



La maîtrise de la circulation de l'air (i.e. l'aéroulque) conditionne l'efficacité des procédés de réfrigération de la filière viande, ainsi que la qualité et la sécurité des produits traités. L'intérêt économique lié à la maîtrise de l'aéroulque est indéniable. Par exemple, il a été établi que la perte de poids d'une carcasse de bœuf, qui est conditionnée par l'aéroulque de l'appareil, représentait 55 à 65% du coût total de la réfrigération (coût de construction inclus) pour les systèmes où le traitement était supérieur à 24 h [1]. Dans les installations de réfrigération dites « statiques » où les carcasses ne sont pas déplacées, la position de la carcasse (i.e. la distribution de l'air autour) est un facteur aussi important que son poids pour expliquer les hétérogénéités de traitement (température et pertes de poids) observées [2]. Maîtriser l'aéroulque est d'autant plus difficile que celle-ci est influencée par de nombreux paramètres, tels que les caractéristiques géométriques de l'installation, la nature du conditionnement d'air ou la position des carcasses et leur nombre. Au final, l'aéroulque au sein d'une installation est trop rarement maîtrisée et est trop souvent subie.

Aéroulque en chambre froide

Mesures, modélisation, solutions d'amélioration et perspectives

En prenant pour application deux ressues statiques de carcasses de bœuf, cet article fait le point sur les potentialités d'une utilisation combinée de l'expérimentation et de la modélisation numérique pour caractériser et améliorer le comportement aéroulque des installations de réfrigération des viandes. L'aptitude de l'approche numérique à prédire le couplage existant entre aéroulque et traitement thermique et hydrique des carcasses, ainsi que la propagation et le dépôt de particules contaminantes aéropoortées sont également examinées.

Science et technique

MIRADE P.-S.
UR370 Qualité des Produits animaux,
INRA — Theix
F-63122 ST GENÈS CHAMPANELLE

Ces dernières années, l'Inra et l'Adiv ont œuvré pour rationaliser l'optimisation et la conception aéroulque des installations industrielles [3-5] :

- en mettant au point une méthode de mesure rapide de la distribution spatiale de la vitesse de l'air dans les appareils industriels [6]. Pour extraire l'information donnant l'évolution de la vitesse moyenne de l'air dans l'espace, la méthode consiste à appliquer des techniques de traitement du signal à des enregistrements de vitesse effectués au moyen d'anémomètres à boule chaude déplacés lentement et à vitesse constante. En visualisant les vitesses moyennes sur des surfaces en deux dimensions correspondant à des coupes longitudinales, transversales ou horizontales, il est possible de procéder à un diagnostic du fonctionnement aéroulque de l'appareil étudié ;
- en montrant que l'outil Mécanique des Fluides Numérique (ou Computational Fluid Dynamics – CFD – voir encadré) offrait de réelles potentialités en matière d'amélioration de l'aéroulque d'un appareil existant ou de conception d'une nouvelle installation.

En prenant pour support deux ressuages statiques de carcasses de bœuf, cet article s'attache à montrer l'intérêt et la complémentarité des deux approches que sont l'expérimentation et la simulation numérique. Il présente également deux perspectives prometteuses liées à la modélisation et à la simulation du couplage existant entre l'aéroulque et les échanges de chaleur et d'eau des carcasses, et à celles de la propagation et du dépôt de particules contaminantes dans les installations industrielles (aérobiocontamination).

INTÉRÊT ET COMPLÉMENTARITÉ DE LA CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE ET DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'AÉROULQUE

