$m.s^{-2}$]
λ	thermal conductivity of air [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
μ	dynamic viscosity of air [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
ρ	air density [$kg.m^{-3}$]
β	thermal expansion coefficient [K^{-1}]
ΔT	temperature difference [K]

Indices

f	full scale
r	reduced scale
$1/2$	half airflow rate

1. Introduction:

In order to prevent pathogenic bacteria growth in meat during slaughter operations, legislation requires the application of refrigeration immediately after post mortem inspection of carcasses. However, it is important to control the kinetics of product temperature reduction in order to optimize meat maturation (ensuring good technological quality, i.e. tenderness) and sanitary quality (Savell et al., 2005).

French and European regulations have been enforced for the temperature of meat carcasses before and during transportation (CE n°853/2004). According to this regulation, the meat must be chilled to reach a core temperature of 7 °C as soon as possible. This refrigeration must be performed in the cold rooms of the slaughterhouse before any carcass handling operation such as transport or cutting. Derogations have been adopted in some countries to allow the transport of carcasses or half-carcasses with a core temperature above 7 °C, if the transport duration is less than 2 hours. In 2014, Efsa adopted a scientific opinion concluding that the surface temperature is an appropriate indicator of bacterial growth. This is related to the fact that aerobic bacteria are essentially on the surface of pork carcasses. Certain aerobic bacteria, especially *Pseudomonas* spp., can reach critical levels much faster than pathogenic bacteria; their growth kinetics may be an indicator of temperature abuse during storage and transport.

It is to be emphasized that the transport of a product in a refrigerated trailer is complex because of the high heterogeneity of air temperature and velocity. Lower product temperatures are often observed at the front, while higher temperatures are observed at the rear close to the doors (Moureh and Flick, 2005). The position of potential sanitary risk (high-temperature zone) can be influenced by the trailer design, the carcass arrangement and the loading density. Thus, an understanding of the airflow and the convective heat transfer coefficient (CHTC) variation at different positions is essential in order to allow the identification of risk zones (areas with low air velocities and low CHTC). An experimental study of airflow in a trailer loaded with pork carcasses has been previously conducted using LDV (Laser Doppler Velocimetry) (Merai et al., 2018). The present work completes this study by investigating the thermal exchange between the air circulating in the trailer and the carcasses at different positions.

Measurements of the CHTC for simple geometries (cylinders, spheres...) and different dimensions have been investigated in the past and reported in the literature (Ghisalberti, 1999), and the effects of air velocity, turbulent intensity and the angle of the object with respect to the airflow have also

been investigated. To estimate the overall CHTC between the air and the surface of the carcasses, Kondjoyan (2006) likened the carcasses to cylinders. This author also reported the effect of product dimensions, water content and the presence/absence of packaging on the CHCT values. The assumption that the real product geometry can be considered as a simple shape and the use of an overall uniform heat transfer coefficient instead of local values implies significant uncertainties regarding refrigeration kinetics prediction (Kondjoyan and Daudin, 1997).

Several studies were conducted in order to measure the CHTCs on one carcass or a part of a carcass (Harris et al., 2004, Willix et al., 2006, Kondjoyan and Daudin, 1997). The most commonly used method is based on measurements under stationary conditions using flux-meters and thermocouples located in different zones of the carcass surface.

Regardless of the studied carcass type, pork (Kondjoyan et Daudin, 1997), beef (Willix et al., 2006) or lamb (Harris et al, 2004), results showed that the air velocity and the turbulent intensity had a significant effect on the measured CHTC. Moreover, the CHTC values were significantly different depending on the measurement zone. The parts of the carcasses that were more exposed to the airflow showed higher values. Differences between the maximum and minimum values reached an average of 140% (Willix et al., 2006).

The purpose of this study was to measure CHTCs on the surface of carcasses loaded in a refrigerated trailer. Unlike previous studies (Harris et al., 2004, Willix et al., 2006, Kondjoyan and Daudin, 1997), this work does not focus on a single carcass with imposed upstream air characteristics, but instead focuses on carcasses located close to each other in the complex airflow pattern of a trailer. Because of limitations linked to feasibility and the cost of conducting experiments in the field with real carcasses in a real trailer, the experiments were performed in a reduced-scale trailer loaded with reduced-scale carcasses. The heat transfer coefficient was measured on different parts of instrumented carcasses (ham, loin and shoulder) throughout the reduced-scale trailer. Two trailer configurations were studied (with or without air ducts) and the heat transfer coefficient values obtained were compared. Also, the results obtained were correlated with the airflow pattern inside both configurations using the data presented in a previous study (Merai et al., 2018).

2. Materials and methods

2.1. Experimental device

2.2.1. Trailer filled with carcasses

The studied transport configuration (number of rails and carcasses, layout) was chosen according to the most common configurations encountered in the long-distance transport of pork carcasses (Figure 3-a) observed by our partners, the French Pork Institute (IFIP) and the French Meat Association (Culture Viande). In this configuration, the refrigerated trailer had an internal length of 13.3 m and was loaded with 215 pork carcasses hung on 5 rails (Figure 3-b and Figure 3-c).

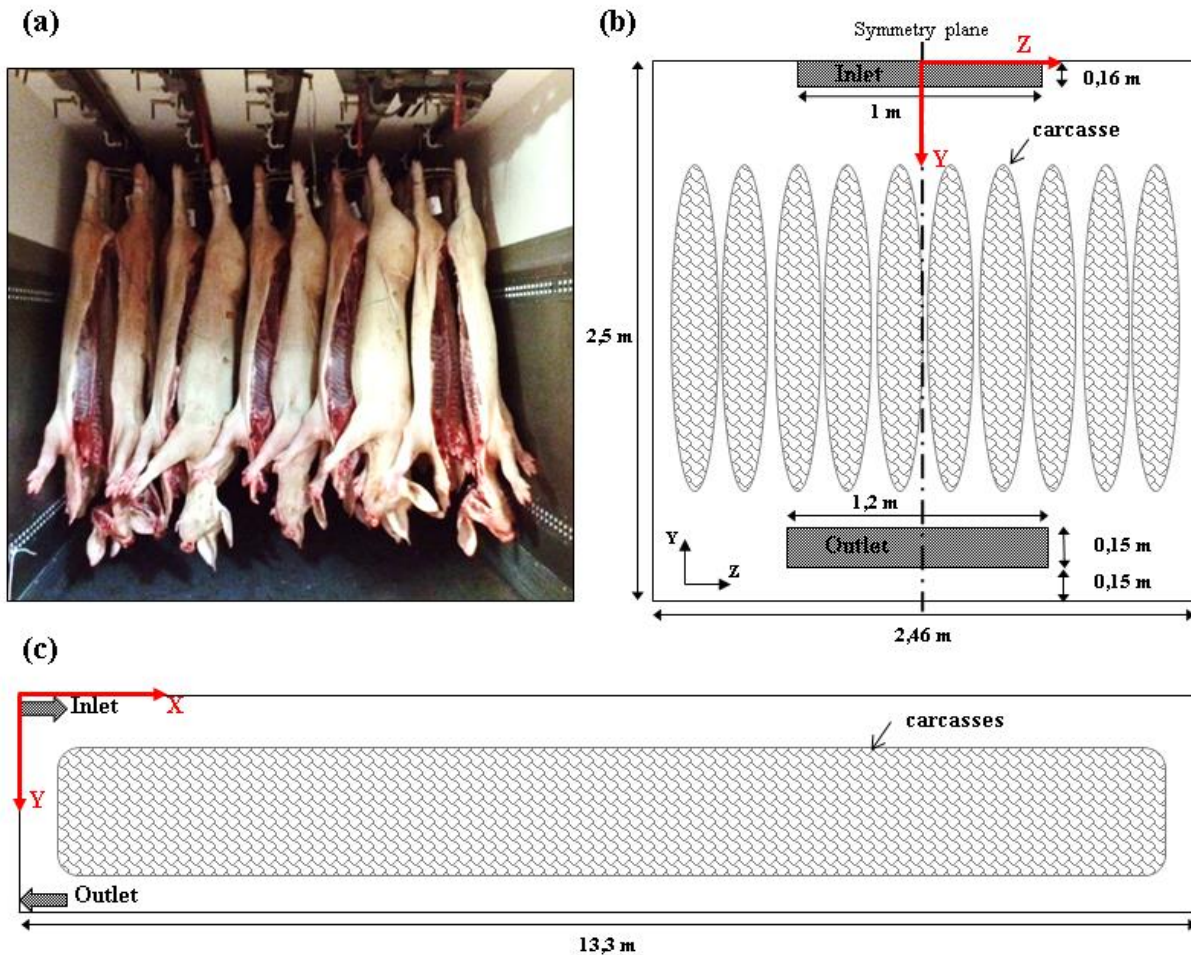


Figure 3-1: Loaded trailer; (a) real scale of the chosen configuration; (b) front view and (c) side view with characteristic dimensions.

To conduct our experiments within reasonable dimensions, a reduced-scale trailer with a reduced-scale/full-scale ratio of 1:3.3 (745 x 757 x 4000 mm) was used. In order to obtain the same airflow pattern at a reduced scale as at full scale, the inlet velocity of the reduced-scale trailer was adjusted

in order to maintain the same Reynolds number as under full-scale conditions. Even though the air was warmer in the reduced-scale trailer ($\approx 20^\circ\text{C}$) than in a full-scale trailer, the physical properties of the air can be considered almost identical ($\rho_f \approx \rho_r$ and $\mu_f \approx \mu_r$), thus:

$$\text{Re}_f = \text{Re}_r \leftrightarrow \frac{\rho_f V_f L_f}{\mu_f} = \frac{\rho_r V_r L_r}{\mu_r} \rightarrow \frac{V_r}{V_f} = \frac{L_f}{L_r} = 3.3 \quad (1)$$

The reduced-scale trailer (with a glass side wall) was loaded with 430 reduced-scale half-carcasses made of polyurethane (foam). They were obtained using a mold of a carcass produced by 3D printing based on an X-ray scan of a full-scale half-carcass (Figure 3-).

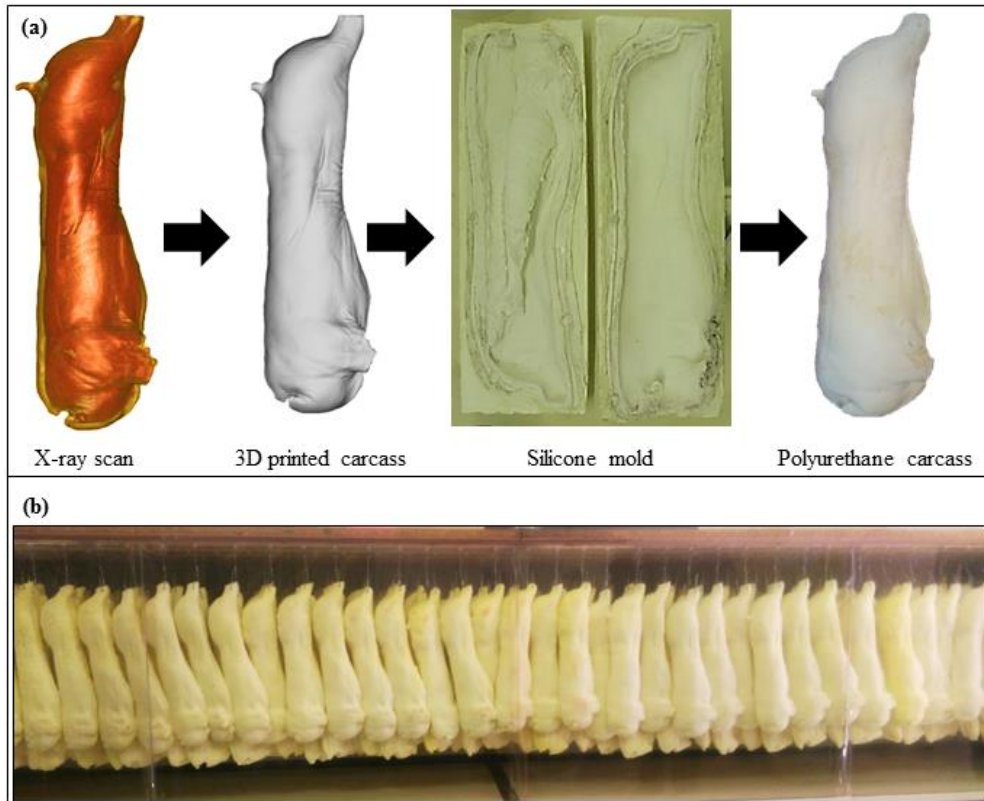


Figure 3-2 : (a) Steps in the production of reduced-scale carcasses based on the X-ray scan of a real pork carcass; (b) Side view of the reduced-scale trailer loaded with reduced-scale carcasses.

The heat transfer in the studied configuration is mainly driven by convection between the blown air and the carcasses. If natural convection should be taken into account in this study, the Grashof number in the reduced-scale trailer should also be the same as that in the full-scale trailer.

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (2)$$

where g is the gravitational acceleration, β the thermal expansion coefficient, ΔT the temperature difference between the carcass surface and the internal air, L a characteristic length (e.g. height of the trailer) and ν the kinematic viscosity. As the fluid used in both full and reduced scales is air, $\beta_f = \beta_r$ and $\nu_f = \nu_r$. The Grashof number conservation would imply that $\Delta T_r = (L_f/L_r)^3 \approx 36 \Delta T_f$ where ΔT_r and ΔT_f are respectively temperature differences in the reduced-scale and the full-scale trailers, and L_f and L_r are respectively the characteristic lengths of the full-scale and the reduced-scale trailers. In the case of $\Delta T_f = 5^\circ\text{C}$, ΔT_r would be around 180°C . Because of feasibility issues, natural convection could not be reproduced in the reduced-scale trailer. Thus, forced convection alone was characterized in our study.

Two different air inlet configurations were used in this study: with and without air ducts. The configuration with two rectangular ducts (0.2 m x 0.16 m x 6 m) is similar to some configurations encountered in France for carcass transportation. Both configurations have a symmetry plane so that the experimental investigations and the numerical simulations (to be presented in future work) can be conducted only on one half of the trailer. In the case without an air duct, the entire airflow is blown at $x = 0$ m (front of the trailer). In the case of the trailer with air ducts, 63% of the airflow is blown at $x = 0$ m (front) and 37% is blown at $x = 6$ m at the outlets of the two distribution ducts.

2.1.2. Instrumented half-carcasses

The method developed for the measurement of heat convection coefficients on the carcasses, similar to those used in previous studies (Kondjoyan and Daudin, 1997, Willix et al., 2006), consists of heating continuously instrumented half-carcasses until a steady state is reached (constant temperature). The CHTC can be calculated using the measured heat flow and the recorded temperature difference between the surface of the carcass and the surrounding air according to Newton's law: $q/A = h(T_s - T_{\text{air}})$ (3)

Two reduced-scale plaster half-carcasses were manufactured as shown in Figure 3-. Two silicone heating panels (Vulcanic-France), each with a customized shape and a maximum heating capacity of 96 W were incorporated inside the plaster mass to ensure uniform heating to the greatest possible extent. Previously calibrated T-type thermocouples were placed on the surface of the plaster near the flow meters, and in the ambient air on the leg and shoulder side, to monitor the temperature evolution.

Circular (30 mm diameter) copper-surface heat flux sensors (Captec-France) with T-type thermocouples were bonded to the surface of the plaster half-carcasses. The nominal sensitivity of each flow meter has been provided by the manufacturer, and this value is greater than $0.6 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1}\text{m}^2$. The specific value obtained with each heat flux sensor makes it possible to convert the output signal from μV into $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Each plaster half-carcass was hung with a half-carcass made of polyurethane (Figure 3-3b).

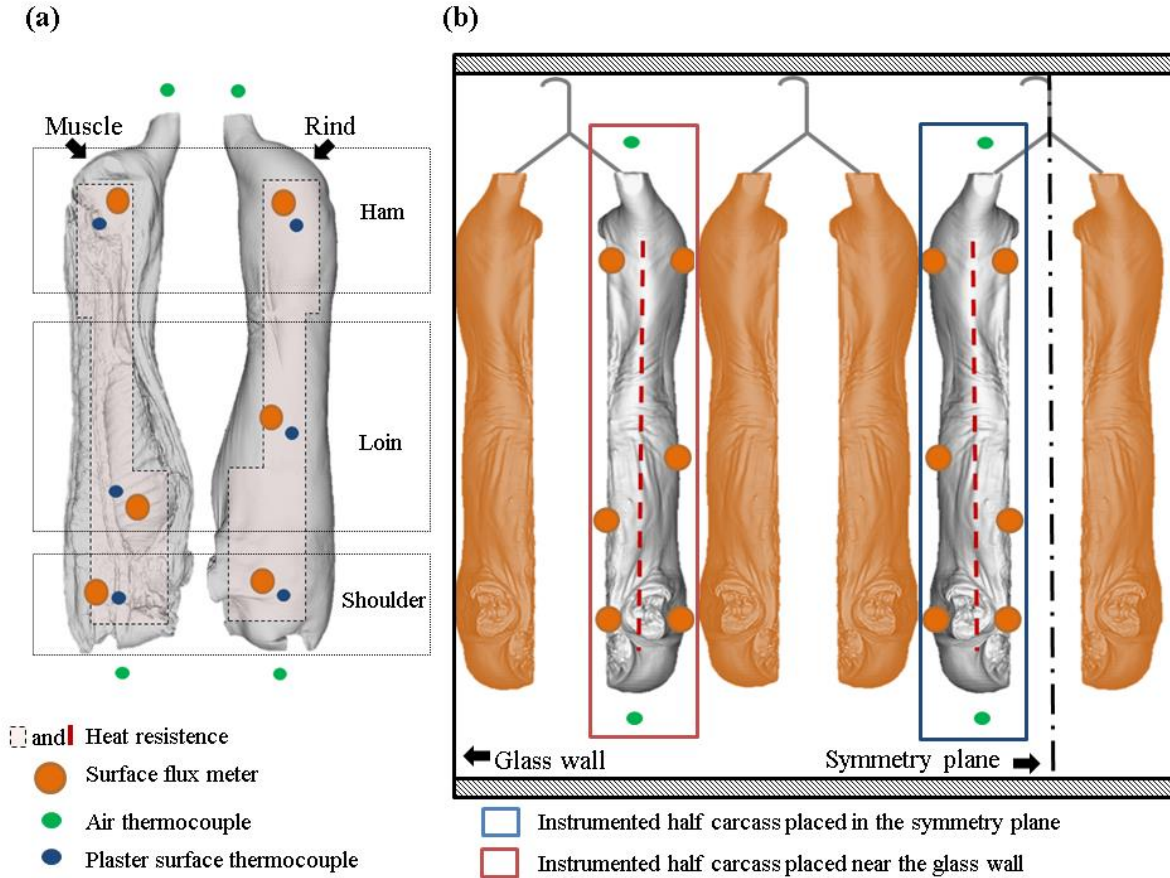


Figure 3-3 : Instrumentation of the plaster half-carcasses (a) location of the heating panels, heat flux sensors, surface thermocouples and ambient air; (b) positions of the plaster half-carcass and the polyurethane ones.

The heat transfer coefficient in the full-scale trailer (h_f) was determined using Nusselt's analogy. Because Nu is a function of the Re and Pr numbers, and since $Re_f = Re_r$ and $Pr_f = Pr_r$:

$$Nu_r = \frac{h_r L_r}{\lambda_r} = Nu_f = \frac{h_f L_f}{\lambda_f} \rightarrow \frac{h_f}{h_r} = \frac{L_r \lambda_f}{L_f \lambda_r}$$

Air conductivity (λ_r) in the reduced-scale trailer where the mean temperature of the air is around 20°C is 0.0256 W.m⁻¹.K⁻¹. In a full-scale trailer during transport, the air temperature is around 4°C, which implies an air conductivity (λ_f) of 0.0243 W.m⁻².K⁻¹. Thus, we can obtain the following

$$\text{equation } \frac{h_f}{h_r} \approx \frac{1}{3.325} \quad (4)$$

According to Daudin and Kuitche (1996), the energy exchanged by radiation is much lower than the energy exchanged by convection under the usual chilling conditions. In the case of a product surrounded by others at similar temperatures such as in our case, radiation is much lower (Kondjoyan 2006) and can be neglected.

2.2. Experimental conditions

The measurements were conducted on half of the trailer assuming the same phenomena in the other half because of the presence of a symmetry plane in the studied configurations. The two instrumented half-carcasses made of plaster were firstly placed in the reduced-scale trailer loaded with foam half-carcasses (428 half-carcasses + 2 plaster half-carcasses) in different positions (Figure 3-4).

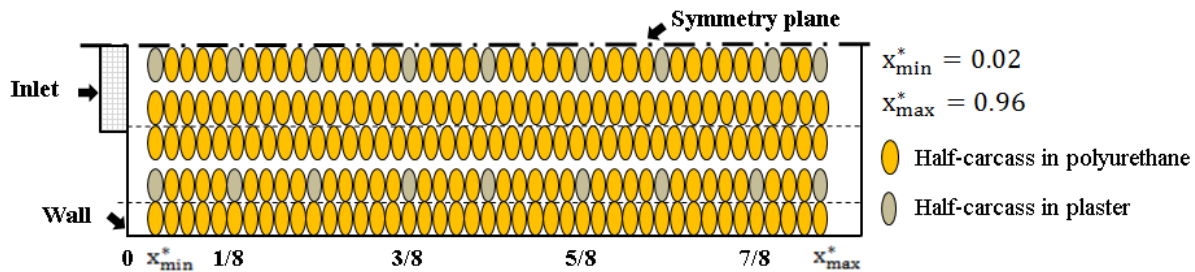


Figure 3-4 : Top view of half of the trailer loaded with half-carcasses showing the measurement positions used to measure the CHTC using instrumented plaster half-carcasses.

These two half-carcasses were heated using a heating capacity of 45 W for 45 minutes before starting the blowing of the trailer with a reference flow rate of 5500 m³.h⁻¹ (full-scale value). Temperature and heat flux sensor output signal acquisitions were performed every minute using a data-logger (Keysight 34970A) and acquisition software (Agilent bench link data). It took 6 h to reach steady state. Then the data were recorded during a 1-h stationary phase.

Preliminary tests were carried out at the position $x^* = 3/8$ in order to check the repeatability and reproducibility of the measurement of the CHTC values to validate the experimental protocol. The

repeatability was checked by repeating the operations explained in the previous paragraph on three successive days without removing the instrumented carcasses from the trailer. The reproducibility test involved the removal and repositioning of the instrumented carcass in between two measurements.

In order to investigate the effect of the airflow rate on the CHTC values, additional experiments have been carried out at three positions (i.e. $x^* = 6/8$, $7/8$ and x_{\max}^*) in the trailer without air ducts. For those experiments, a reduced inlet airflow rate (half of the reference inlet airflow rate) has been used in order to represent the case of poor ventilation in the trailer. The CHTC values obtained were then compared with those obtained under the reference conditions of this study.

In all, 46 experiments were performed on the trailer without air ducts and 39 on the trailer with air ducts.

3. Results and discussion

3.1. Experimental repeatability and reproductibility

Three repeatability experiments were performed at $x^* = 3/8$ in the trailer without air ducts. The discrepancy of the results of these three experiments was not significant, whatever the position on the instrumented carcass (ham, loin and shoulder). The average standard deviation was about $0.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, whereas the largest difference was $0.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (in the muscle part of the ham placed near the wall).

Three reproducibility experiments were performed at the same position ($x^* = 3/8$). There was good agreement between the obtained results on both instrumented half-carcasses; the average standard deviation was $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ and the difference was always less than $0.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

The effect of the carcass's heating capacity on the CHTC was also investigated. Two heating capacities were tested (45 W and 90 W at $x^* = 1/8$) and the CHTC values obtained for different parts of the instrumented half-carcasses were compared. Results showed that the differences are 2% on the average and never exceed 5%. Thus, the discrepancy due to the heating capacity can be considered as non-significant as expected for forced convection and the capacity of 45 W was used in all the other experiments. It should be borne in mind that the reported values represent the full-scale results and these values were calculated from the measured value obtained in the reduced-scale trailer by using Eq. 4.

3.2. Overall view of the results

All measured local CHTC values throughout the trailer in both studied configurations (without or with air ducts) were summarized in Figure 3-.

CHTC values varied according to the height in the carcass (ham, loin and shoulder), the side of the carcass (muscle or rind), the lateral position in the trailer (near the symmetry plane and near the lateral wall), the longitudinal position in the trailer (9 measuring positions from the front to the rear of the trailer) and the air blowing configuration (with or without air ducts).

The maximum values were obtained on the ham muscle side of the half-carcass placed near the symmetry plane in both studied configurations. In the trailer without air ducts $h_{\max} = 29.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ in the middle of the trailer and in the presence of air ducts, and $h_{\max} = 37.1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ was obtained at the rear of trailer.

Minimum CHTC values were also obtained on the surface of the half-carcass placed near the symmetry plane in both studied configurations. Low CHTC values were obtained on the loin muscle side, at the rear of the trailer without air ducts ($h_{\min} = 1.68 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) and at $x^* = 6/8$ on the shoulder muscle side in the trailer with air ducts ($h_{\min} = 0.97 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Because of the complexity of airflow in our study, CHTC varies locally in a complex manner. In order to provide a better understanding, mean values have been calculated and are shown in Section 3.3.

3.3. Effect of the location at the surface of the carcasses

In order to appreciate the effect of the heat flux sensor position at the surface of the instrumented half-carcass on the measured CHTC, a mean value along the trailer (in both studied configurations) is represented in Figure 3-.

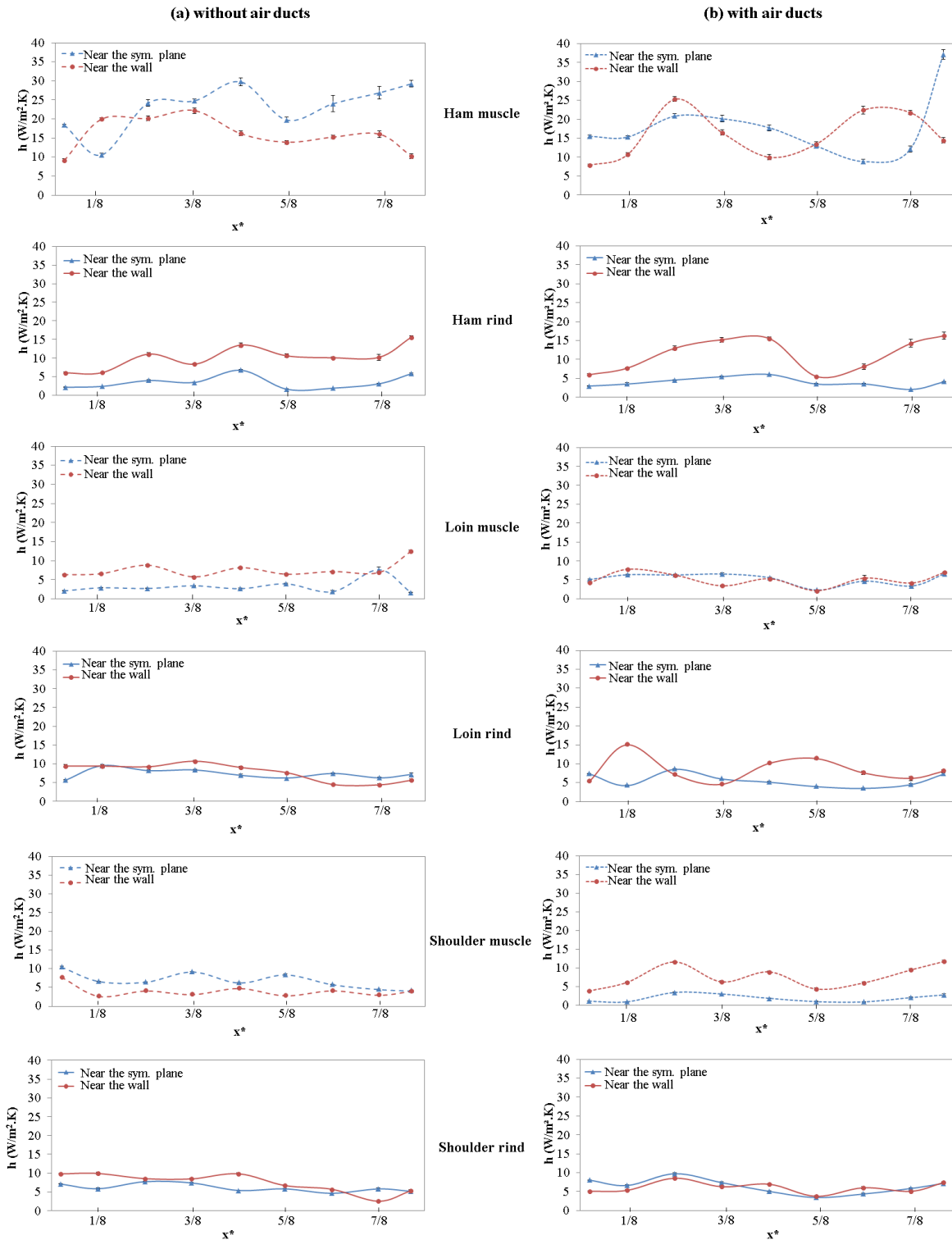


Figure 3-5 : Local CHTC measured on the muscle and rind surfaces of the ham, loin and shoulder parts of the instrumented half-carcasses in the trailer (a) without air ducts and (b) with air ducts.

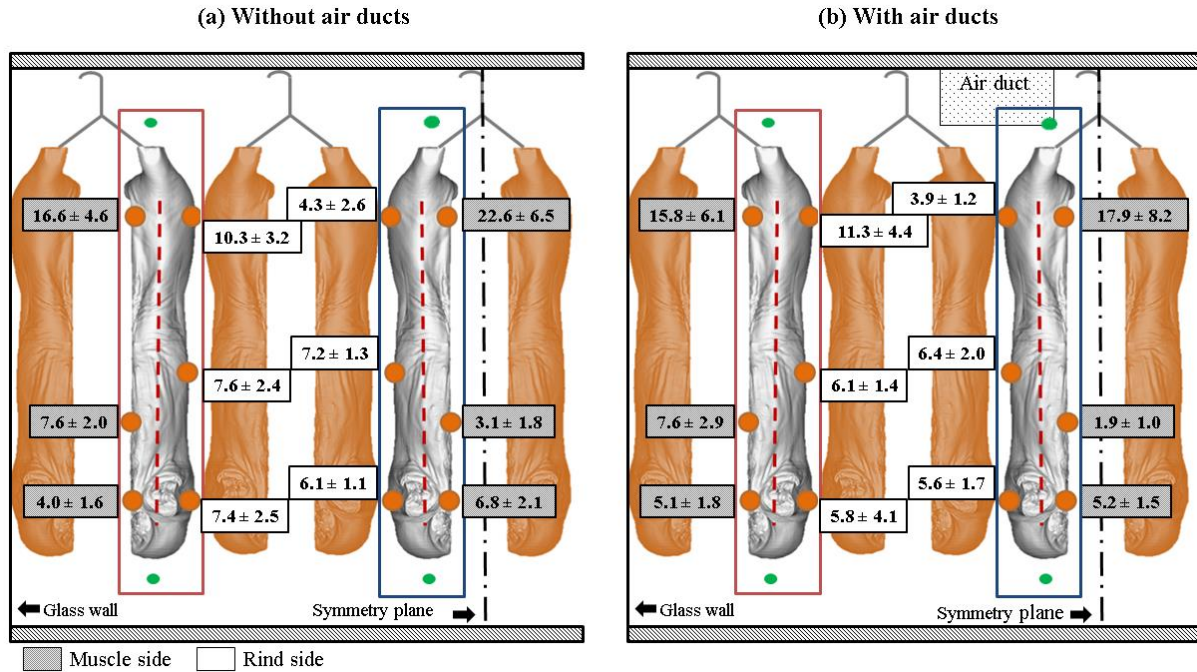


Figure 3-6 : Mean CHTC values ($W. m^{-2}. K^{-1}$) along the trailer and their standard deviation at different positions of the instrumented half-carcass. (a) without air ducts, and (b) with air ducts.

Figure 3-6 shows a large variation in the mean values between the ham, loin and shoulder parts in both studied configurations. Results were significantly higher in the ham part (min. 3.4 $W. m^{-2}. K^{-1}$, max 22.6 $W. m^{-2}. K^{-1}$, average 12.6 $W. m^{-2}. K^{-1}$) than in the loin part (min. 1.9 $W. m^{-2}. K^{-1}$, max 7.7 $W. m^{-2}. K^{-1}$, average 6.0 $W. m^{-2}. K^{-1}$) and in the shoulder part (min. 4.2 $W. m^{-2}. K^{-1}$, max 7.4 $W. m^{-2}. K^{-1}$, average 5.8 $W. m^{-2}. K^{-1}$).

This is due to the fact that air is blown above the carcasses near the ceiling of the trailer and flows with relatively high velocities (most often $> 2 m.s^{-1}$, Merai et al. 2018).

Considering the ham, the observed CHTC values were higher on the muscle side (min. 15.8 $W. m^{-2}. K^{-1}$, max 22.6 $W. m^{-2}. K^{-1}$, average 18.0 $W. m^{-2}. K^{-1}$) than on the rind side (min. 3.4 $W. m^{-2}. K^{-1}$, max 11.3 $W. m^{-2}. K^{-1}$, average 7.2 $W. m^{-2}. K^{-1}$) in both configurations. This is mainly due to the fact that with the suspension system used, the ham part of a carcass is in contact with the rind side of another carcass, whereas there is a greater air space between the muscle sides of the two half-carcasses, thus allowing a higher airflow rate.

CHTC variations between the muscle and rind sides of the loin and the shoulder parts were lower ($< 2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, Figure 3-6).

CHCT variations are mainly related to the characteristics of the airflow around the carcasses (particularly air velocity) and to the characteristics of the product itself (shape, dimensions, position relative to airflow direction) (Verboven et al., 1997). These observations are similar to those of Kondjayan, 2006: for the same carcass, some parts are exposed to high air velocity while others are exposed to almost stagnant air.

The overall average CHTC values in the cases with ducts and without ducts are similar ($7.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ and $8.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respectively).

3.4. Relationship between convective heat transfer coefficient and airflow pattern

In order to understand the effect of local air velocity (measured by LDV, already presented in Merai et al, 2018) on the CHTC value, the following analysis was carried out.

3.4.1. Trailer without air ducts

As presented in Section 3.2, the CHTC value varies according to the position on the same carcass. Figure 3-7a shows the variation in this measured coefficient for the ham, loin and shoulder along the trailer. The presented values are the mean of both the muscle and the rind sides of the carcass located on the symmetry plane and near the side wall. These values were analyzed by comparing them with the simplified airflow pattern (Figure 3-7b) in which the dimensionless airflow is shown (Merai et al., 2018). This dimensionless airflow was defined as the ratio between the airflow rate at a given position and the airflow rate at the inlet.

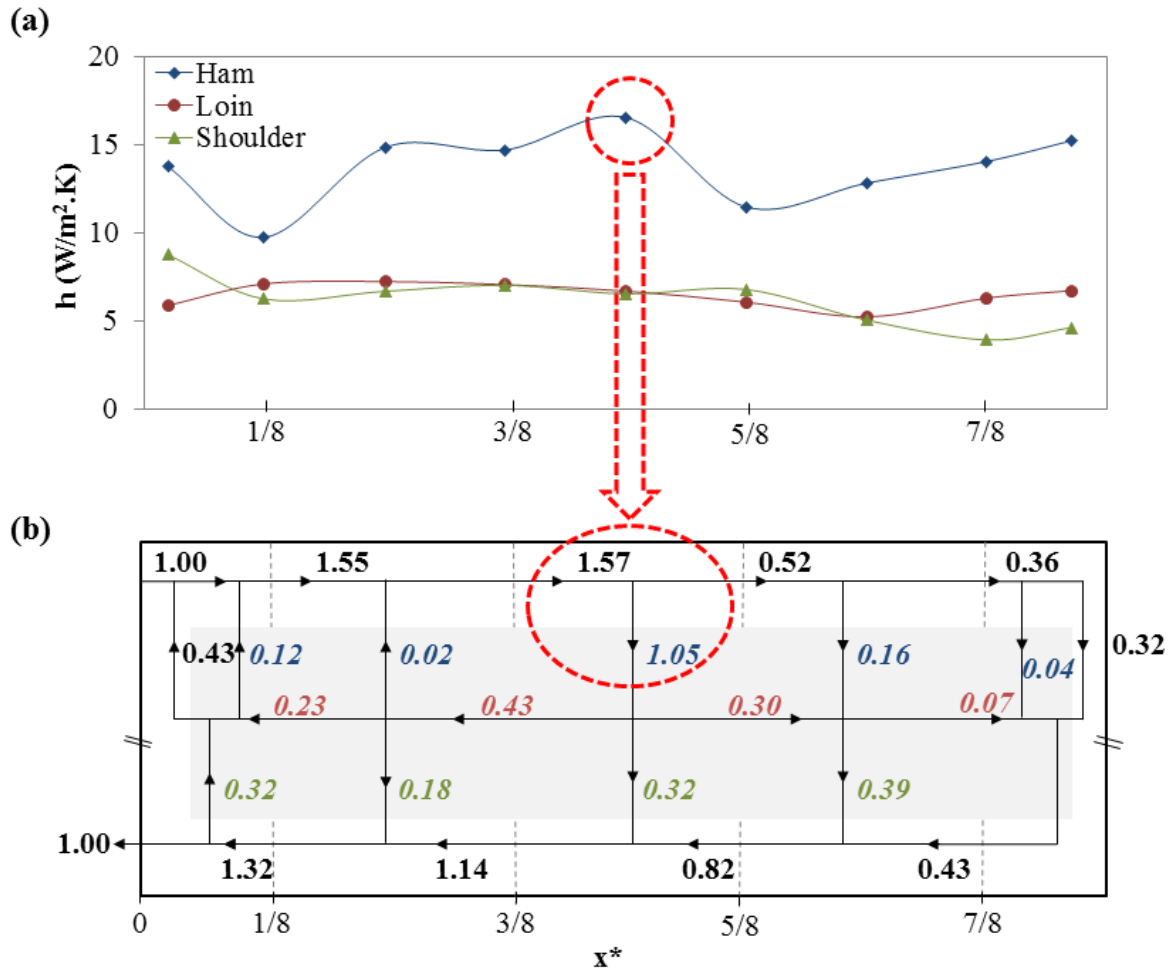


Figure 3-7 : (a) CHTC (mean values for rind and muscle sides of carcasses located near the symmetry plane and near the wall) along the trailer without air ducts at the surface of ham (blue \diamond), loin (red \blacksquare) and shoulder (green \blacktriangle), (b) Simplified airflow pattern in the trailer loaded with carcasses without air ducts (values represent dimensionless airflow rates).

High dimensionless airflow values were obtained on the top of the carcasses (ham parts) compared with the loin and shoulder parts. On the top of the carcasses, the dimensionless airflow increased from the blowing at the inlet of the trailer ($x^* = 0$) to $x^* = 4/8$. At this position, the airflow separates into 2 streams with different airflow rates: ceiling (low airflow rate) and downward vertical airflow (high airflow rate) throughout the carcasses. This explains the increase in CHTC values on the surface of the ham parts, and the maximum value at $x^* = 4/8$.

Stable mean CHTC values were obtained for both loin and shoulder ($\approx 7 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) because of the low airflow rate (vertical and horizontal flow) in the bottom part of the trailer. At the front of the trailer ($x^* \approx 0$), the higher CHTC value for the shoulder compared with that for the loin can be

explained by entrainment of the air from the bottom to the top of the carcasses due to the strong blowing.

It is important to note that the lowest CHTC values are not necessarily in the rear part of the trailer as observed by Moureh and Flick (2005) in the case of a trailer loaded with pallets. In fact, about 32% of the airflow was directed to the rear of the trailer and goes down the empty space between the last carcasses and the trailer door.

In order to illustrate CHTC differences according to the lateral position, Figure 8 compares the evolution of CHTC on the muscle side of the ham part near the symmetry plane and near the lateral wall. Overall, the CHTC (on the muscle side of the ham) is higher near the symmetry plane (average $23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) than near the wall (average $16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). However, the opposite is true at the particular location $x^* = 1/8$.

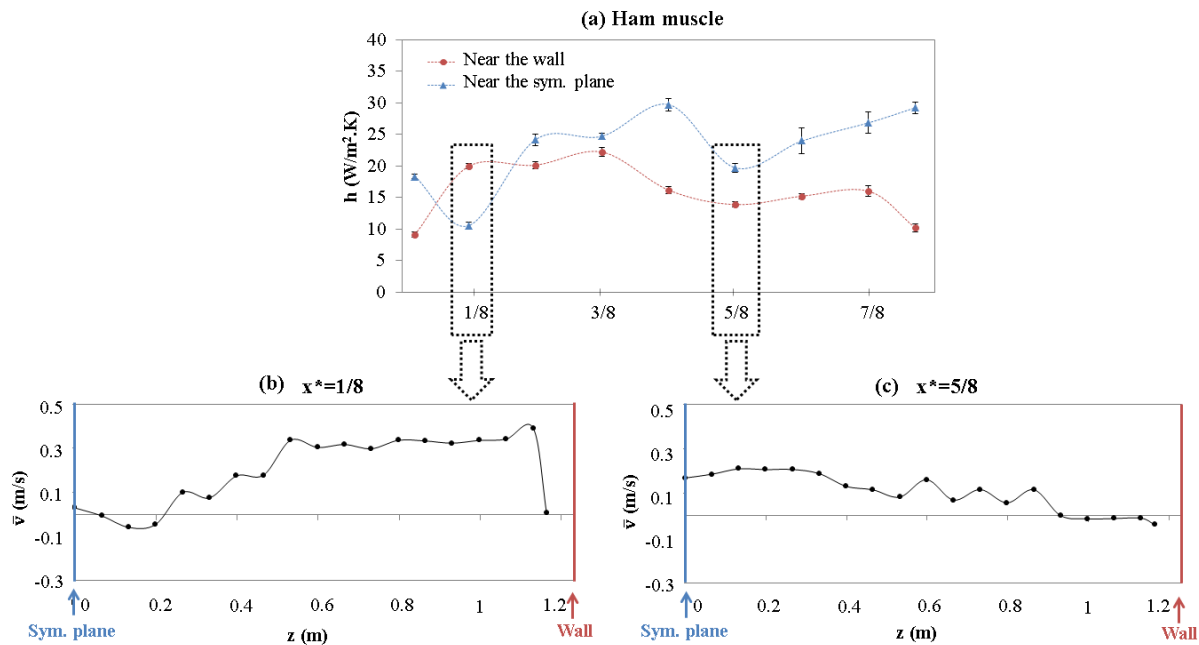


Figure 3-8 : (a) CHTC at muscle side of ham of the carcasses near the side wall (red ●) and near the symmetry plane (blue ■), (b) Vertical time averaged velocity (positive downwards) on the top of carcasses at $x^* = 1/8$ and (c) at $x^* = 5/8$.

These results can be explained by the velocity profile obtained using LDV on the top of the carcasses at positions $x^* = 1/8$ (Figure 3-8b) and $x^* = 5/8$ (Figure 3-8c). For $x^* = 1/8$; the vertical velocity on the top of carcasses is higher near the side wall than near the symmetry plane; whereas for $x^* = 5/8$, the vertical velocity is higher near the symmetry plane than near the side wall. This

illustrates that some of the trends observed for the CHTC can be explained by the previous velocity measurements using LDV (Merai et al., 2018). However, other CHTC variations could not be explained by the simplified flow pattern scheme (Figure 3-7a) or by measurements conducted above the carcasses (Figure 3-8a).

It would be interesting to correlate the local CHTC values obtained with the local velocity near to the carcasses. However, it was not possible to measure air velocity close to the carcass surfaces using LDV. A future computational fluid dynamic study (CFD model) will be conducted to estimate the relationship between local CHTC values and local velocities.

3.4.2. Trailer with air ducts

The same approach was used for the trailer with air ducts in order to analyze the effect of airflow characteristics on the CHTC. The CHTC values for different parts of the carcass (ham, loin and shoulder) are shown in Figure 3-9a (mean values on both rind and muscle sides for the carcasses located near the symmetry plane and near the side wall).

Similarly to the case without an air duct, the ham part presents the highest CHTC. The values increased at the front of the trailer ($0 < x^* \leq 2/8$) because of the entrainment effect of the air jet blown from the first air inlet. The value decreased for $2/8 < x^* \leq 5/8$ and then increased again for $x^* > 5/8$ because of the air blown from the distribution duct located at this position. The same trend was observed for the shoulder and loin parts along the trailer. However, CHTC values were much lower for the loin and shoulder parts compared with the ham parts. The lowest values ($\approx 3.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) were obtained at $x^* = 5/8$ where a stagnant airflow was observed in the simplified airflow of the trailer with air ducts (Figure 3-9b).

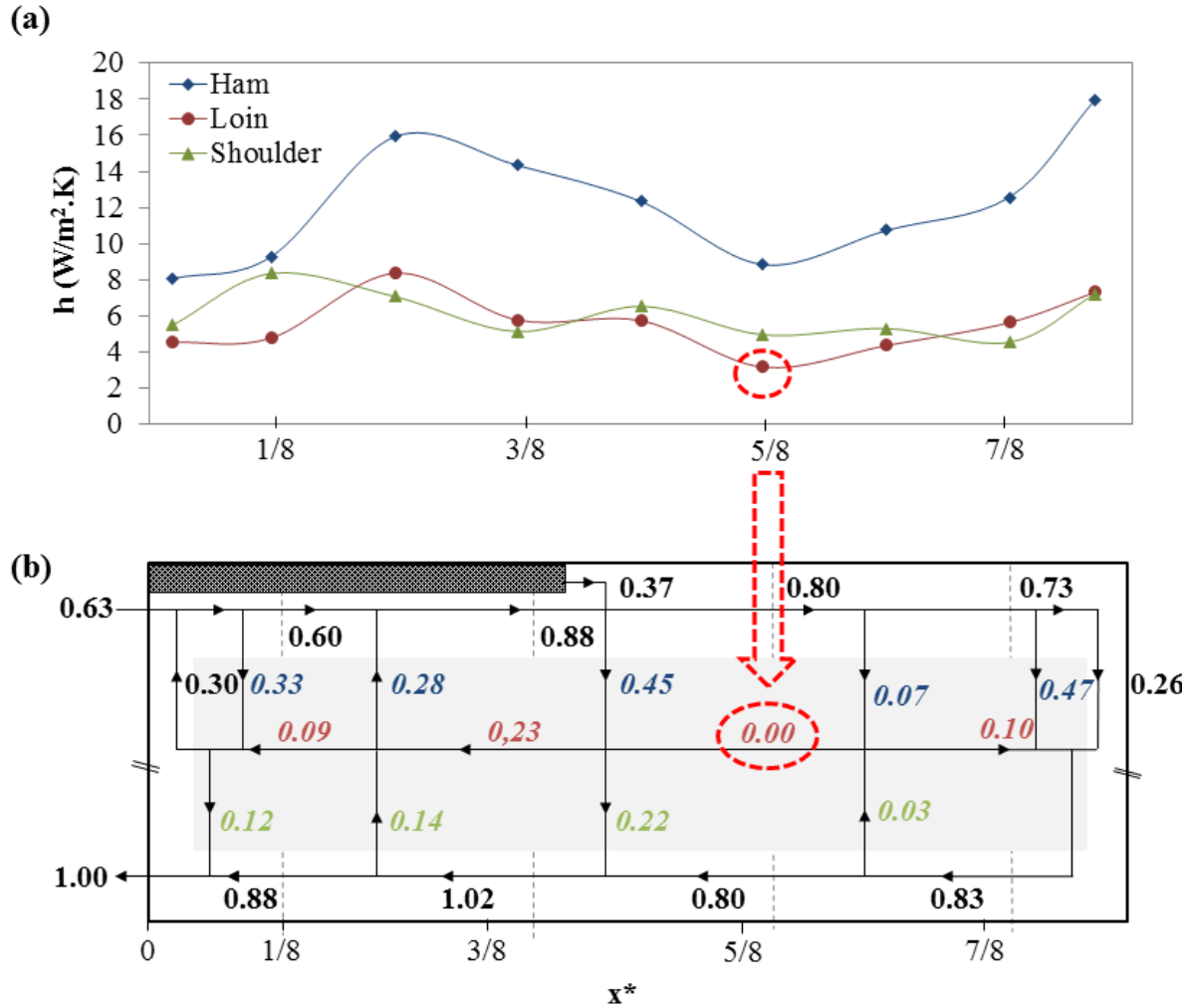


Figure 3-9 : (a) CHTC (mean values for rind and muscle sides of carcasses located near the symmetry plan and near the side wall) along the trailer with air ducts at the surface of ham (bleu \blacklozenge), loin (red \blacksquare) and shoulder (green \blacktriangle), (b) Simplified airflow direction in the trailer loaded with carcasses with air ducts (values represent dimensionless airflow rates).

By comparing the results shown in Figure 3-7a (without an air duct) and Figure 3-9a (with an air duct), it can be seen that the presence of air ducts does not improve the homogeneity of the CHTC values obtained. However, these results depend on the empty space between the last carcass and the rear door of the trailer (0.45 m in our study).

3.5. Effect of the airflow rate

Additional measurements were conducted at $x^* = 6/8, 7/8$ and x^*_{max} with only 50% of the reference airflow rate. The aim was to investigate the impact of lower air velocity on the CHTC. In practice,

the airflow rate may vary due to the trailer design, and some trailers offer a choice of two airflow rates.

In the trailer, forced convection is the dominant heat exchange mode and implies that $Nu = f(Re, Pr)$. The heat transfer fluid is air in our case ($Pr = 0.72$), and a simple correlation $Nu = a Re^b$ can therefore be used. In the literature, parameters a and b were determined for simple shapes and some food products (Harris et al., 2004). Based on the CHTC values obtained with the full airflow rate (h) and the half airflow rate ($h_{1/2}$), the following equation can be used to determine b values in the rear part of the trailer.

$$b = \frac{\ln(h/h_{1/2})}{\ln(2)}$$

For pork hindquarters, Kondjoyan and Daudin (1997) proposed $b = 0.73$, whereas in our study we obtained $b = 0.9 \pm 0.58$. Kondjoyan and Daudin (1997) conducted their study on a single hindquarter with controlled air velocity, turbulence and angle of exposure. In this study, because of the complex airflow pattern in terms of velocity and turbulence when the airflow rate is halved, the velocity around a given carcass is not necessarily half of the reference velocity in all places. In fact, the airflow pattern could change completely and exert an important effect on the local velocities. This could explain the large standard deviation of b . In addition, above the ham parts, the airflow was turbulent (b is expected to be about 0.8) while the flow was laminar between the carcasses near the loin and the shoulder parts (b is expected to be about 0.5). Indeed, in a previous study (Merai et al., 2018), the order of magnitude of the velocity in the porous medium, which is constituted by the carcasses, was evaluated as being $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the distance between the carcasses was around 30-40 cm, the Reynolds number is around 1800 in the loin region.

4. Conclusion and perspectives

A methodology for convective heat transfer coefficient measurement was developed using a steady state method. The method was applied to the case of pork carcasses loaded in a trailer. Instrumented plaster carcasses were made, and heat flux sensors were placed on different parts of the carcass (ham, loin and shoulder) on the muscle and rind sides. These carcasses were placed at different positions in a reduced-scale trailer (1:3.3) loaded with carcasses made of polyurethane representing airflow obstacles. Two configurations were studied: with and without air distribution ducts.

For the ham part, almost everywhere in the trailer, the convective heat transfer coefficient on the rind side was lower than that on the muscle side. This is mainly due to the fact that with the suspension system used, two carcasses located side-by-side are in contact on the rind side of the ham part; this led to low airflow on this side. A greater air space between the muscle sides allows better air circulation between the half-carcasses. As the potential for bacterial growth is higher for the muscle side (higher water activity) than for the rind side, this suspension system seems to be suitable because of higher air circulation on the muscle side allowing better heat exchange between the carcass surface and the air ($h > 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ almost everywhere on muscle side of ham, in trailers with or without ducts). The effect of air ducts on the convective heat transfer coefficient is not significant for both loin and shoulder parts. Values were almost stable along the trailer with mean values of $5\text{-}7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

In future studies, 3D modelling will be developed by combining the conduction inside the carcasses and the convection with the surrounding environment. The experimentally determined CHTC value obtained in the present study will be useful in order to introduce realistic boundary conditions. This model will be associated with a predictive microbial model to evaluate the health risk for consumers in different transport scenarios (initial temperature, air temperature and humidity, transport duration).

Chapitre 4 : Modélisation des transferts
thermique et hydrique et de la croissance
microbienne au cours du transport
frigorifique des carcasses de porc

1. Introduction

En se basant sur les résultats de l'étude expérimentale réalisée dans les chapitres 2 et 3 de ce manuscrit de thèse, ainsi que sur des données de mesures réalisées sur site (chapitre 5), nous avons évalué l'impact d'une dérogation réglementaire permettant le transport de carcasses encore tièdes (15°C à cœur au lieu de 7°C) sur la croissance microbienne à la surface d'une carcasse au cours du transport. Pour l'évaluation du risque sanitaire, différents scénarios de transport ont été testés. Dans une première étape, la modélisation des transferts de chaleur et de masse sur un jambon a été réalisée en 3D sous Comsol® (5.3). Puis, par un modèle de microbiologie prévisionnelle, la croissance microbienne a été prédite en fonction de l'évolution de la température et de l'activité de l'eau à la surface maigre du jambon.

2. Principaux résultats

Les résultats obtenus ont montré que dans les 12 scénarios de transport étudiés, le jambon atteignait toujours la température requise à cœur ($< 7^{\circ}\text{C}$) après 10h de transport. Une légère évolution de la teneur en eau / activité à la surface a été observée. Sur la base du modèle de microbiologie prédictive proposé, l'augmentation de la charge microbienne pendant le transport ($\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)$) était toujours inférieure à 1,7 dans les conditions étudiées. Bien que le temps de séjours des carcasses en chambre froide d'abattoir (avant le chargement dans la semi-remorque) soit inférieur pour les carcasses de la dérogation à celui des carcasses de la réglementation, l'augmentation globale de la charge microbienne (en moyenne sur la surface maigre du jambon) est légèrement plus importante pour les carcasses de la dérogation.

3. Perspectives

Le couplage des modèles de transfert thermique/hydrique et de microbiologie prévisionnelle permet d'étudier l'impact de différents scénarios combinant différentes conditions opératoires sur la croissance microbienne. La démarche développée pourrait être adaptée pour d'autres produits alimentaires et d'autres équipements frigorifiques permettant ainsi d'évaluer la qualité sanitaire sous des conditions réelles.

4. Article 3

Modelling of temperature, water activity and microbial growth on the surface of a pork ham during refrigerated transport

M. Merai^{1,2,*}, S. Duret¹, L. Guillier³, J. Sicard⁴, et S. Portaguen⁴, Pierre-Sylvain Mirade⁴

¹ Irstea, UR GPAN, Refrigeration Process Engineering Research Unit, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony, France

² UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

³ Université Paris-Est, Anses, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety, Food Safety Laboratory, 23 avenue du Général de Gaulle, 94706 Maisons-Alfort Cedex, France

⁴ INRA, UR370 QuaPA, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

* (mouna.merai@irstea.fr)

Abstract

European regulation previously required the chilling of pork carcasses immediately after slaughter in slaughterhouses and to reach a core meat temperature of 7 °C before further handling operation. Recently, the regulation was amended and now this derogation offers the opportunity to transport carcasses from the slaughterhouse to other facilities (e.g. cutting plant) with a core temperature higher than 7 °C.

The purpose of this study was to evaluate the impact of the regulation modification on the microbial growth on the surface of the pork carcasses. First, the heat and mass transfer during refrigerated transportation were predicted using a 3D pork ham model. Predicted temperature and water activity at the carcasses surface were then used to evaluate the microbial growth. A total of 12 scenarios were studied to evaluate the microbial growth during chilling room and refrigerated transport stages under the regulation and the derogation for various operating conditions (e.g. convective heat transfer coefficients, air temperature, air relative humidity)

Results showed that in all the studied conditions, the ham reached the required temperature ($< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$) at the core after 10 hours of transportation. Small changes in water content/activity were observed. Based on a proposed predictive microbiology model, the microbial load increase during transportation ($\log_{10}(\frac{N}{N_0})$) was lower than 1.4. Although the residence time of carcasses in the slaughterhouse chilling room was shorter in the derogation scenarios compared to the regulation scenarios, the average microbial growth was higher for derogation than regulation during transportation (1.56 times higher) because of higher temperature during transportation.

Keywords: 3D model, pork ham, temperature, water activity, microbial growth, refrigerated transportation.

Nomenclature

a_w	water activity
$a_{w,\min}$	minimum water activity for microbial growth
C_{pa}	air specific heat capacity ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
C_{pm}	specific heat capacity of meat ($3200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
C_w	water concentration in the meat (mol.m^{-3})
D_a	water vapor diffusivity in air ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
D_w	water diffusivity inside the ham ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
h	convective heat transfer coefficient, CHTC ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
k	mass (water) transfer coefficient ($\text{kg.m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
Le	Lewis number of air ($Le = \frac{\alpha_a}{D_a} = 0.777$)
L_v	latent heat of water vaporization (2450 kJ.kg^{-1})
M_w	molar mass of water (18 g.mol^{-1})
N	microbial load at the surface (CFU.cm^{-2})
P_{atm}	atmospheric pressure (101325 Pa)
P_{sat}	saturated vapor pressure (Pa)
q	heat flux (W.m^{-2})
RH	air relative humidity (%)
t	time of transportation (s)
T	ham temperature (K)
T_{\min}	minimum temperature for microbial growth (K)
T_s	surface temperature at the muscle or rind part (K)
T_a	air temperature around the muscle or rind part (K)
$T_{w,b}$	wet bulb temperature (K)
X_w	water content in the ham wet basis (kg water/kg total)
X'_w	water content in the ham dry basis (kg water/kg dry matter)
Y	logarithmic microbial load at the surface ($\log_{10}(\text{CFU}).\text{g}^{-1}$)
Y_0	logarithmic microbial load after slaughtering ($\log_{10}(\text{CFU}).\text{g}^{-1}$)
$Y_{0,t}$	logarithmic microbial load at the beginning of transportation ($\log_{10}(\text{CFU}).\text{g}^{-1}$)

α_a	thermal diffusivity of air ($m^2.s^{-1}$)
μ_{max}	microbial maximum growth rate (s^{-1})
μ_{ref}	microbial reference growth rate (s^{-1})
φ_w	water evaporation flux from product surface ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
λ	ham thermal conductivity ($0.45 W.m^{-1}.K^{-1}$)
ρ	ham density (muscle: $1072 kg.m^{-3}$; fat: $1800 kg.m^{-3}$)
Indices	
r	rind
m	muscle

1. Introduction

In order to prevent the growth of spoilage and pathogenic bacteria in meat during slaughter operations, legislation requires the application of refrigeration immediately after post mortem inspection of carcasses (CE n°853/2004). Moreover, because of the influence of high temperature and pH on the chemical/biochemical reactions and on development of pale, soft and exudative pork (PSE), a quick chilling process is needed for pork meat (Lawrie, 1998; Savell et al., 2005).

European regulations have been enforced for the temperature of meat carcasses before and during transportation (CE n°853/2004). According to this regulation, the meat must be chilled in the cold rooms of the slaughterhouse to reach a core temperature of 7 °C as soon as possible before any further handling operation such as transport or cutting.

Thus, in 2014 and 2016, the Efsa Biohaz panel adopted scientific opinions concluding that the surface temperature is more appropriate than the core temperature to assess bacterial growth. *Pseudomonas* was chosen as the indicator for assessing the impact of transport conditions. These opinions concluded that the transport of carcasses or half-carcasses with a core temperature above 7 °C is possible if the surface temperature remains below 7 °C.

To reinforce Efsa opinions, combined predictive microbiology models and relatively simple empirical model were developed to describe temperature decrease and microbial growth during refrigeration (Efsa 2014 and 2016). Although their modelling approaches took into account variability, operating conditions such as air velocity, local temperature around carcasses or relative humidity were not included: Data gaps were identified to help designing further investigations and improve the robustness of the conclusions (Ellouze et al. submitted).

The potential improvement of microbial growth assessment in the case of meat carcasses during refrigeration process, are the physico-chemical properties and especially the evolution of the temperature and the water activity at the surface (Lebert and al, 2005). The temperature and the water activity are time dependent and are the result of the balances of heat and water transfers taking place inside the product but also on the air-product interface. Thus it is important that heat and mass transfer are well characterized to predict microbial growth (Duret et al., 2014).

Several researches on carcasses (beef and pork) were previously conducted in order to characterize heat and mass transfer during refrigeration process using different approaches. As the geometry of such products is complex, simplified geometries like cylinders and slabs were used (Davey and

Pham, 1997). 3D geometries are now the most commonly used approaches to predict heat and mass transfer within carcasses or pork ham (Kuffi et al, 2016, Harkouss et al., 2018). However, the variability of heat and mass transfer due to the heterogeneity of the airflow and its impact on microbial growth at the surface of pork carcasses during refrigerated transport has not been studied. Air temperature and velocity heterogeneity in a refrigerated semitrailer loaded by product were observed in several studies. Lower product temperatures are often observed at the front on the truck cabin side while higher temperatures are observed at the rear close to the doors (Moureh and Flick, 2004). The positions of high air temperature and low air velocity that could alter meat quality can be influenced by the semitrailer design and the carcass arrangement (Merai et al., 2018). Thus, an aerodynamic and thermal study in a refrigerated semitrailer loaded with meat carcasses is essential for the understanding of the airflow and the heat transfer coefficient variation at different positions (Merai et al., 2018).

The purpose of this study was to evaluate the impact of the derogation on the microbial growth on the carcasses surface. First, the heat and mass transfer during refrigerated truck transportation were predicted using a 3D pork ham model and taking into account the variability of air temperature, air relative humidity and convective heat transfer coefficient (CHTC) encountered in a semitrailer through 12 studied scenarios. Predicted temperature and water activity of the carcasses surface were then used to evaluate microbial growth on the surface. The developed model can be used in the future to study the influence of transport conditions (e.g. loading temperature of carcasses and air relative humidity) on the growth of bacteria for different refrigeration conditions in the cold rooms of slaughterhouses.

2. Model development

The objective of this model was (1): the prediction of heat and mass (water) transfer in a complex geometry object such as a meat carcass exposed to different ambient conditions encountered in a refrigerated semitrailer and (2): the prediction of microbial growth at the surface of the pork ham. The geometry is described in section 2.1, governing equations of heat and mass transfer are presented in sections 2.2.1 and 2.2.2, respectively. Predictive microbial model without lag time is described in section 2.2.3. Finally, initial conditions and studied scenarios are described in section 2.3.

2.1. 3D geometry and meshing

A 3D model developed in COMSOL ® Multiphysics by Harkouss et al., 2018 of a pork ham was used in order to predict the temperature and water activity evolution on the surface of muscle part during transportation.

Based on X-ray imaging of a real pork ham, a 3D geometry (42 cm of length; 32 cm of width and 15.8 cm of depth) was produced respecting its different parts, i.e. rind muscles and bone (Figure 4-1a and Figure 4-1b). A volumetric mesh was then constructed on the 3D geometry consisting in 2.02×10^5 tetrahedral meshes and containing the different parts (Figure 4-1c). Two zones were considered: the rind part with low water evaporation and no microbial growth and the muscle part with high water evaporation (Figure 4-1d). The bone was the only part that was not meshed and to avoid the overload of the computation. Hence, equations of heat and mass transfer described in the following sections were not solved for the bone part.

2.2. Governing equations

2.2.1. Heat transfer modelling

In order to numerically simulate conductive heat transfer inside the ham and predict temperature evolution during transportation, Fourier law was used:

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

This equation was applied and solved in all domains of the numerical ham, except the bone which was considered as thermally insulated.

At the air-ham interface, both the thermal convection and the energy exchanged during water evaporation were taken into account. Thus, at this boundary the heat flow rate q was calculated as follows:

$$q = -\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T_s - T_a) + \phi_w L_v \quad (2)$$

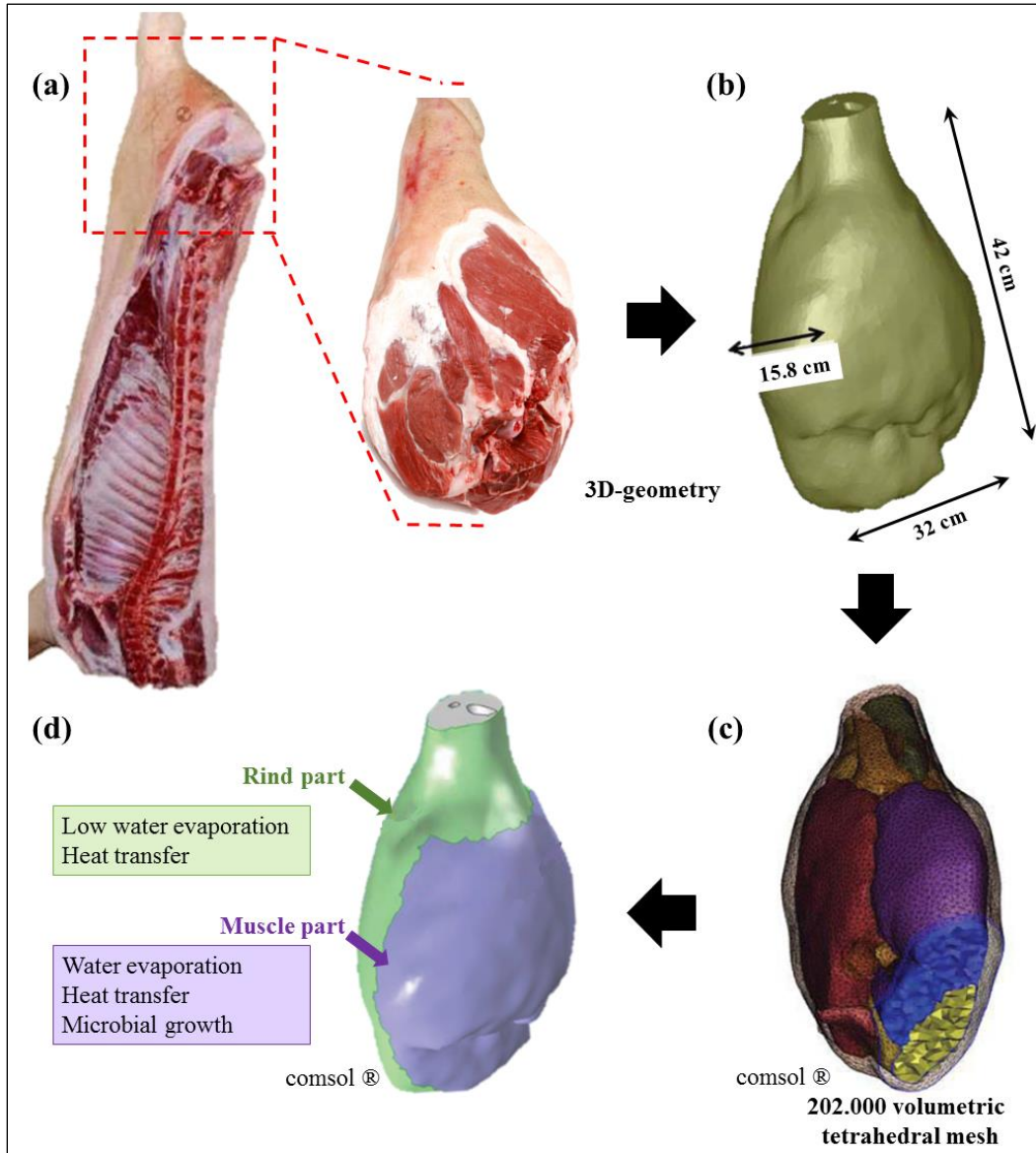


Figure 4-1 : Views of (a) the pork ham part (b) the 3D ham geometry and its dimensions, (c) the volumetric tetrahedral mesh with the different components of the ham imported into Comsol Multiphysics software (d) two considered zones on the ham with boundary conditions (from Harkouss et al. 2018).

2.2.2. Mass transfer modelling

The water migration inside the ham was modelled by the Fick equation and solved in all domains except in the bone:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_w \cdot \vec{\nabla} C_w) \quad (3)$$

The water diffusion coefficient can be estimated by the equation proposed by Ruiz-Cabrera et al. (2004) which is a function of water content (X'_w):

$$D_w = 4 \cdot 10^{(0,625 \cdot X'_w - 12)} \quad (4)$$

For the boundary condition (product surface), water evaporation flux was calculated using the following equation:

$$\varphi_{\text{water}} = -D_w \cdot \vec{\nabla} C_w \cdot \vec{n} = k \left(a_w P_{\text{sat}, T_s} - \frac{RH}{100} P_{\text{sat}, T_a} \right) \quad (5)$$

Water evaporation was assumed to occur only on the muscle part of the ham. The mass transfer coefficient k was calculated from the CHTC using the Chilton Colburn analogy (Kondjoyan and Daudin, 1997):

$$k = \frac{h \cdot M_{\text{water}}}{C_{p, \text{air}} \cdot M_{\text{air}} \cdot P_{\text{atm}} \cdot Le^{2/3}} \quad (6)$$

$$\text{and } P_{\text{sat}, T} = \exp\left(-\frac{6764}{T} - 4.915 \cdot \log T + 58.75\right) \quad (7)$$

The CHTC “ h ” was measured on the muscle part of the ham of pork carcasses loaded in a semi-trailer. This measurements were performed on a reduced scale laboratory device where the Reynold’s number is the same as that in a real semi-trailer to assure the same airflow pattern (Merai et al., submitted). Water activity was expressed as a function of water content (Rougier et al., 2007):

$$a_w = 0.993 \exp(-0.0204 X'_w^{-1.96}) \quad (8)$$

2.2.3. Microbial growth modelling

2.2.3.1. Model description

Pseudomonas growth was used as an indicator of the growth of total (psychrophilic) microflora (Efsa 2014). In order to highlight the influence of the pH, the evolution of the temperature and water activity at the surface on the microbial growth, a preliminary model without lag phase was used (eq.9).

$$\frac{\partial Y(t)}{\partial t} = \mu_{\text{max}} (T, a_w, \text{pH}) \quad (9)$$

where μ_{max} was obtained using a secondary model that takes into account temperature and water activity evolution:

$$\mu_{\text{max}} = \mu_{\text{opt}} \cdot \gamma(T) \cdot \gamma(\text{pH}) \cdot \gamma(a_w) \text{ with}$$

$$\gamma(T) = \frac{(T-T_{\max})(T-T_{\min})^2}{(T_{\text{opt}}-T_{\min})[(T_{\text{opt}}-T_{\min})(T-T_{\text{opt}})-(T_{\text{opt}}-T_{\max})((2-1)T_{\text{opt}}+T_{\min}-2\times T)]} \quad (10)$$

$$\gamma(\text{pH}) = \frac{(\text{pH}-\text{pH}_{\max})(\text{pH}-\text{pH}_{\min})}{(\text{pH}_{\text{opt}}-\text{pH}_{\min})(\text{pH}-\text{pH}_{\text{opt}})-(\text{pH}_{\text{opt}}-\text{pH}_{\max})(\text{pH}_{\min}-\text{pH})} \quad (11)$$

$$\gamma(\text{aw}) = \frac{(\text{aw}-\text{aw}_{\max})(\text{aw}-\text{aw}_{\min})^2}{(\text{aw}_{\text{opt}}-\text{aw}_{\min}) [(\text{aw}_{\text{opt}}-\text{aw}_{\min})(\text{aw}-\text{aw}_{\text{opt}})-(\text{aw}_{\text{opt}}-\text{aw}_{\max})(\text{aw}_{\text{opt}}+\text{aw}_{\min}-2\times \text{aw})]} \quad (12)$$

Cardinal values for growth of *Pseudomonas*, i.e. T_{\min} , T_{opt} , T_{\max} , pH_{\min} , pH_{opt} , pH_{\max} , aw_{\min} , aw_{opt} and aw_{\max} , used to simulate growth are detailed in supplementary material 1.

Six growth experiments were carried out with one strain of *Pseudomonas fluorescens*. They aimed at calibrating the secondary model for growth to meat pork and at validating the model with independent growth kinetics. Experimental conditions are fully described in supplementary material 1.

The μ_{opt} value characterizing this food matrix effect was estimated through two growth experiments of a *Pseudomonas* on pork meat.

Four independent growth kinetics of *Pseudomonas* were used to validate the growth model. Experimental values and responses predicted by the secondary model were compared using the bias and accuracy factors (Ross, 1996), shown in Eq.11 and Eq.12, respectively.

$$\text{bias factor} = 10^{(\sum_1^n \log(\text{pred}_i/\text{obs}_i)/n)} \quad (13)$$

$$\text{accuracy factor} = 10^{(\sum_1^n |\log(\text{pred}_i/\text{obs}_i)|/n)} \quad (14)$$

Bias and accuracy factors equal to 1 indicate a perfect match between predicted and observed values. The accuracy factor is always equal to or greater than 1, and the higher its value, the less precise the prediction is. The validation results of the developed model are detailed in supplementary material 1.

2.3. Cold room and refrigerated transport scenarios

2.3.1. Carcass chilling in the cold room

In order to be close to real initial conditions of transport in terms of temperature distribution in the pork's ham, a preliminary numerical simulation of ham chilling in a cold room of slaughterhouses was conducted (Figure 4-2). The carcass chilling in the cold room was modeled in two steps. The first step took into account the regulation requiring a reduction of the carcass core temperature to

20 °C in the first 6 hours after the animal slaughtering ($T_a=2$ °C, RH=95 % and $h=10$ W.m⁻².K⁻¹). The second step refrigeration condition was inspired from the ones observed in field ($T_a=2$ °C, RH=95 % and $h=25$ W.m⁻².K⁻¹). For the second step, two different durations were considered depending on the scenarios. In the regulation scenarios (scenarios 1,2, 5, 6, 9 and 10), in which the core temperature of the carcass is required to reach a temperature of 7 °C at the end of the chilling stage (CE regulation n°853/2004), the chilling duration of the second step was 6 hours. In the derogation scenarios (scenarios 3, 4, 7, 8, 11 and 12), in which the core temperature of the carcass is required to reach a temperature of 15 °C (ensuring that the surface temperature is lower than 7 °C), the chilling duration of the second step was 1 h 24 min.

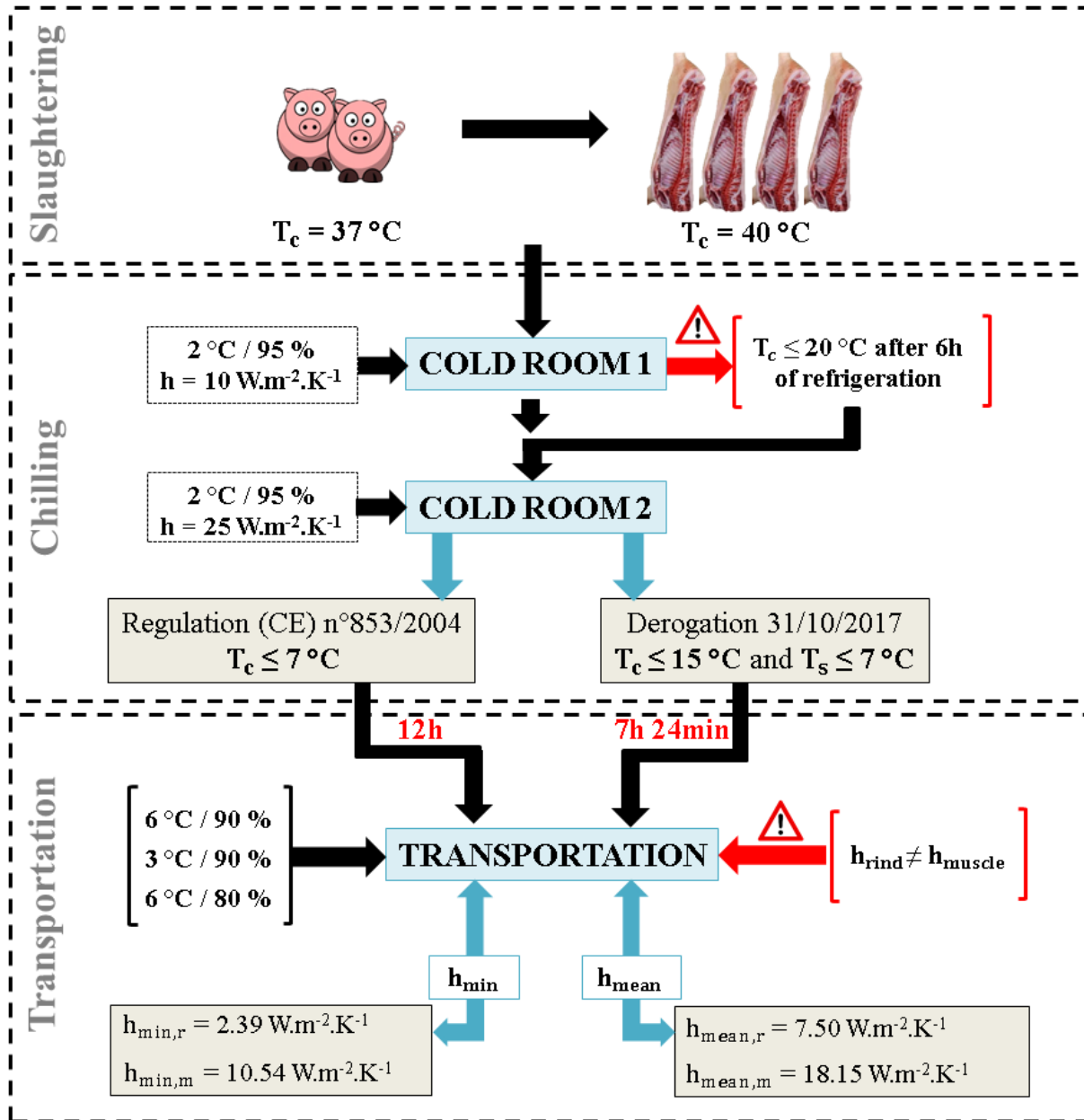


Figure 4-2: Diagram of refrigeration steps after carcass slaughtering and conditions used in numerical simulation.

2.3.2. Transport conditions

Depending on the carcass positions in the semitrailer, carcass surrounding air temperature, air relative humidity, air velocity and CHTC are variables. Based on results of measurements of temperature and relative humidity (RH) conducted in a real transportation (unpublished data), three

different conditions were studied to represent the variability of the air temperature and the air relative humidity: 6 °C and 90 % RH (reference scenario), 3 °C and 90 % RH, 6 °C and 80 % RH (Table 4-1). For each condition, the regulation as well as the derogation were studied. Finally, for all conditions presented above, two values of CHTC (h_{mean} and h_{min}) were studied for totally 12 scenarios. The CHTC values were chosen based on the experimental results obtained from a reduced scale semitrailer loaded by carcass (Merai et al. submitted). According to this study, CHTC values vary depending on the carcasses' side (rind and muscle), their position in the trailer and the loading configuration. For these reasons, one part of the studied scenarios considers the lowest observed CHTC values ($h_{\text{min,r}} = 2.39 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ and $h_{\text{min,m}} = 10.54 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) while the other part of the studied scenarios considers the mean values of CHTC ($h_{\text{mean,r}} = 7.50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ and $h_{\text{mean,m}} = 18.15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). The duration of the transportation in this study was 10 hours for all scenarios.

Table 4-1 : Studied transportation scenarios.

Scenarios	Cold room conditions	Transportation conditions
Reference scenarios	1 Regulation	6°C / 90% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$
	2 Regulation	6°C / 90% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$
	3 Derogation	6°C / 90% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$
	4 Derogation	6°C / 90% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$
5 Regulation	6°C / 80% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$	
6 Regulation	6°C / 80% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$	
7 Derogation	6°C / 80% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$	
8 Derogation	6°C / 80% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$	
9 Regulation	3°C / 90% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$	
10 Regulation	3°C / 90% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$	
11 Derogation	3°C / 90% $h_{\text{mean,m}} / h_{\text{mean,r}}$	
12 Derogation	3°C / 90% $h_{\text{min,m}} / h_{\text{min,r}}$	

3. Results and discussion

3.1. Reference scenario study

3.1.1. Product temperature evolution during transport

Figure 4-3 shows the predicted temperature within the ham at different times during the transport stage (t=0 h, 2 h, 4 h and 10 h) for the four scenarios (air temperature of 6 °C and 90 % RH). The core and the maximum surface temperatures (T_c and $T_{s,max}$) are also presented. This figure shows that in the regulation scenarios (initial core temperature around 7 °C), with mean and minimum CHTC's for rind and muscle sides (scenario1 and scenario 2, respectively), ham temperature decreases continuously during the 10 hours of refrigerated transport. At 10 h, the ham temperature in both scenarios is close to the air temperature (6 °C) in the entire ham.

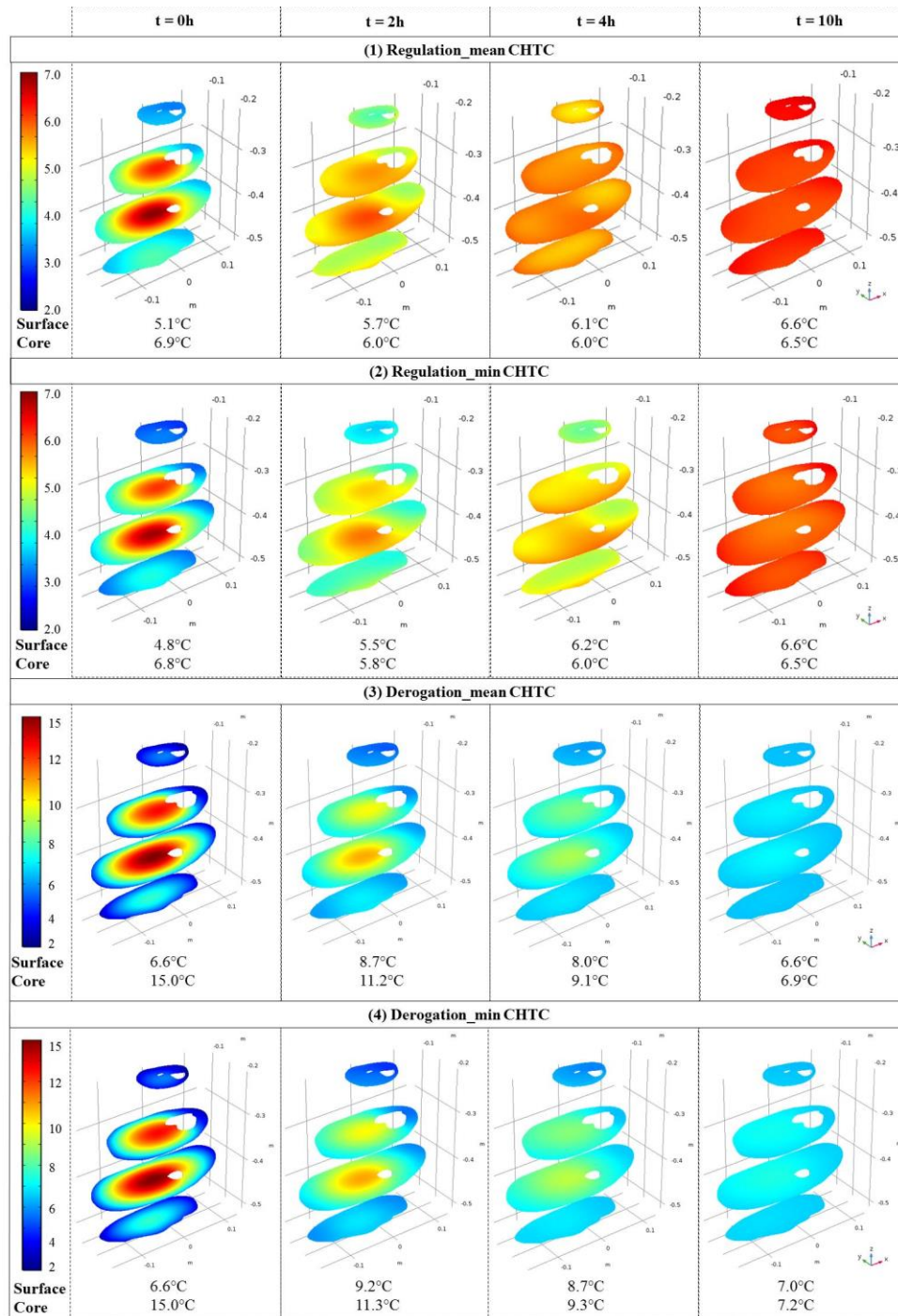


Figure 4-3: Temperature evolution inside pork during transport according to the reference scenario ($T_{air} = 6^{\circ}\text{C}$ and $RH = 90\%$) for 4 scenarios. scenario1: regulation $CHTC = h_{mean}$, scenario 2: regulation $CHTC = h_{min}$, scenario 3: derogation $CHTC = h_{mean}$ and scenario 4: derogation $CHTC = h_{min}$ placed in a cold trailer. The empty zones correspond to the bone. Values at the bottom of each graph present core (dark cross as shown in scenario 1) and maximum surface temperatures.