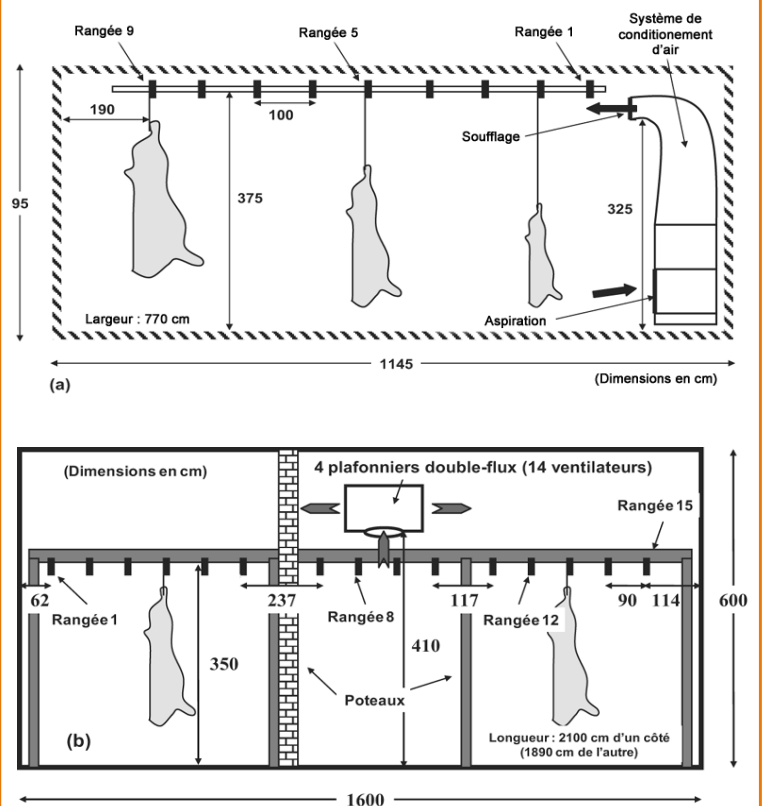
Les résultats présentés dans cette partie sont issus d'un projet de recherches piloté par l'Adiv et financé par Interbev et l'Ofival, qui visait à procéder à la validation de la simulation de l'aéroulque comme outil d'amélioration du fonctionnement et de la conception des ressuages industriels de gros bovins [5].

MATÉRIELS & MÉTHODES : OUTIL CFD ET CALCUL NUMÉRIQUE

Issus des industries du nucléaire et de l'aéronautique, les codes de calcul généraux en mécanique des fluides (codes CFD parmi lesquels Ansys Fluent est le plus utilisé) permettent de résoudre des problèmes d'écoulements de fluides, avec transferts de matière, de chaleur et phénomènes de turbulence. Les équations régissant les mouvements de fluide sont les équations de Navier-Stokes qui traduisent les lois physiques de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. La turbulence des écoulements est prise en compte au moyen de modèles de turbulence, dont le plus connu est le modèle $k-\epsilon$ standard, où k représente l'énergie cinétique turbulente et ϵ , le taux de dissipation de k . La représentation des écoulements dans les couches limites qui se développent près des parois et autour des objets se fait classiquement au moyen de lois appelées « lois de paroi ». La résolution des équations de base fortement non linéaires implique une discrétisation et une transformation de celles-ci en relations algébriques par la méthode des volumes finis. Enfin, la convergence des calculs vers une solution stable est un processus itératif, réalisé au moyen d'algorithmes de résolution dont les plus communs sont Simple et PISO.

Concrètement, la création de la géométrie de l'appareil, en tenant compte de l'ensemble des éléments ayant une incidence sur la circulation de l'air (par exemple, les rails, le conditionneur d'air, les poteaux et les rangées de carcasses dans les deux ressuages étudiés), la création du maillage, i.e. le découpage du grand volume où circule l'air en plusieurs milliers de petits volumes élémentaires dans lesquels l'ensemble des équations est résolu (915 000 pour le ressuage 1000 et 1 342 000 pour le ressuage 2), l'imposition des conditions limites et le choix des modèles numériques (turbulence, schémas convectifs, algorithme de résolution...) sont les tâches incombant à un utilisateur du code Ansys Fluent.