Regarding the derogation scenarios (initial core temperature around 15 °C and surface temperature below 7 °C), the surface temperature increases in the first two hours of refrigerated transport (Figure 4-3, scenario 3 and scenario 4). This increase can be explained by the heat diffusion from the core to the surface of the ham, induced by a lower heat flux between the surface and the air in the transport in comparison with the cold room. Indeed, cooling rate in cold room is more significant than in the refrigerated semitrailer which serves normally to maintain product temperature during transport. Despite the surface temperature increase in the first two hours, the overall temperature of the ham continuously decreases during the refrigerated transport. Although the core temperature in scenario is slightly above 7 °C after 10 h of transport (7.2 °C), the surface temperatures reach 7 °C for all CHTC values (Figure 4-3, scenario 3 and scenario 4).

For both regulation and derogation conditions (scenarios 1 to 4), in the effect of the CHTC values (mean and minimum values) on the ham cooling rate during transport is limited. In fact, the characteristic thermal diffusion time $\tau = e^2/\alpha$ (where $e \approx 8$ cm is half of the ham thickness) is higher than 10 h. This means that core temperature evolution during transportation mainly depends on the temperature profiles (gradients between core and surface temperatures) at the outlet of slaughterhouses' cold rooms.

3.1.2. Surface temperature, water content and microbial growth modelling

The microbial growth modelling aims to predict the growth rate on the muscle surface of the ham during the refrigerated transport of pork carcasses. This phenomenon mainly depends on temperature and water activity evolution as shown in section 2.2.3. Numerical results of temperature, water content on dry basis and microbial growth at the meat surface at 10 hours of transport are represented in Figure 4 for the reference scenarios ($T_{\text{air}} = 6$ °C and RH = 90 %, scenarios 1 to 4).

The overall view shows variability at the surface for the three model outputs. Slight differences between the regulation and the derogation scenarios can be observed. Surface temperature (after 10 h) is slightly higher in the derogation scenarios with the minimum CHTC values (Figure 4-4, scenario4), water content profiles show higher values in the regulation scenario than the derogation scenario. This can be explained by the fact that the evaporation rate is proportional to $(a_w P_{\text{sat},T_s} -$

$\frac{RH}{100} P_{\text{sat},T_a}$) and the surface temperature T_s is higher in the derogation scenario, which implies more surface dehydration and hence, lower water activity.

The water content (X'_w) at the surface remains close to the initial value (3 kg water/kg dry matter) along the transport. According to Eq. 8, the water activity remains very close to the initial value of 0.99 on the whole surface for all scenarios. Thus, only surface temperature variations affect the surface microbial growth for the studied scenarios.

The microbial growth at the end of transportation is slightly higher for the derogation scenario (Figure 4-4, scenarios 3 and 4) compared to regulation scenario (Figure 4-4, scenarios 1 and 2), especially for the lowest CHTC (Figure 4-4, scenario 4) because of the higher surface temperature. For example, in scenarios 2 (regulation) and 4 (derogation) with the minimum CHCTs, the microbial growth during the transport are 0.41 and 0.49, respectively.

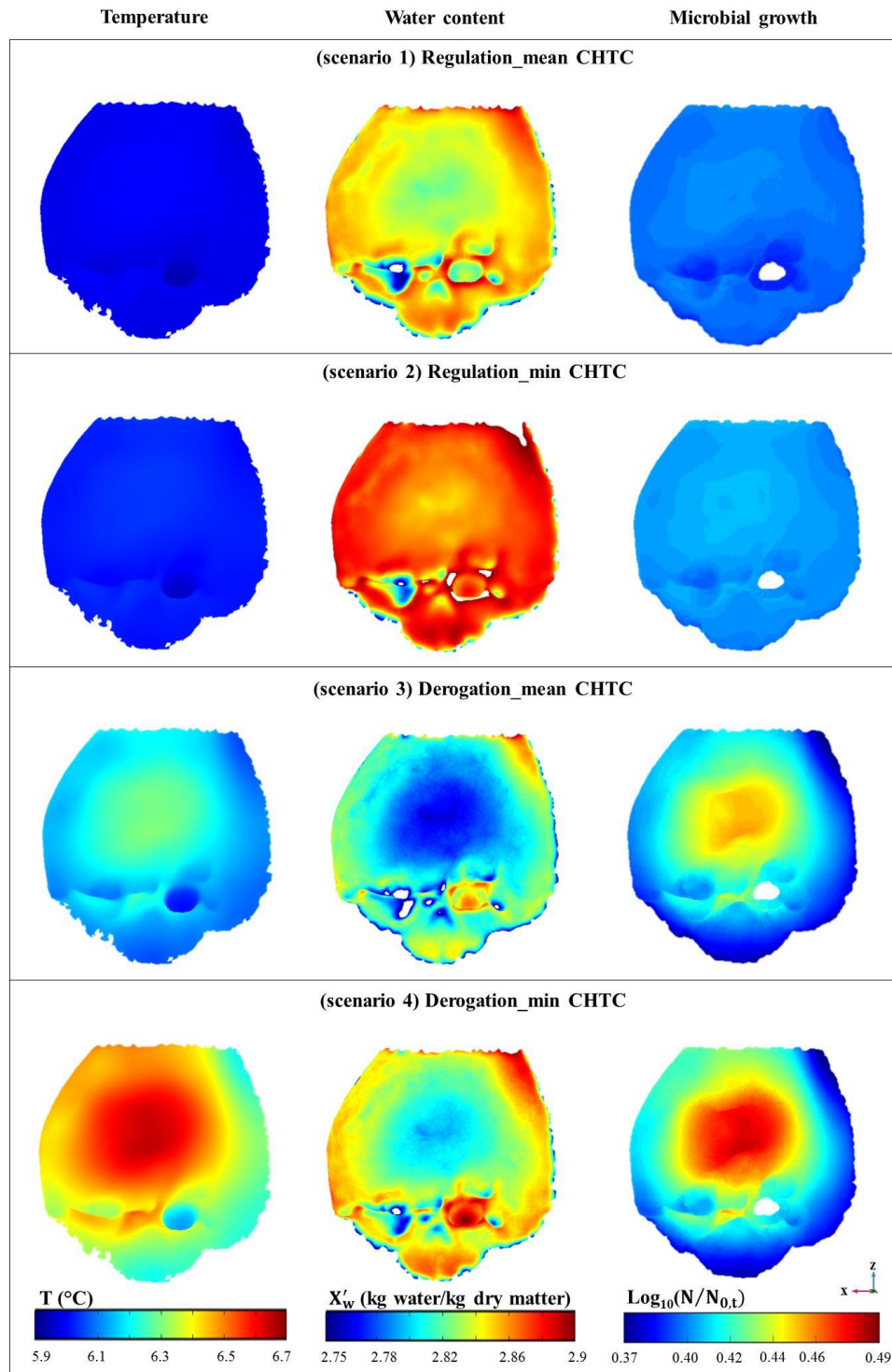


Figure 4-4: Surface temperature (°C), water content (kg water/kg dry matter) and microbial growth on the muscle surface of pork's ham after 10 hours of refrigerated transport at the reference scenario ($T_{air} = 6\text{ °C}$ and $RH = 90\%$).

3.2. Comparison of the average evolution at muscle surface for different scenarios

To simplify the analysis of temperature, water content and microbial growth on the muscle surface during the refrigerated transport for the 12 scenarios, this section presents the evolution of mean surface temperature, water content, and microbial growth on the muscle side of the pork ham as well as the weight loss for all scenarios: regulation/derogation, mean CHTC/min CHTC, 6 °C-90 % RH, 6 °C-80 % RH and 3 °C-90 % RH (Figure 4-5).

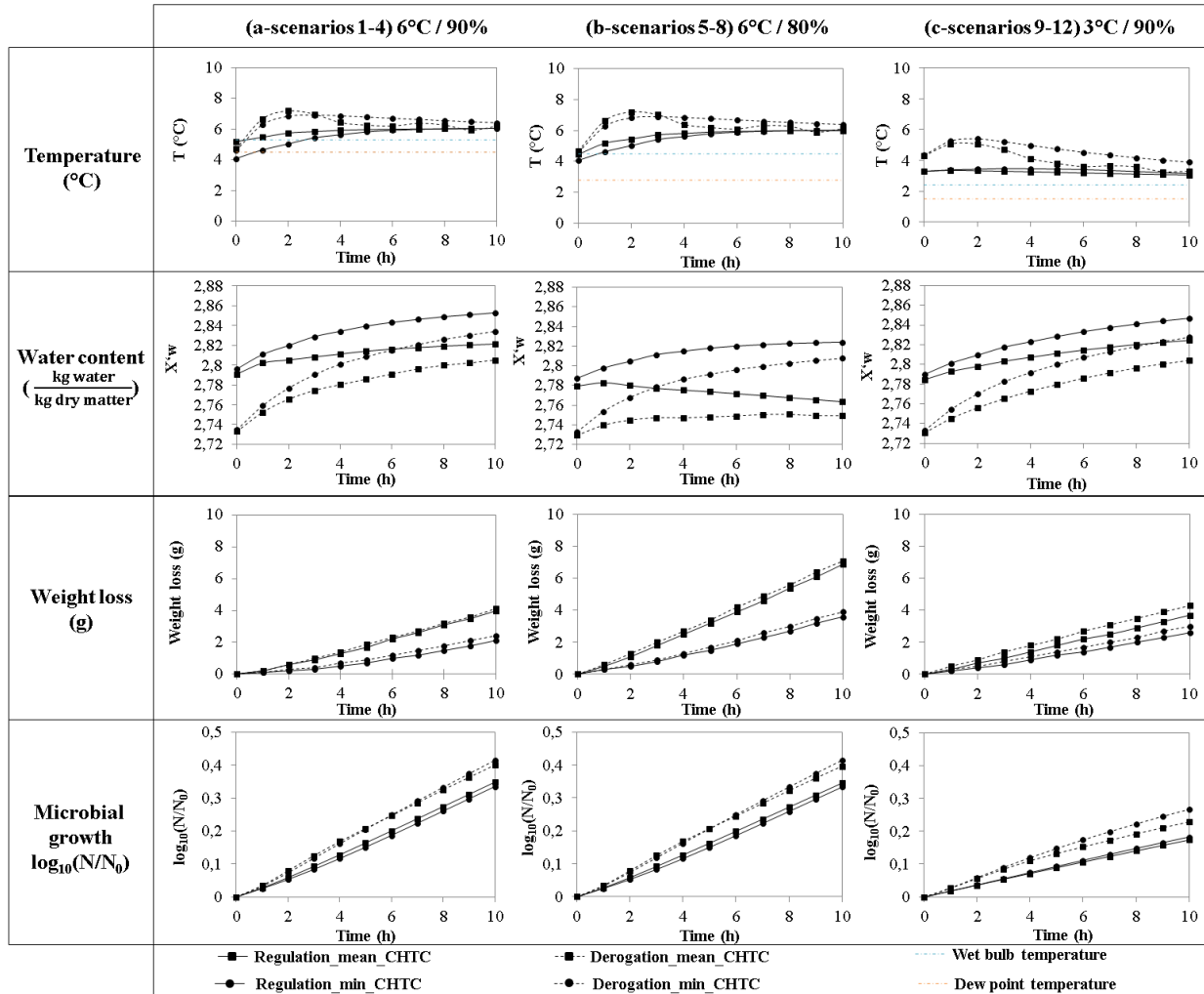


Figure 4-5: Evolution of mean temperature, water content and microbial growth on the surface of pork's ham muscle as well as weight loss during 10 hours of refrigerated transport for different scenarios.

3.2.1. Surface temperature evolution

Regardless of the studied scenario, pork's muscle surface temperature was mainly affected by the air temperature. The average surface temperature of the muscle side should tend towards the wet bulb temperature (T_{wb}) during the transportation as water activity is very close to 1 ($a_w \approx 0.99$). The surface temperature is always higher than the dew-point, thus, no condensation is expected even for derogation scenarios in which the initial surface temperature (~ 4 °C) is lower than the air temperature (6 °C) (scenarios 3, 4, 7 and 8). In fact, as shown in Figure 5, almost no differences are observed in temperature evolution during transportation for scenarios 1 to 4 (Figure 4-5a) in which air temperature was 6°C and relative humidity was 90 % ($T_{wb}= 5.3$ °C) and scenarios 5 to 8 (Figure 4-5b), respectively, in which air temperature was 6 °C and relative humidity was 80 % ($T_{wb}= 4.5$ °C). This tendency may be explained by the fact that the rind part, on which no evaporation was considered represents more than the half of the ham, thus, limiting the effect of relative humidity on the global CHTC that includes latent vaporization heat (Eq. 2).

The effect of CHTC values is small: slightly higher in the first hours of transportation for derogation scenarios than for regulation scenarios due to the initial conditions differences. However, in the scenario presented in Figure 5c where air temperature was at 3 °C, the effect of CHTC on refrigeration kinetics was more noticeable with an average muscle surface temperature decreasing to 3.3 °C with mean values of CHTC while the average muscle surface temperature decreased to 4 °C for minimum values of CHTC.

In the derogation scenarios (scenarios 3, 4, 7, 8, 11 and 12), the average surface temperature increases during the first 2 hours of the transport and then decreases towards the air temperature while in the regulation scenarios (scenarios 1, 2, 5, 6, 9 and 10), the average surface temperature of the meat directly decreases towards the air temperature without initial increase. This initial increase observed in the derogation scenarios can be explained by the intense carcass chilling in the cold room just before refrigerated transport. In fact, to reach initial conditions (7 °C at the surface and 15 °C at the core for derogation and 7 °C at the surface for regulation); pork's ham second step of refrigeration in the cold room of slaughterhouses was conducted at 2 °C-95 % RH with a CHTC of 25 W.m⁻².K⁻¹ during 1 h 24 min for derogation and 6 h for regulation. As air temperature during transportation is higher than the surface temperature (6 °C) and lower CHTC in the transport in comparison with the cold room, the internal heat diffusivity in the ham from the

core to the surface induces surface temperature increase. In addition, since at the beginning of the transport, air temperature is higher than surface temperature, the pork's ham gain a small amount of energy and as a result the surface muscle temperature increases in the first hours before decreasing again and stabilizes at ≈ 6.3 °C.

3.2.2. Water content evolution at surface

For the regulation scenarios, the average water content at the muscle surface was initially at 2.85 kg water/kg dry matter whereas the one at core was at 3 kg water/kg dry matter. Then it remained almost constant (min values of CHTC) or slightly decreased (mean values of CHTC). In this way, liquid water diffusion occurred from core to surface (with an almost constant rate) and free water ($a_w \approx 0.99$) evaporated at the surface. According to eq. 5, evaporation is higher for lower relative humidity; more surface dehydration in scenario (b) than in scenario (a).

For the derogation scenario, the average water content at the muscle surface was initially at 2.73 kg water/kg dry matter (core at 3 kg water/kg dry matter). This lower value than for regulation scenario is due to different refrigeration conditions in slaughterhouses' cold rooms (the refrigeration duration in cold room was assumed higher in the regulation than the derogation scenario). Then the average surface water content tends to the same equilibrium value than for regulation scenario. This induced the increase of the surface water content: the surface became less dried because water evaporation rate was lower in the semi-trailer than in the cold room (CHTC trailer < CHTC cold room). But still liquid water diffusion occurred from core to surface as well as water evaporation at surface.

3.2.3. Product weight loss evolution

While the relative humidity has almost no effect on the product temperature evolution, the effect on weight loss was more significant (Figure 4-5). This effect was similar in both studied initial conditions (regulation and derogation). As expected, the weight losses at the end of transportation in the scenarios with 80 % RH (scenario 5 to 8 in Figure 4-5b) were almost twice of the ones with 90 % RH (scenario 1 to 4 in Figure 4-5a), respectively.

Globally, the weight loss was the highest for scenarios with the highest values of CHTC, which is consistent with eq. 5 and 6.

3.2.4. Microbial growth during transport

Since water activity at the meat surface is constant along the cold room and transport (section 3.1.2.), the microbial growth depends mainly on the muscle surface temperature evolution. The microbial growth was slightly higher in the derogation scenarios than the microbial growth in the regulation ones. In scenarios 1 to 8 in Figure 4-5a and Figure 4-5b, similar microbial growth were observed with values included between 0.35 and 0.42 after 10 h of transport. In the scenarios 9 to 12 (Figure 4-5c), in which air temperature was 3°C, microbial growth was less significant for both derogation and regulation with values included between 0.2 and 0.26 after 10 hours of transport.

3.3. Effect of the derogation on the microbial growth

The application of the derogation implies a reduction of the duration of pork carcasses in the cold rooms and as a result the reduction of the time in logistic chain. For food safety point of view, it is better to compare the microbial growth in both derogation and regulation based on the cold chain from the refrigeration in the slaughterhouses' cold rooms to the arrival to the cutting plants as shown in Figure 4-6.

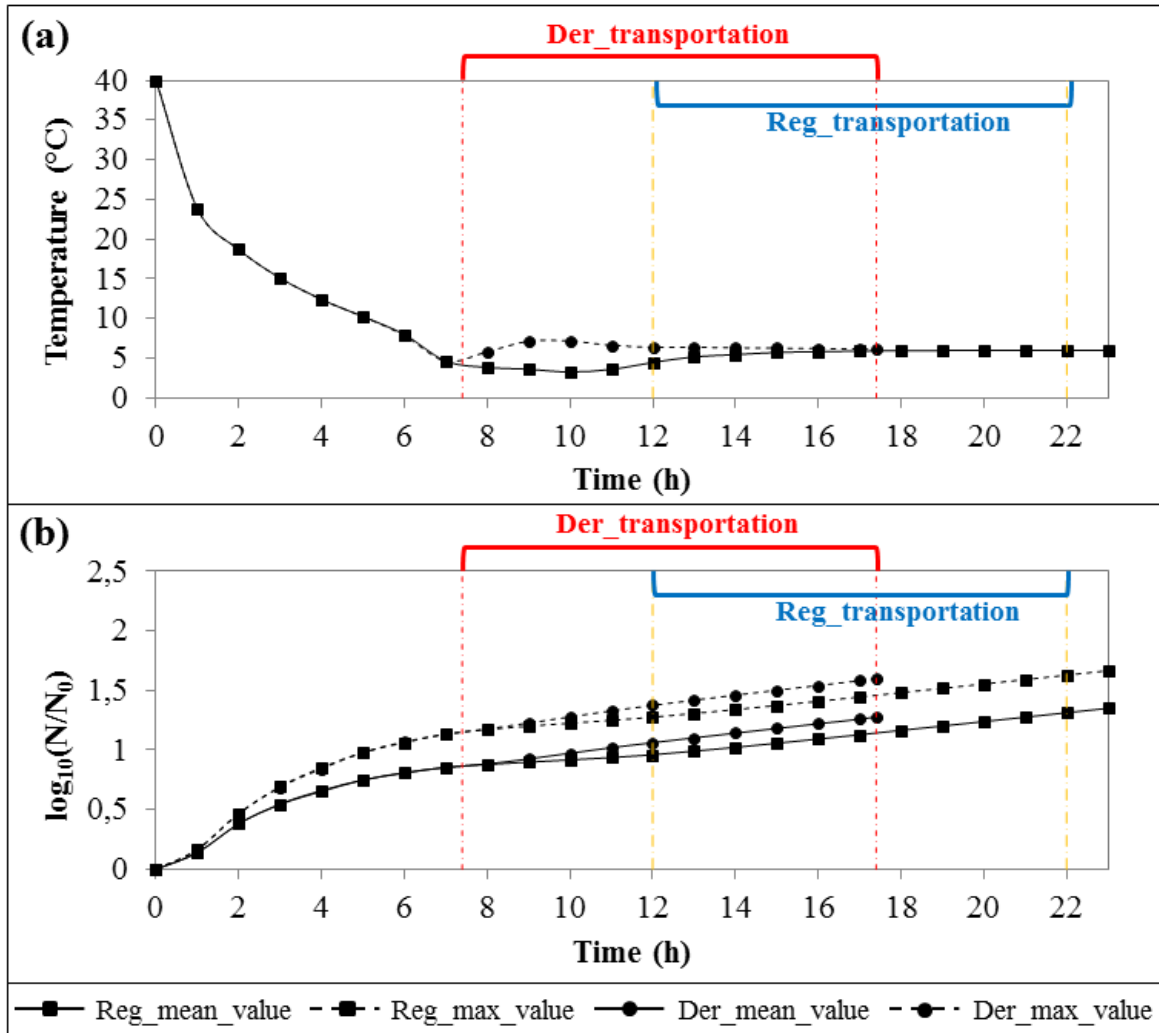


Figure 4-6 : (a) Mean values of muscle surface temperature and (b) mean and maximum microbial growth profiles on the surface of pork's ham muscle during refrigeration in both the cold room and the transportation for both regulation and derogation scenarios.

The duration of the cold chain (cold room refrigeration and cold transportation) applied to pork carcasses in the scenario of regulation is around 22 hours while it is only 17 hours and 24 minutes in the case of the derogation (Figure 4-6).

If one focuses on the mean muscle surface temperature evolution for both studied scenarios (Figure 4-6a), almost the same mean surface temperatures are observed during the transport. However, from a point of view of microbial growth (Figure 4-6b), the evolution of the mean microbial load versus time is always slightly higher in the scenario of derogation than regulation. While the

regulation scenario arrives at cutting plants after 22 hours with a maximum $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = 1.63$, the microbial growth reaches for the derogation scenario a final maximum value $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = 1.58$. As the refrigeration is not homogenous on the muscle surface (Figure 4) the maximal value of microbial growth is slightly higher than the mean value $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)_{\max} \approx \log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)_{\text{mean}} + 0.3$.

4. Conclusion and perspective

In this study, a combination of heat/mass transfer and microbial growth modelling on a 3D geometry of pork ham was conducted. The main advantage of combining heat and mass transfer models with predictive bacterial model is that operating conditions can be taken into account in the prediction of the sanitary quality during refrigerated transport of pork carcasses.

The main objective was to study the feasibility of reducing the chilling time of pork carcasses before transport in refrigerated semitrailer. First, heat and mass transfer occurring in pork ham in a cold chain including chilling in a cold room of a slaughtering house and refrigerated transport was predicted and coupled with a microbial growth model. Two main sets of scenarios were studied: a first set corresponding to the regulation, in which carcasses are chilled until core temperature reaches 7°C before transport; and a second set of scenarios corresponding to a derogation to the regulation, and in which the chilling time was reduced so that the core and surface temperatures reached respectively 15°C and 7°C before transport. Twelve scenarios in which different values of surrounding air temperature, relative humidity, convective heat transfer coefficient and chilling duration in cold room were tested to account for the variability of operating conditions.

Results showed that the carcasses refrigeration during transport depends only on the air temperature values. Product weight loss depends on the relative humidity and is almost proportional to (100-RH). In the studied conditions, surface dehydration was always low and water activity remained close to 1 ($a_w \approx 0.99$). Thus, it leads to concluded that microbial growth on the muscle surface depends only on the product surface temperature.

Results showed that in all scenarios, carcasses reached the required temperature (~7 °C) after 10 hours. In the case of derogation (15 °C of core temperature and 7 °C of surface temperature), the final microbial growth was higher than the regulation (7 °C of core temperature). Although the

reduction of the chilling time in cold rooms in the case of derogation, a slightly higher contamination at the end of the transport was always lower for derogation compare to the regulation. This implies that the use of derogation does not affect significantly the sanitary quality of carcasses in the case that all operating conditions are satisfied. The combination of both thermal and microbial models in sanitary quality prediction is a convenient tool to evaluate of the microbial growth while modifying operating conditions like air temperature, the time spent in cold rooms and the transport conditions.

Supplementary material

1. Characteristics of *Pseudomonas* strain

Growth model to assess the growth of *Pseudomonas* of the surface of pork meat was assessed with *Pseudomonas fluorescens* strain Pseuflu002 provided by IFIP - The French Pork and Pig Institute. Table S1 reports cardinal values for secondary growth model associated to that strain.

Table S1. Cardinal values for *P. fluorescens* strain used

	minimum	optimal	maximum
T (°C)	-2.8	29.6	36.4
pH	4.87	7.5	10.13
aw	0.962	1	1

2. Microbial growth experiments

2.1. Experimental plan

Six growth experiments were carried out with *Pseudomonas fluorescens* strain used. They aimed at calibrating the secondary model for growth to meat pork and at validating the model with independent growth kinetics. The conditions (temperature, relative humidity and measured water activity of meat) of these experiments are detailed in table S2. pH was measured at 5.8.

Table S2. Description of conditions for growth assessment of *Pseudomonas* on meat surface

Experiment number	T (°C)	RH (%)	Meat water activity	Use
#1	16.1	93	0.986	Calibration
#2	13.2	93	0.986	Calibration
#3	11.7	93	0.986	Validation
#4	16.2	78	0.98	Validation
#5	16.1	93	0.986	Validation
#6	16.1	93	0.986	Validation

2.2. Microbial growth experiments

P. fluorescens strain Pseuflu002 was inoculated on meat cut at concentration above 10^4 cfu/cm². Bacterial counts were performed of *Pseudomonas* were monitored according to NF EN ISO 13720 (Anonymous, 2010) based on the use of selective CFC agar (cetrimide, fucidin, cephaloridine). Samples were stored in conditions detailed in Table S1 in an incubator regulating both temperature and relative humidity.

2.3. Growth kinetics fitting

Each enumerated growth kinetics used for calibration were fitted to the primary growth model of Baranyi & Roberts (1994) using the nlsMicrobio R package (Baty & Delignette-Muller, 2015) to estimate the growth parameters. The primary model without N_{\max} was chosen to fit the kinetics. These fitted parameters were: the initial contamination (N_0) level, the maximum growth rate (μ_{\max}), and the lag phase (*lag*).

3. Results

3.1. μ_{opt} estimation

The two fitted kinetics of growth of *P. fluorescens* on meat surface are presented on Figure S1. The growth rates were of 0.16 and 0.11 h⁻¹ for #1 and #2 experiments respectively. According to experimental conditions and cardinal values of the strain used, the μ_{opt} value for *Pseudomonas* on meat is of 1.45 h⁻¹.

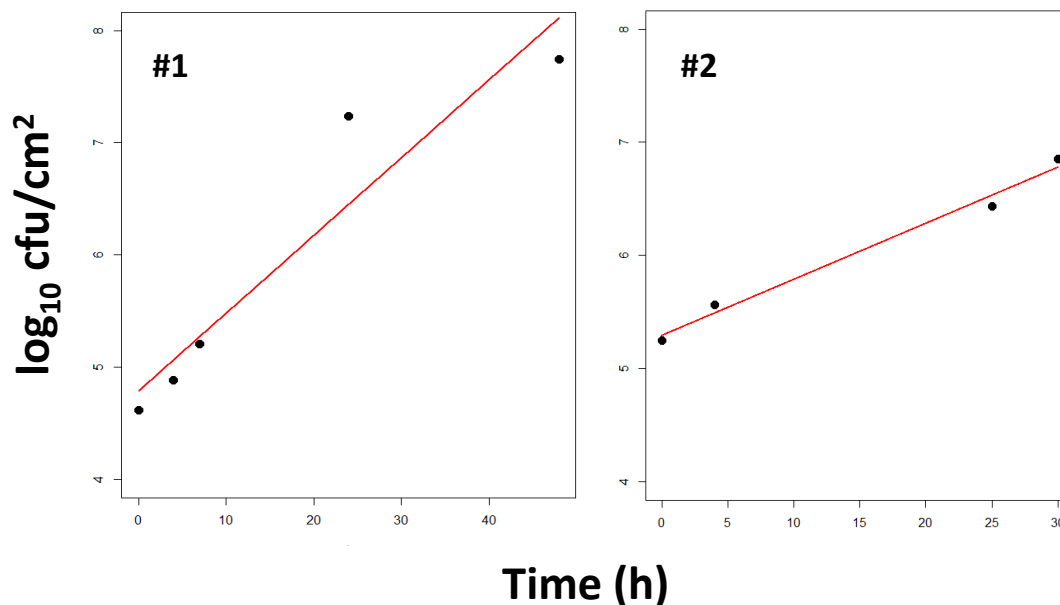


Figure S1. Observed (●) and fitted (—) growth kinetics of *P. fluorescens* on raw pork meat surface in two conditions (see Table S1 for environmental conditions)

3.2. Model validation

Growth experiments #3, #4, #5 and #6 were used for model validation. Figure S2 presents the observed kinetics and the prediction according to equations 10, 11 and 12 and μ_{opt} value obtained above.

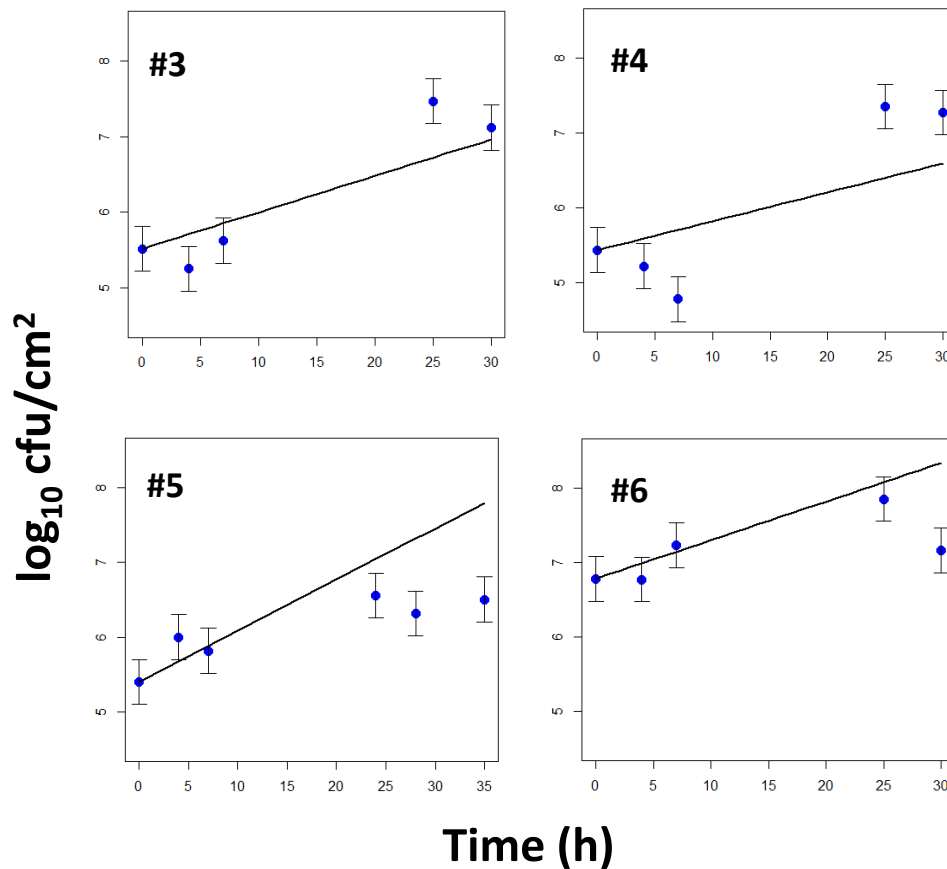


Figure S2. Observed (●) and predicted (—) growth kinetics of *P. fluorescens* on raw pork meat surface in four conditions (see Table S1 for environmental conditions)

The bias factor for these four kinetics was of 1.03, indicating no over or under-predictions of the model. The accuracy factor was of 1.08, indicating that predicted levels were on average different from 8% compared to observed ones.

4. Références

- Anonymous (2010). NF EN ISO 13720 Novembre 2010. Viande et produits à base de viande - Dénombrement de *Pseudomonas* spp. Présomptifs.
- Baranyi J and Roberts, TA (1994) A dynamic approach to predicting bacterial growth in food, *International Journal of Food Microbiology*, 23, 277-294.
- Baty, F., and Delignette-Muller, M. L. (2015). nlsMicrobio: data sets and nonlinear regression models dedicated to predictive microbiology. *R package version 0.0-1*. Available online at: <https://CRAN.R-project.org/package=nlsMicrobio> (Accessed August, 2018).

Chapitre 5 : Caractérisation
expérimentale et modélisation du
refroidissement des carcasses de porc au
cours d'un transport frigorifique dans les
conditions réelles

1. Introduction

Dans le but d'acquérir des données de température et d'humidité relative de l'air dans un camion frigorifique ainsi que l'évolution de la température à cœur et en surface de carcasses de porc lors d'un transport frigorifique, une expérience sur site a été menée (instrumentation lors du chargement des carcasses dans une semi-remorque à un abattoir en Bretagne et récupération des capteurs à la destination). Les données enregistrées au cours du transport ont été utilisées pour estimer les conditions de refroidissement lors de la modélisation thermodynamique et microbiologique d'un jambon (Chapitre 4), permettant ainsi d'approcher les conditions opératoires réelles. De plus, l'analyse de la cinétique de refroidissement des carcasses a permis de déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif et de le comparer avec celui mesuré à l'échelle laboratoire (Chapitre 3). La capacité frigorifique requise a été estimée pour différents rapports de charge de carcasses chaudes et froides (température à cœur de 15 °C et 7 °C, respectivement) dans une semi-remorque.

2. Principaux résultats

Les résultats des mesures sur site ont confirmé l'hétérogénéité des températures de surface et à cœur des carcasses situées à différents endroits dans une semi-remorque (480 demi-carcasses au total). Dans la configuration de chargement étudiée, un refroidissement à cœur en dessous de 7 °C des carcasses initialement chaudes a pu être atteint dans presque toutes les zones du camion au bout de 9 heures. Le coefficient de transfert de chaleur convectif moyen identifié à partir des courbes de refroidissement des carcasses pendant le transport ($7,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) est proche de la moyenne de mesure en laboratoire ($7,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ sans gaine de distribution et $8,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ avec gaine). L'étude numérique du transport de différentes proportions de carcasses chaudes et froides dans une semi-remorque a montré que la capacité de réfrigération du système frigorifique est suffisante pour évacuer la chaleur des carcasses pour le transport étudié. Cette étude apporte donc des informations intéressantes sur la capacité des transports frigorifiques à abaisser la température de carcasses initialement chaudes à des niveaux acceptables afin d'assurer leur qualité sanitaire.

3. Article 4

Experimental characterization and modelling of refrigeration of pork carcasses during transport under field conditions

M. Merai^{1,3}, S. Duret¹, E. Derens¹, A. Leroux², D. Flick³, O. Laguerre¹

¹ Irstea, UR GPAN, Refrigeration Process Engineering Research Unit, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony, France

² IFIP, Institut du Porc, La Motte au Vicomte B.P. 35104, 35651 Le Rheu Cedex, France

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

Abstract

Measurements of air and product temperatures were conducted at different positions in a semi-trailer loaded with 480 warm half-carcasses of pork (core temperature ~ 13 °C, surface temperature ~ 7 °C). The refrigerating curves of 8 instrumented half-carcasses during transport show that the core temperature (T_{core}) decreases significantly and reaches the recommended value of 7 °C in almost all half-carcasses after 9 h, whereas the product surface temperature decreases slightly (~ 4 °C after 9 h). Analysis of the cooling kinetics of the carcasses made it possible to determine the convective heat transfer coefficient (average value $7.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). A simplified model based on an analytical solution was proposed to predict the core and average temperature changes during transport. The required refrigerating capacity was estimated for different loading ratios of warm and cold carcasses (T_{core} 15 °C and 7 °C, respectively) in a semi-trailer.

Keywords: Transport, warm carcass, temperature prediction, refrigerating capacity

Nomenclature

A	Exchange surface area (m ²)
Bi	Biot number = $\frac{hR_{eq}}{k}$
Cp	Thermal capacity of pork (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Fo	Fourier number = $\frac{\alpha t}{R_{eq}^2}$
h	Convective heat transfer coefficient at carcass surface (W.m ⁻² .K ⁻¹)
K	Coefficient of heat transmission of the semi-trailer (Wm ⁻² K ⁻¹)
k	Thermal conductivity of pork (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
m	Product mass (kg)
R _{eq}	Equivalent radius of carcass (m)
T	Temperature (°C)
T*	Dimensionless temperature = $\frac{T(t)-T_a}{T_o-T_a}$
t	Time (s)
x	Water content in the air (kg water.kg dry air ⁻¹)

Greek symbols

ρ	Density (kg.m ⁻³)
α	Thermal diffusivity (m ² s ⁻¹)

Subscript

a	Air
av	Average
c	Core
D	Derogation
ext	External
int	Internal
0	Initial
R	Regulation
s	Surface

1. Introduction

After slaughtering, the surface temperature of a pork carcass is about 30 °C, and the core temperature is about 38-40 °C (Rossel, 2003). Meat carcasses are highly perishable products and their quality depends on the refrigeration conditions after slaughtering. To prevent quality loss, since 1964 in the European Union, carcasses must be chilled immediately after the post-mortem inspection and kept at a constant core temperature below 7 °C until consumption. The first step in the cooling process in slaughterhouses is designed to lower the core temperature of carcasses as fast as possible in order to prevent the growth of undesirable microorganisms (Kinsella et al., 2006; Savell et al., 2005). The main challenge in this step is to lower the temperature without affecting the colour, tenderness and water content of the carcasses (Létang, 1990; Kuitche et al., 1995; Savell et al., 2005). As a consequence of this regulation, carcasses have to be stored in the cold rooms of slaughterhouses for 15-20 hours prior to transport.

Because of the improvement in hygiene in the meat sector, slaughterhouses are now requesting derogations in order to be allowed to load warm carcasses (core temperature 15 °C) into refrigerated trucks. The transport conditions eligible for derogations are shown in Table 5-1.

Table 5-1 : Conditions governing derogations for meat transport in France.

Maximum transport duration (h)	Surface temperature (°C)	Core temperature (°C)	Max. air temperature during transport (°C)	Max. duration to attain a surface temperature of 7°C (h)	Max. aerobic bacterial load (CFU/cm²)
6	7	-	6	16	10 ⁴
30	7	15	6	16	10 ⁴

In France, the majority of slaughterhouses are located in the North-West region, while the processing plants are located in other regions (Figure 5-1).

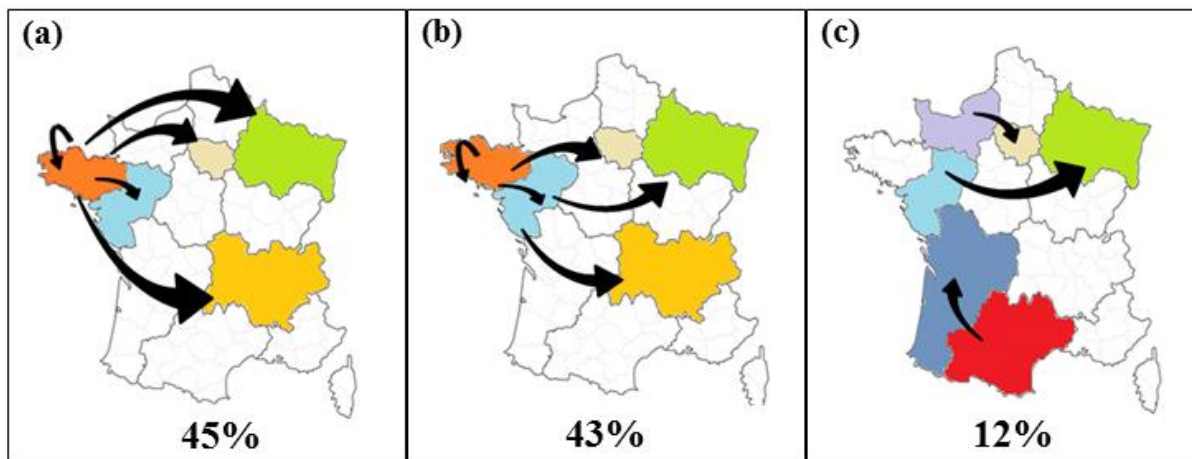


Figure 5-1 : Geographic distribution of pork carcass transport in France (a) - transport of > 200 carcasses by vehicle from the North-West to other regions; (b) - transport of ≤ 200 carcasses by vehicle from the North-West to other regions; and (c) - other transport operations, whatever the number of carcasses in the semi-trailer (Source: French meat industrial group, 2013, Statistics concerning 188 transport operations).

Carcass transport from the North-West region to other regions represents 88 % of transport in France: in 45 % of cases, more than 200 carcasses per vehicle are transported, and in 43 % of cases, less than 200 carcasses per vehicle are transported (French Meat Industry, 2013). The transport duration varies generally from a few hours to 30 hours (taking into account the waiting time on a dock before loading into a vehicle), as shown in Figure 5-2.