Figure 1
DEUX GÉOMÉTRIES DE RESSUAGE STATIQUE DE TAILLE TRÈS DIFFÉRENTE ONT ÉTÉ ÉTUDIÉES

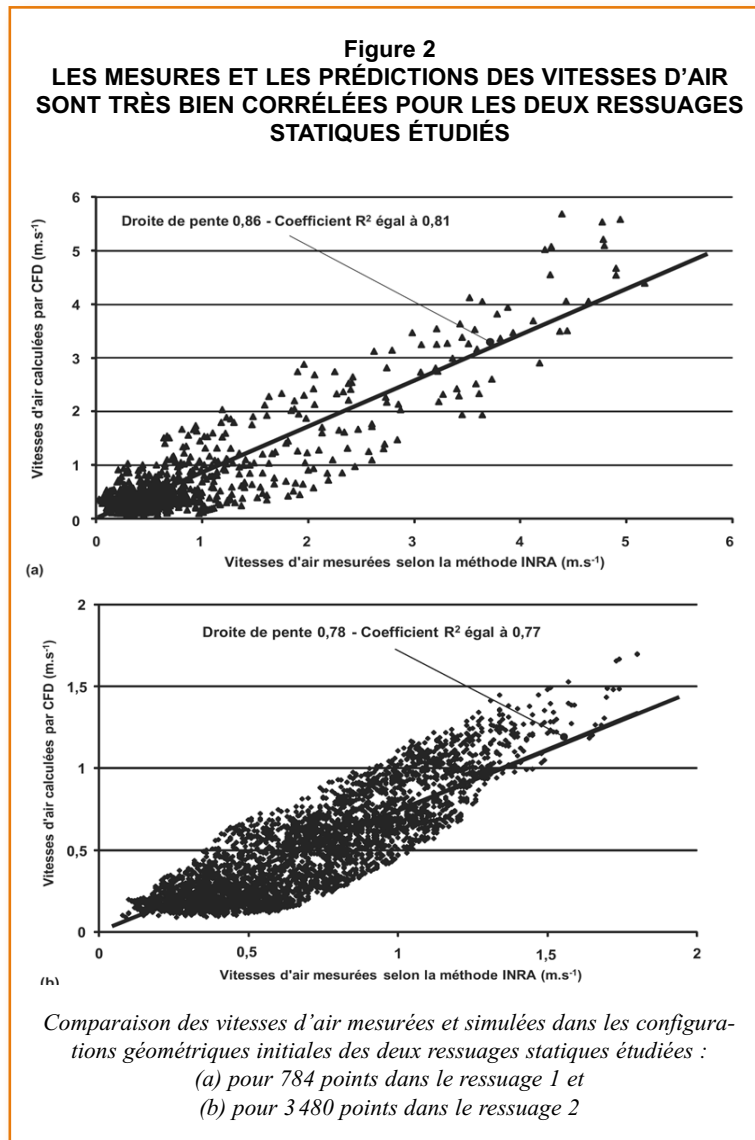


Description selon une coupe verticale de la géométrie des deux ressuages statiques étudiés : (a) ressuage 1 de 350 m³ et (b) ressuage 2 de 1900 m³

La figure 1 détaille la géométrie et le principe de fonctionnement des deux ressuges statiques qui ont servi de support à cette étude.

Les travaux de modélisation et de simulation numérique de l'aérodynamique conduits dans ce projet se sont déroulés selon trois étapes pour chacun des deux ressuges statiques.

La première étape a consisté à faire une modélisation et une simulation de l'aérodynamique, au moyen du code de calcul Fluent [7], au sein des deux géométries de rousage telles qu'elles existaient au début du projet, et à valider les résultats numériques obtenus par comparaison avec les résultats issus du diagnostic expérimental préalablement effectué. Lors de ce diagnostic, les vitesses d'air moyennes avaient été mesurées dans les deux installations statiques (Mirade & Daudin, 1998), où des sondes anémométriques à boule chaude reliées à une centrale d'acquisition avaient été déplacées continuellement à une vitesse de l'ordre de $0,02 \text{ m.s}^{-1}$ au moyen d'un téléphérique spécifiquement conçu et développé par l'Adiv. Au total, 784 points de mesure de vitesses d'air avaient été réalisés dans le premier rousage et 3480 dans le second, permettant ainsi de procéder à un diagnostic expérimental du fonctionnement de ces installations et de constituer une base de données conséquente pour valider les calculs CFD. Le diagnostic expérimental avait permis de déceler une forte hétérogénéité dans la distribution des vitesses d'air dans le premier rousage, avec un effet de jet d'air très marqué générant des vitesses supérieures à $1,8 \text{ m.s}^{-1}$ face à la zone de soufflage de la centrale de traitement de l'air (effet visible sur la figure 3a), et des vitesses d'air inférieures à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, notamment autour de la dernière rangée de carcasses (rangée n° 9). Dans le second rousage, un déficit flagrant de ventilation avait été clairement mis en évidence, avec de larges zones occupées par les carcasses où les vitesses d'air étaient inférieures à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, ainsi qu'un déséquilibre sur le plan de la ventilation en partie basse de l'installation, de part et d'autre de la rangée de batteries froides (vitesses supérieures à 1 m.s^{-1} d'un côté et inférieures à $0,6-0,8 \text{ m.s}^{-1}$ de l'autre). Quel que soit le rousage étudié, la figure 2 rend compte d'une bonne adéquation entre les vitesses d'air prédites par CFD et celles mesurées, mais aussi d'une sous-esti-



mation systématique des vitesses d'air calculées : pente de 0,86 et 0,78 respectivement, et non pas 1,0, du fait de la « diffusion numérique » générée par les modèles et les schémas numériques utilisés lors de la résolution des équations.

La deuxième étape a eu pour but d'identifier une ou plusieurs solutions techniques permettant d'améliorer l'aérodynamique au sein des deux ressuges, i.e. en réduisant l'hétérogénéité de la distribution des vitesses d'air mise en évidence dans le premier rousage, et en augmentant le niveau global de la ventilation dans le second rousage. Les solutions imaginées devaient être simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. La distribution des vitesses d'air a été rendue plus homogène dans le premier rousage, suite à l'ajout de trois parois verticales autour de la dernière rangée de carcasses (rangée n° 9), combiné à l'ajout de trois déflecteurs

horizontaux – orientés, respectivement, selon un angle de -25° , 0° et $+10^\circ$ par rapport au plan horizontal — et six déflecteurs verticaux – orientés selon un angle de $\pm 20^\circ$ par rapport au plan vertical — juste à la sortie de la zone de soufflage de la centrale de traitement d'air. La figure 3 montre, selon une coupe verticale située à mi-largeur dans le rousage 1, l'amélioration de l'homogénéité des vitesses d'air induite par l'ajout de ces différents éléments : la partie supérieure du rousage est moins ventilée que précédemment, au profit de sa partie inférieure ; l'effet de jet face au soufflage a été fortement réduit et les rangées n° 8 et 9 sont ventilées de manière plus homogène et plus intensément. Dans le second rousage, le niveau global de ventilation a été fortement augmenté et le déséquilibre de ventilation décelé en partie basse a été supprimé, grâce à l'ajout de deux lignes de six ventilateurs au-dessus des rangées de

carcasses n° 5 et 13, conduisant à une augmentation de 50% du débit d'air brassé dans l'installation.

La troisième et dernière étape a consisté à valider expérimentalement les améliorations du fonctionnement aéroulque générées par les modifications géométriques mises en place dans les deux ressuges statiques (ajout de déflecteurs, de parois verticales et de ventilateurs) et préconisées suite aux travaux de simulation numérique. La fiabilité de l'outil CFD pour améliorer les installations de ressuge des viandes a ainsi pu être jugée : les résultats expérimentaux ont bien mis en évidence une amélioration de l'homogénéité de la ventilation dans le ressuge 1, avec une réduction de 67% de l'écart-type des vitesses et de 10% de la vitesse d'air moyenne dans le volume occupé par les carcasses. Dans le second ressuge, la campagne de mesures a mis en évidence une augmentation de 39% des vitesses d'air, combinée à une réduction de 5% de l'écart-type. Cette étude a donc démontré que la simulation numérique était un bon outil de prédiction des modifications du comportement aéroulque d'une installation, même si l'outil CFD a eu tendance à sous-estimer les valeurs réelles des vitesses d'air, entre 8 et 26% selon les cas. L'ensemble des résultats expérimentaux et numériques ayant trait à l'étude présentée ici sont consultables dans deux communications internationales [8-9].