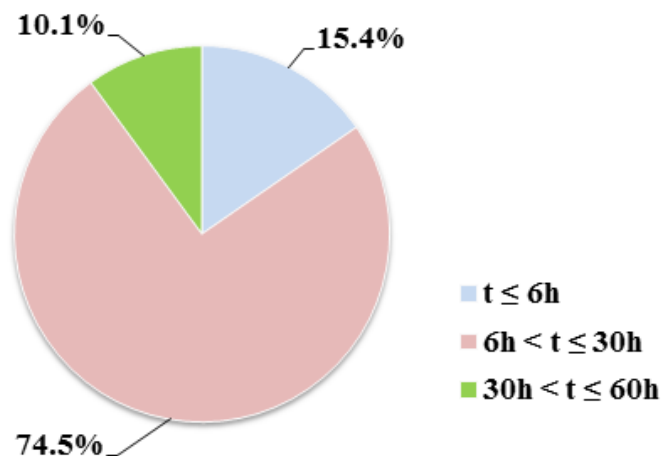


Figure 5-2 : Distribution of duration of carcass transport in France from slaughterhouses to processing plants (Source: French meat industrial group, 2013, Statistics concerning 188 transport operations).

Longer durations (up to 60 hours) can be explained by waiting periods during weekends. This explains the demand for derogations for the transport of warm carcasses in order to shorten the duration of refrigeration in the cold rooms of slaughterhouses.

Transport of a food product in a refrigerated trailer is a specific process because of the high heterogeneity of air temperature and velocity. Non-uniform air distribution inside the trailer was identified by James (1996) as the main problem in refrigerated transport. Lower product temperature is often observed at the front of the vehicle, while higher temperatures are observed at the rear close to the doors (Moureh and Flick, 2005). The position of potential sanitary risk (high-temperature zone) can be influenced by the trailer design, the carcass arrangement and the loading density. Thus, knowledge of the airflow and the heat transfer at different positions is essential in order to enable identification of risk zones (areas of low air velocities and low convective transfer coefficients). Studies conducted on the airflow and heat transfer in a semi-trailer loaded with pork carcasses have already been undertaken by our team. An experimental study on airflow was conducted using LDV (Laser Doppler Velocimetry) (Merai et al., 2018). In addition, an experimental study on the heat exchange between the air circulating in the semi-trailer and the carcasses at on a laboratory scale using a reduced-scale semi-trailer.

During transport, conduction occurs within the carcass, while convection and water evaporation take place at the air-product interface. These phenomena, which vary with time, depend on the air characteristics (temperature, humidity). The temperature difference between the air and the carcass surface, air velocity and turbulent intensity are the main factors which affect the heat and moisture fluxes (Mirade et al., 2002). Several studies have been undertaken in order to characterize the airflow distribution inside chilled rooms by experimental and modelling approaches (Mirade and Picgirard, 2001; Mirade 2007). These studies have made it possible to develop solutions enabling control of the chilling parameters, and have also made it possible to minimize product weight loss.

To complete the studies cited previously, this work was carried out with the following objectives:

- To present field data on the transport of pork carcasses in a refrigerated vehicle: product arrangement, air and product temperatures, air humidity;
- To estimate the convective heat transfer coefficient between the product surface and air during transport;

- To estimate the refrigerating capacities of a vehicle loaded with greater or fewer numbers of warm carcasses.

2. Materials and method

2.1. Loaded semi-trailer

The studied refrigerated vehicle was a semi-trailer (length x width x height = 13.30 x 2.46 x 2.50 m), with an airflow rate at the discharge air outlet of 5000 m³.h⁻¹ and a refrigerating capacity of 13 kW. The duration of compressor “on” and “off” cycles was 4 h, then a defrosting duration of 45 min was undertaken during which the refrigeration system was turned off.

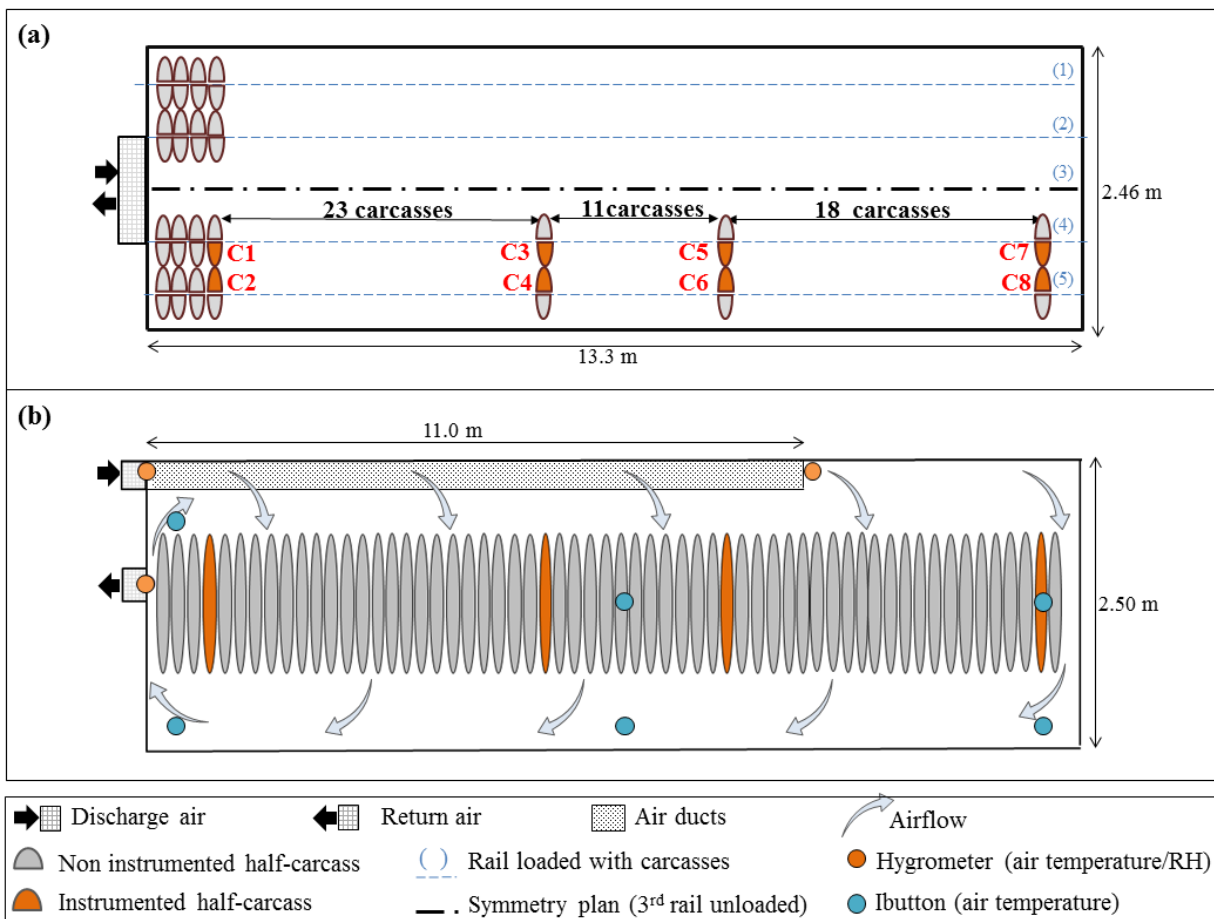


Figure 5-3 : Positions of measurements in a semi-trailer loaded with pork carcasses (a) - Top view; (b) - Side view.

This semi-trailer was equipped with 5 tracks for product hanging, but only 4 tracks were used in our study (the one in the center was empty), as shown in Figure 3a. There were 120 pork half-carcasses on each track, with an average weight of 30.7 kg per half-carcass (thus, a total of 480 half-carcasses were loaded into the semi-trailer). Cold air was discharged at the top front area of the semi-trailer via an 11-metre long air distribution duct made of plastic with fine holes. Part of the cold air flows through the “porous” zones constituted by the half-carcasses and exchanges heat with them (the air becomes warmer), and the other part flows above the carcasses until it reaches the rear of the semi-trailer. The warm air then returns to the front to be cooled down by the refrigeration system (Figure 5-3b).

2.2. Instrumentation

Considering a symmetry plane in the semi-trailer, one half of the semi-trailer was instrumented and the other half was not instrumented. Eight half-carcasses located at 4 distances from the cold air discharge outlet were instrumented, as shown in Figure 5-3. The weight of the instrumented carcasses is shown in Table 5-2, and the thermophysical properties of pork are shown in Table 5-3. On each carcass, rigid thermocouples (Testo 171-4, T-type, precision ± 0.2 °C) were inserted to a depth of 12 cm under the ham surface and 6 cm under the shoulder surface (Figure 5-4). The different measurement depths can be explained by the thickness of ham, which is much greater than that of a shoulder. In this manner, the product core temperature can be represented by the recorded value. To measure the product surface temperature, Ibuttons (Progesplus, 22L type, precision ± 0.5 °C) were pasted on the ham and shoulder surfaces. To measure the air temperature and relative humidity near the product, thermohygrometers (Testo 174H, ± 0.5 °C, precision ± 3 % RH) were used, and were located at about 5 cm from the ham and the shoulder surfaces (shown as blue circles in Figure 5-4).

Table 5-2: Weight of instrumented half-carcasses (W).

Number of instrumented carcasses	Weight of half-carcasses, W (kg)
C1	31.5
C2	33.0
C3	28.5
C4	32.0
C5	29.0
C6	30.0
C7	32.0
C8	29.0

The air temperature and relative humidity in the semi-trailer were also measured at other positions at different distances from the discharge air outlet, at 6 cm from the left and the right walls and for two heights, as shown in Figure 5-3b. Data were recorded every minute over a total duration of 9 h. The water content in the air (kg water/kg dry air) was calculated using a humid air diagram (Beysens, D., 1995).

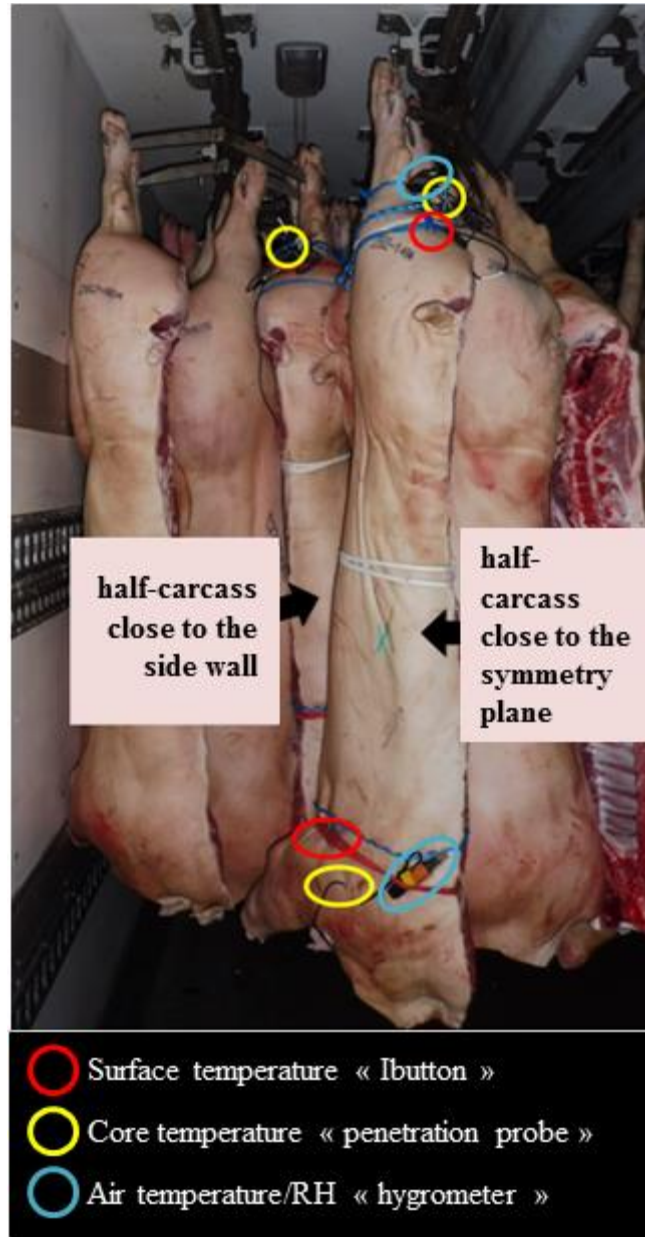


Figure 5-4 : Photo of an instrumented carcass at the ham and shoulder positions.

3. Experimental results and discussion

3.1. Product and air temperature changes during transport

The temperatures of the half-carcasses and air near the carcasses (5 cm from the product surface) decreased gradually during transport. The example of the half-carcass located at the center of the semi-trailer (C3) is presented in Figure 5-5a. During transport, the core temperature decreased by

about 6.5 °C both for ham and shoulder (from 13.8 °C to 7.4 °C for ham and 13.4 °C to 6.8 °C for shoulder). The surface temperature decreased by about 2.9 °C both for ham and shoulder (from 6.8 °C to 4.0 °C for ham and 8.4 °C to 5.4 °C for shoulder). The air temperature decreased only by 1.3 °C near the ham (5.0 °C to 3.7 °C), whereas it decreased by 4.1 °C near the shoulder (from 7.7 °C to 3.6 °C). The air temperature near the shoulder was much higher than that near the ham because the air at this position mixed with air which was warmed up when flowing around the carcasses and air from the rear of semi-trailer (see Figure 5-3b).

The surface and core temperatures of ham and shoulder of the eight instrumented carcasses at the beginning (t = 0 h) and at the end of transport (t = 9 h) are shown in Figures 5b and 5c respectively. At the beginning (t = 0 h), the core temperature ranged from 8.8 °C (C7) to 14.0 °C (C5) with an average of 11.6 °C; the surface temperature ranged from 5.0 °C (C4) to 8.4 °C (C3) with an average value of 6.9 °C. The lower core temperature of the carcasses C7 compared with those at other positions can be explained by the fact that this carcass had spent a longer period in the cold room of a slaughterhouse. At the end of transport (t = 9 h), both the surface and the core temperature were in almost all parts of the vehicle lower than 7 °C, which complies with the recommended value: average core temperature 6.1 °C and average surface temperature 4.2 °C.

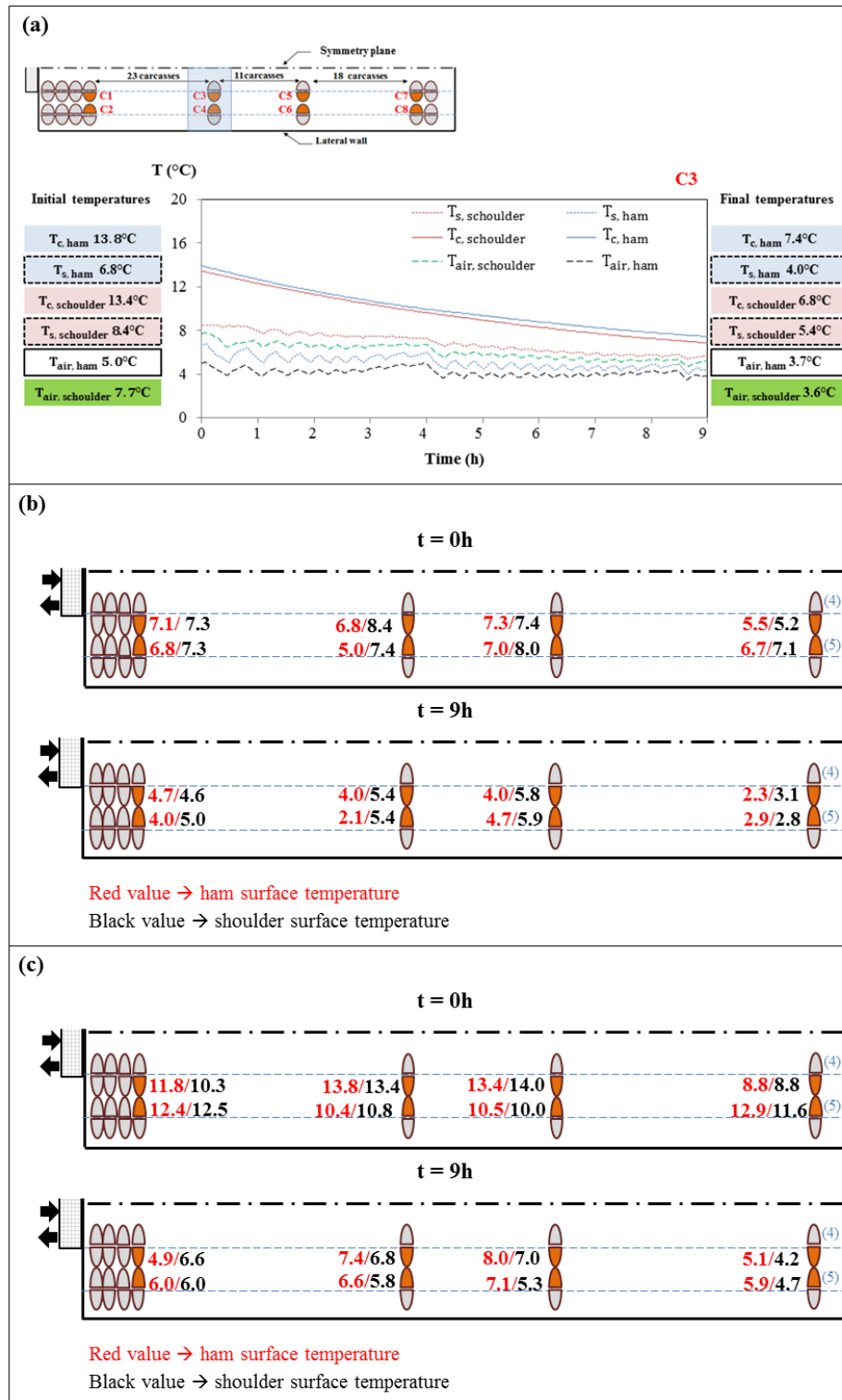


Figure 5-5 : (a) - Product and air temperature changes during transport of the carcass C3; (b) - Product surface temperature at the beginning and at the end of transport with a duration of 9 h; (c) - Product core temperature at the beginning and the end of transport with a duration of 9 h.

3.2. Average air temperatures and air humidity during transport

To summarize the numerous data, Figure 5-6a and Figure 5-6b present the average values of air temperature (°C) and air humidity (kg water/kg dry air) in the semi-trailer. The average air temperature was in all locations lower than 7 °C (temperature imposed by the regulation). Considering the water content at the discharge outlet (0.0031 kg water/kg dry air) and return air grille (0.0044 kg water/kg dry air), the water gain of 0.0013 kg water/kg dry air is related to water evaporation from carcasses. For the studied semi-trailer, the air mass flow rate of 6345 kg.h⁻¹ (5000 m³.h⁻¹, considering an air density of 1.269 kg.m⁻³ at 5 °C) made it possible to estimate the total mass of water evaporated from all half-carcasses as being 8.3 kg (average weight loss 17.2 g/half-carcass) per hour. This represents a weight loss of about 0.5 % for a transport period of 9 h. The refrigerating capacity necessary to condense the water vapour evaporated from carcasses is about 6 kW. These values should be interpreted cautiously because of the limited precision of the hygrometer when the air is almost saturated. Experts consider that the weight loss is generally lower than 0.5 %. From the discharge and return air temperature difference, the refrigerating capacity required to cool down the air is estimated to be about 7.5 kW.

In fact, the average values shown in Figure 5-6a and Figure 5-6b were calculated considering the “on” and “off” compressor working cycles and the two defrosting periods at 3.5 and 8.5 h during which the compressor was turned off. Figure 6c shows the air temperature change at different positions in the semi-trailer during a transport period of 9 h.

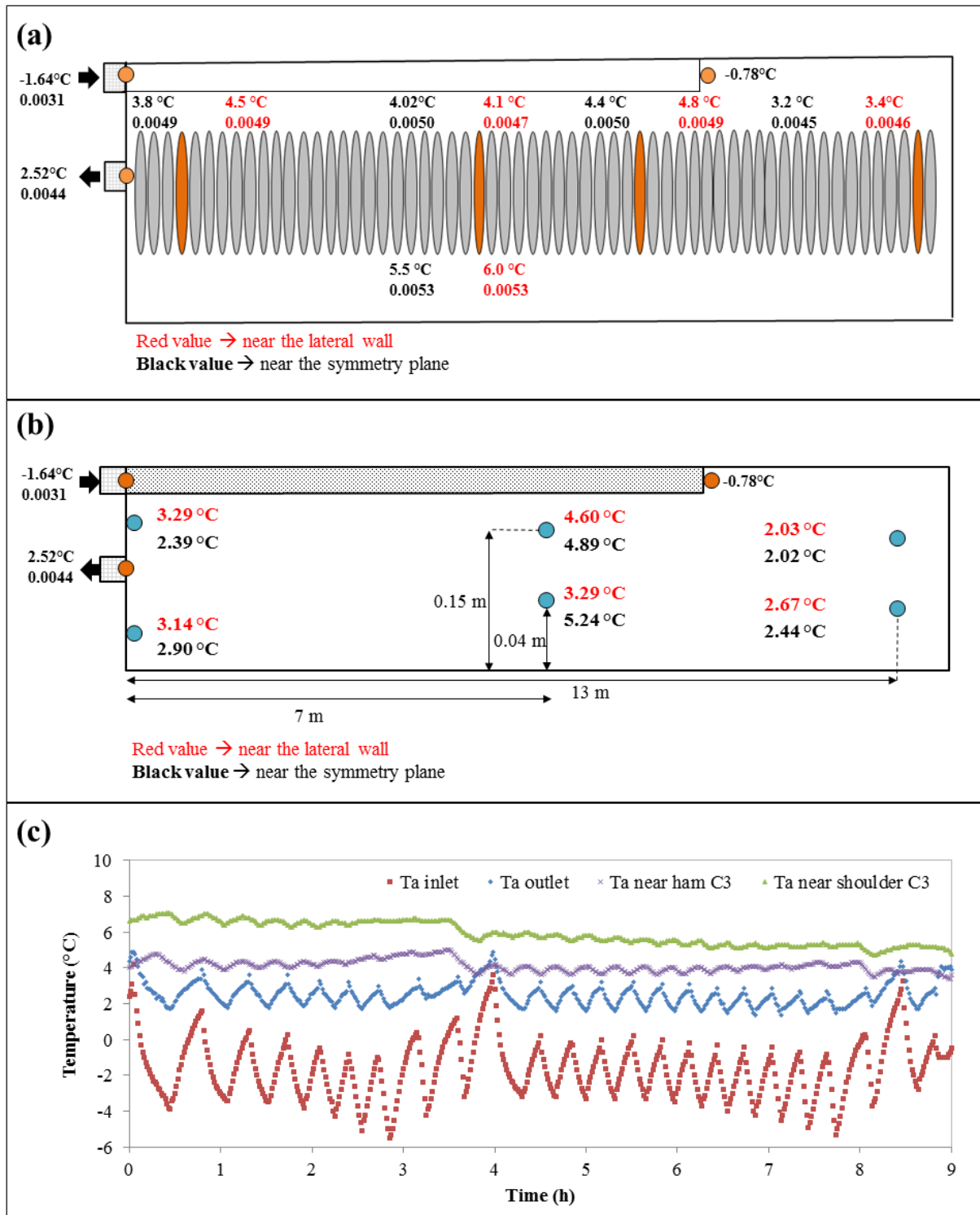


Figure 5-6 : Average air temperature (°C) and air water content (kg water/kg dry air) during transport with a duration of 9 h at different positions: (a) - air near ham (at top) and shoulder (at bottom); (b) - air near side walls; (c) - Air temperature change at the inlet, the outlet and near the carcass C3.

4. Estimation of the convective heat transfer coefficient between the carcass surface and air during transport

As a first approach, a half-carcass can be represented by an infinite cylinder with an equivalent radius (R_{eq}). By considering conduction inside the product and convection between the product surface and air, an analytical solution was proposed (Carslow and Jaeger, 1959):

$$T_c^* = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 Fo} \frac{1}{(\beta_n^2 + Bi^2) J_0(\beta_n)} \quad (1)$$

Where T_c^* = dimensionless product core temperature at time t defined as $\frac{T_c(t) - T_a}{T_0 - T_a}$

$T_c(t)$ = product core temperature at time t

T_0 = initial product temperature

T_a = average air temperature in semi-trailer

$$\beta_n = n^{\text{th}} \text{ root of } \beta J_1(\beta) - Bi J_0(\beta) = 0 \quad (2)$$

where $J_0(\beta_1)$ and $J_1(\beta_1)$ are Bessel function of zero order and first order,
respectively

$$Bi = \text{Biot number} = \frac{hR_{eq}}{k}$$

$$Fo = \text{Fourier number (dimensionless time)} = \frac{\alpha t}{R_{eq}^2}$$

In this simplified approach, only heat transfer is considered. Water evaporation occurs only on the muscle part (not on the rind part covered with skin) and depends also on water activity. Thus, the estimated convective heat transfer coefficient “h” will also take into account evaporative cooling.

For simplification purposes, only the first term of Eq. 1 is considered (the other terms can be neglected for $Fo > 0.2$):

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

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

Eq. 4 shows the linear relationship between $\ln(T_c^*)$ and Fo with the slope $=-\beta_1^2$

As an example for the carcass C3, the curve of experimental values of T_c^* and Fo was developed for ham and shoulder (Figure 5-7a and Figure 5-7b). The slope was used to identify Bi where $Bi \cong \frac{\beta_1 J_1(\beta_1)}{J_0(\beta_1)}$ and knowing Bi ($Bi = \frac{hR_{eq}}{k}$), the heat transfer coefficient (h) can be calculated.

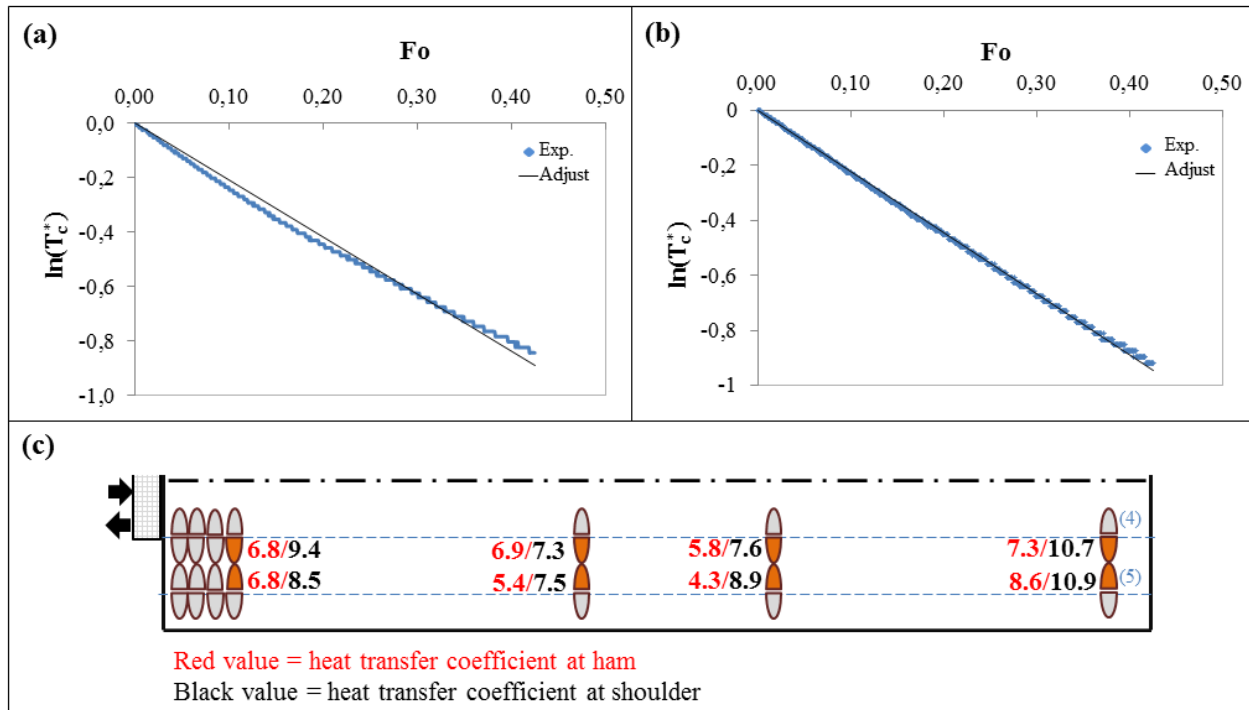


Figure 5-7 : Dimensionless core temperature (T_c^*) of a carcass (C3) as a function of dimensionless time (Fo) (a) Ham part; (b) Shoulder part; (c) Values of convective heat transfer coefficient (h , $W.m^{-2}.K^{-1}$) between the air and the carcass surfaces (value near ham/value near shoulder).

The same calculation was undertaken for the other instrumented carcasses (C1 to C8) and the results are shown in Figure 5-7c. For every carcass, the heat transfer coefficient (h) varies from 4.3 to 10.8 $W.m^{-2}.K^{-1}$. The overall heat transfer coefficient (including the ham and shoulder of 8 carcasses) is 7.7 $W.m^{-2}.K^{-1}$. Merai et al. (2018) carried out measurements of the heat transfer coefficient by using fluxmeters pasted onto the surface of reduced-scale carcasses loaded into a reduced scale semi-trailer. The heat transfer coefficient values obtained by these authors were

7.7 W.m⁻².K⁻¹ (with an air distribution duct) and 8.5 W.m⁻².K⁻¹ (without an air distribution duct). These values are close to those obtained in the present field study.

5. Estimation of the refrigerating capacity of a semi-trailer loaded with warm carcasses

For sanitary reasons, after slaughtering, carcasses (≈ 40 °C) must be chilled as soon as possible in a cold room. Because of the thermal inertia, the surface temperature decreases rapidly compared with that at the core.

Once again considering a carcass as a semi-infinite cylinder, the average temperature change can be represented as follows (Carslow and Jaeger, 1959):

$$T_{av}^* = 4Bi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 Fo} \frac{J_1(\beta_n)}{\beta_n(\beta_n^2 + Bi^2)J_0(\beta_n)} \quad (5)$$

For simplification purposes, only the first term is considered:

$$T_{av}^* \cong 4Bi e^{-\beta_1^2 Fo} \frac{J_1(\beta_1)}{\beta_1(\beta_1^2 + Bi^2)J_0(\beta_1)} \text{ with } Fo = \frac{\alpha t}{R_{eq}^2} \quad (6)$$

Equations 3 and 6 were used to calculate the core and the average carcass temperature changes in the cold room of a slaughterhouse and in the semi-trailer in the following manner.

It is assumed that the carcasses (initial temperature $T_0 = 40$ °C) are cooled down in the cold room of a slaughterhouse and in the semi-trailer in the same manner with a heat transfer coefficient corresponding to the average value estimated previously (7.7 W.m⁻².K⁻¹) and an air temperature T_a of 2.5 °C. Carcasses benefiting from a derogation leave the cold room of the slaughterhouse after the duration t_D at which the core temperature reaches $T_{c,D} = 15$ °C (Figure 8a). The carcasses benefiting from a derogation are loaded into a semi-trailer at the same time as regulated carcasses which stayed in the cold room for a duration t_R and have a core temperature $T_{c,R}$ of 7 °C. The core and average temperature changes of carcasses benefiting from a derogation and regulated carcasses during transport in a semi-trailer with an air temperature of $T_a = 2.5$ °C are shown in Figure 5-8b.

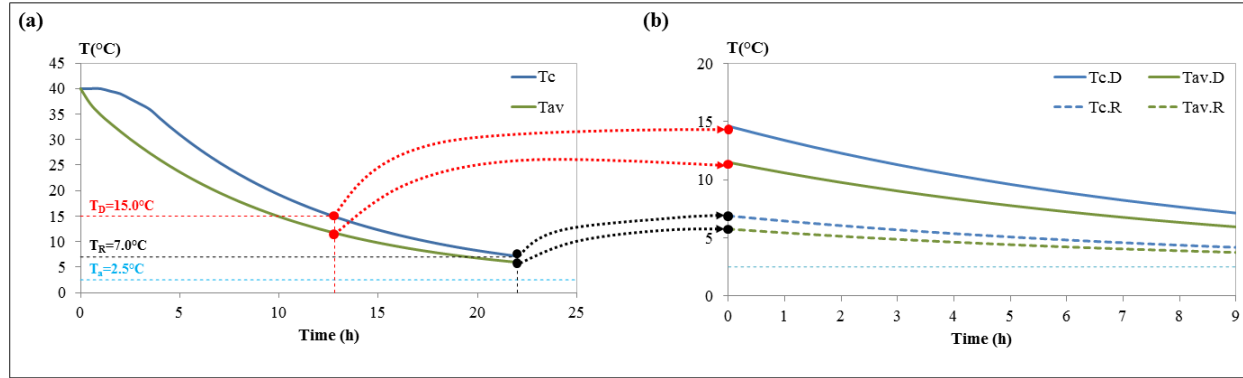


Figure 5-8 : Carcass core and average temperature changes during refrigeration: (a)-in a cold room of a slaughterhouse; and (b)-in a semi-trailer (Dotted lines show the corresponding temperatures of carcasses transferred from a cold room to a semi-trailer).

The heat flow to be evacuated from the carcass (\dot{Q}) (ambient temperature T_a) can be estimated as follows:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= -Cp \left(m_{\text{tot.R}} \frac{dT_{\text{av.R}}}{dt} + m_{\text{tot.D}} \frac{dT_{\text{av.D}}}{dt} \right) = Cp(T_0 - T_a) \left(m_{\text{tot.R}} \frac{dT_{\text{av.R}}^*}{dt} + m_{\text{tot.D}} \frac{dT_{\text{av.D}}^*}{dt} \right) \\ &= Cp(T_0 - T_a) 4Bi \frac{J_1(\beta_1) \beta_1^2 \alpha / R_{\text{eq}}^2}{\beta_1 (\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)} \left(m_{\text{tot.R}} \cdot e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha (t+t_R)}{R_{\text{eq}}^2}} + m_{\text{tot.D}} \cdot e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha (t+t_D)}{R_{\text{eq}}^2}} \right) \end{aligned}$$

This heat flow is maximal at the beginning of transport ($t = 0$ h) and can be estimated as follows:

$$\dot{Q} = Cp(T_0 - T_a) 4Bi \frac{J_1(\beta_1) \beta_1^2 \alpha / R_{\text{eq}}^2}{\beta_1 (\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)} \left(m_{\text{tot.R}} \cdot e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha t_R}{R_{\text{eq}}^2}} + m_{\text{tot.D}} \cdot e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha t_D}{R_{\text{eq}}^2}} \right) \quad (7)$$

The terms in Eq. 7 involving t_R and t_D can be obtained by Eq. 3.

$$T_{\text{c,R}}^*(t_R) = \frac{T_{\text{c,R}} - T_a}{T_0 - T_a} = 2Bi \frac{1}{(\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)} e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha t_R}{R_{\text{eq}}^2}} \quad (8)$$

$$T_{\text{c,D}}^*(t_D) = \frac{T_{\text{c,D}} - T_a}{T_0 - T_a} = 2Bi \frac{1}{(\beta_1^2 + Bi^2) J_0(\beta_1)} e^{-\frac{\beta_1^2 \alpha t_D}{R_{\text{eq}}^2}} \quad (9)$$

Considering that a semi-trailer (with an air temperature $T_a = 2.5$ °C) is loaded with different percentages of half-carcasses benefiting from a derogation (core temperature $T_{\text{c,D}} = 15$ °C) and regulated carcasses (core temperature $T_{\text{c,R}} = 7$ °C), for a total number of half-carcasses of 480 (35

kg/carcass, the mass of half-carcasses generally observed in practice), the refrigerating capacity (\dot{Q}) of the semi-trailer required to cool down all of the half-carcasses at the beginning of the transport process ($t = 0$) is presented in Table 5-3. When all the half-carcasses benefiting from a derogation are loaded into the semi-trailer (100 %), the refrigerating capacity should be about 10 kW.

Table 5-3: Thermophysical properties of pork.

Property	Value	Reference
Equivalent radius, R_{eq} (m)	0.1	$R_{eq} = 0.005(12.93 + 0.24W)$ W = Weight of half-carcass (kg) Daudin and Kuitche, 1996
Density, ρ (kg.m ⁻³)	1072	Harkouss et al., 2018
Thermal conductivity, k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.45	Kondjoyan et al., 2013
Thermal capacity, C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	3200	Kondjoyan et al., 2013
Thermal diffusivity, $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ (m ² .s ⁻¹)	1.31×10^{-7}	

It should be borne in mind that heat loss also occurs through the walls of the semi-trailer, and these losses are higher in summer (when the external ambient temperature is 30 °C) than in winter (when the external ambient temperature is 5 °C). Considering a heat transmission $K = 0.44 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (average value of 97 semi-trailers tested by Cemafrroid), the estimation of the heat losses in summer through the walls is as follows:

$$\dot{Q} = K A (T_{ext} - T_{int}) = 0.44 \times 144.3 \times (30 - 2.5) = 1745 \text{ W}$$

A = surface area of the semi-trailer = 144.3 m² (length x width x height = 13.3 x 2.46 x 2.5 m)

The total required refrigerating capacity of a semi-trailer loaded with warm carcasses and taking into account heat loss through the semi-trailer walls can therefore reach about 12 kW.

The refrigerating capacity of the studied semi-trailer was 13 kW, and thus it can be considered that the cooling capacity of the semi-trailer was sufficiently high to cool a load of up to 100 % of half-carcasses benefiting from derogation.

6. Conclusions

This study was carried out in order to acquire knowledge of the transport of pork carcasses under real conditions, and was designed to complement our previous studies on heat transfer and airflow on a laboratory scale under well-controlled conditions. This study demonstrated the heterogeneity of the surface and core temperatures of carcasses located at different positions in a semi-trailer. The experimental results demonstrated that the studied semi-trailer allowed product cooling during the transport of warm carcasses: the product temperature was lower than 7 °C (recommended temperature) in almost all locations at the end of a transport period of 9 h. The convective heat transfer coefficient identified from the experimental cooling curves of carcasses during transport ($7.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) is close to that measured in a laboratory. The numerical study on the transport of different ratios of warm and cold carcasses in a semi-trailer showed that the refrigerating capacity of the refrigeration system was sufficient to remove the heat from the carcasses for the studied configuration.

Chapitre 6 : Conclusions et perspectives

1. Bilan des travaux

Depuis le début des années 60, la question de l'impact d'un transport de viande à une température de plus de 7 °C sur la qualité sanitaire est régulièrement posée et évaluée. Cette question est le résultat du fait que les clients sont demandeurs de viande très fraîche. De ce fait, les carcasses doivent arriver rapidement sur les lieux de découpe et de transformation pour y être travaillées. En 2006, la filière porcine française a initié des travaux afin d'évaluer la conséquence d'une sortie des carcasses des salles de refroidissement des abattoirs avant l'atteinte de températures à cœur de 7 °C pour les transporter. En 2008, la DGAL a encouragé les professionnels à engager une réflexion sur les conséquences de la modification de la réglementation européenne. Le travail initié par la filière, complété par celui réalisé par les agences d'évaluation des risques, a montré qu'un tel changement était envisageable sans augmenter le niveau de risque des carcasses ainsi transportées. Ces travaux ont conduit à la modification du règlement 853/2004 fin 2017, afin d'introduire une dérogation à la réfrigération complète, i.e. 7 °C maximum en tout point de la carcasse, avant transport. Le règlement précisant cette modification (UE 1781/2017) met en avant les performances en termes de maîtrise de l'hygiène ; seuls les abattoirs respectant un certain niveau de critère microbiologique d'hygiène des procédés peuvent prétendre à ces conditions de transport des carcasses. Toutefois, les conditions opératoires garantissant le respect de ces températures dans les différentes configurations de transports (nombre de carcasses, position dans le camion, typologie et durée de transport...) n'ont pas été prises en compte dans les études conduisant à l'apparition de ce nouveau règlement (article 5).

Ce travail a permis d'étudier l'effet de la nouvelle dérogation pour la filière de viande sur les aspects logistiques, économiques et énergétiques tout en respectant la qualité sanitaire des produits transportés. L'application principale porte sur la possibilité de transporter dans un véhicule frigorifique des carcasses de porc sortant de l'abattoir à une température plus élevée que celle posée par la réglementation antérieure. Ce travail a permis de confirmer qu'il est possible de réduire le temps de séjour des carcasses dans la chambre froide de l'abattoir en chargeant les carcasses à une température à cœur de 15°C et en poursuivant leur refroidissement dans le véhicule frigorifique (article 4).

D'un point de vue scientifique, la thèse a permis de caractériser expérimentalement les écoulements (article 1) et les transferts (article 2) ainsi que de coupler des modèles de transferts thermique et hydrique à un modèle microbiologique pour prédire l'évolution de la température, de l'humidité et de la charge microbienne à la surface des carcasses de viande au cours du transport frigorifique (article 3). Ces travaux ont permis de comprendre, de dresser un schéma d'écoulements et de quantifier le taux de distribution d'air à différentes positions d'une semi-remorque chargée de carcasses de porc. Une méthodologie de mesure du coefficient de transfert convectif sur un objet à géométrie complexe telle qu'une carcasse a été développée. L'influence de la position de mesure sur une carcasse (maigre, couenne, jambon, épaule...) et l'influence de la position de la carcasse dans la semi-remorque ont été étudiées. Un lien a été établi entre la valeur du coefficient de transfert convectif et l'estimation de la vitesse d'air à différentes positions : une vitesse faible conduit en général à un coefficient de transfert convectif faible. Ainsi, les positions à faibles vitesses d'air qui peuvent engendrer une température élevée des carcasses ont pu être identifiées. L'association de la modélisation thermique (conduction au sein de produit, convection entre la surface du produit et l'air) et hydrique (évaporation d'eau à la surface de produit) avec la microbiologie prévisionnelle pour un produit ayant une géométrie complexe constitue une avancée scientifique. La méthodologie numérique développée permet d'estimer l'évolution de la charge microbienne dans différentes conditions de transport (température et humidité relative de l'air). Ce travail permet d'apporter des éléments de réponse quant au questionnement lié à l'emplacement des carcasses ayant la croissance microbienne la plus importante.

2. Limites des travaux

Mesure de la vitesse d'air par LDV dans une semi-remorque chargée de carcasses.

Etant donnée la complexité de la configuration étudiée, nous avons travaillé sur des configurations ayant un plan de symétrie (sans gaine de distribution d'air ou avec deux gaines de distribution de même longueur). La présence du plan de symétrie a permis de réaliser les mesures LDV sur la moitié du camion en supposant que les résultats sont les mêmes sur l'autre moitié. En réalité, pour certains chargements, les gaines peuvent être dissymétriques. Par ailleurs, nous avons établi un schéma d'écoulement simplifié, il est important de noter que l'écoulement est en réalité en 3D et qu'il est plus complexe que la représentation 2D réalisée.

Mesure des coefficients de transfert convectif

La mesure des coefficients de transfert convectifs sur les carcasses de porc en plâtre dans une semi-remorque frigorifique à échelle réduite représente l'originalité de ce travail. En effet, les travaux réalisés précédemment pour mesurer les coefficients de transfert convectifs à la surface de carcasses de viande ont été réalisés dans des conditions opératoires maîtrisées et sur une seule carcasse. Dans ce travail, il a été d'une grande importance de déterminer des valeurs locales de ce coefficient afin d'estimer la variabilité en fonction de la position des fluxmètres sur la carcasse et de la position de la carcasse dans la semi-remorque chargée. Toutefois, cette mesure reste très locale et dépend fortement de la position du fluxmètre sur la carcasse et de son angle d'exposition vis-à-vis de l'écoulement d'air.

Modélisation 3D des transferts thermiques et hydriques

Dans la modélisation des transferts thermiques et hydriques sur le jambon au cours du transport frigorifique, nous avons opté pour une distribution non uniforme de la température dans le volume du jambon (température à cœur supérieure à celle de la surface) dès le début du transport afin de se rapprocher le plus possible du cas réel. Pour avoir cette distribution, il était nécessaire de prendre en compte la phase de refroidissement des carcasses dans la chambre froide de l'abattoir jusqu'à la sortie de la chambre. A notre connaissance, aucune étude scientifique publiée n'a caractérisé les températures et les humidités relatives de l'air ainsi que les coefficients de transfert convectifs à la surface des carcasses de porc au cours d'un refroidissement en chambre froide. De ce fait, nous avons considéré des valeurs constantes pour ces paramètres lors de la simulation du refroidissement en chambre froide de sorte que les valeurs estimées de température à cœur permise par la réglementation ou la dérogation soient atteintes. Cette hypothèse pourrait donc impacter la prédiction de l'évolution de la température, la teneur en eau et la croissance microbienne à la surface des jambons modélisés.

Il est aussi à noter que seul le jambon a été modélisé dans cette étude et non pas une carcasse entière. Ceci est lié à la complexité de la géométrie d'une carcasse de porc et du nombre important de mailles qui peut impacter le temps de calcul du modèle utilisé. Le choix du jambon est lié au fait que c'est la partie la plus épaisse de la carcasse et la plus difficile à refroidir. Ce choix est sécuritaire car les croissances bactériennes prédites sont les plus élevées de la carcasse. Les parties

moins volumineuses (longe, épaupe) sont refroidies plus rapidement et présentent donc des niveaux de risque moindre.

Microbiologie prévisionnelle

Seule la modélisation de la croissance de *Pseudomonas* a été réalisée, d'autres flores pathogènes (*Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *enterocolitica*) n'ont pas été étudiées dans ce travail.

Bien que *Pseudomonas* ne soit pas un pathogène, ce micro-organisme a été choisi dans ce travail comme indicateur de la qualité microbiologique des carcasses car d'après l'étude Efsa, *Pseudomonas* et *Listeria monocytogenes* ont des comportements de croissance similaires sur les carcasses de porc. Des expérimentations en laboratoire ont été réalisées dans des conditions ambiantes (température, humidité relative d'air) proche de celles rencontrées dans les semi-remorques. Les résultats obtenus ont été utilisés pour développer un modèle de croissance de *Pseudomonas* sur la surface des carcasses de porc. Le modèle développé correspond donc mieux aux conditions de terrain que les approches utilisées par l'Efsa. Toutefois, sur la surface des carcasses de porc on peut trouver une flore mixte de pathogènes et d'altération. Il est envisagé à l'avenir d'intégrer la croissance d'autres flores d'altération (*Brochothrix thermosphacta*, flores lactiques), et de prendre en compte la compétition de croissance entre ces différentes flores. Ceci impliquerait toutefois la connaissance des mécanismes d'interactions entre ces différentes flores. Il faut souligner que dans nos conditions de travail (faibles niveaux de contamination), la compétition a été négligée, étant donné les « faibles » niveaux de contamination à la surface des carcasses rencontrés à la sortie de l'abattoir (la compétition intervient quand l'une des flores atteint des concentrations supérieures à 10^8 ufc.cm⁻²) (Cornu et al. 2011).

Configuration étudiée

Dans ce travail, on a opté pour une configuration et une typologie de chargement jugées comme étant les plus défavorables au refroidissement des carcasses de porc alors qu'il existe de nombreuses configurations de semi-remorques et de typologie de chargement dans les conditions réelles de transport. En effet, le type de soufflage choisi dans la semi-remorque n'est pas le plus favorable pour l'homogénéité de la distribution d'air dans le volume. De plus, le chargement de la semi-remorque avec plus de 200 carcasses rend le chargement très compact avec très peu d'espace

entre les carcasses ce qui ne favorise pas le refroidissement de ces dernières. De ce fait, l'étude expérimentale des écoulements et des transferts thermiques a été réalisée uniquement dans ces conditions.

3. Perspectives

Une première approche de simulation numérique des écoulements d'air (CFD) a été réalisée. Toutefois, la géométrie étudiée étant complexe, les résultats numériques se sont montrés assez éloignés des données expérimentales ce qui n'a pas permis de valider le modèle CFD. Une modélisation géométrique plus proche de la réalité, un maillage plus fin et l'utilisation de modèles de turbulence plus avancés devraient être testés. Un modèle CFD validé expérimentalement aurait pu nous aider à prédire les résultats dans d'autres configurations et typologie de chargement. Cela permettrait d'éviter la réalisation d'expérimentations très coûteuses. Le modèle CFD pourrait par exemple tenir compte de l'effet des ouvertures de portes ou du taux de chargement qui peut avoir un impact sur la température des carcasses au cours du transport frigorifique.

Depuis l'étude de terrain réalisée par la SNIV-SNCP en 2013, des changements sont intervenus dans le transport frigorifique. Pour des raisons économiques, de nombreux abattoirs réalisent la découpe dans des ateliers proches des abattoirs. D'autres enjeux pourraient changer les circuits logistiques dans les années à venir. En effet, dans une approche plus respectueuse de l'environnement, les circuits courts (vente de viande à la ferme) sont en expansion d'où la diminution des transports frigorifiques de longues durées avec des taux de chargement importants, pour laisser la place à des transports de petits lots de carcasses et des transports mixtes (demi-carcasses avec des pièces de découpe). Ce travail permet donc de formuler de nouvelles réflexions quant au refroidissement des produits carnés pour d'autres équipements (camion de petite capacité, chambre froide des exploitations agricoles). Une autre question ouverte est celle de la mesure de la température à la surface des carcasses de viandes. Moyennant quel outil de mesure pour que la mesure soit fiable et reproductible? Quel est le nombre de points de mesure à envisager pour obtenir une valeur représentative?

La démarche de modélisation au niveau d'une filière pour justifier des mesures de maîtrise des dangers est une démarche de plus en plus utilisée par les filières et les grands groupes industriels. A ce titre on peut citer l'existence du Réseau Mixte Technologique (RMT) Qualima qui vise à

proposer des méthodologies de validation de mesures de maîtrise de danger. Ces démarches permettent de passer du contrôle systématique à des estimations de risque. En d'autres termes, il serait peut-être plus intéressant d'utiliser les résultats de cette étude pour définir les paramètres clés (température de l'air, durée de refroidissement en chambre froide, type et nombre de carcasses, typologie de chargement dans le camion, durée de transport...) ainsi que les valeurs minimales à respecter pour s'assurer de la qualité sanitaire des carcasses de viande. Dans ce contexte, une vérification journalière des paramètres les plus pertinents serait suffisante pour assurer la qualité sanitaire des carcasses de viande. Le contrôle resterait donc nécessaire mais à des fréquences moins importantes ce qui allègerait la charge de travail des professionnels de la filière.

Références

- Afssa, 2010. Avis relatif au transport des carcasses de porc n'ayant pas atteint la température réglementaire à la sortie de l'abattoir. Saisine 2008-SA-0283. 2010.
- Alvarez, G., Flick, D., 1999. Analysis of heterogeneous cooling of agricultural products inside bins: part II: thermal study. *Journal of Food Engineering*. 39 (3), 239-245.
- Amara, S.B., Laguerre, O., Flick, D., 2004. Experimental study of convective heat transfer during cooling with low air velocity in a stack of objects. *International Journal of Thermal Sciences*. 43 (12), 1213-1221.
- Anses, 2014. Avis relatif à « la sécurité et la salubrité microbiologique des carcasses de porcs réfrigérées en chambre froide puis transportées en camion frigorifique ». Saisine 2013-SA-0003.
- Baranyi, J., Roberts, T.A., 1994. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *International Journal of Food Microbiology*. 23, 277-294.
- Bennahmias, R., Labonne, G., 1991. Transports frigorifiques: Influence de certains équipements intérieurs du véhicule et du type d'emballage des unités de charge, I.I.F./I.I.R Comissions B2, C2, D1, D2/3 – Dresden (Germany). 4, 809-824.
- Bennahmias, R., Labonne, G., 1993. Etude de la distribution de l'air et de la dispersion des températures dans une semi-remorque frigorifique, *Revue Internationale du Froid*. 83 (10), 11-16.
- Ben-Yoseph, E., Hartel, R.W., 1998. Computer simulation of ice recrystallization in ice cream during storage. *Journal of Food Engineering*. 38, 309-329.
- Beysens, D., 1995. The formation of dew. *Atmospheric research*. 39, 215-237.
- Billiard, F., Viard, D., 2002. Food safety and refrigeration. Join FAO/WHO global forum of food safety regulators, 28–30 January 2002, Marrakesh.

- Buchanan, R.L., 1993. Predictive food microbiology. Trends in food science and technology. 4, 6-6.
- Carniol, N., Kondjoyan, A., Daudin, J.D., Alvarez, G., Bimbenet, J.J., 2000. Heat transfer coefficient distribution inside finite height cylinders array under a highly turbulent air free stream. Entropie. 227, 42-52.
- CEE, Directive 64/433/CEE du Conseil, du 26 juin 1964, relative à des problèmes sanitaires en matière d'échanges intracommunautaires de viandes fraîches.
- Cepeda, J.F., Weller, C.L., Thippareddi, H., Negahban, M., Subbiah, J., 2013. Modeling cooling of ready-to-eat meats by 3D finite element analysis: validation in meat processing facilities. Journal of food engineering. 116 (2), 450-461.
- Chourasia, M.K., Goswami, T.K., 2007. Steady state CFD modeling of airflow, heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store. International Journal of Refrigeration. 30 (4), 672-689.
- Commère, B., Billiard, F., 1999. La chaîne du froid dans l'agroalimentaire. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 2 (F3230), F3230-1.
- Cornu, M., Beaufort, A., Rudelle, S., Laloux, L., Bergis, H., Miconnet, N., Serot, T., Delignette-Muller, M.L., 2006. Effect of temperature, water-phase salt and phenolic contents on *Listeria monocytogenes* growth rates on cold-smoked salmon and evaluation of secondary models. International Journal of Food Microbiology. 106 (2), 159-168.
- Cornu, M., Billoir, E., Bergis, H., Beaufort, A., Zuliani, V., 2011. Modeling microbial competition in food: Application to the behavior of *Listeria monocytogenes* and lactic acid flora in pork meat products. Food microbiology. 28 (4), 639-647.
- Cortella, G., 2007. CFD aided retail cabinets design. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. CRC Press, 99-117.
- Coulter, S., Pham, Q.T., McNeil, I., McPhail, N.G., 1995. Geometry, cooling rates and weight losses during pig chilling. International Journal of Refrigeration. 18 (7), 456-464.

- Dabbene, F., Gay, P., Sacco, N., 2008a. Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology. *Biosystems Engineering*. 99 (3), 348-359.
- Dabbene, F., Gay, P., Sacco, N., 2008b. Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part II: A case study. *Biosystems Engineering*. 99 (3), 360-371.
- Daudin, J.D., Kuitche, A., 1996. Modelling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time variable conditions using analytical based method-III. Calculations versus measurements on pork carcass hindquarters. *Journal of Food Engineering*. 29 (1), 39-62.
- Davey, L.M., Pham, Q.T., 1997. Predicting the dynamic product heat load and weight loss during beef chilling using a multi-region finite difference approach. *International Journal of Refrigeration*. 20 (7), 470-482.
- Davey, L.M., Pham, Q.T., 2000. A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*. 23 (6), 444-456.
- Delhalle, L., Daube, G., Adolphe, Y., Crevecoeur, S., Clinquart, A., 2012. A review of growth models in predictive microbiology to ensure food safety. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 16 (3), 369-381.
- Delignette-Muller, M.L., Rosso, L., 2000. Biological variability and exposure assessment. *International Journal of Food Microbiology*. 58 (3), 203-212.
- Delignette-Muller, M.L., Rosso, L., Flandrois, J.P., 1995. Accuracy of microbial growth predictions with square root and polynomial models. *International Journal of Food Microbiology*. 27 (2-3), 139-146.
- Derens, E., Laguerre, O., Palagos, B., 2001. Analysis of affecting factors on domestic refrigerator temperature in use. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*. 185 (2), 311-322.
- Derens-Bertheau, E., Osswald, V., Laguerre, O., Alvarez, G., 2015. Cold chain of chilled food in France. *International Journal of Refrigeration*. 52, 161-167.
- Dermesonluoglu, E., Gogou, E., Katsaros, G., Taoukis, P., 2012. Validated kinetic models of frozen milk products and vegetables quality. *Frisbee (Food Refrigeration Innovations for Safety,*

- consumer's Benefit, Environmental impact and Energy optimization along the cold chain in Europe) European project, Deliverable 3.2.4.8.
- Duret, S., 2014. Modélisation de la variabilité des transferts thermiques dans la chaîne du froid pour la maîtrise de la qualité et de la sécurité des aliments. Thèse de doctorat. L'institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France.
- Duret, S., Hoang, H-M., Flick, D., Laguerre, O., 2014. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *International Journal of Refrigeration*. 46, 17-25.
- Efsa Panel on Biological Hazards, Growth of spoilage bacteria during storage and transport of meat. *Efsa Journal*, 2016. 14 (6).
- Efsa Panel on Biological Hazards, Scientific Opinion on the public health risks related to the maintenance of the cold chain during storage and transport of meat. Part 1 (meat of domestic ungulates). *Efsa Journal*, 2014. 12 (3), 3601.
- Efsa, 2008. A quantitative microbiological risk assessment on *Salmonella* in meat 1: source attribution for human salmonellosis from meat. *Efsa Journal*, 2008. 1–32.
- Ellouze, M., Minvielle, B., Merai, M., Fravallo, P., Baril, E., Guillier, L. Evaluation of the quality and safety of pig carcasses transported at core temperature above the regulatory 7°C. *Meat Science*. Submitted.
- European Commission, Regulation amending Annex III to Regulation (EC) n° 853/2004 of the European Parliament and of the Council as regards temperature conditions during transport of meat. 2017.
- European Commission, Regulation n° 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin. *Official Journal of the European Union*. 2004, 30(151).
- European Commission, Regulation n° 854/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific rules for the organisation of official controls on products of animal origin intended for human consumption. *Official Journal of the European Union*. 2004, 30(155).

- FAO/OMS, 1997. Risk management and food safety. Report of the Joint FAO/WHO Expert Consultation in Rome, Italy. January 27-31.
- Fluent, 2000. Glorious food - CFD solutions for a demanding industry 9 (1), 12–13.
- Foster, A. M., Barrett, R., James, S. J., Swain, M. J., 2002. Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International journal of refrigeration*. 25 (8), 1102-1109.
- French Meat Industrial (Culture Viande, Les entreprises Française des Viande), 2013.
- Gac, A., 1991. Cold chain for ornamental ornamental horticulture. Hortifroid, V International Symposium on Postharvest Physiology of Ornamental Plants; Importance of Cold in Ornamental. 298 (march), 367-372.
- Ghisalberti, L., and Kondjoyan, A., 1999. Convective heat transfer coefficients between air flow and a short cylinder. Effect of air velocity and turbulence. Effect of body shape, dimensions and position in the flow. *Journal of Food Engineering*. 42, 33-44.
- Giannakourou, M.C., Taoukis, P.S., 2003. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*. 83, 33-41.
- Gigiel, A., Collett, P., 1989. Energy consumption, rate of cooling and weight loss in beef chilling in UK slaughter houses. *Journal of Food Engineering*. 10 (4), 255-273.
- Gögüs A.Y., Yavuzkurt S., 1974. Temperature pull-down and distribution in refrigerated trailers. I.I.F-I.I.R commissions D2, Wagenigen, La Nouvelle Zelande. 2, 189-193.
- Gonçalves, E.M., Abreu, M., Brandão, T.R.S., Silva, C.L.M., 2011. Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International journal of refrigeration*. 34, 2136-2144.
- Gruyters W, Verboven P, Delele M, Gwanpua SG, Schenk A, Nicolai B., 2018. A numerical evaluation of adaptive on-off cooling strategies for energy savings during long-term storage of apples. *International Journal of Refrigeration*. 85, 431-440.
- Guilpart, J., Leduq, D., 2009. Qualité alimentaire et consommation d'énergie: Contrôle-commande prédictif. *Revue générale du froid et du conditionnement d'air, (DEC)*, 39-46.

- Gwanpua, S.G., Verlinden, B.E., Hertog, M.L.A.T.M., Bulens, I., Van de Poel, B., Van Impe, J., Nicolai, B.M., Geeraerd, A.H., 2012. Kinetic modeling of firmness breakdown in 'Braeburn' apples stored under different controlled atmosphere conditions. *Postharvest Biology and Technology*. 67, 68-74.
- Gwanpua, S.G., Vicent, V., Verlinden, B.E., Hertog, M.L.A.T.M., Nicolai, B.M., Geeraerd, A.H., 2014. Managing biological variation in skin background colour along the postharvest chain of 'Jonagold' apples. *Postharvest Biology and Technology*. 93, 61-71.
- Harkouss, R., Chevarin, C., Daudin, J.D., Sicard, J., Mirade, P.S., 2018. Development of a multi-physical finite element-based model that predicts water and salt transfers, proteolysis and water activity during the salting and post-salting stages of the dry-cured ham process. *Journal of Food Engineering*. 218, 69-79.
- Harris, M.B., Carson, J.K., Willix, J., Lovatt S.J., 2004. Local surface heat transfer coefficients on a model lamb carcass. *Journal of Food Engineering*. 61, 421-429.
- Hoang, H. M., Duret, S., Flick, D., Laguerre, O., 2015. Preliminary study of airflow and heat transfer in a cold room filled with apple pallets: Comparison between two modelling approaches and experimental results. *Applied Thermal Engineering*. 76, 367-381.
- Hoang, M. H., Laguerre, O., Moureh, J., Flick, D., 2012. Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle. *Journal of food engineering*, 113 (3), 389-398.
- Hoang, M. L., Verboven, P., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. M., 2000. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *International Journal of Refrigeration*. 23 (2), 127-140.
- James, S. 1996. The chill chain "from carcass to consumer". *Meat Science*. 43, 203-216.
- James, S.J., Swan, M.J., 1983. The effect of surface fat layers on the chilling time of meat. *Porc. 16th International Congress of Refrigeration, Paris, France 2*, 473-478.
- Jevšnik, M., Hlebec, V., Raspor, P., 2008. Consumers' awareness of food safety from shopping to eating. *Food Control*. 19 (8), 737-745.

- Kinsella, K.J., Sheridan, J.J., Rowe, T.A., Butler, F., Delgado, A., Quispe-Ramirez, A., Blair, I.S., McDowell, D.A., 2006. Impact of a novel spray-chilling system on surface microflora, water activity and weight loss during beef carcass chilling. *Food Microbiology*. 23 (5), 483-490.
- Kolodziejczyk, M., Butrymowicz, D., Smierciew, K., Gagan, J., 2016. Numerical Modelling Of Heat And Mass Transfer Processes In Chinese Cabbage Cold Storage Chamber. 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 11-14, 2670, 1-9.
- Kondjoyan, A., 2006. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. *International Journal of Refrigeration*. 29, 863-875.
- Kondjoyan, A., Daudin, J.D., 1993. Determination of transfer coefficients by psychrometry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 36 (7), 1807-1818.
- Kondjoyan, A., Daudin, J.D., 1997. Heat and mass transfer coefficients at the surface of a pork hindquarter. *Journal of Food Engineering*. 32, 225-240.
- Kondjoyan, A., Oillic, S., Portanguen, S., Gros, J.B., 2013. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *Meat Science*. 95 (2), 336-344.
- Koutsoumanis, K., Nychas, G.J.E., 2000. Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions. *International Journal of Food Microbiology*. 60, 171-184.
- Koutsoumanis, K.P., Taoukis, P.S., Drosinos, E.H., Nychas, G.J.E., 2000. Applicability of an arrhenius model for the combined effect of temperature and CO₂ packaging on the spoilage microflora of fish. *Applied and Environmental Microbiology*. 66, 3528-3534.
- Kuffi, K. D., Defraeye, T., Nicolai, B.M., De Smet, S., Geeraerd, A., Verboven, P., 2016. CFD modeling of industrial cooling of large beef carcasses. *International Journal of Refrigeration*. 69, 324-339.
- Kuffi, K., Defraeye, T., Koninckx, E., Lescouhier, S., Nicolai, B.M., De Smet, S., Geeraerd, A., Verboven, P., 2013. CFD Modeling of Air Cooling of Multiple Beef Carcasses Using 3D Geometrical Models. *Acta Horticulturae*, October 2013.

- Kuitche, A., 1995. Modélisation des cinétiques de température et de perte de poids des viandes pendant la réfrigération en régime variable. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Agroalimentaires, France.
- Kuitche, A., Daudin, J.D., Letang, G., 1995. Modelling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time-variable conditions using an analytical-based method-I. The model and its sensitivity to certain parameters. *Journal of Food Engineering*, 28, 1, 55-84.
- Laguerre, O., Duret, S., Hoang, H.M., Guillier, L., Flick, D., 2015. Simplified heat transfer modeling in a cold room filled with food products. *Journal of Food Engineering*. 149, 78-86.
- Laguerre, O., Hoang, M.H., Flick, D., 2012. Heat transfer modelling in a refrigerated display cabinet: the influence of operating conditions. *Journal of Food Engineering*. 108 (2), 353-364.
- Le Marc, Y., Huchet, V., Bourgeois, C.M., Guyonnet, J.P., Mafart, P., Thuault, D., 2002. Modelling the growth kinetics of *Listeria* as a function of temperature, pH and organic acid concentration. *International journal of food microbiology*. 73 (2-3), 219-237.
- LeBlanc, D., Beaulieu, C., Lawrence, R., Stark, R., 1994. Evaluation of temperature variation of frozen foods during transportation, *The refrigeration Research Foundation Information Bulletin* (Bethesda, Maryland, USA), Décembre 1994, 1-3.
- Létang, G., 1990. Brumisation des viandes: économie d'énergie en réfrigération des carcasses de gros animaux grâce à la brumisation. *Revue Générale du Froid*. Mai, 25-29.
- Létang, G., Frencia, J.P., 2008. La réfrigération de la viande. *Revue Générale du Froid et du conditionnement d'air*. 11, 38-45.
- Likar, K., Jevšnik, M., 2006. Cold chain maintaining in food trade. *Food control*. 17 (2), 108-113.
- Luning, P.A., Devlieghere, F., 2006. *Safety in the agri-food chain*. Wageningen Academic Pub.
- Mallikarjunan, P., Mittal, G.S., 1994. Heat and mass transfer during beef carcass chilling - Modelling and simulation. *Journal of Food Engineering*. 23 (3), 277-292.
- McKellar, R.C., Lu, X., 2004. *Modelling microbial response in food*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press.
- Mejlholm, O., Gunvig, A., Borggaard, C., Blom-Hanssen, J., Mellefont, L., Ross, T., Dalgaard, P., 2010. Predicting growth rates and growth boundary of *Listeria monocytogenes* - An

- international validation study with focus on processed and ready-to-eat meat and seafood. *International Journal of Food Microbiology*. 141 (3), 137-150.
- 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.
- Merai M., Flick D., Guillier L., Duret S., Laguerre O., Experimental characterization of heat transfer inside a refrigerated trailer loaded with carcasses. *International Journal of Refrigeration*. submitted.
- Mirade, P.S., 2007. CFD modelling of indoor atmosphere and water exchange during the chesses ripening process. Da-Wen Sun (Ed.), *Computational fluid dynamic in food processing*, CRC Press, 697-726.
- Mirade, P.S., Kondjoyan, A., Daudin, J.D., 2002. Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34 (1-3), 67-88.
- Mirade, P.S., Picgirard, L., 2001. Assessment of airflow patterns inside six industrial beef carcass chillers. *International Journal of Food Science and Technology*. 36, 463-475.
- Monin, G., 2003. Abattage des porcs et qualités des carcasses et des viandes. *Inra Productions Animales*. 16 (4), 251-262.
- Moureh, J., Flick, D., 2004. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *International Journal of Refrigeration*. 27, 464-474.
- Moureh, J., Flick, D., 2005. Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 26, 12-24.
- Moureh, J., Menia, N., Flick, D., 2002. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34, 25-42.
- Moureh, J., Tapsoba, S., Derens, E., Flick, D., 2009a. Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts. *International Journal of Refrigeration*. 32 (2), 220-234.

- Moureh, J., Tapsoba, S., Derens, E., Flick, D., 2009b. Airflow in a slot-ventilated enclosure partially filled with porous boxes: Part I – measurements and simulations in the clear region. *Computers and Fluids*. 38 (2), 194-205.
- Moureh, J., Tapsoba, S., Flick, D., 2008. Airflow and heat transfer in a slot-ventilated enclosure: application to refrigerated trucks. in *ichmt digital library online*. Begel House Inc..
- Nahor, H. B., Scheerlinck, N., Verniest, R., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. M., 2001. Optimal experimental design for the parameter estimation of conduction heated foods. *Journal of Food Engineering*. 48 (2), 109-119.
- Ndoye, F. T., and Alvarez, G., 2015. Characterization of ice recrystallization in ice cream during storage using the focused beam reflectance measurement. *Journal of Food Engineering*. 148, 24-34.
- Norton, T., Sun, D.W., 2006. Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science and Technology*. 17 (11), 600-620.
- Ovca, A., Jevšnik, M., 2009. Maintaining a cold chain from purchase to the home and at home: consumer opinions. *Food Control*. 20 (2), 167-172.
- Pham, Q.T., Trujillo, F.J., McPhail, N., 2009. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients. *International Journal of Refrigeration*. 32 (1), 102-113.
- Ratkowsky, A.D., Lowry, R., McMeekin, T.A., Stokes, A.N., Chandler, R.E., 1983. Model for Bacterial Culture Growth Rate Throughout the Entire Biokinetic Temperature Range. *Journal of Bacteriology*. 154 (3), 1222-1226.
- Rediers, H., Claes, M., Peeters, L., Willems, K. A., 2009. Evaluation of the cold chain of fresh-cut endive from farmer to plate. *Postharvest Biology and Technology*. 51 (2), 257-262.
- Rossel, R., 2003. *Listeria monocytogenes* en abattage et découpe de porc: contrôle de la contamination environnementale des frigos de ressuage et salles de découpe. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.
- Rosset, P, Beaufort, A., Cornu, M., Poumeyrol, G., 2002. The cold chain in food processing. *Cahiers de Nutrition et de Dietétique*. 37 (2), 124-130.

- Rosset, P., 2003. Home food preservation using cold temperature. The last link of the cold chain is the freezer in our homes. How to use it to reduce the risk of bacterial growth? *Servir* (Lisbon, Portugal). 51 (1), 32-39.
- Rosso, L., Lobry, J.R., Bajard, S., Flandrois, J.P., 1995. Convenient Model to Describe the Combined Effects of Temperature and pH on microbial growth. *Applied and Environmental Microbiology*. 61 (2), 610-616.
- Sajadiye, S.M., Ahmadi, H., Hosseinalipour, S.M., Mohtasebi, S.S., Layeghi, M., Mostofi, Y., Raja, A., 2012. Evaluation of a cooling performance of a typical full loaded cool storage using mono-scale CFD simulation. *Modern Applied Science*. 6 (1), 102-119.
- Savell, J.W., Mueller, S.L., Baird, B.E., 2005. The chilling of carcasses. *Meat Science*. 70 (3), 449-459.
- Savoie, G., LeBlanc, D., Nguyen, C., 1996. Aspects thermiques d'un camion semi-remorque chargé d'aliments surgelés, *Revue de l'Université de Moncton*, 73-101.
- Schneider, K.C., Sweat, V.E., Arce, J.A., Duston, T.R., Dzhan, P.F., 1982. Factors affecting beef carcass chilling rates. *Transactions of the ASAE*. 25, 498-507.
- Smale, N. J., Moureh, J., Cortella, G., 2006. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *International Journal of Refrigeration*, 29(6), 911-930.
- Springer, M. P., Carr, M. A., Ramsey, C. B., Miller, M. F., 2003. Accelerated chilling of carcasses to improve pork quality. *Journal of Animal Science*. 81(6), 1464-1472.
- Stahl, V., Le Page, J.F., El Jabri, M., Thuault, D., 2012. Validated kinetic models of chilled and frozen meat quality and safety. *Frisbee (Food Refrigeration Innovations for Safety, consumer's Benefit, Environmental impact and Energy optimization along the cold chain in Europe)* European project, Deliverable 3.2.4.6.
- Tapsoba, M., 2005. Etude expérimentale et numérique de l'aérodynamique dans un véhicule frigorifique. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France.
- Tapsoba, M., Moureh, J., Flick, D., 2007a. Airflow patterns inside slotted pallets in a ventilated enclosure. *Computers and Fluids*. 36 (5), 935-948.

- Tapsoba, M., Moureh, J., Flick, D., 2006. Airflow patterns in an enclosure loaded with slotted pallets. *International Journal of Refrigeration*. 29 (6), 899-910.
- Tapsoba, M., Moureh, J., Flick, D., 2007b. Airflow patterns in a slot-ventilated enclosure partially loaded with empty slotted boxes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 28 (5), 963-977.
- Trujillo, F.J., Pham, Q.T., 2006. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*. 29 (6), 998-1009.
- Trujillo, F.J., Pham, Q.T., 2007. CFD Modeling of Simultaneous Heat and Mass Transfer in Beef Chilling. *Contemporary Food Engineering Series*. D.-W. Sun: 83-101.
- Trujillo, F.J., Wiangkaew, C., Pham, Q.T., 2007. Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*. 78 (1), 74-85.
- Van Derlinden, E., Bernaerts, K., Van Impe, J.F., 2008. Accurate estimation of cardinal growth temperatures of *Escherichia coli* from optimal dynamic experiments. *International Journal of Food Microbiology*. 128 (1), 89-100.
- Verboven, P., Nicolai, B., Scheerlinck, N., and De Baerdemaeker, J., 1997. The local surface heat transfer coefficient in thermal food process calculations: a CFD approach. *Journal of Food Engineering*. 33, 15-35.
- Wang, L., Sun, D.W., 2003. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry – a review. *Trends in Food Science and Technology*. 14, 408-423.
- Whiting, R.C., Buchanan, R.L., 1993. A classification of models for predictive microbiology. *Food Microbiology*. 10, 175-177.
- Willix, J., Harris, M.B., and Carson, J.K., 2006. Local surface heat transfer coefficients on a model beef side. *Journal of Food Engineering*. 74, 561-567.
- Zertal-Ménia, N., 2001. Etude numérique et expérimentale de l'aérodynamique dans un véhicule frigorifique. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique-Paris Grignon, France.
- Zertal-Ménia, N., Moureh, J., Flick, D., 2002. Modélisation simplifiée des écoulements d'air dans un véhicule frigorifique. *International journal of refrigeration*. 25 (5), 660-672.

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., Van't Riet, K., 1990. Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and environmental microbiology*. 56 (6), 1875-1881.

Zwietering, M.H., 2015. Risk assessment and risk management for safe foods: Assessment needs inclusion of variability and uncertainty, management needs discrete decisions. *International Journal of Food Microbiology*. 213, 118-123.

Annexes

Annexe 1: Présentation orale au congrès international « The 3rd International conference on Food and Biosystems Engineering », 1-4 June, Rhodes, Greece

Characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses

M. Merai^{1,2,*}, D. Flick², L. Guiller³, S. Duret¹, O. Laguerre¹

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

² UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

³ Université Paris-Est, Anses, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety, Food Safety Laboratory, 23 avenue du Général de Gaulle, 94706 Maisons-Alfort Cedex, France

* (mouna.merai@irstea.fr)

ABSTRACT

After slaughtering, pork carcasses should be cooled down as fast as possible to reach a core temperature of 7°C (current requirement in European regulation) before transport in order to inhibit the growth of spoilage and pathogen microorganisms. To reach this temperature, carcasses are usually loaded into chiller rooms (15-20 hours) where the rate of cooling is controlled. To reduce the logistic time from slaughter house to cutting plant, a solution is proposed by loading the product into a trailer at core temperatures higher than 7°C. However, we have to assess that such a practice will not lead to a sanitary risk when applied to real scenario. In order to answer this issue, the first step will be to study the airflow characteristics within a trailer filled with pre-chilled pork carcasses.

The objective of this study is to investigate experimentally the air velocity distribution in a reduced scale trailer filled with reduced scale carcass models under isothermal conditions. The 215 carcass models were made of polyurethane foam using a mold obtained by 3D printing based on X-ray scanner of a real carcass. The Reynold number in the experimental device is the same as in a real trailer ($Re \sim 1.3 \cdot 10^5$). In this way, the airflow is similar to that observed in the real conditions. The velocity measurements have been carried out using 2D-LDV equipment (Laser Droplet Velocimetry) at different points in the symmetry plane of the filled trailer model. The analysis of the experimental results allows the understanding of the airflow magnitude and direction, thus, high and low velocity zones can be distinguished.

Keywords: refrigeration, transport, carcasses, airflow, Laser Droplet Velocimetry.

1. INTRODUCTION

Meat carcasses are highly perishable products and their quality depend on the refrigeration conditions used after slaughtering. To prevent quality loss, since 1964 in the European Union, carcasses should be chilled immediately after the post mortem inspection and kept at a constant core temperature of $\leq 7^{\circ}\text{C}$ until the consumption. The first step of cooling in slaughterhouses intend to cool down, as fast as possible, the core temperature of carcasses to prevent the growth of undesirable microorganisms (Kinsella et al., 2006 ; Savell et al., 2005). Different techniques, e.G. using air or spray chilling are used depending on slaughterhouses. The big challenge in this step is to lower the core temperature without affecting the color, tenderness and water loss of carcasses (Létang, 1990 ; Kuitche, 1995 ; Savell et al., 2005). As a consequence of this regulation, carcasses can be stored in chilled rooms of slaughterhouses for 24-48 hours.

In France, most of the slaughterhouses are located in west part while cutting facilities are dispatched all over the country. In order to provide their clients with acceptable product quality in an acceptable delay, slaughterhouses are asking today for an easing of this regulation. Such a request has been accepted in other European countries such Italy where a national regulation has been created (DL n.286, 1994) that allows carcasses transportation before reaching the European regulatory temperature ($\leq 7^{\circ}\text{C}$). In this case, only short and fast transportation are allowed (Kuffi et al. 2013). The Belgium Scientific Committee of the FASFC used predictive microbiology to conclude that the transport of pork carcasses at temperature above the regulatory temperature was acceptable for 2 hours of transportation if carcasses are loaded in the trailer with 9°C of surface temperature, or for 3 hours with temperatures of 7°C at the surface and 12°C in the core (Anonymous, 2004 and 2008).

Those studies have been conducted using either empirical studies or predictive microbial tests without taking into account the variability of the transportation step. The refrigerated equipment characteristics, the loading technique, the number of carcasses and the transportation duration have an important impact on the core and surface temperature evolution and as a consequence they can affect the microbial growth. In 1996, James explained that the main problem in the cold transportation is the non-uniform air distribution inside the trailer. It is thus necessary to understand the airflow pattern in the refrigerated trailer.

The objective of this experimental work is to study the airflow inside a trailer loaded with carcasses at reduced scale. This airflow is characterized by air velocity and flow direction using 2D Laser Doppler Velocimetry (LDV). The identification of zones of low air velocity leads to the information of a potential microbial risk.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Experimental device

With respect to European regulation, the refrigerated trailers have the internal length of 13.3 m. In order to conduct our experiments on a reasonable dimension, a reduced scale trailer (1:3.3) has been used. In such a way, Reynolds number is the same order of magnitude of the real trailer ($Re \sim 1.3 \cdot 10^5$). The side wall of this trailer was made of glass to allow the measurements of internal air velocity using two-dimensional LDV (Dantec Dynamics, Flow explorer-2D). The other walls are made of wood.

As a result of the scale reduction, studied pork carcasses have been also prepared at the same scale (1:3.3). Based on X-ray scans provided by the French Pork Institute (IFIP), 3D carcass geometry has been built up and the scale has been reduced before printing both half-carcasses on polyamide structure (Figure 1). The obtained structure has been used to create a silicone mold and to prepare 430 half-carcasses using expanded polyethylene. Once all the reduced scale carcasses are prepared, they have been placed into the reduced scale trailer respecting a real loading configuration observed in real pork carcasses refrigerated transport. This configuration has been approved by both French Pork Institute (IFIP) and French meat companies (Culture Viande) the partners in this work (Figure 2).

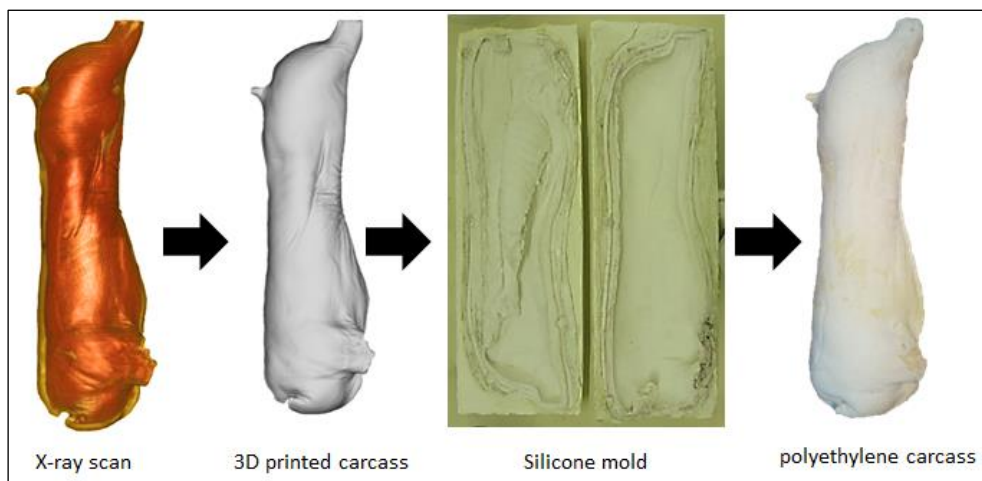


Figure 1. Steps to produce reduced scale carcasses from the X-ray scan of real pork carcass.

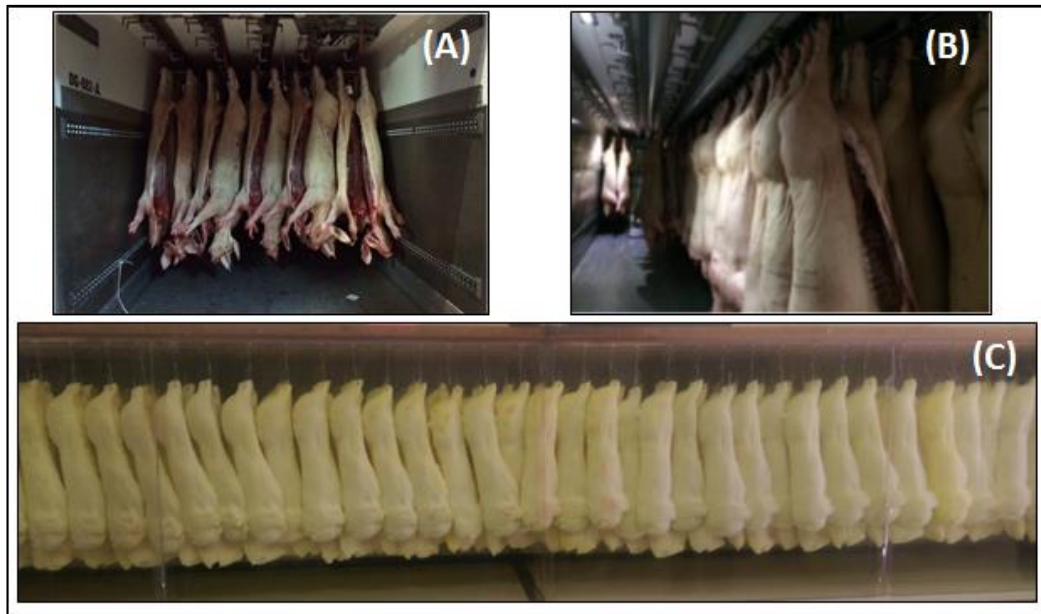


Figure 2. Photography of the selected loading configuration (A and B) and the reduced scale trailer filled with pork carcasses (C).

2.2. Velocity measurements

The measurement of the internal air velocity by LDV requires the use of a wall of glass to allow the penetration of the laser beam inside the trailer. The laser equipment was placed on a displacement system that allowed the automation and the control of the movement according to the three axes x , y and z (Figure 3).