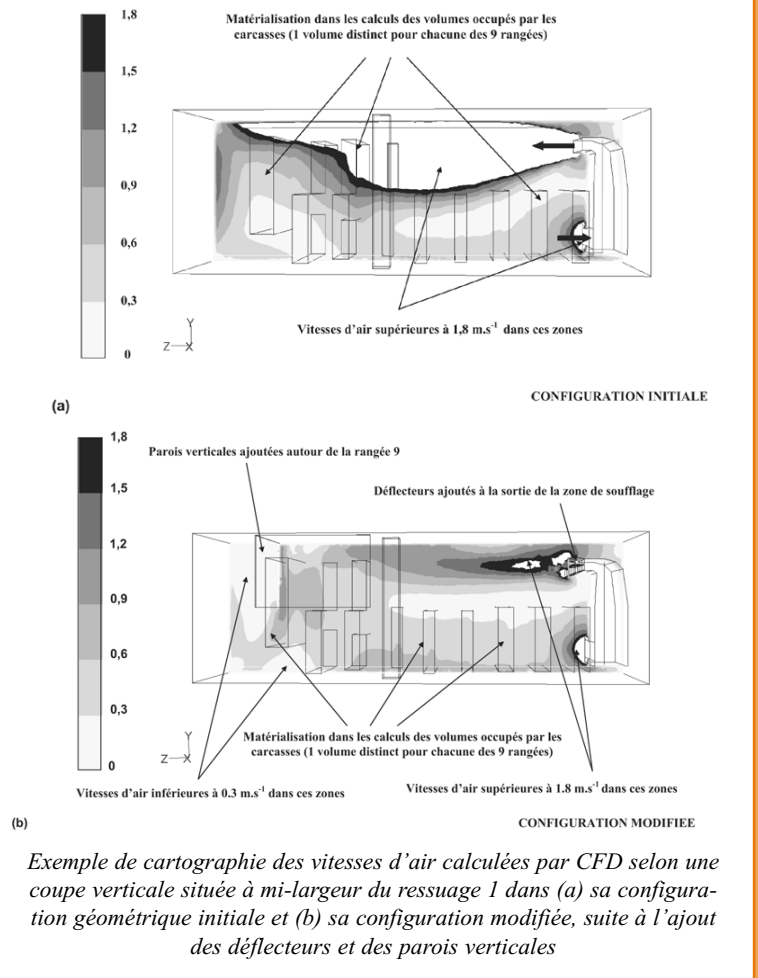
PERSPECTIVES

Compte tenu de la formidable évolution de la puissance de calcul ces dernières décennies, l'outil CFD est de plus en plus utilisé pour traiter des cas de plus en plus complexes. Il convient notamment d'en citer particulièrement deux qui ouvrent de réelles perspectives dans le domaine du froid : (1) la modélisation du couplage entre l'écoulement d'air et les transferts thermiques et hydriques des carcasses et (2) l'aérobiocontamination, i.e. la propagation par l'air de particules contaminantes.

Modélisation du couplage aéroulque-transferts thermiques et hydriques des carcasses

Les transferts de chaleur au sein des carcasses de viande ont été étudiés depuis fort longtemps, bien avant l'aéroulque. Leur résolution était

Figure 3
L'HOMOGENÉITÉ DE LA VENTILATION A ÉTÉ AMÉLIORÉE
DANS LE RESSUGE 1 SUITE AUX MODIFICATIONS
GÉOMÉTRIQUES APPORTÉES



basée sur la recherche de solutions analytiques appliquées à des formes géométriques simplifiées.

Depuis, sont apparues dans la littérature, plusieurs études scientifiques qui couplent aéroulque et échanges de chaleur et d'eau au niveau des carcasses. Une des plus récentes et des plus complètes combine calculs CFD et modèles aux éléments finis [10]. L'originalité de ce travail réside dans le fait que la géométrie d'une carcasse de bœuf est matérialisée par la somme de 12 sections représentées par des équations de régression, préalablement ajustées à partir de données recueillies (conformation, poids et état d'engraissement) sur 79 carcasses. En d'autres termes, toute nouvelle carcasse peut être aisément reconstruite dans le modèle numérique au moyen de ces équations de régression, connaissant son état d'engraissement et son poids. Une fois la géométrie de la carcasse reconstituée,