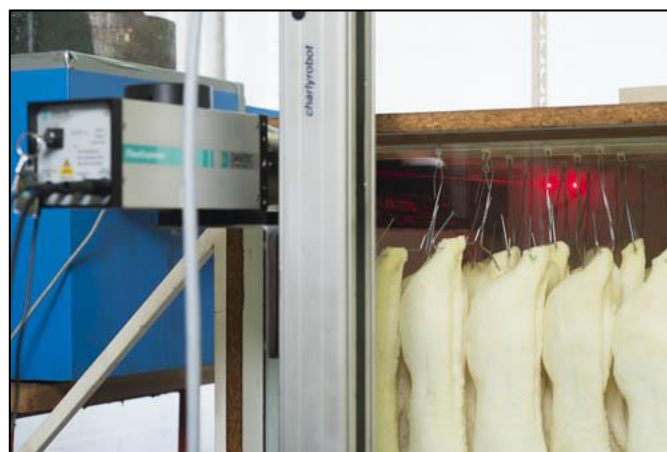


Figure 3. Measurement of air velocity above the carcass in a reduced scale trailer by Laser Doppler Velocimetry (LDV).

The air velocity was determined by measuring the displacement velocity of small particles of paraffin oil (diameter $\approx 1 \mu\text{m}$) injected into the blowing device. Those particles are small enough to follow the air displacement inside the trailer. Thus the velocity of this tracer is considered as the air velocity.

The 2D LDV used in this study was able to show the airflow direction (sign +/-) as well as the velocity magnitude. This magnitude is represented by the mean velocity and its fluctuations of two velocity components in the trailer: U (longitudinal in x direction) and V (vertical in y direction). The device is composed of two 70 mW laser diodes emitting two laser beams at 660 nm and 785 nm, a beam-splitter, a Bragg cell, a focusing and receiving lens, a pinhole arrangement to collect scattered light and a photomultiplier. Measurements were conducted in a coincidence mode where both laser beams converge in the same measure volume (0.17 mm x 2.8 mm).

In this study, measurements of velocity have been carried out in the symmetry plan (35 cm from the glass wall) of the trailer filled with carcasses over and under the carcasses as shown in Figure 4-A.

A total of 2270 measurement points were undertaken to describe the airflow pattern in the symmetry plan using Matlab (R2015a, Mathworks Inc.). Results were presented using the velocity magnitude defined by the eq. 1.

$$\|\vec{V}\| = \sqrt{V^2 + U^2} \text{ (eq. 1)}$$

In addition to this profile, measurements in 8 vertical plans at x= 50, 150, 250 and 350 cm of the reduced scale trailer length over and under carcasses (from z=0 cm to z= 35cm) and just after the inlet section were conducted (Figure 4-B). Measurements were also carried out in two horizontal plans at mid-height at the front (from x=3 cm to x=10 cm and from z=0 cm to z=35 cm) and at the rear of the trailer where no carcasses are present (from x=486 cm to x=497 cm and from z=0 cm to z=35 cm). The airflow rate was then calculated in those plans using the integral of the U velocity component (eq. 2).

$$Q = \int_x U dS \text{ (eq. 2)}$$

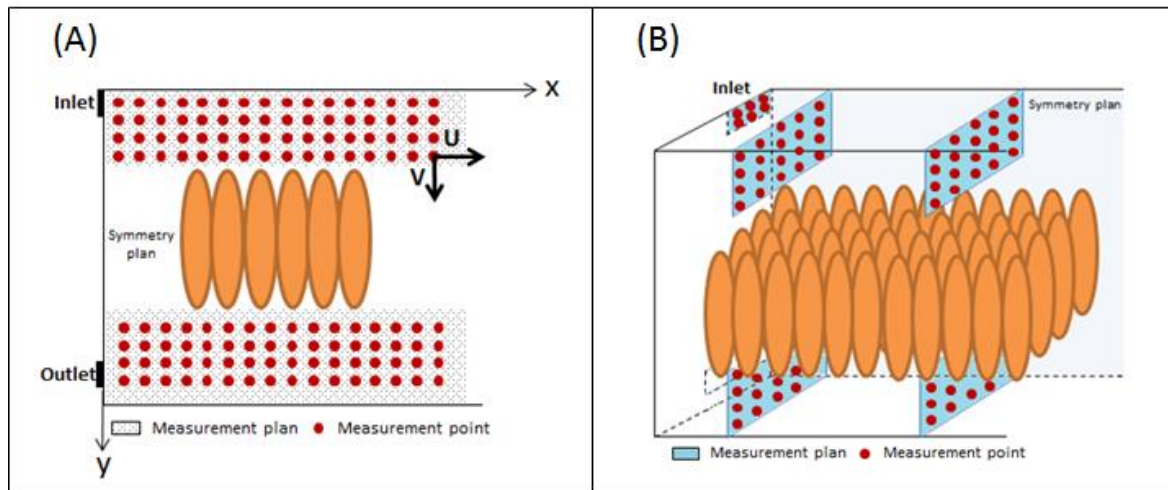


Figure 4. Graphical representation of measurement positions (A) in the symmetry plan of the trailer and (B) in vertical plans over and under carcasses.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Symmetry plan characterization

In order to illustrate the overall airflow pattern in the symmetry plan, Figure 5 shows the magnitude of the velocity obtained by LDV measurements around carcasses. The zones over and under the carcasses were expanded vertically in this graph to better highlight the velocity in those zones. Over carcasses we can see the evolution of the jet behavior.

The trailer can be divided into two main zones: the first zone from $x=0$ m to $x=10$ m and the second one from $x=10$ m to the end of the trailer. In the front zone ($x \leq 10$ m), the air velocity decreases from 11 m.s^{-1} to 2 m.s^{-1} . For the rear zone ($x > 10$ m), the air velocity decreases also from the upper part of the trailer ($y=0$ m) to the upper part of carcasses ($y=3.6$ m) where the velocity ranges from 0 m.s^{-1} to 1.5 m.s^{-1} corresponding to a weak airflow. Similar results have been obtained with the airflow characterization in the empty trailer (Moureh and Flick, 2005).

Under carcasses, the trailer can also be divided into two zones: the first zone ($0 \text{ m} \leq x \leq 6 \text{ m}$) where the air velocities are around $2\text{-}3 \text{ m.s}^{-1}$ and the second zone ($6 \text{ m} < x \leq 13.3 \text{ m}$) where the air is nearly stagnant.

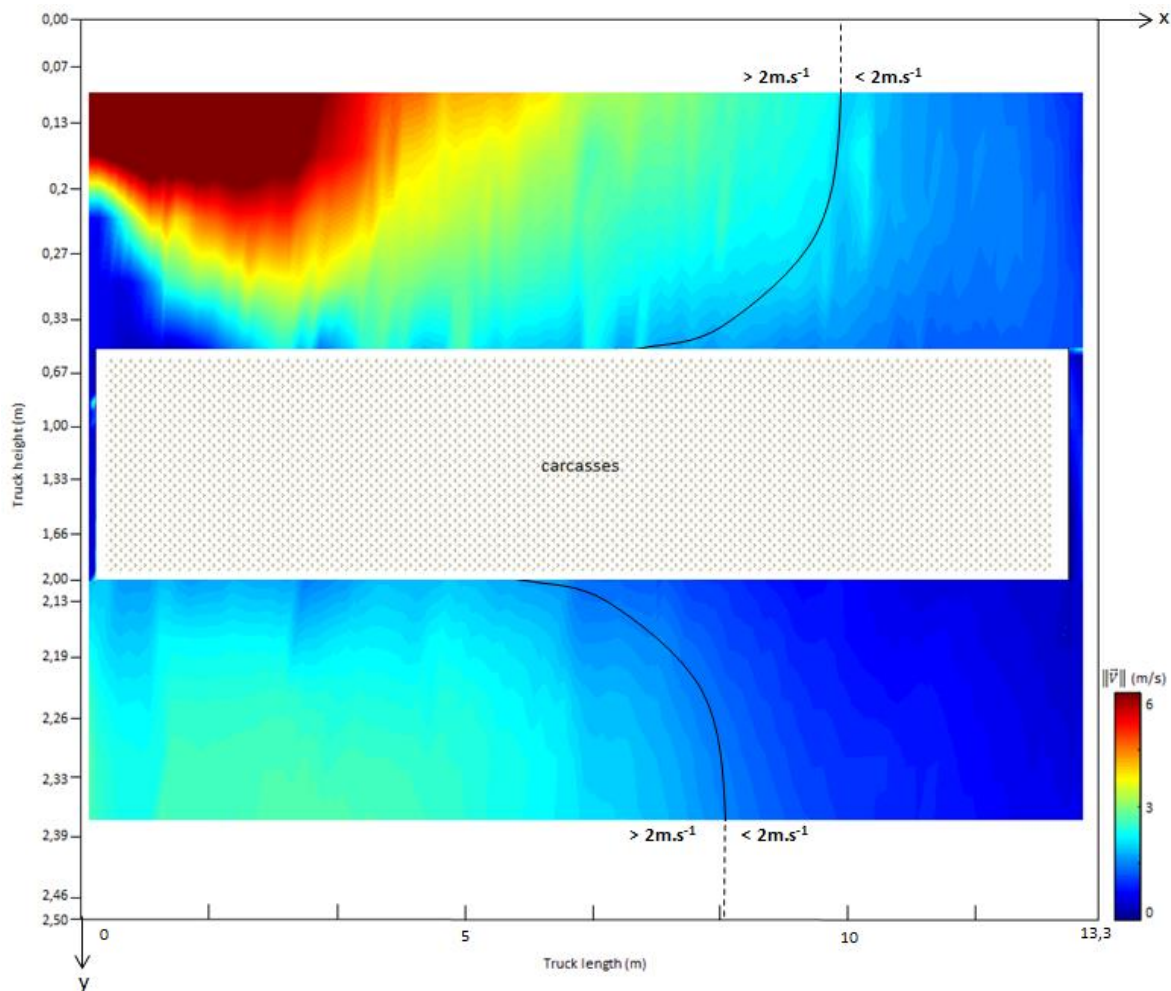


Figure 5. Velocity magnitude in the symmetry plan of the trailer filled with carcasses (*results obtained from LDV measurements and translated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy*).

3.2. Airflow rate estimation

Velocity measurements in the vertical plans upper and under carcasses were used to estimate the airflow rate in those regions (Figure 6). Results are shown as dimensionless airflow rate obtained by the expression of the measured airflow divided by the inlet flow (Q/Q_0).

In the two first measurements plans ($x=1.66$ m and $x=4.99$ m), the airflow rate is higher than the inlet one. This phenomenon is related to the strong blowing airflow in the inlet of the trailer. At 5 m $< x < 8$ m, the airflow rate decreases rapidly. Those results are similar to those obtained in the empty trailer (Zertal Méria, 2001).

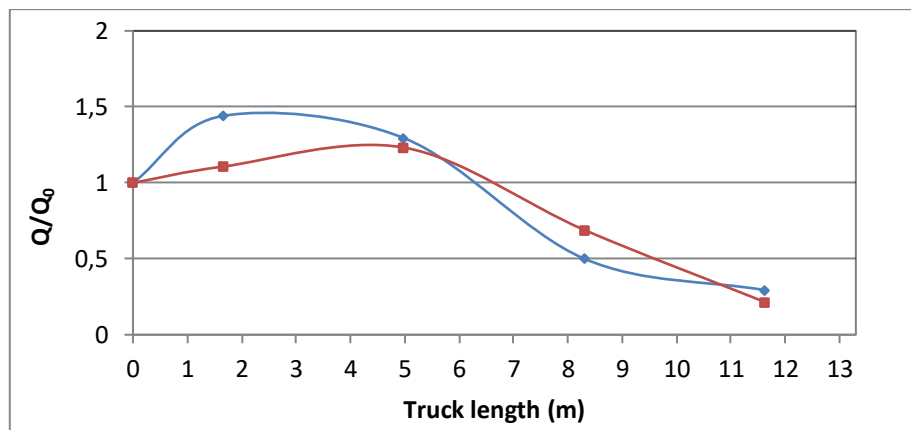


Figure 6. Dimensionless airflow rate estimation in the filled trailer (*blue*) over and (*red*) under carcasses (results obtained from LDV measurements and translated to the real scale of the trailer using Reynolds analogy).

Under carcasses, the airflow rate is different from the over carcasses ones. Those differences can be attributed to a circulation of the air between the carcasses volume.

3.3. Simplified model reconstruction

Based on the results obtained in (3.1.) and (3.2.), a simplified schematic airflow can be developed in the filled trailer (Figure 7). It takes into account the hypothesis of vertical and horizontal air circulations between carcasses. These circulations were estimated by the difference between upper and lower airflow rates.

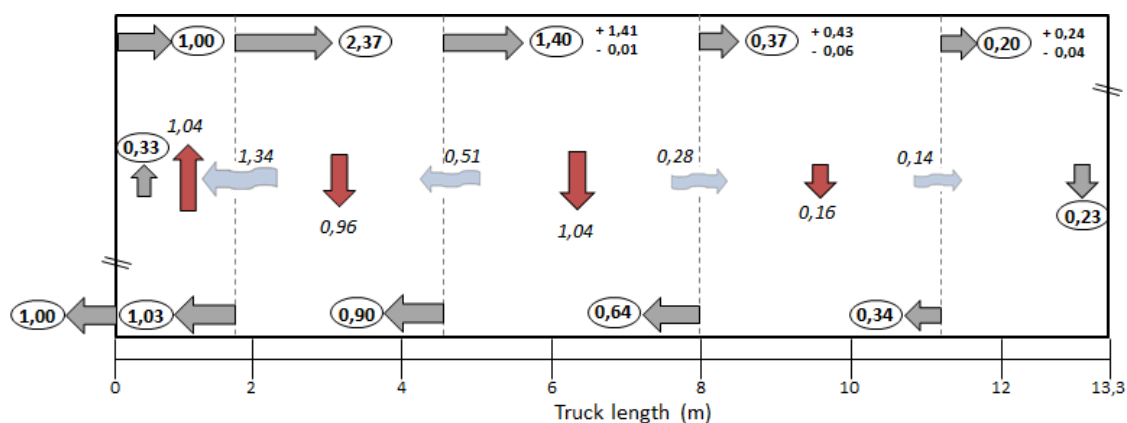


Figure 7. Simplified schematic airflow rate distribution in the symmetry plan of the filled trailer. Values represent Q/Q_0 . Bold values with grey arrow correspond to the calculated airflow; italic values with red arrow correspond to the difference between upper and down airflow; blue arrow correspond to the airflow lateral circulation.

4. CONCLUSION

Using a reduced scale trailer filled with pork carcasses (1:3.3) with respect of the Reynolds number and a 2D LDV technique, internal flow was successfully characterized in the trailer.

A zone of low airflow has been identified in the rear part of the trailer above carcasses starting from approximately 10 m. Under carcasses the zone of low airflow is larger and extends from the back of the trailer to 6 m of length. In these zones where air is nearly stagnant, the product temperatures maintain is problematic and a potential risk of microorganism's development can be expected. The results of this study allow, on one hand, the understanding of the airflow distribution around carcasses and on the other hand, the development of the simplified model.

ACKNOWLEDGMENT

This research work was carried out in the framework of DIM ASTREA grant by the Regional Council of Ile-de-France (France). The authors thank "IFIP" and "Culture viande" represented by Brice Minvielle and Franck Bellaca for their contribution in this work.

REFERENCES

- Anonymous. (2004). Regulation (EC) No 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin. Official Journal of European Union 001.001/001-059.
- Anonymous. (2008). A quantitative microbiological risk assessment on Salmonella in meat 1: source attribution for human salmonellosis from meat. *EFSA J.*, 1-32.
- James, S. (1996). The chill chain "from carcass to consumer". *Meat Science*. 43(1), 203-216.
- Kinsella, K.J., Sheridan, J.J., Rowe, T.A., Bulter, F., Delgado, A., Quispe-Ramirez, A., Blair, I.S., McDowell, D.A. (2006). Impact of a novel spray-chilling system on surface microflora, water activity and weight loss during beef carcass chilling. *Food Microbiology* 23, 483-490.
- Kuffi, K., T. Defraeye, E. Koninckx, S. Lescouhier, B. M. Nicolai, S. De Smet, A. Geeraerd and P. Verboven. (2013). CFD Modeling of Air Cooling of Multiple Beef Carcasses Using 3D Geometrical Models. *Acta Horticulturae*, October 2013.
- Kuitche, A. (1995). Modélisation des cinétiques de température et de perte de poids des viandes pendant la réfrigération en régime variable. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Agroalimentaires, France.

- Létang, G. (1990). Brumisation des viandes: économie d'énergie en réfrigération des carcasses de gros animaux grâce à la brumisation. *Revue Générale du Froid* **Mai**, 25-29.
- Moureh, J. and Flick, D. (2005). Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26, 12-24.
- Savell, J.W., Mueller, S.L. and Baird, B.E. (2005). The chilling of carcasses. *Meat Science* 70 (3), 449-459.
- Savell, J.W., Mueller, S.L., Baird, B.E. (2005). The chilling of carcasses. *Meat science 50th International Congress of Meat Science and Technology, (ICoMST), 8-13 August 2004, Helsinki, Finland* 70, 449-459.
- Zertal-Ménia, N. (2001). Etude numérique et expérimentale de l'aérodynamique dans un véhicule frigorifique, PhD thesis. Institut National Agronomique-Paris Grignon, France.

Annexe 2: Présentation orale au congrès international « FoodSim'2018 », 8-12 Avril 2018, Leuven, Belgium

MODELLING OF TEMPERATURE, WATER ACTIVITY AND MICROBIAL GROWTH ON THE SURFACE OF A PORK LEG DURING REFRIGERATED TRANSPORTATION

Mouna Merai

Refrigeration Process Engineering Unit-Irstea, Antony, France

E-mail: mouna.merai@irstea.fr

KEYWORDS

3D model, pork leg, temperature, water activity, microbial growth, refrigerated transportation.

ABSTRACT

European regulation previously imposed to slaughterhouses that pork carcasses must be chilled immediately to ensure a core meat temperature below 7°C before future handling operation. Recently the regulation was amended and offers the opportunity to transport carcasses with a core temperature > 7°C from the slaughterhouse to the cutting plants but with continuous refrigeration during their transportation.

The purpose of this study was to evaluate the impact of the regulation modification on the microbial growth on the carcasses surface. First, the heat and mass transfer during refrigerated truck transportation were predicted using a 3D pork leg model. Predicted temperature and water activity of the carcasses surface were then used to evaluate microbial growth on the surface.

The obtained results showed that in the studied conditions ($T_a = 4.5^\circ\text{C}$, $HR = 97\%$, $T_i = 15^\circ\text{C}$), the leg reached the required temperature (< 7°C) at the core after 10 hours of transportation. Small change in water content/activity was observed. Based on the proposed predictive microbiology model, the maximum microbial load increase was $2.5 \log_{10}$ after 30 hours of transportation.

NOMENCLATURE

a_w	water activity
$a_{w,\min}$	minimum water activity for microbial growth
C_p	air specific heat capacity ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
C_p	ham specific heat capacity ($3200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
C_w	water concentration in the leg (mol.m^{-3})
D_a	mass diffusivity of air ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
D_w	water diffusivity inside the leg ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
h	convective heat transfer coefficient ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
k	mass (water) transfer coefficient ($\text{kg.m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
Le	Lewis number of air ($Le = \frac{\alpha_a}{D_a} = 0.777$)
L_v	latent heat of water evaporation (2450 kJ.kg^{-1})
M_w	molar mass of water (18 g.mol^{-1})
N	microbial load at the surface (CFU.cm^{-2})
P_{atm}	atmospheric pressure (101325 Pa)
P_{sat}	saturated vapor pressure (Pa)
q	heat flux (W.m^{-2})
RH	air relative humidity (%)
t	time of transportation (s)
T	leg temperature (K)
T_{\min}	minimum temperature for microbial growth (K)
T_s	surface temperature at the muscle or rind part (K)
T_a	air temperature around the muscle or rind part (K)
X_w	water content in the leg (kg water/kg total)
Y	logarithmic microbial load at the surface $\log_{10}(N)$
α_a	thermal diffusivity of air ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
μ	microbial growth rate (s^{-1})
μ_{ref}	microbial reference growth rate (s^{-1})
ϕ_{water}	water evaporation flux from product surface ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
λ	ham thermal conductivity ($0.45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
ρ	ham density (1072 kg.m^{-3})

INTRODUCTION

In order to prevent the pathogenic bacteria contamination in meat during slaughter operations,

legislation requires the application of refrigeration immediately after post mortem inspection of carcasses. However, it is important to control the kinetics of product temperature reduction to optimize the meat maturation (ensuring a good technological quality) and the sanitary quality (Savell et al., 2005). French and European regulations have been enforced for the temperature of meat carcasses before and during transportation (Anonymous, 2004). According to this regulation, the meat must be chilled to reach a core temperature not exceeding 7°C as soon as possible. This refrigeration must be carried out in the cold rooms of the slaughterhouse before any carcass handling operation such as transport or cutting. However, this strict regulation does not make the difference between the types of pathogenic and alterations microorganisms knowing that in the case of pork carcasses, there are essentially aerobic bacteria on the surface. Thus, in 2014, EFSA adopted a new scientific opinion which concluded that the surface temperature is an appropriate indicator of bacterial growth. Consequently, derogations have been adopted in some countries to allow the transport of carcasses or half-carcasses with a core temperature above 7°C, if the transport duration is less than 2 hours. These derogations eventually triggered in 2016 a new scientific opinion on the growth of bacteria during the storage and transport of meat carcasses (EFSA, 2016). As some bacteria, especially *Pseudomonas* spp., can reach critical levels much faster than pathogenic bacteria, their growth kinetics may be an indicator of the temperature abuse during storage and transport. Because of the air temperature and velocity heterogeneity in a refrigerated semitrailer, lower product temperature is often observed at the front and higher at the rear. The position of sanitary risk (zone of high temperature and low velocity) can be influenced by the semitrailer design and the carcass arrangement. Thus, an aerodynamic and thermal study in a refrigerated semitrailer loaded with meat carcasses is essential for the understanding of the airflow and the

heat transfer coefficient variation at different position (Merai et al., 2018). This allows the identification of risk zones (areas where low air velocities and low convective transfer coefficients are observed).

The purpose of this study was to evaluate the impact of the regulation modification on the microbial growth on the carcasses surface. First, the heat and mass transfer during refrigerated truck transportation were predicted using a 3D pork leg model. Predicted temperature and water activity of the carcasses surface were then used to evaluate microbial growth on the surface. The developed model can be used in the future to study the influence of transport conditions (e.g. loading temperature of carcasses and air relative humidity) on the growth of bacteria at different areas in refrigerated semitrailer.

MATERIALS AND METHODS

Our scientific problematic is the simultaneous heat transfer, mass (water) transfer and microbial growth in a complex geometry object such as a meat carcass exposed to different operating conditions encountered in a refrigerated semitrailer. In this case, several transport phenomena occur, heat transfer by conduction inside the product and convection between product surface and air. Water migrates from the product inside to the surface and evaporates into the surrounding air. The product temperature and the water activity at the surface are determining factors of microbial growth.

3D geometry and meshing

A 3D model developed in COMSOL® Multiphysics by Harkouss et al., 2018 of a pork leg was used in order to predict the temperature, water activity and microbial growth evolution on the surface of muscle part during transportation (collaboration with INRA-Theix, France).

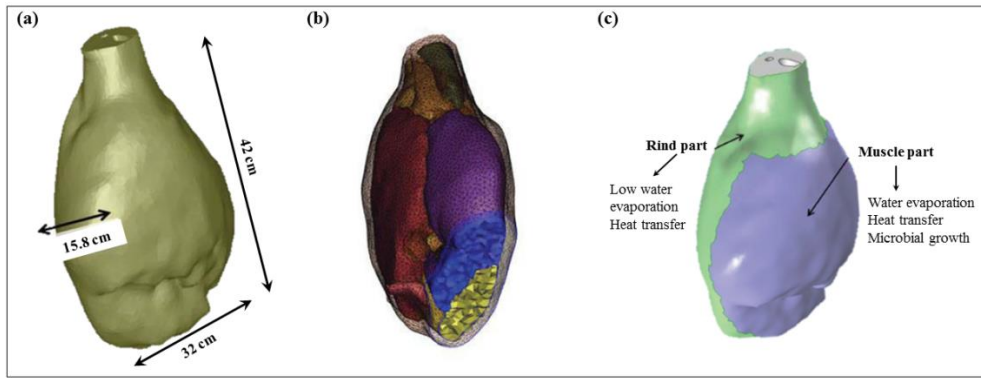


Figure 1: Views of (a) the 3D leg geometry and its dimensions and (b) the volumetric tetrahedral mesh with the different components of the leg imported into Comsol ® Multiphysics software (c) two considered zones on the leg (Harkouss et al., 2018).

Based on X-ray imaging of a real pork leg, a 3D geometry was produced respecting its different parts, i.e. rind, muscles and bone (Figure 1a). A volumetric mesh was then constructed on the 3D geometry (42 cm of length; 32 cm of width and 15.8 cm of depth) (Figure 1b) consisting in 202000 tetrahedral meshes and containing the different parts. Two zones were considered: rind part with low water evaporation and muscle part with water evaporation (Figure 1c).

Governing equations

Heat transfer modelling

In order to numerically simulate heat transfer inside the leg and predict temperature evolution during transportation, Fourier law was used:

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

This equation was applied and solved in all domains of the numerical leg, except the bone which was considered as thermally insulated.

At the air-leg interface, both the thermal convection and the energy exchanged during water evaporation were taken into account. Thus, at this boundary the heat flow rate q was calculated as follow:

$$q = -\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T_{\text{surface}} - T_{\text{air}}) + \varphi_{\text{water}} L_v \quad (2)$$

Mass transfer modelling

The water migration inside the carcasses during transportation can be modelled by the Fick equation that was solved in all domains except in the bone:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_w \cdot \vec{\nabla} C_w) \quad (3)$$

The water diffusion coefficient can be estimated by the equation presented by Ruiz-Cabrera et al. (2004) which is a function of water content (X_{water}):

$$D_{\text{water}} = 4 \cdot 10^{(0.625 \cdot X_w - 12)} \quad (4)$$

For the boundary condition (product surface), water evaporation flux was calculated using the following equation:

$$\varphi_w = -D_w \cdot \vec{\nabla} C_w \cdot \vec{n} = k \left(a_w P_{\text{sat}, T_s} - \frac{RH}{100} P_{\text{sat}, T_a} \right) \quad (5)$$

Water evaporation was assumed to occur only on the muscle part of the leg. k was calculated from the convective heat transfer coefficient using the Chilton Colburn analogy (Kondjoyan and Daudin, 1997):

$$k = \frac{h \cdot M_{\text{water}}}{C_{p, \text{air}} \cdot M_{\text{air}} \cdot P_{\text{atm}} \cdot Le^{2/3}} \quad (6)$$

$$\text{and } P_{\text{sat},T} = \exp\left(-\frac{6764}{T} - 4.915 \cdot \log T + 58.75\right) \quad (7)$$

Water activity was expressed as a function of water content (Rougier et al., 2007):

$$a_w = 0.993 \exp(-0.0204 X_w^{-1.96}) \quad (8)$$

Air temperature and relative humidity profiles were measured during real pork carcasses transportation. The convective heat transfer coefficient h was measured in a laboratory scale on the muscle part of the leg.

For the simulation, air temperature and relative humidity around the leg were considered constant (RH = 97 %, $T_a = 4.5^\circ\text{C}$). Initial water content in the pork leg of 0.75 kg water/kg total and initial temperature of 15°C were assumed. Heat convective coefficient was fixed at $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Microbial growth modelling

In order to highlight the influence of surface temperature and water activity evolution on a possible microbial growth, a simple preliminary model without lag phase was used (eq.9).

$$\frac{\partial Y(t)}{\partial t} = \mu(T, a_w) \quad (9)$$

where μ was obtained using a secondary model that takes into account temperature and water activity evolution:

$$\mu = \mu_{\text{ref}} (T - T_{\text{min}})^2 \left(\frac{a_w - a_{w,\text{min}}}{1 - a_{w,\text{min}}} \right) \quad (10)$$

No growth is assumed for $T < T_{\text{min}}$ or $a_w < a_{w,\text{min}}$. As a first approach, simulations were made for $T_{\text{min}} = 4.5^\circ\text{C}$, $a_{w,\text{min}} = 0.9$ and μ_{ref} value is fixed at 0.003 s^{-1} . These values depend on the microorganism and other food characteristics like salt concentration or pH. The T_{min} and $a_{w,\text{min}}$ values were chosen as representatives of values that characterized psychrotrophic bacterial species involved in meat spoilage (Gill & Jones, 1992).

Supplementary studies are under way to estimate these values for specific microorganisms often encountered on carcasses and meat cuts like *Pseudomonas*.

RESULTS AND DISCUSSION

Temperature evolution during transportation

To visualize the temperature evolution inside the leg for 1 h, 5 h, 10 h and 30 h transportation, 4 horizontal slices have been selected using the same temperature scale (Figure 2).

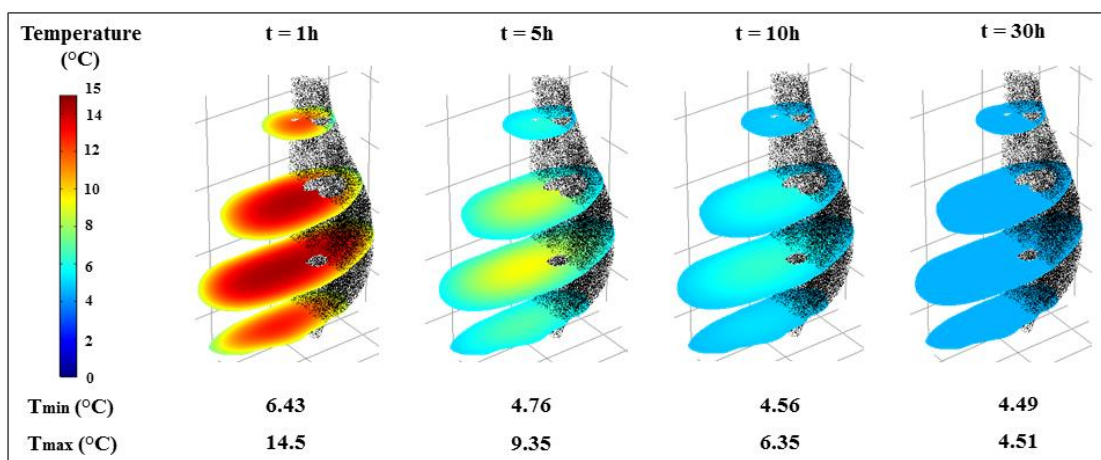


Figure 2: Temperature distribution in four horizontal slices of the carcasses' leg during transportation (t = 1 h, 5 h, 10 h and 30 h) showing the minimum and maximum temperature.

Water activity evolution during transportation

Water activity varies slightly (results not shown) and can be considered constant around the initial value ($a_w \approx 0.96$). This small variation can be explained by the high relative humidity (97 %) of the air in the loaded refrigerated truck due to the air recycled during transportation.

Microbial growth during transportation

After 10 hours of transportation, order of magnitude of transportation time in France, microorganisms load increases and reaches $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = 1.4$ (Figure 3). This value is consistent with observed increase of total psychotropic microflora during carcass cooling (Gill and Jones, 1997; Afssa, 2009).

According to the European legislation (EFSA, 2016), for 30 hours transportation of carcasses with initial core temperature of 15°C, the contamination should not exceed 10^4 CFU.cm⁻² (or 4 log₁₀). Predicted results showed that the logarithmic load increases: maximum value of $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)$ is lower than 2.5 after 30 hours (with $T_i = 15$ °C). To respect the regulation, the initial contamination should not exceed $10^{1.5} \approx 300$ CFU.cm⁻² in the studied conditions. This initial value of total microflora is consistent with existing literature (Gill and Jones, 1997).

Further work is to be conducted to evaluate the initial level of contamination on carcasses to accurately evaluate the final contamination.

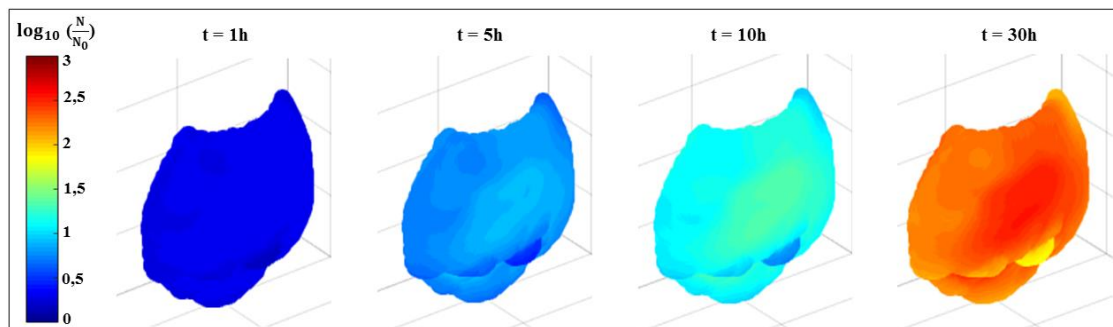


Figure 3: Microbial growth evolution during transportation (at 1 h, 5 h, 10 h and 30 h)

CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Models were developed to predict the microbial growth on the surface of the lean part of a pork leg during transportation. This choice was based on the fact that the leg is the most problematic in the whole pork carcass as it is the largest part and so it is difficult to cool.

Temperature, water content and water activity evolution were simulated for 30 hours of transportation ($T_a = 4.5$ °C, $RH = 97\%$, $h = 20$ W. m⁻². K⁻¹, $T_0 = 15$ °C). Small changes were observed for water activity while temperature decreased rapidly at the surface of the leg (< 7 °C after 1 hour). After 10 hours of transportation the microbial load increased and reached $\log_{10} \left(\frac{N}{N_0} \right) = 1.4$.

In a future work, different scenarios will be studied varying the relative humidity, air temperature and the heat convection coefficient as a function of the position in the semi-trailer loaded with pork carcasses. This parametric study will allow a precise prediction of the microbial growth in the most problematic zones of the semi-trailer already identified in our previous work dealing with air velocity distribution around and between the carcasses.

ACKNOWLEDGEMENT

This research work was carried out within the framework of a DIM ASTREA grant by the Regional Council of Ile-de-France (France). The authors thank Pierre-Sylvain Mirade and Jason Sicard from INRA-Theix-France for their collaboration.

REFERENCES

Afssa, 2009. "Avis relative au transport des carcasses de porc n'ayant pas atteint la température réglementaire à la sortie de l'abattoir". <https://www.anses.fr/fr/system/files/MIC2008sa0283.pdf>.

Anonymous, 2004. "Règlement (CE) n°853/2004 du Parlement Européen et du Conseil du 29 avril

2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale".

- EFSA BIOHAZ Panel, 2014. "Scientific opinion on the public health risks related to the maintenance of the cold chain during storage and transport of meat. Part 1 (meat of domestic ungulates)". *EFSA Journal* 2014; 12 (3):3601, 81 pp. doi:10.2903/j.efsa.2014.3601.
- EFSA BIOHAZ Panel, 2016. "Scientific opinion on the growth of spoilage bacteria during storage and transport of meat". *EFSA Journal* 2016; 14 (6):4523, 38 pp. doi:10.2903/j.efsa.2016.4513.
- Gill, C.O., Jones, T., 1992. "Assessment of the hygienic efficiencies of two commercial processes for cooling pig carcasses". *Food Microbiology*. 9, 335-343.
- Gill, C.O., Jones, T., 1997. "Assessment of the hygienic performances of an air-cooling process for lamb carcasses and a spray-cooling process for pig carcasses". *International Journal of Food Microbiology*. 38 (2), 85-93.
- Harkouss, R., Chevarin, C., Daudin, J.D., Sicard, J., Mirade, P.S., 2018. "Development of a multi-physical finite element-based model that predicts water and salt transfers, proteolysis and water activity during the salting and post-salting stages of the dry-cured ham process". *Journal of Food Engineering*. 218, 69-79.
- Kondjoyan, A., Daudin, J.D., 1997. "Heat and mass transfer coefficients at the surface of a pork hindquarter". *Journal of Food Engineering*. 32, 225-240.
- Merai, M., Flick, D., Duret, S., Guiller, L., Laguerre, O., 2018. "Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses". *International Journal of Refrigeration* (in press).
- Rougier, T., Bonazzi, C., Daudin, J.D., 2007. "Modeling incidence of lipid and sodium chloride contents on sorption curves of gelatine

in the high humidity range”. *LWT-Food Science and Technology*. 40, 1798-1807.

Ruiz-Cabrera, M., Gou, P., Foucat, L., Renou, J.P., Daudin, J.D., 2004. “Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging”. *Meat Science*. 67, 169-178.

Savell, J.W., Mueller, S.L., Baird, B.E., 2005. “The chilling of carcasses”. *Meat Science*. 70 (3), 449-459.

Annexe 3: Présentation d'un poster au 26^{ème} congrès français de thermique, 29 Mai au 1 Juin 2018, Pau, France

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

Mouna MERAI¹, Onrawee LAGUERRE, 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. 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, m ² .s ⁻¹	X_w	fraction massique en eau
L_v	enthalpie de vaporisation, J.kg ⁻¹	ϕ	densité de flux évaporatoire, kg.s ⁻¹ 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 permettant 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 pour atteindre une température à cœur ne dépassant pas 7°C dans les chambres froides de l'abattoir 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 conséquence, des dérogations ont été adoptées pour permettre le transport des carcasses ou demi-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 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 ~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 aux différentes conditions ambiantes telles que nous rencontrons 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 communes rencontrées dans le transport à longue distance des carcasses de porc (Figure 1a), observées par nos partenaires (Institut Français du Porc, Culture Viande). La configuration étudiée correspond à une semi-remorque réfrigérée à une longueur interne de 13,3 m et chargée de 215 carcasses de porc accrochées sur 5 rails.

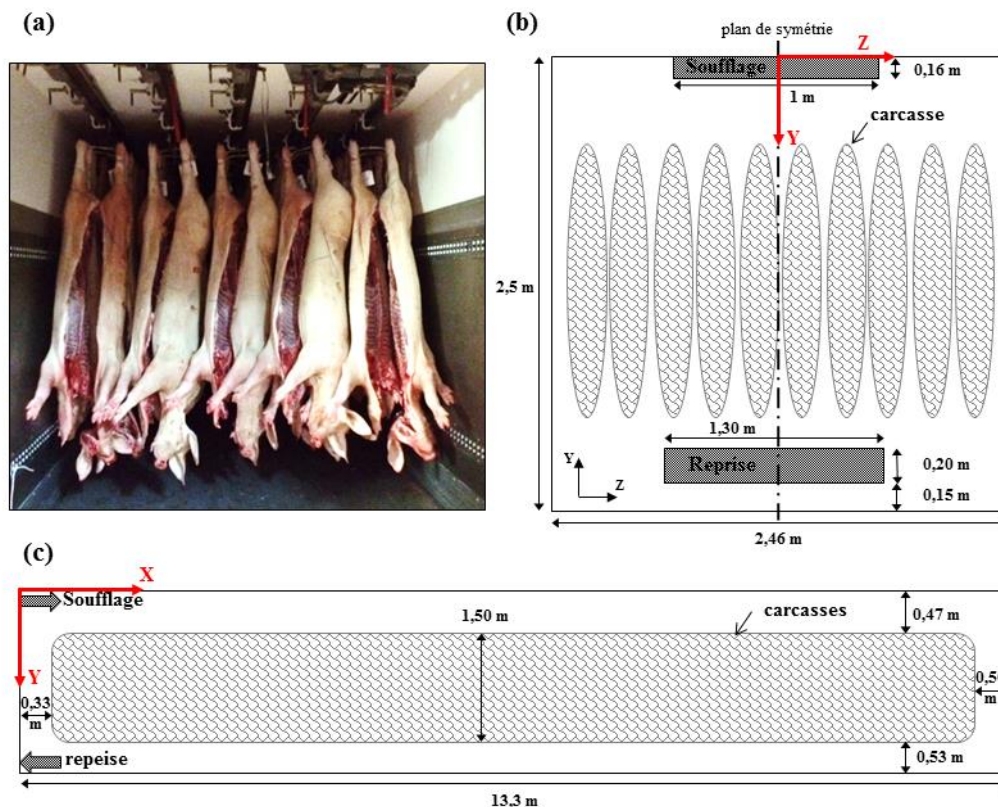


Figure 1 : Semi-remorque chargée de carcasses de porc (a) configuration réelle ; (b) schéma de la vue de face et (c) schéma de la vue de côté.

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 x 757 x 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 $0,6 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$) 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.

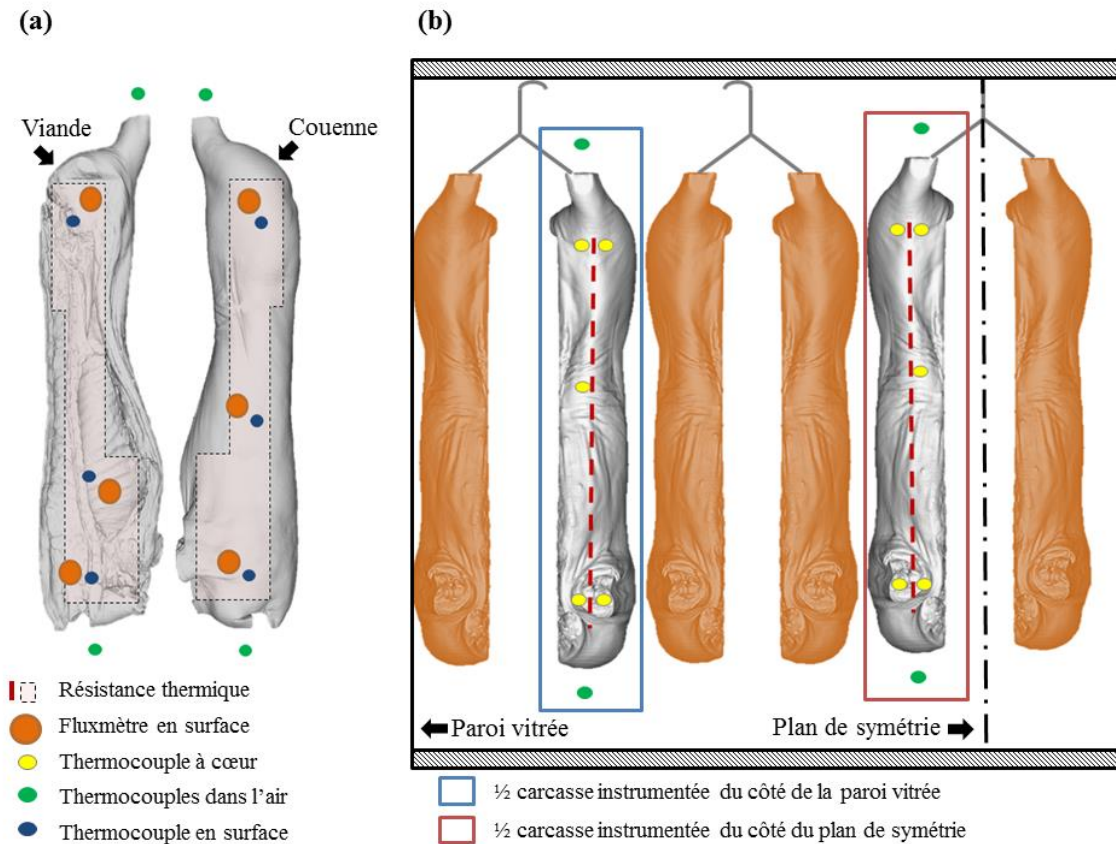


Figure 2 : Instrumentation des demi-carcasses en plâtre

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 $\leq 13\%$).

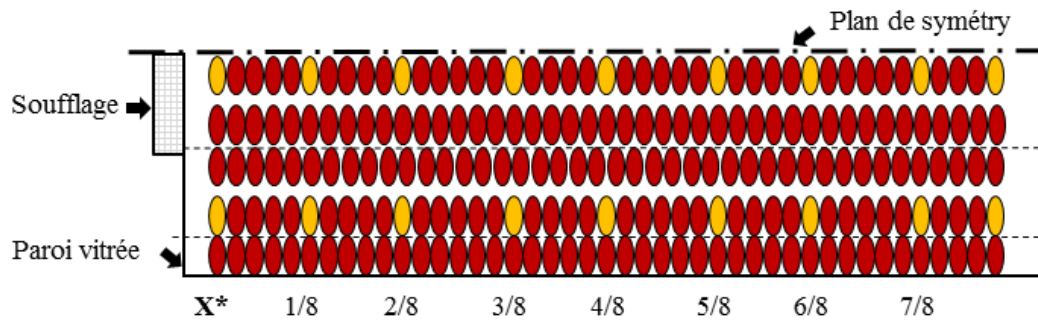


Figure 3 : Vue de dessus de la moitié du camion chargé de carcasses de porc montrant la position (en jaune) des demi-carcasses instrumentées pour la mesure du coefficient de transfert convectif

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 $Nu=f(Re,Pr)$. 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.

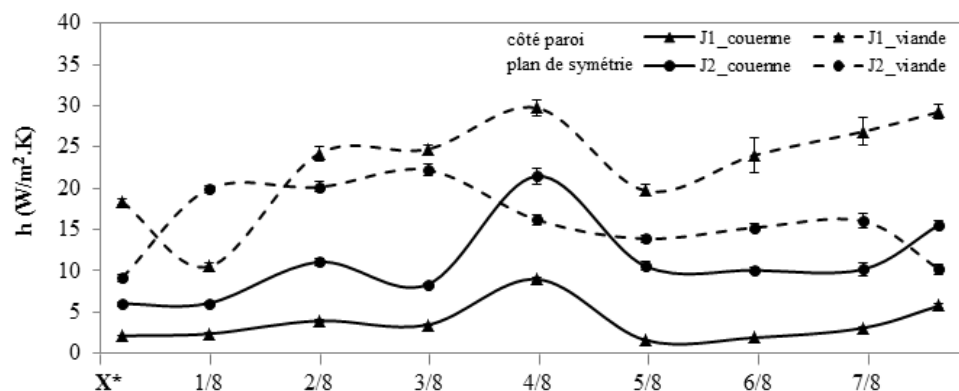


Figure 4. Coefficient de transfert convectif à la surface des jambons le long de la semi-remorque.

Les résultats de mesure des coefficients 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 du 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 coté viande ($h > 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). 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 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 (coté couenne, il n'y a pas évaporation $\phi = 0$):

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

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) :

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

$T_i = 15^\circ\text{C}$ (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 ($D = \text{m}^2\text{s}^{-1}$), 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 ($\sim 2\text{h}$) 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 ($\sim 9\text{h}$). La dissymétrie observée provient, d'une part, du fait que le gras a une conductivité moindre que le muscle, d'autre part de refroidissement lié à l'évaporation du côté maigre. 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 ($4,9^\circ\text{C}$ après 6h au lieu de $3,8^\circ\text{C}$). Il est donc indispensable de prendre en compte le couplage des transferts.

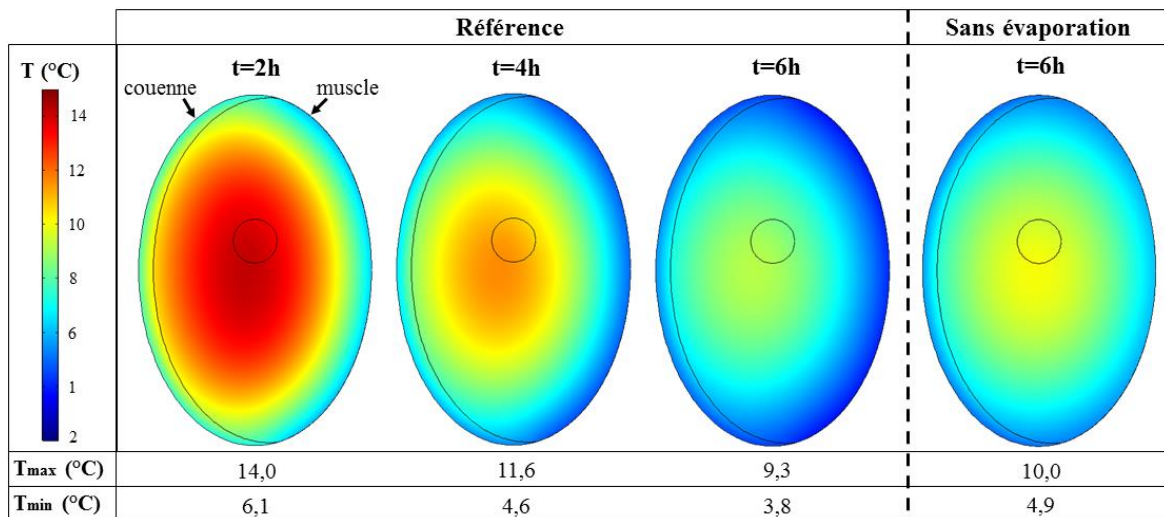


Figure 5 : Champ de température : cas de référence avec/sans prise en compte de l'évaporation.

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 (>0,5).

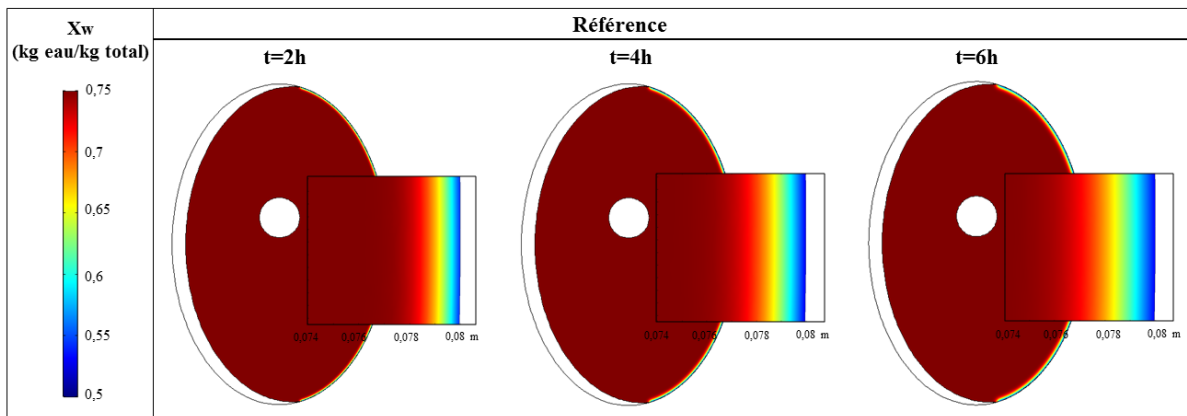


Figure 6 : Champ de la fraction massique en eau dans le muscle : cas de référence.

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 à plus faible humidité d'air (pour $a_w=1$ elle tendrait vers la température du bulbe humide d'autant plus basse que HR est bas).

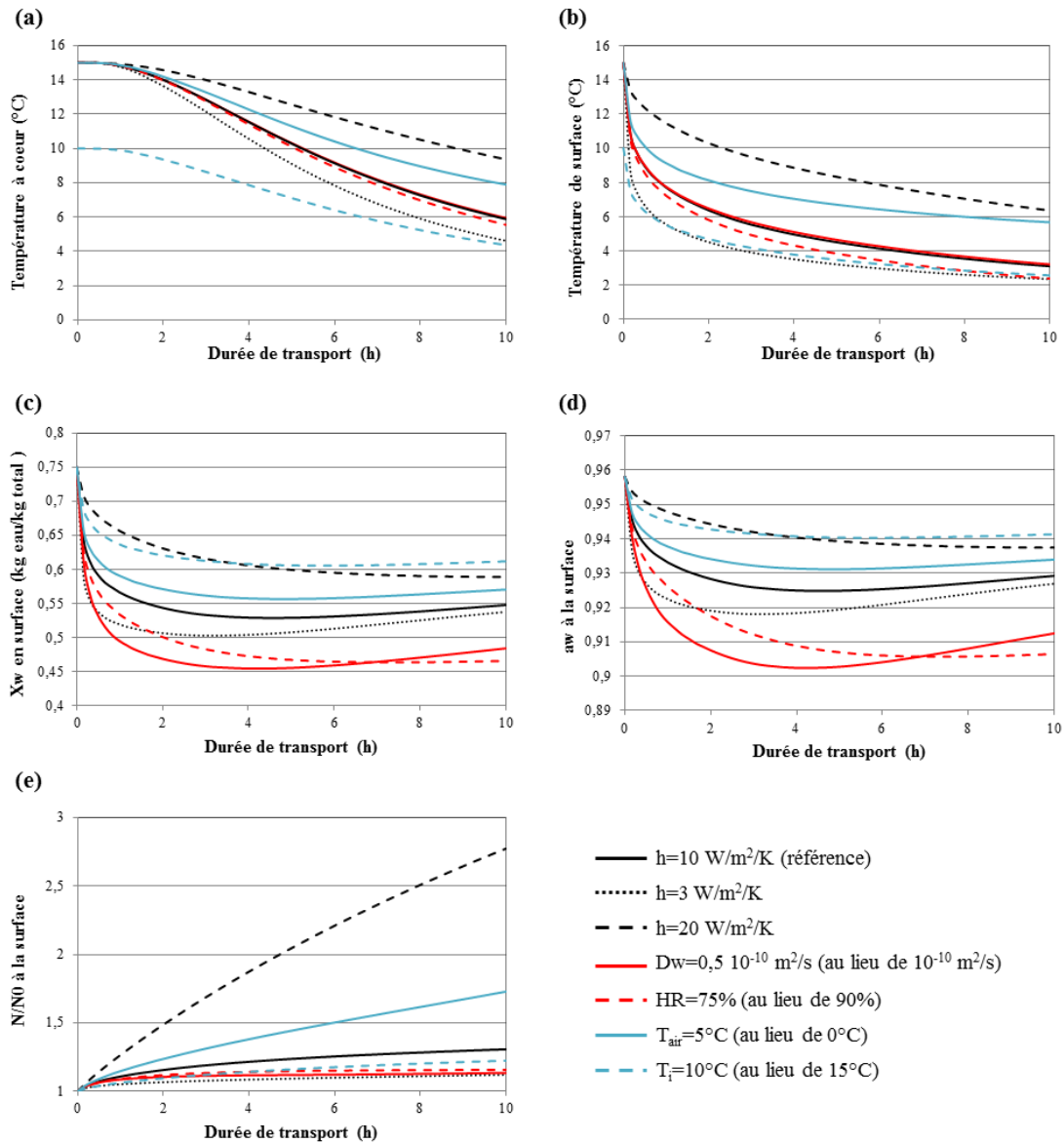


Figure 7 : Evolution au cours du temps de la température à cœur (centre de l'ellipse) de la température en surface du muscle (à mi-hauteur), de la fraction massique et de l'activité de l'eau en surface et de l'augmentation relative de la charge microbienne en surface de la viande.

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 à 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 correspond 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 $^\circ\text{C}$) ou si le coefficient de transfert est plus bas (3 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 ($h = 3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) au bout de 10 h l'augmentation décimale, 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 du camion sur 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)

Annexe 4: Communication au congrès international « International Congress of Refrigeration » 27-30 August 2019, Montreal, Canada

Modelling the fluid flow inside a refrigerated trailer loaded with pork carcasses

M.Merai¹, S.Duret¹, J.Moureh¹, O.Laguerre¹, D.Flick².

¹Irstea, UR GPAN, Refrigeration Process Engineering Research Unit, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony, France

²UMR Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 91300 Massy, France

Abstract

When pork carcasses are transported in a refrigerated trailer, all of them should be correctly ventilated. CFD simulations were performed to assess the homogeneity of air circulation around the carcasses. From an Xray scanner of a carcass, a simplified geometry was deduced. The air volume inside a semitrailer containing 430 pork half-carcasses was then meshed ($21 \cdot 10^6$ cells). The Reynolds Averaged Navier Stokes equations were solved with the k- ϵ turbulence model. The flow pattern is very complex: air is blown at high velocity on the top of the container front, forming a wall jet. There is an air entrainment by this jet whose section increases whereas its velocity decreases. Part of the blown air flows throughout the 'porous' zone constituted by the carcasses while another part reaches the gap between the carcasses and the doors at the rear of the container. Finally air flows back toward the outlet. Zones of low velocity between half-carcasses were identified.

Keywords: airflow, CFD, refrigerated transport, pork carcasses

1. Introduction

When pork carcasses are transported in a refrigerated trailer, all of them should be correctly ventilated. But in fact, it has been shown both by experimentation and computational fluid dynamics (CFD) that air flow can be very heterogeneous in refrigerated trailers. Up to now, the studies concerned empty trailers (Moureh and Flick 2005), trailers loaded with impermeable or porous pallets (Tapsoba et al. (2007), Moureh et al. 2009) or a single carcass (Pham et al. 2009, Kuffi et al. 2016). The present study concerns the case of a long trailer (13.3 m) loaded with 430 pork half-carcasses. The air inlet and outlet are both located at the front of the container, this generally implies a better ventilation in the front part than in the rear part. The air is blown at high velocity (11 m/s) near the ceiling of the container front, forming a turbulent wall jet. The particularity of this configuration in comparison with previous studies is the very complex geometry of the load. A numerical approach is here presented.

Many CFD studies of air flow in refrigeration equipment use the Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) approach. The objective is to predict the time-averaged mean velocity (\vec{v}). Most often the Reynolds stresses, due to the velocity fluctuations (\vec{v}') are expressed with the Boussinesq approximation by introducing the turbulent viscosity (ν_t). This way, the eddies are not directly solved but only characterized by their turbulent kinetic energy (k). Following Kolmogorov's point of view, mechanical energy of the mean flow is transformed into turbulent kinetic energy (because of the mean velocity gradients) and the energy of the smallest eddies is transformed into heat (molecular agitation) with a specific dissipation rate (ε). For complex geometries, an algebraic estimation of the turbulent viscosity cannot be used; the most popular approach relates ν_t to k and ε (taking into account indirectly of the turbulence length scale l_t). Different versions are available which differ by some energy redistribution terms and near wall treatment (standard k - ε , realizable k - ε , k - ε RNG, k - ω SST). Near wall treatment is especially important if heat transfer has to be predicted. Sometimes the Boussinesq approximation cannot be applied because eddies are highly anisotropic and more sophisticated model (e.g. RSM) have to be used (Defraeye et al. 2013).

Near the walls, \vec{v} varies very rapidly in a nonlinear way, so that a very fine mesh should be employed near the walls. But this becomes very expensive in terms of memory and computing time. Therefore, assuming that the flow is almost parallel to the wall in the first cell near a wall, the boundary layer theory can be employed to estimate the wall shear stress. In the software the employed near wall relations are called 'wall functions'.

The present study aims to predict the homogeneity of the fluid flow around the carcasses. No precise velocity field or estimation of the heat transfer intensity is expected; therefore the standard k - ε model (with wall functions) was used.

2. Geometry and mesh

Figure 1 presents the dimensions of the trailer and of the zone occupied by the carcasses.

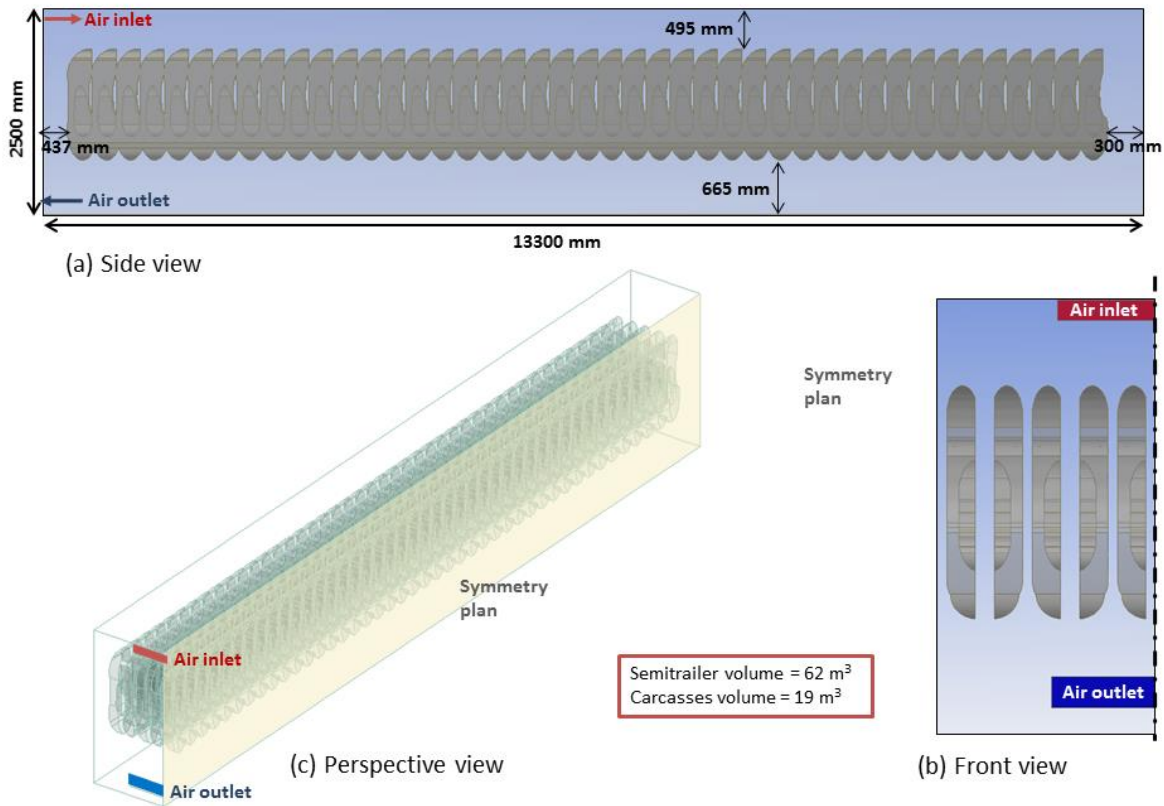


Figure 1: Dimensions of the trailer (real scale)

From an Xray scanner of a carcass, a simplified geometry was deduced as shown on Figure 2. The simplified geometry was developed in order to have the same volume ensuring the same porosity of the zone occupied by the carcasses. The horizontal section at a given height is also about the same for the real carcass and the simplified geometry, ensuring almost the same convergent or divergent flow in the vertical direction.

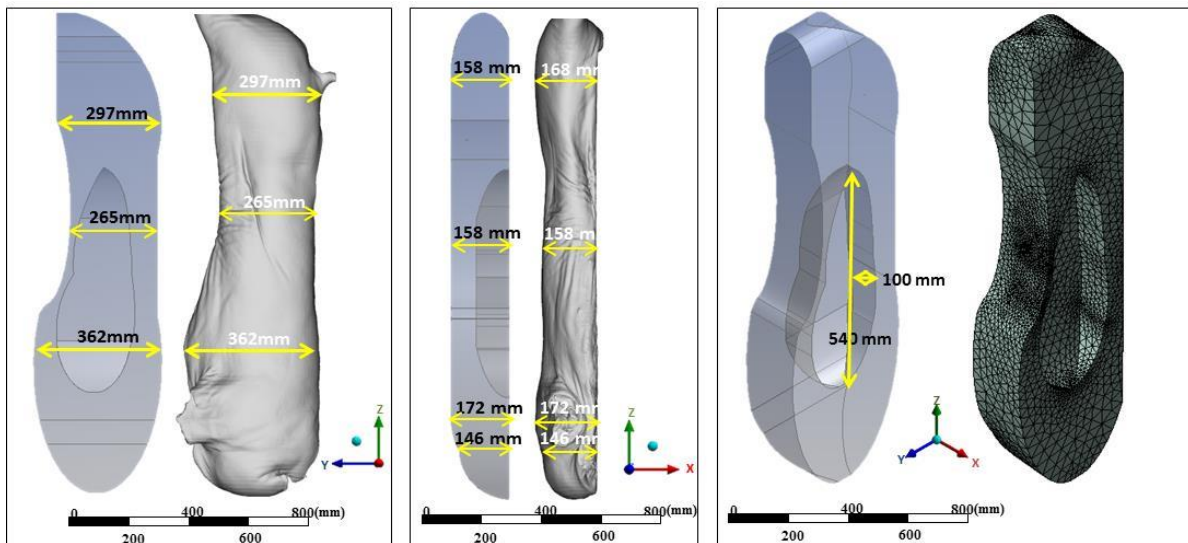


Figure 2: Simplified geometry of the carcasses

The air volume inside a semitrailer containing 430 pork half-carcasses was then meshed using 21 009 342 cells (Figure 3). Near the top wall, the mesh is prismatic in order to better take into account the wall jet development.

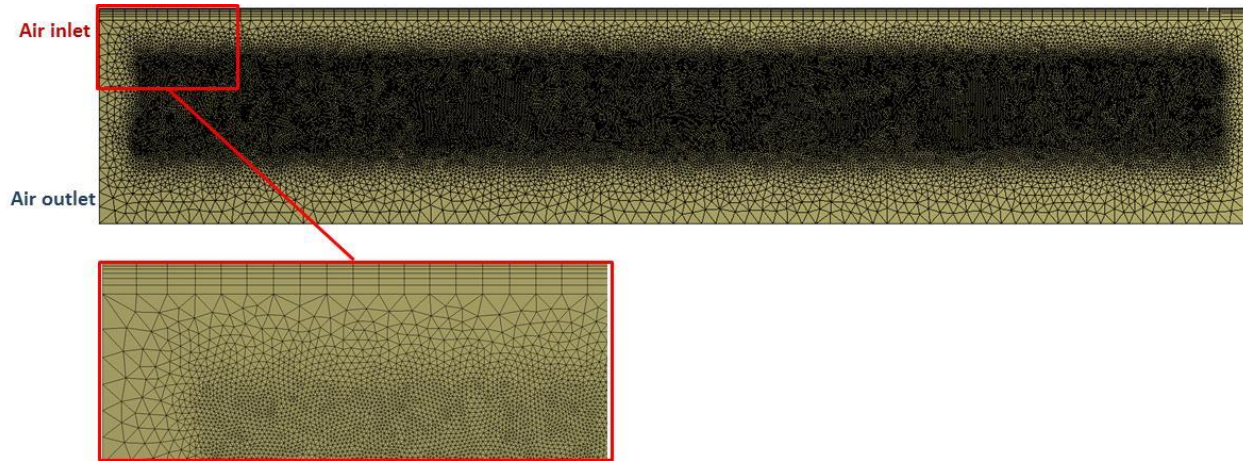


Figure 3 View of the mesh

3. Main hypotheses and boundary conditions

The fluid is assumed incompressible and isothermal. Properties of air at 4°C were used. The steady state RANS equations with the standard k- ϵ model of turbulence and the standard (logarithmic) wall function (smooth walls) were solved using the finite volume method (Fluent).

The inlet conditions are:

- section 1.100 m x 0.16 m (hydraulic diameter: 0.28 m)
- normal mean velocity: 11 m.s⁻¹ (Reynolds number: 2.2 10⁵)
- turbulence intensity: 10 %
- turbulence length : 7 % of hydraulic diameter

At outlet, uniform pressure was imposed (without viscous stress).

The simulation converged after 3500 iterations which needed 48 hours of computation on a 12 cores computer with 130 Go RAM.

4. Results and discussion

Figure 4 present some computed stream lines inside the loaded trailer (the carcasses are not represented in this figure but where taken into account in the simulation). This highlights the complexity of the 3D flow pattern. Globally air blown near the ceiling forms a wall jet. Its section increases whereas its velocity decreases (1). It adheres to the top wall (by Coanda effect) nearly up to the rear of the trailer. Part of the blown air flows throughout the ‘porous’ zone constituted by the carcasses while another part reaches the gap between the carcasses and the doors at the rear of the

container (2). Finally air flows back toward the outlet near the bottom (3). There is an air entrainment by the jet which explains an upward flow on the front of the trailer (4).

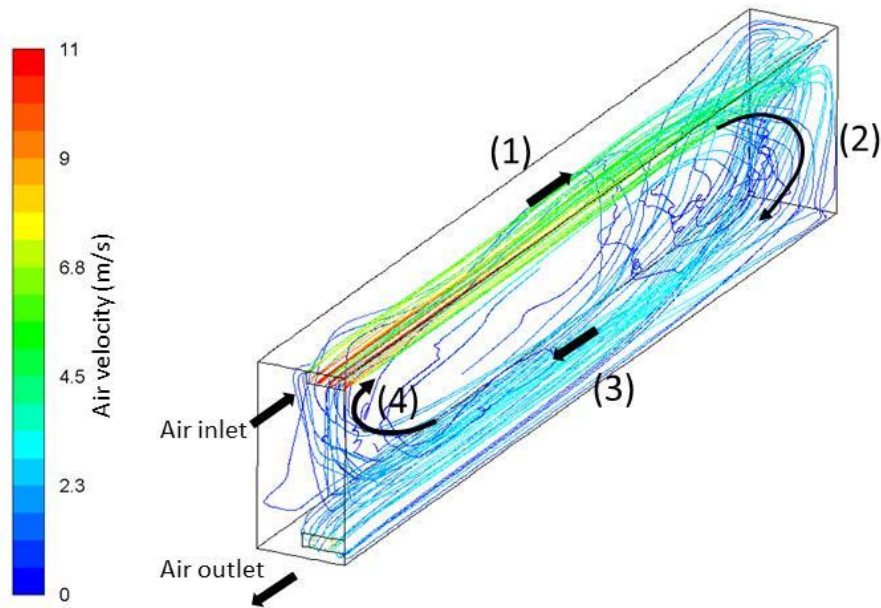


Figure 4 : Stream lines issued from the inlet section

Figure 5a presents the computed velocity magnitude in the symmetry plan. This velocity field can be compared outside the zone of carcasses with the experimental one (Figure 4b) which was obtained on a reduced scale trailer loaded with reduced scale carcasses made of polyurethane foam (Merai et al. 2018) by 2D Laser Doppler Velocimetry (LDV).

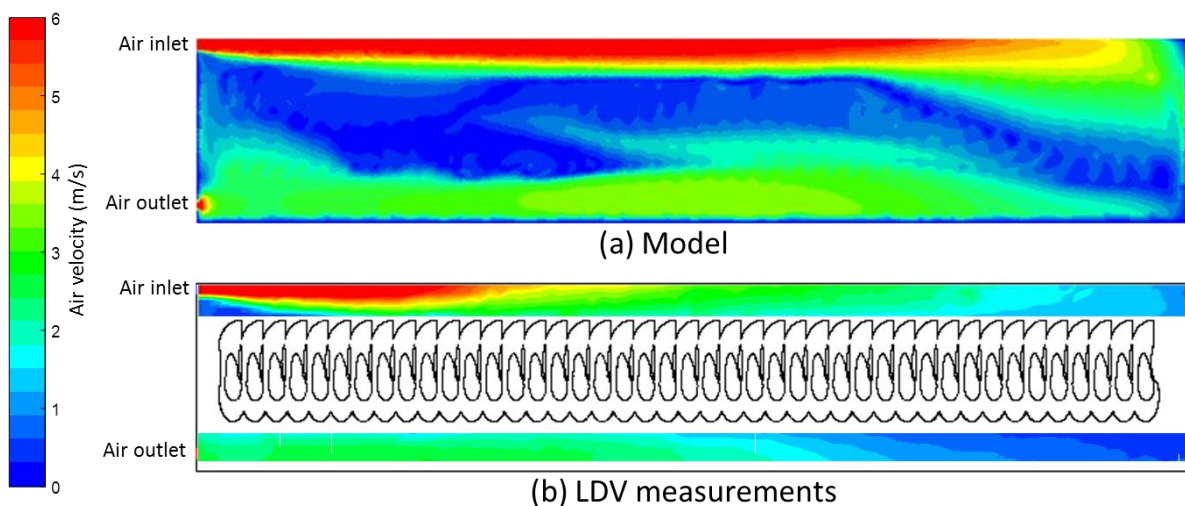


Figure 5: velocity magnitude in the symmetry plan (red color represents velocities ranging from 6 m.s^{-1} to 11 m.s^{-1} which is the value at inlet)

Figure 6 compares the evolution along the jet axis (longitudinal axis passing by the center of the inlet section) of the numerical and experimental axial velocities.

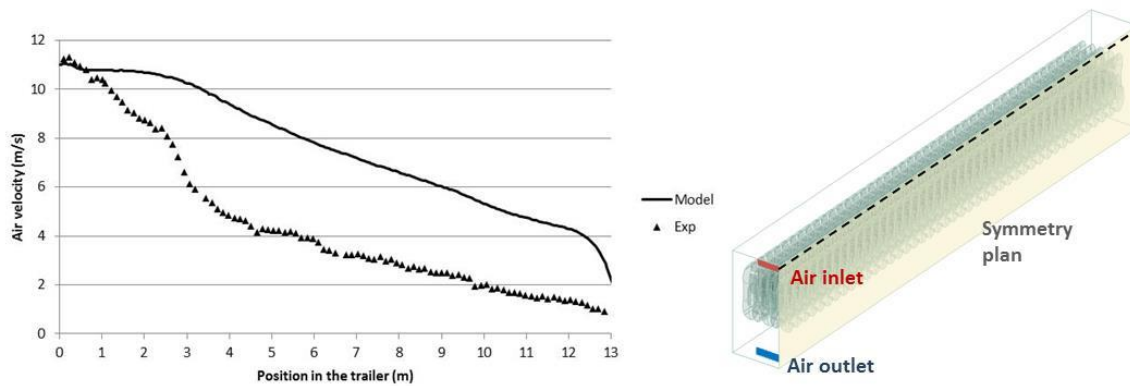


Figure 6 : Velocity along the jet axis

The main difference is that the predicted velocity decreases less rapidly along the jet axis than the measured one. This can be explained by several reasons. The simulated geometry does not take into account the presence of the hooks and the extremity of the feet. Also the heights at which the carcasses are hanged is not exactly the same in the experiment (and in real configuration) to the contrary of simulation. All these aspects could contribute to produce turbulence and increase the jet diffusion in the lateral and vertical directions. The $k-\epsilon$ model is also known to predict incorrectly flows with adverse pressure gradients. This explained that for of an empty trailer, the $k-\epsilon$ was unable to predict the experimentally observed separation of the jet from the wall (Moureh and Flick 2005) whereas the RSM model, which better takes into account of turbulence anisotropy, predicted it well. More realistic geometry and more advanced turbulence models will be tested in future work.

Nevertheless, even taking in mind the limitations of the present numerical results, the interest of the CFD approach is that, contrarily to the experimental approach, it is possible to estimate the air flow around the carcasses.

Figure 7 presents the velocity magnitude at different position between the half carcasses. Some zones of low velocity between half carcasses can be identified.

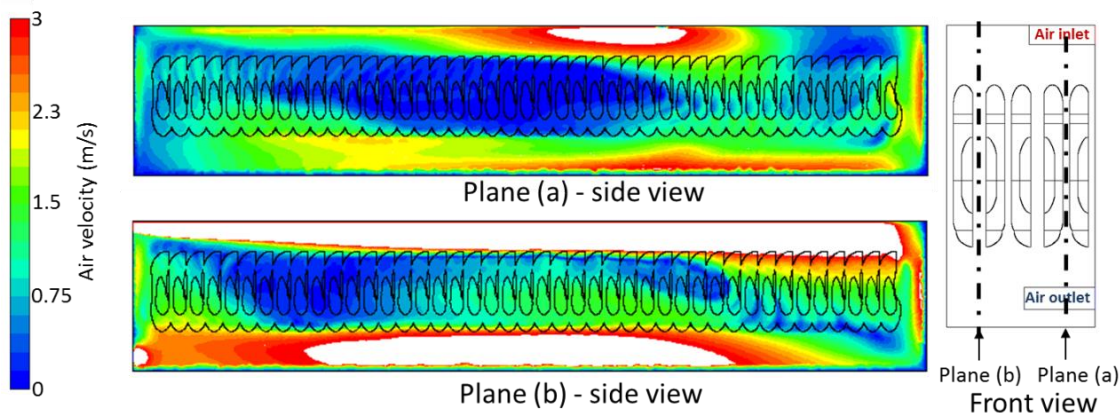


Figure 7 : Velocity magnitude between half carcasses

In plane (a) notably, a nearly stagnant zone at mid length of the trailer was predicted because the simulated jet wall continued flowing along the top wall until the rear of the trailer. In fact, according

to the experimental velocity evolution on the jet axis, it seems that less air reaches the trailer rear and more air flows downward through the carcasses.

One could imagine that the carcasses form a porous medium of relative high pressure drop and that since the air is blown on the top, a relative homogenous downward airflow would occur throughout the carcass zone. But in fact, near the trailer rear the flow is indeed downward but near the front, the entrainment effect of the wall jet induces a suction effect and air flows upward throughout the carcasses in the front zone (Figure 8). In the intermediate region, there is sometimes neither downward and neither upward flow leading to low velocity zones.

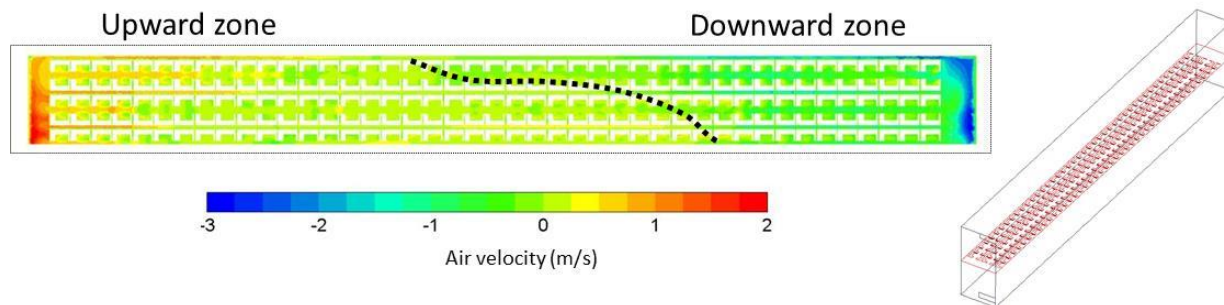


Figure 8: Vertical velocity (positive upward) at mid height of the trailer

In the zones of low velocity, the refrigeration will be of low intensity. Thus, if the carcasses are loaded while there are still warm at core (e.g. 15 °C at core and 7 °C at surface), they could take a long time to reach everywhere the recommended temperature (< 7 °C). Even the surface temperature could slightly increase. This can be problematic for sanitary risk (pathogenic microorganism growth). In fact, the smallest velocities are observed in the lean region of the carcasses (at mid height of the carcasses). Since the lean thickness is small (compared to the jam for example) the lean is generally rapidly cooled down in the cold room of the slaughterhouse. So, microbial risk should be limited for the lean part. In opposite, the jam core is often the warmest part at the exit of the slaughterhouse but the velocity is rather high all along the trailer at the top of the carcasses (jam part). The shoulder regions are also quite well ventilated.

5. Conclusion

Numerical simulations were performed to determine the air flow distribution in a refrigerated trailer loaded with pork half carcasses using the standard k- ϵ model. In the studied configuration, some low velocity zones were located in the lean region of the carcasses but this should not be problematic for sanitary risk.

These numerical results are specific of the trailer geometry (inlet and outlet section and location, number of rails) and of the load (here 215 pork carcasses about 75 kg each). The numerical approach could be used to see the influence of the trailer configuration, including the effect of air ducts, and of load (lower or higher number of carcasses) on the airflow distribution.

Nevertheless, the numerical model should be improved, because it overestimates the flow rate which reaches the rear of the trailer. In further work, a more realistic geometry and more

sophisticated turbulence model (e.g. RSM or k- ω SST) will be tested and the simulation will also integrate unsteady heat transfer.

References

Defraeye T., Verboven P., Nicolai B. (2013) *CFD Modeling of flow and scalar exchange of spherical food products; turbulence and boundary layer modelling*. Journal of food engineering 114, 495-504.

Kuffi K.D., Defraeye T., Nicolai B., De Smet S., Geeraerd A., Verboven P. (2016) *CFD modelling of industrial cooling of large beef carcasses*. International Journal of Refrigeration 69, 324-339.

Merai M., Flick D., Guiller L., Duret S., Laguerre O. (2018) *Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses*. International Journal of Refrigeration, 88, 334-346.

Moureh J., Flick D. (2005) *Airflow characteristics within slot ventilated enclosures*. International journal of heat and fluid flow, 26, 12-24.

Moureh J., Tapsoba M.S., Derens E., Flick D (2009). *Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts*. International Journal of Refrigeration 32, 220-234

Pham Q.T., Trujillo F.J., McPhail N. (2009) *Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients*. International Journal of Refrigeration 32, 102-113.

Tapsoba M.S., Moureh J., Flick D (2007). *Airflow patterns in a slot-ventilated enclosure partially loaded with empty slotted boxes*. International Journal of Heat and Fluid Flow 28, 963-977.

Annexe 5: Article pour la Revue Générale du Froid

Le transport frigorifique des carcasses de porc en France, enjeux liés aux changements de la réglementation européenne

Auteurs : Mouna Merai, Steven Duret, Onrawee Laguerre, Denis Flick, Nathalie Veauclin, Franck Bellaca, Brice Minvielle, Laurent Guillier

Résumé

La réglementation européenne s'est intéressée à l'application du froid en industries alimentaires depuis les années 70. Dans le cas des produits carnés, l'application du froid est nécessaire pour la maîtrise des risques sanitaires liés à la prolifération des microorganismes pathogènes et d'altération. L'évolution de la réglementation en 2017 ouvre la voie à une possible diminution de la chaîne logistique des produits carnés entre les abattoirs et les ateliers de découpe pour un approvisionnement plus rapide des consommateurs. Ce travail a pour objectif de présenter le contexte du changement de la réglementation, l'état des lieux des pratiques de transport frigorifique des grandes carcasses de viande ainsi que d'expliquer l'importance de l'utilisation d'une approche scientifique pluridisciplinaire dans l'évaluation des risques sanitaires liés au changement de la réglementation.

Mots clés : réglementation, carcasses de viande, transport frigorifique, risques sanitaires.

I. Introduction

L'utilisation du froid immédiatement après l'abattage est essentielle au maintien des qualités sanitaires et organoleptiques des carcasses. La descente en température doit être maîtrisée afin de ralentir la croissance des bactéries et de limiter les pertes en eau [1]. Depuis fin 2017, suite aux évaluations des risques par les agences sanitaires française et européenne, la réglementation européenne offre une nouvelle possibilité aux professionnels, les carcasses pouvant être transportées avant d'être complètement refroidies. Cette dérogation au refroidissement complet avant transport offre des perspectives pour les professionnels, mais les conditions techniques de son application posent de nombreuses questions. Le nombre de carcasses transportées, la typologie du chargement, l'écoulement des flux d'air, la durée du chargement sont autant de paramètres qui peuvent influencer sur le refroidissement. L'objectif de ce travail est de présenter le contexte de ce changement réglementaire, un état des lieux des pratiques de transport des carcasses de porc et la démarche de modélisation permettant d'évaluer plus finement les conditions techniques/opératoires de transport garantissant un haut niveau de sécurité des produits transportés.

II. La sécuritaire sanitaire de la filière viande

1. Contexte réglementaire

La mise en application de la réglementation européenne de la Food Law et du Paquet hygiène en 2006 a modifié la philosophie générale de la réglementation. Les systèmes de gestion de la sécurité des aliments historiquement basés sur les dangers (réglementation prescriptive, obligation de moyens, contrôles des produits finis, ...) ont évolué vers des systèmes basés sur le risque (responsabilité des professionnels, obligation de résultats, démarche préventive basée sur les bonnes pratiques d'hygiène, sur le système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques (HACCP pour « Hazard Analysis and Critical Control Point » en anglais) et, en France, sur le plan de maîtrise sanitaire.

Cette évolution donne une place importante à l'analyse des risques dans la sécurité sanitaire des produits alimentaires [1]. Le principe de l'analyse des risques est présenté sur la Figure 1.

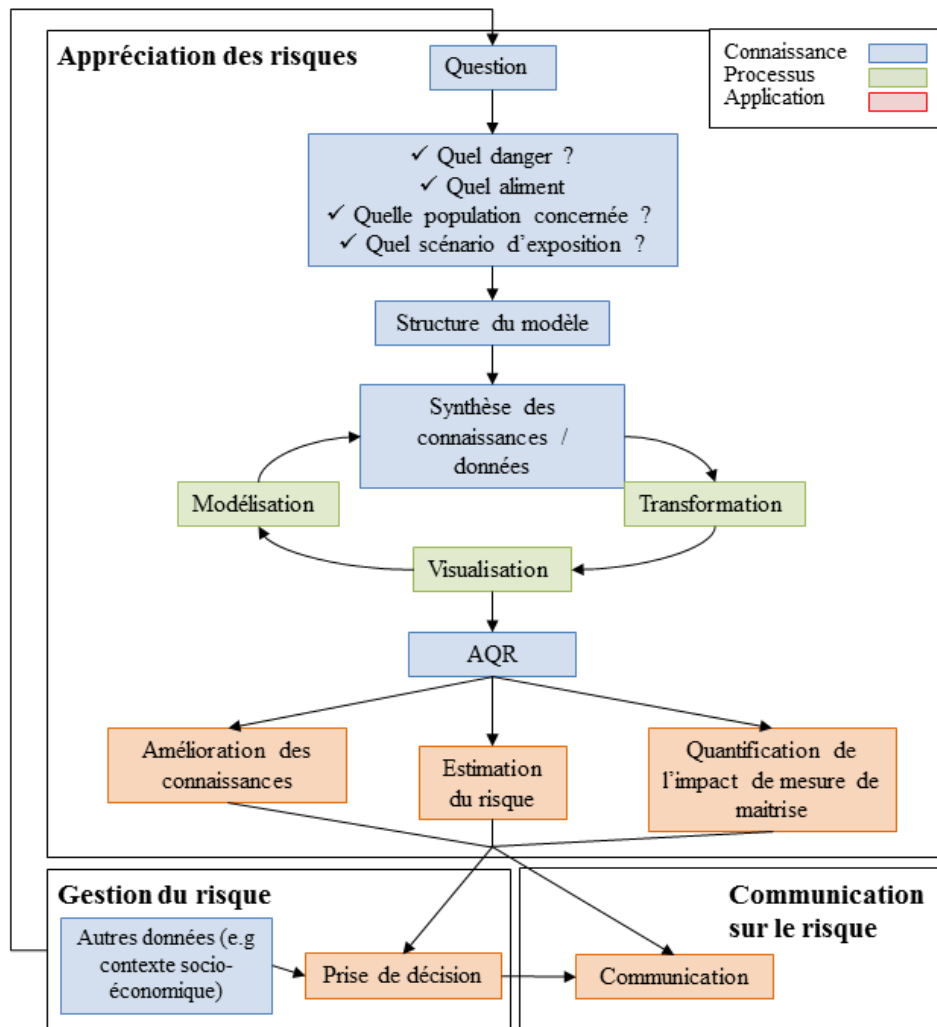


Figure 1. Principe de l'analyse de risques.

Une analyse du risque est généralement conduite pour répondre à une question sanitaire identifiée par le gestionnaire du risque. L'objectif principal du gestionnaire du risque est de protéger la santé publique par la sélection et la mise en œuvre de mesures appropriées [2]. Le fait que la gestion du risque repose sur la prise en compte de l'ensemble de la chaîne de production alimentaire est un concept important (« de la fourche à la fourchette ») de l'approche réglementaire européenne. L'importance de l'évaluation des risques est primordiale dans l'analyse du risque. Elle fournit une description objective et scientifique des risques d'origine alimentaire. Elle représente ainsi la composante scientifique de l'analyse des risques. Les estimations du risque qu'elle produit sont utilisées par le gestionnaire du risque.

2. La réglementation spécifique aux viandes fraîches

La réglementation relative à la sécurité des viandes et des produits carnés tient une place importante dans le dispositif de sécurité sanitaire des aliments. La réglementation s'applique tout au long de

la chaîne de production des aliments. Elle s'intéresse notamment à l'hygiène lors de l'abattage des animaux, à l'inspection des carcasses, au refroidissement et à l'entreposage de ces dernières ainsi qu'aux conditions relatives au transport des carcasses. Cette réglementation relative aux aspects sanitaires des viandes est historiquement l'une des premières règles d'hygiène alimentaire appliquée au niveau européen [3]. Aujourd'hui, les obligations des professionnels et des services de contrôle denrées alimentaires d'origine animale sont spécifiées dans deux règlements du « Paquet hygiène » entrés en vigueur en 2006 [4, 5].

3. Les évolutions relatives aux conditions de transports des carcasses

Depuis 1964, la réglementation européenne exige que les viandes fraîches destinées aux échanges intracommunautaires soient immédiatement refroidies après l'inspection post mortem et maintenues en permanence à une température interne inférieure ou égale à + 7 ° C [3]. Ces exigences sur la réfrigération et le maintien de la température problèmes ont pour objectif la sécurité sanitaire, et la température de 7 ° C a été proposée pour limiter la croissance de *Salmonella* [6]. En France, cette réglementation a été complétée en 1967 par une exigence d'équipement frigorifique devant permettre d'atteindre cette température en moins de 24h [7]

Le refroidissement influe également sur les réactions biochimiques (glycolyse, chute de pH, activité enzymatique...) et physiques (perte en eau) qui ont lieu après l'abattage des porcs. Ces réactions peuvent avoir un impact sur la qualité organoleptique et technologique des viandes [8].

En fin de ligne d'abattage, la température des carcasses de porc est encore d'environ 30 ° C en surface et de 38-40 ° C en profondeur [9]. Ces températures sont très favorables à la croissance de la plupart des bactéries contaminant les carcasses. Le refroidissement a pour objectif de réduire le plus rapidement possible la température des carcasses dans le but de préserver la qualité microbiologique des viandes [10-12]. Cette étape de l'abattage est à ce titre considérée comme une étape importante pour la maîtrise des dangers microbiologiques dans le cadre de l'approche HACCP. Ainsi en France, depuis le début des années 90 les recommandations professionnelles précisent, en plus de l'exigence d'atteindre 7 ° C en tout point en moins de 24 h, que la température optimale à cœur après 6 heures de réfrigération soit de 20 ° C, afin de limiter le développement des bactéries anaérobies et la production éventuelle de toxines [13].

Depuis le début des années 80, la question de l'impact d'un transport à plus de 7 ° C sur l'hygiène de la viande est régulièrement posée et évaluée [6, 14].

En 2006, la filière porcine française a initié des travaux afin d'évaluer la conséquence d'une sortie des carcasses des salles de refroidissement avant l'atteinte de températures à cœur de 7 ° C, qui ont conduit au soutien de la DGAL en 2008 pour engager une réflexion au niveau communautaire sur

la modification de la réglementation européenne. Les études conduites par l'IFIP-Institut du porc, et financées par l'Interprofessions porcine Inaporc, ont notamment permis d'obtenir dans plusieurs entreprises des données permettant de caractériser la température en surface et à cœur des carcasses de porcs. Ces données ont été essentielles à l'évaluation des risques par les agences sanitaires [15-18]. Ces différentes évaluations ont permis de conclure qu'il était possible de déroger à la réglementation existante sans augmenter le niveau de risque des carcasses ainsi transportées.

Le règlement 853/2004 a été modifié en conséquence, afin d'introduire une dérogation à la réfrigération complète, i.e. 7 °C maximum en tout point de la carcasse, avant transport. Cette modification réglementaire (règlement (UE) 2017/1981, [19]) indique des températures en surface et à cœur à respecter en fonction du temps de descente en température de surface des carcasses en chambre froide, la durée maximale et la température maximale du camion au transport et des résultats microbiologiques sur carcasses (nombre de colonies aérobies dénombrées moyen journalier maximum (Tableau 1). Et surtout, ce règlement introduit pour la première fois la notion de température maximale à la surface des carcasses (lors de la réfrigération et pendant le transport). Le règlement met en avant les performances en termes de maîtrise de l'hygiène ; seuls les abattoirs respectant un certain niveau de critère microbiologique d'hygiène des procédés peuvent prétendre à ces conditions de transport des carcasses (Tableau 1).

Toutefois, les conditions opérationnelles garantissant le respect de ces températures dans les différentes configurations de transports (nombre de carcasses, position dans le camion, typologie et durée de transport...) n'ont pas été prises en compte dans les études conduisant à l'apparition de ce nouveau règlement.

Tableau 1. Les paramètres proposés par le règlement UE 2017/1981 pour le transport frigorifique des carcasses de porc.

Durée de transport maximale	Température de surface	Durée maximale de réfrigération pour atteindre la température de surface	Température à cœur	Température de l'air maximale durant le transport	Nombre de colonies aérobies moyen journalier maximal
6 h	7 °C	16 heures	-	6 °C	$\log_{10} 4$ ufc/cm ²
30 h	7 °C	16 heures	15 °C	6 °C	$\log_{10} 4$ ufc/cm ²

III. Pratiques actuelles du transport des carcasses

Sur la base d'une étude conduite en 2013 dans le cadre d'une demande de dérogation de sortie à 15 °C à cœur par la filière professionnelle, un état de lieux du transport frigorifique des carcasses de porc a pu être dressé. L'étude a été réalisée par Culture Viande (SNIV-SNCP) sur plus de 800 camions provenant de 24 abattoirs et sur 400 camions au déchargement. Il a permis de caractériser les aspects logistiques (géographiques et durée de transport) entre les abattoirs et les ateliers de découpe, et de montrer la diminution des températures pendant le transport. Une autre enquête réalisée à Rungis en 2016 a permis de caractériser les typologies de chargement des carcasses dans les camions.

1. Répartition géographique

Les abattoirs de porc en France métropolitaine sont principalement localisés dans le nord-ouest (Figure 2). D'après l'étude réalisée en 2013 sur un ensemble de 188 transports différents, 79 % des abattoirs de porc recensés sont situés en Bretagne, contre 10,1% dans les Pays de la Loire, 7,5 % l'Occitanie et 3,2 % en Normandie. L'étude a également montré que des carcasses étaient transportées de Bretagne vers des ateliers de découpe dans les Pays de la Loire, pour être ensuite distribuées dans les autres régions.

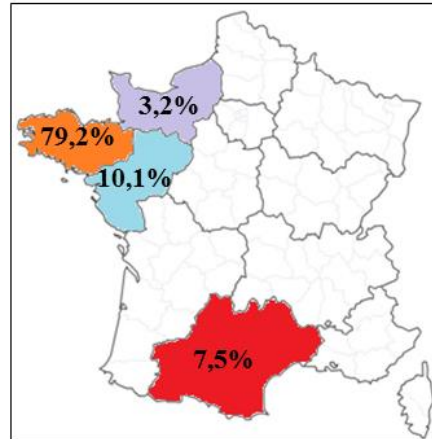


Figure 2. Répartition géographique des abattoirs de porc en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports).

La Normandie et l'Occitanie fournissent principalement les régions à proximité. Les données montrent que la Normandie fournit des demi-carcasses de porc uniquement à l'île de France. Quant à l'Occitanie, elle fournit un mélange de demi-carcasses et des pièces de découpe à la Nouvelle Aquitaine.

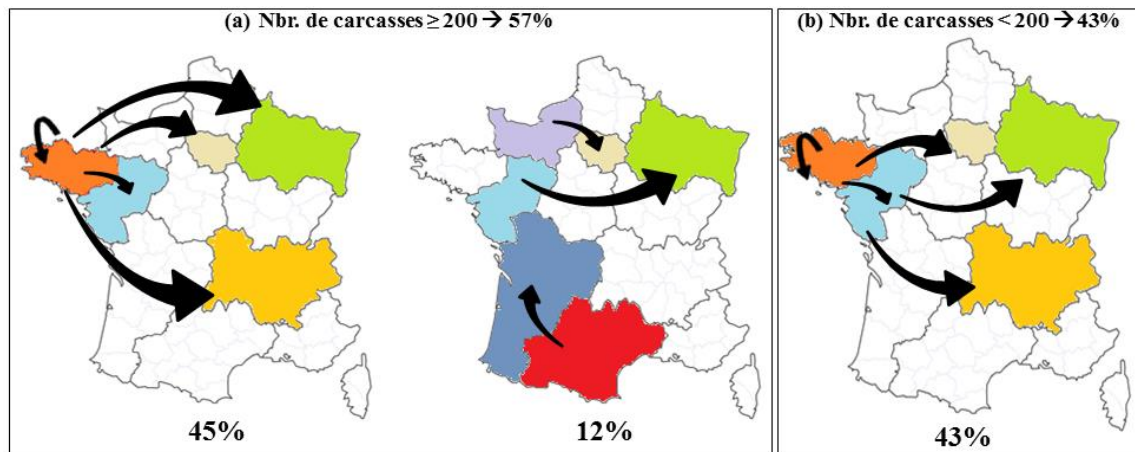


Figure 3. Répartition géographique des transports de carcasses de porc en France. (a) transports de plus de 200 carcasses et (b) transports de moins de 200 carcasses (données du SNIV 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).

La majorité des transports contiennent plus de 200 carcasses de porc (57 %). Parmi ces transports 45% partent de la région de Bretagne à destination des régions Ile-de-France, Pays de la Loire, Grand Est et Auvergne-Rhône-Alpes, et 12 % partent des régions Normandie, Pays de la Loire et Occitanie (Figure 3a). Les transports avec un chargement inférieur à 200 carcasses de porc présentent 43 % des transports totaux. Ils peuvent correspondre à des transports mixtes où des demi-carcasses de porc sont transportées avec des pièces de découpe ou à des transports dans des petits camions frigorifiques. L'ensemble des transports avec un chargement inférieur à 200 carcasses partent des régions Bretagne et Pays de la Loire (Figure 3b).

2. Durée de transports

Avec des abattoirs localisés majoritairement dans le nord-ouest du territoire, la durée de transport varie en fonction de la destination de la viande transportée. Dans 27 % des cas les ateliers de découpe sont localisés dans la région Pays de la Loire, ce qui correspond à une durée de transport de 6 heures en moyenne. Toutefois, en pratique, la durée de transport est beaucoup plus longue et peut atteindre 16 heures ou plus. Ceci est principalement lié à l'attente des camions frigorifiques en quai de réception. A cette attente s'ajoute les weekends et les jours fériés qui peuvent prolongés la durée du transport jusqu'à 60 heures.

La proportion des durées de transport est présentée dans la Figure 4.

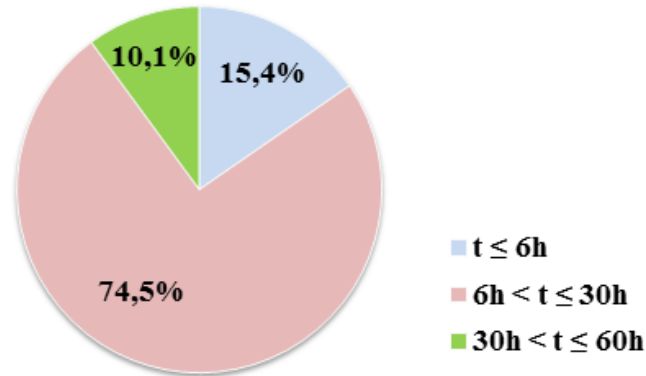


Figure 4. Répartition de la durée de transport des carcasses en France (données du SNIV 2013 pour 188 transports entre les abattoirs et les ateliers de découpe).

Dans la majorité des cas, 74,5 % la durée des transports est comprise entre 6 et 30 heures. Ceci prend en compte les transports de courte durée (~6 heures) comme entre la Bretagne et le Pays de la Loire, ceux de durée moyenne (~9 heures) entre la Bretagne et l'île de France et les imprévus liées aux weekends et jours fériés. Les transports de très courte durée (< 6 heures), principalement des transports vers des abattoirs de la même région sont assez fréquents et représentent 15,4 % des transports.

Les transports de très longue durée existent aussi, ils représentent 10,1 % des transports et concernent généralement des transports entre les régions de l'ouest et de l'est.

3. Caractérisation des températures pendant le transport des abattoirs vers les ateliers de découpe

En ce qui concerne le suivi de l'évolution de la température des carcasses au cours du transport frigorifique, les carcasses ont été chargées avec des températures à cœur supérieures à 7 °C (< 15 °C) mais qui correspondent aux pratiques autorisées par la DGAL. L'enquête réalisée sur un nombre total de 6352 carcasses réparties dans 881 camions et placées par des lots de 3 demi-carcasses placées dans le premier 1/3, au milieu et à l'arrière du chargement. Les moyennes globales des températures à cœur du jambon et des températures à la surface de l'épaule sont montrées dans le tableau 2. Il est important de noter que les valeurs moyennes globales des températures ne tiennent pas compte de la durée des transports, du nombre total de carcasses et de la typologie de chargement.

Pour des températures à cœur du jambon de $11,3 \pm 2,9$ °C au moment du chargement des carcasses, un abaissement de 5,8°C a pu être observé à la fin du transport avec une température moyenne de $5,7 \pm 2,5$ °C.

Tableau 2. Récapitulatif des valeurs moyennes des températures au moment du chargement et déchargement des carcasses de porc (SNIV-SNCP 2013).

	Cœur jambon		Surface poitrine	
	Chargement	Déchargement	Chargement	Déchargement
Nombre de camions	881	407	881	407
Température moyenne (°C)	11,3	5,7	4,4	3,9
Ecart-moyen	2,9	1,8	2,3	1,4

La même tendance a été observée au niveau de la température de surface mesurée au niveau de la poitrine (Tableau 2). Toutefois, cette diminution de température reste difficile à interpréter vu le manque d'informations relatives à la durée de transport, la typologie de chargement, le nombre total de carcasses par camion ainsi que le type de camion (capacité frigorifique du camion et type de soufflage d'air).

4. Chargement et typologie de transport

Pour garantir la qualité sanitaire des carcasses, les camions frigorifiques doivent respecter une température d'air de 6 °C au maximum pour maintenir les produits transportés à une température constante. Dans le cas des transports de plus de 200 carcasses de porc, les industriels font appel à des camions frigorifiques de type semi-remorque. Avec une longueur de 13,3 m ils peuvent contenir jusqu'à 250 carcasses. Toutefois, l'inconvénient majeur de ce type de camion est l'hétérogénéité des écoulements d'air et donc de la température. En effet, des études ont montré que la deuxième moitié d'une semi-remorque (près des portes) est parfois mal ventilée et que des zones d'air stagnant peuvent y exister [20-22]. Ceci peut induire un réchauffement des carcasses au cours du transport et avoir des conséquences sur leur qualité sanitaire. Afin de remédier à cette problématique, différents dispositifs de soufflage d'air ont été proposés (Figure 5).

Aujourd'hui on peut trouver des semi-remorques frigorifiques équipées de conduites de distribution d'air. Les conduites de distribution d'air sont des gaines qui ont pour objectif d'amener l'air soufflé à l'avant du camion (côté chauffeur) jusqu'à la fin du camion (côté portes). On peut avoir une, deux ou trois gaines par camion. Elles peuvent avoir différentes longueurs (3, 6, 9 et 11 m), peuvent être symétriques ou dissymétriques, perforées ou non. Des études réalisées par l'unité de recherche Génie des Procédés Frigorifiques d'IRSTEA (ex-CEMAGREF), ont montré l'efficacité de ces gaines de distribution dans l'amélioration de la circulation d'air au fond du camion pour des études sur des chargements de palettes [23]. Toutefois, dans le cas de transport de viande, des travaux récents sur une semi-remorque chargée de carcasses de porc et équipée ou non

de deux gaines symétriques de 6m de long chacune ont pu démontrer que même en l'absence de gaines la partie arrière de la semi-remorque était assez bien ventilée. Néanmoins, dans les deux configurations, avec ou sans gaines, des zones limitées d'air quasiment stagnant ont pu être indirectement identifiées au milieu du chargement des carcasses de porc [20].

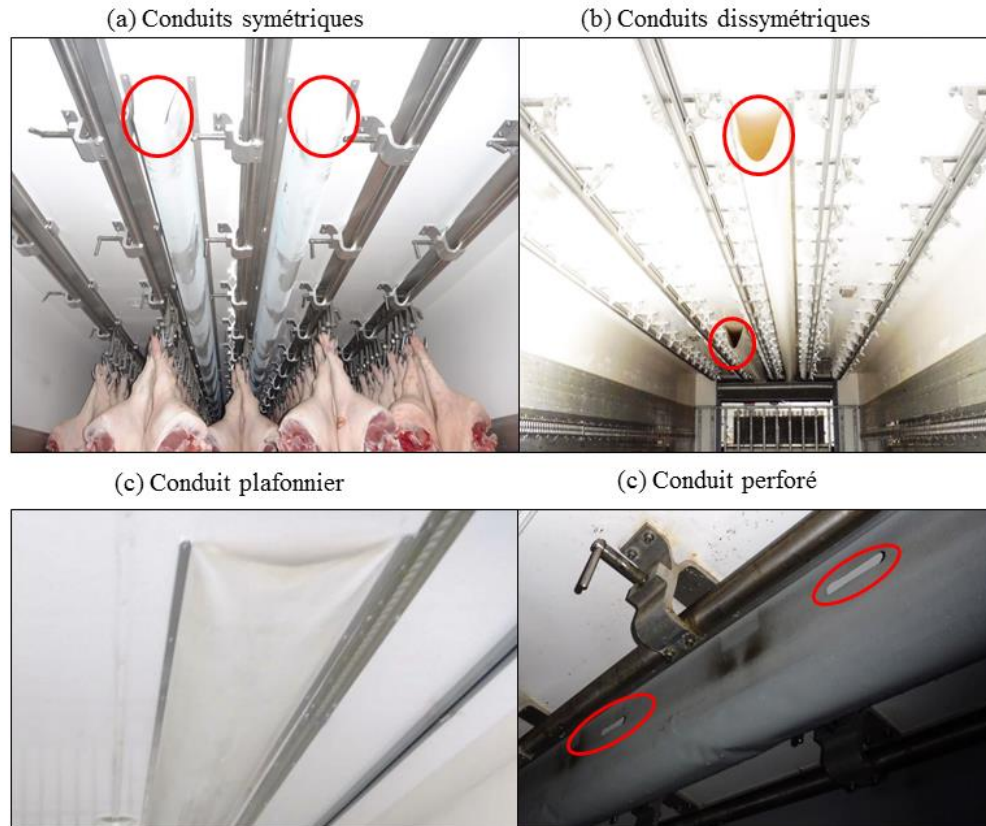


Figure 5. Exemples de conduits d'air dans les semi-remorques frigorifiques destinés au transport des carcasses de viande.

Les transports sont généralement réalisés dans des camions frigorifiques spécialement conçus pour le transport des carcasses de viande. Ils disposent de rails (5 rails en général) et de dispositifs d'accrochage des carcasses afin de suspendre les carcasses et de faciliter la manutention lors de leur chargement dans le camion avant le transport et de leur déchargement sur le quai après le transport. L'accrochage des carcasses se fait de deux manières différentes : en crochet ou en tinet (Figure 6). Le type du système d'accrochage dépend de celui de l'abattoir et/ou d'exigences clients.

(a) Système de suspension par des crochets



(b) Système de suspension par des tinets



Figure 6. Exemples de chargements des demi-carcasses de porc dans les semi-remorques frigorifiques.

Pour le système de suspension avec des crochets, chaque demi-carcasse est accrochée sur un crochet, le côté couenne étant placé contre les côtés muscle de la demi carcasse suivante (Figure 6). Ceci est fait dans le but d'éviter le contact entre les muscles de deux demi-carcasses et le risque de potentielles contaminations. Dans cette configuration les carcasses sont placées presque en quinconce ce qui permet de créer un espace qui permettra le passage d'air et le potentiel refroidissement des carcasses.

Sur les tinets, les deux demi-carcasses provenant d'une même carcasse sont accrochées muscle contre muscle ou couenne contre couenne. Dans cette configuration, un espace vide est créé soit entre les deux demi-carcasses sur le même crochet soit entre les deux carcasses placées sur deux

crochets côtes à côtes. Cet espace, bien que très petit, permettra la circulation de l'air et empêchera le réchauffement des carcasses au cours du transport. Dans ce type de chargement, le rail au milieu du camion peut rester vide et permet ainsi d'améliorer la circulation de l'air entre les carcasses. Mais il réduit de 20% la capacité de chargement.

IV. L'évaluation du risque sanitaire, une approche pluridisciplinaire

En se basant sur ces données récoltées sur le terrain concernant les pratiques du transport frigorifique des carcasses de porc, une étude scientifique portant sur la caractérisation de l'écoulement d'air et la détermination des coefficients de transfert thermiques par convection a pu être menée dans le cadre d'une thèse de doctorat financée par la région Ile-de-France (financement DIM ASTREA de la thèse de Mouna Merai, dirigée par Onrawee Laguerre et Denis Flick et encadrée par Laurent Guillier et Steven Duret). La configuration étudiée portait sur un cas extrême : chargement de 215 carcasses de porc.

Cette étude a permis de prendre en compte les variabilités du système de distribution d'air (présence ou pas de gaines de distribution d'air) dans le camion frigorifique et d'en déduire les conséquences sur le refroidissement des carcasses transportées [20]. En effet, ce travail a permis d'identifier les zones à faible circulation d'air (faibles vitesses d'écoulement d'air) qui peuvent entraîner un ralentissement du refroidissement des carcasses (faible coefficient de transfert thermique par convection) d'où un risque potentiel de croissance microbienne.

A l'aide de la modélisation 3D d'un jambon de porc et de la simulation numérique des transferts thermiques et hydriques, en prenant en compte les variabilités des coefficients de transfert thermique par convection à la surface des carcasses en fonction de leur emplacement dans le camion, l'évaluation de l'efficacité du refroidissement des carcasses en fonction de la durée de transport a pu être déterminée.

Enfin, la modélisation de la croissance microbienne a pu être réalisée en se basant sur les résultats de l'évolution de la température et l'activité de l'eau des jambons dans différents scénarios de transport évaluant ainsi le risque sanitaire.

Ainsi, le travail scientifique en cours pourrait apporter certaines appréciations sur les conditions opératoires de transport proposées par le nouveau règlement [19]. Au-delà, il contribue à l'amélioration des connaissances et à la maîtrise des paramètres influant sur la température des carcasses avec l'intégration de la notion de variabilité de différents paramètres intervenant dans le transport frigorifique des carcasses de porc. Ces constats sont susceptibles d'apporter des pistes pour améliorer la maîtrise du froid lors du transport frigorifique des porcs.

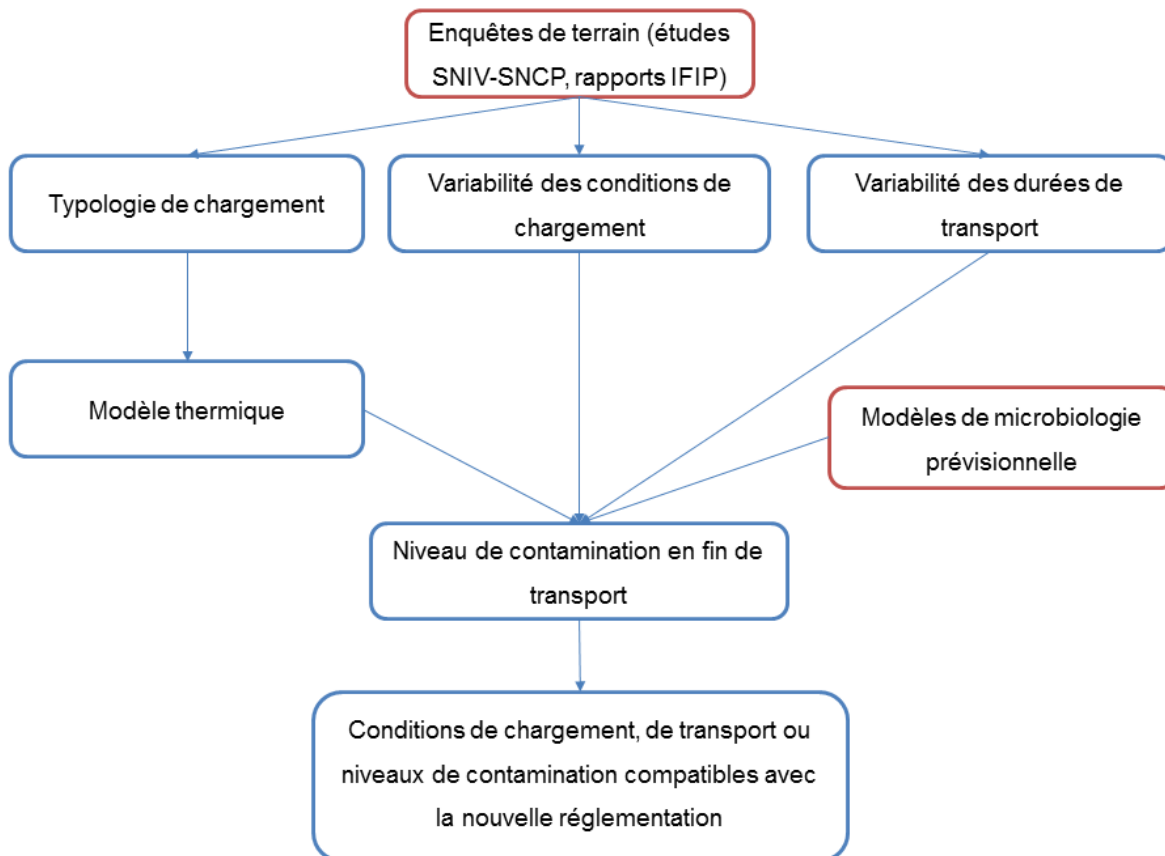


Figure 7. Démarche scientifique de l'évaluation du risque sanitaire au cours du transport frigorifique des carcasses de porc.

V. Conclusion et perspectives

Le changement de la réglementation européenne relative aux températures de chargement des carcasses de viande dans les camions frigorifiques a été réalisé dans l'objectif de faciliter le transport des carcasses de viande des abattoirs vers les ateliers de découpe. En France, vu la durée importante des transports entre les abattoirs (79 % des abattoirs sont localisés en Bretagne) et les ateliers de découpe, qui est pour 74,5 % des cas entre 6 et 30 heures, le chargement des carcasses de viandes dans les camions à des températures supérieures à 7°C à cœur permettrait de raccourcir la chaîne logistique et d'augmenter les cadences d'abattage chez les abattoirs ainsi qu'un rapide approvisionnement des consommateurs en viande fraîche. Toutefois, lors de l'établissement de la nouvelle réglementation en 2017, l'évaluation des risques sanitaires liés à la diminution du temps de séjours des carcasses dans les chambres froides des abattoirs a été réalisée sur la base d'une étude empirique de l'évolution de la température ne tenant pas compte des conditions opératoires liées aux hétérogénéités des transports frigorifiques. L'étude menée par la SNIV-SNCP en 2013 a certes permis de constater qu'en moyenne une diminution de la température à cœur et en surface des carcasse de porc a été obtenue à la fin du transport. Toutefois, elle a permis de constater aussi

que plus de la moitié des transports correspondent à des chargements de plus de 200 carcasses par semi-remorque. De plus, l'hétérogénéité des systèmes de distribution d'air dans les camions frigorifiques entraîne des hétérogénéités dans la circulation de l'air autour des carcasses qui sont jusqu'à nos jours peu connus. Tous ces paramètres, non pris en compte par la réglementation, sont des paramètres clés dans la prédiction de la qualité sanitaire des carcasses de viande. Pour cela, il est important de faire appel à une étude scientifique permettant d'évaluer le risque sanitaire lié au changement de la réglementation moyennant une approche pluridisciplinaire. Cette approche fait appel à des compétences en mécanique des fluides, en transferts thermiques et de matière ainsi qu'à la microbiologie prévisionnelle. De point de vue pratique, ce type d'approche scientifique apportera une aide aux professionnels de la viande pour la mise en place de la nouvelle réglementation. Par exemple, il est important de se poser des questions quant à la faisabilité technique des mesures de la température de surface des carcasses et la fiabilité des méthodes utilisées par les professionnels ou encore sur l'influence des ouvertures de porte sur le refroidissement des carcasses dans les camions.

Références

1. Zwietering, M.H., *Risk assessment and risk management for safe foods: Assessment needs inclusion of variability and uncertainty, management needs discrete decisions*. International Journal of Food Microbiology, 2015. **213**: p. 118-123.
2. FAO/OMS, *Risk management and food safety. Report of the Joint FAO/WHO Expert Consultation in Rome, Italy. January 27-31, 1997*. . 1997.
3. CEE, *Directive 64/433/CEE du Conseil, du 26 juin 1964, relative à des problèmes sanitaires en matière d'échanges intracommunautaires de viandes fraîches*. 1964.
4. Commission Européenne, *Règlement (CE) n° 853/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale*. Journal officiel de l'Union européenne, 2004. **30**(151).
5. Commission Européenne, *Règlement (CE) n° 854/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant les règles spécifiques d'organisation des contrôles officiels concernant les produits d'origine animale destinés à la consommation humaine*. Journal officiel de l'Union européenne, 2004. **30**(155).
6. SCVPH, *Opinion of the SCVPH on cooling of carcasses during transport, 15 – 16 March 1999*. 16p. https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/sci-com_scv_out20_en.pdf. 1999.
7. Anonyme, *Arrêté du 28 mars 1967 fixant les prescriptions techniques pour la construction des abattoirs publics*, Journal Officiel du 11 avril 1967. 1967.
8. Springer, M.P., et al., *Accelerated chilling of carcasses to improve pork quality*. Journal of Animal Science, 2003. **81**(6): p. 1464-1472.
9. Rossel, R., *Listeria monocytogenes en abattage et découpe de porc: contrôle de la contamination environnementale des frigos de ressuage et salles de découpe*. 2003, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.

10. Kinsella, K.J., et al., *Impact of a novel spray-chilling system on surface microflora, water activity and weight loss during beef carcass chilling*. Food Microbiology, 2006. **23**(5): p. 483-490.
11. Monin, G., *Abattage des porcs et qualités des carcasses et des viandes*. Inra Productions Animales, 2003. **16**(4): p. 251-262.
12. Savell, J.W., S.L. Mueller, and B.E. Baird, *The chilling of carcasses*. Meat Science 50th International Congress of Meat Science and Technology,(ICoMST), 8-13 August 2004, Helsinki, Finland, 2005. **70**(3): p. 449-459.
13. Certiviande, *Guide de bonnes pratiques hygiéniques en abattage et découpe de porcs*, 49p. 1995.
14. Moerman, P., *The chilling of pig carcasses during transport*. 29th Eur. Congr. Meat Res. Workers, Salsomaggiore, Italy, 14p. . 1983.
15. Afssa, *Avis relatif au transport des carcasses de porc n'ayant pas atteint la température réglementaire à la sortie de l'abattoir*. Saisine 2008-SA-0283. 2010.
16. ANSES, *Avis relatif à « la sécurité et la salubrité microbiologique des carcasses de porcs réfrigérées en chambre froide puis transportées en camion frigorifique »*. Saisine 2013-SA-0003. 2014.
17. EFSA Panel on Biological Hazards, *Growth of spoilage bacteria during storage and transport of meat*. Efsa Journal, 2016. **14**(6).
18. EFSA Panel on Biological Hazards, *Scientific Opinion on the public health risks related to the maintenance of the cold chain during storage and transport of meat. Part 1 (meat of domestic ungulates)*. Efsa Journal, 2014. **12**(3): p. 3601.
19. Commission Européenne, *Règlement (UE) 2017/1981 de la Commission du 31 octobre 2017 modifiant l'annexe III du règlement (CE) n° 853/2004 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les conditions de température pendant le transport de viande*. Journal officiel de l'Union européenne, 2017. **285**: p. 10-13.
20. Merai, M., et al., *Experimental characterization of airflow inside a refrigerated trailer loaded with carcasses*. International Journal of Refrigeration, 2018. **88**: p. 337-346.
21. Tapsoba, M., *Etude expérimentale et numérique de l'aéroulque dans un véhicule frigorifique*. 2006, Ph. D., INA-PG, Paris.
22. Zertal-Ménia, N., *Etude numérique et expérimentale de l'aéroulque dans un véhicule frigorifique*. These INA-PG, 2001.
23. Moureh, J. and D. Flick, *Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets*. International Journal of Refrigeration, 2004. **27**(5): p. 464-474.

Title: Experimental characterization and modelling of heat/mass transfer and microbial growth during pork carcasses cold transportation

Keywords : *refrigerated transport, pork carcasses, air flow, heat transfer, predictive microbiology*

Abstract :

The objective of this work is to develop an approach allowing to predict the evolution of microbial load on the surface of pork carcasses during a refrigerated transport according to the operating conditions (temperature and humidity of the blowing air) and initial conditions of product (temperature profile at the outlet of the slaughterhouse cold room). Since microbial growth depends mainly on temperature and water activity, it is necessary to study heat and mass transfer within and around the carcasses. These phenomena depend on the airflow pattern in the refrigerated vehicle loaded with hundreds of half-carcasses which makes the geometry particularly complex.

Thus, this work involves various disciplines: fluid mechanics, heat/mass transfer and predictive microbiology. The coupling of these three disciplines makes it possible to provide scientific answers as to the sanitary quality of the pork carcasses.

Experiments at the laboratory scale were built by reproducing the real conditions as closely as possible thanks to the support of specialists in the meat sector. Thus the pork carcass models were made in molds obtained by 3D printing from X-Ray scanners of real carcasses. By conducting experiments on a reduced scale semitrailer loaded with these carcasses, the airflow could be characterized using 2D Doppler Laser Velocimetry in two air distribution configurations (with and without air ducts). In addition, local convective heat transfer coefficients could be estimated at the surface of different parts of pork carcasses and at different positions in the reduced-scale trailer using fluxmeters. A simplified airflow diagram and the ratio of air distribution in the loaded vehicle have been established, helping in the identification of the "risk zones" in the loaded semi-trailer (low air circulation and low convective transfer coefficients).

*Based on the experimental results in laboratory scale and those measured during real refrigerated transport, the variability of the parameters characterizing the air circulating around the carcasses could be estimated. This information served as boundary conditions for heat and mass (water) transfer modelling within the most microbial sensitive part of carcass: the ham. This 3D model, solved by the finite element method, allows the prediction of the evolution of the temperature, the water content and the microbial load (*Pseudomonas*) on the surface of the lean part of the ham for different transport scenarios. The results showed that if the transport begins while the carcasses center is still warm (15°C instead of 7°C according to current regulation) the microbial growth on the surface of pork carcasses is generally not more between slaughter and arrival at the cutting site.*

Finally, a field study was conducted to monitor the temperature evolution of the pork carcass located at different positions in semitrailer. The cooling capacity of semitrailer required for the transport of different ratio of warm carcasses was estimated. Finally, the developed experimental and numerical methodologies for airflow and heat transfer characterization in a particularly complex geometry showed the interest of coupling transfer models and predictive microbiology models. The results of this study are usable by the profession and the public authorities for the adaptation of the refrigerated transport regulations. The approach developed may be adapted for similar problems in ventilated enclosures.

Titre: Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermique/hydrique et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc

Mots-clés : *transport frigorifique, carcasses de porc, écoulement d'air, transferts thermiques, microbiologie prévisionnelle*

Résumé :

L'objectif de ce travail est de développer une démarche permettant de prédire l'évolution de la charge microbienne à la surface de carcasses de porc lors d'un transport frigorifique selon les conditions opératoires (température et humidité de l'air de soufflage) et les conditions initiales (profil de température en sortie de chambre froide d'abattoir). La croissance microbienne dépendant notamment de la température et de l'activité de l'eau, il est nécessaire d'étudier les transferts de chaleur et de matière de type diffusif au sein des carcasses et de type convectif autour des carcasses. Ces derniers dépendent de la circulation d'air dans le véhicule frigorifique lorsqu'il est chargé de centaines de demi-carcasses ce qui rend la géométrie particulièrement complexe.

De ce fait, ce travail fait appel à diverses disciplines : mécanique des fluides, transferts thermiques et microbiologie prévisionnelle. Le couplage de ces trois disciplines permet d'apporter des réponses scientifiques quant à la qualité sanitaire des carcasses de porc.

En travaillant sur un dispositif expérimental reproduisant une semi-remorque chargée de carcasses de porc à l'échelle réduite, les écoulements d'air ont pu être caractérisés par vélocimétrie laser Doppler 2D dans deux configurations de distribution d'air (avec et sans conduits). De plus, les coefficients de transfert convectifs locaux ont pu être estimés à la surface de différentes parties des carcasses de porc et à différentes positions dans la semi-remorque à l'échelle réduite. Un schéma simplifié des écoulements d'air a été établi, il permet de localiser les « zones à risque » dans la semi-remorque chargée (faible circulation d'air et faible coefficients de transfert convectif).

*En se basant sur les résultats de l'étude expérimentale à l'échelle laboratoire et sur ceux récoltés au cours de vrais transports frigorifiques, la variabilité des paramètres caractérisant l'air circulant autour des carcasses a pu être estimée. Ces informations ont servi de conditions aux limites d'un modèle de transfert de chaleur et de matière (eau) au sein de la partie la plus sensible au niveau microbiologique: le jambon. Ce modèle 3D, résolu par la méthode des éléments finis, permet de prédire l'évolution de la température, de la teneur en eau et de la charge microbienne (*Pseudomonas*) à la surface de la partie maigre du jambon pour différents scénarios de transport frigorifique. Les résultats ont montré que si le transport commence alors que le cœur des carcasses est encore tiède (15°C au lieu de 7°C selon la réglementation actuelle) la croissance des microorganismes à la surface des carcasses de porc n'est globalement pas plus importante entre l'abattage et l'arrivée sur le site de découpe.*

Enfin, une étude de terrain a permis d'étudier les profils de température de la surface et du cœur des carcasses dans des conditions réelles de transport. De plus, cette étude a permis d'évaluer les besoins frigorifiques supplémentaires dus au transport des carcasses chaudes par rapport transport de carcasses froides selon différents taux de chargement. Cette étude a permis de développer des méthodes de caractérisation des écoulements et des transferts dans une géométrie particulièrement complexe. Elle a montré l'intérêt de coupler des modèles de transfert et de microbiologie prévisionnelle. Les expérimentations à l'échelle laboratoire ont été construites en reproduisant au plus près les conditions réelles grâce à l'appui de spécialistes de la filière viande. Ainsi les carcasses modèles ont été réalisées dans des moules obtenus par impression 3D d'après des scanners X de vraies carcasses. Les résultats de cette étude sont utilisables par la profession et les pouvoirs publics pour l'adaptation de la réglementation des transports réfrigérés. La démarche développée pourra être adaptée pour des problèmes similaires dans des enceintes ventilées très encombrées.