le code de calcul Fluent est utilisé pour calculer les coefficients locaux de transferts de chaleur et de matière, à partir du champ de vitesse d'air régnant autour de la carcasse. Enfin, un modèle aux éléments finis a été spécifiquement développé et implémenté dans le code CFD, afin de calculer la diffusion de l'eau à l'intérieur de la carcasse, en prenant pour hypothèse simplificatrice que cette diffusion se déroulait surtout à proximité de la surface (quelques millimètres) et pouvait, de ce fait, être considérée comme monodimensionnelle [11]. En couplant calculs CFD et modèles aux éléments finis, Pham et al. [10] ont donc développé une méthodologie permettant de déterminer en fonction du temps, pour n'importe quelle géométrie de carcasse, la quantité de chaleur évacuée, les cinétiques de changement de température et de perte de poids, et même, l'évolution de l'activité de l'eau en différents points de cette carcasse.

Aérobiocontamination

Les problèmes d'aérobiocontamination dans le domaine du froid sont bien réels, avec notamment la propagation par l'air de spores de moisissures à l'intérieur des chambres froides, ce qui peut occasionner des contaminations au niveau des produits alimentaires, surtout si ces derniers ne sont pas emballés.

Utiliser l'outil CFD pour prédire la propagation et le dépôt de particules contaminantes (bactéries accrochées à des poussières, spores de moisissures...) dans les chambres froides suppose d'être capable de simuler avec précision l'ensemble des phénomènes physiques (inertie, impaction, interception, gravité, mouvement Brownien, fluctuations turbulentes...) auxquels sont soumises ces particules lors de leur transport, mais surtout lorsqu'elles sont à proximité des parois, où elles sont susceptibles de venir se déposer. Ce type de modélisation et de simulation est beaucoup plus contraignant qu'un simple calcul aérodynamique, en termes de finesse de maillage à proximité des parois et de modèles numériques utilisés (turbulence de l'écoulement, phénomènes physiques), requérant des temps de calcul très longs et l'utilisation de machines multiprocesseurs.

Très récemment, dans le cadre du projet de recherches SIMPFRI¹ (sûreté, innovation et maîtrise de l'énergie dans les procédés et équipements frigorifiques), un calcul visant à prédire le dépôt de particules contaminantes dans une chambre froide de 90 m³ remplie de neuf objets parallélépipédiques a été réalisé [12], moyennant :

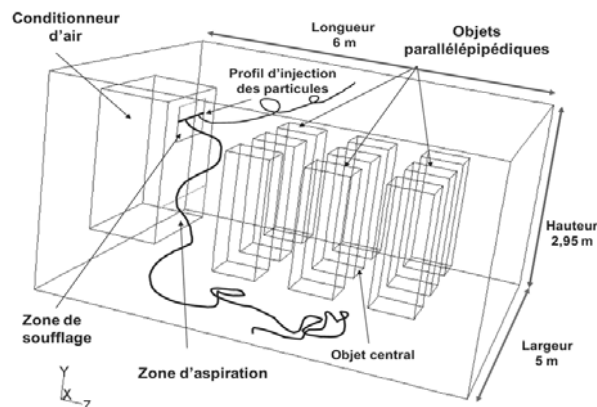
- la création d'un maillage très fin, particulièrement au niveau des parois (chambre et objets) où la hauteur des mailles était égale à 1 mm,
- une modélisation de la turbulence de l'écoulement au moyen d'un modèle tenant compte du caractère anisotrope de la turbulence (modèle RSM), notamment, à l'approche des parois où les tourbillons sont déformés,
- et l'utilisation d'un modèle à bas nombre de Reynolds pour tenir

compte des phénomènes physiques particuliers se déroulant dans les couches limites qui se développent au niveau des parois et notamment, l'amortissement de la turbulence.

La figure 4 décrit la géométrie de la chambre froide utilisée dans le travail de Chorel [12]. La figure 5 donne un exemple de prédiction du dépôt obtenu dans le cas de la propagation de 3000 particules sphériques, de den-

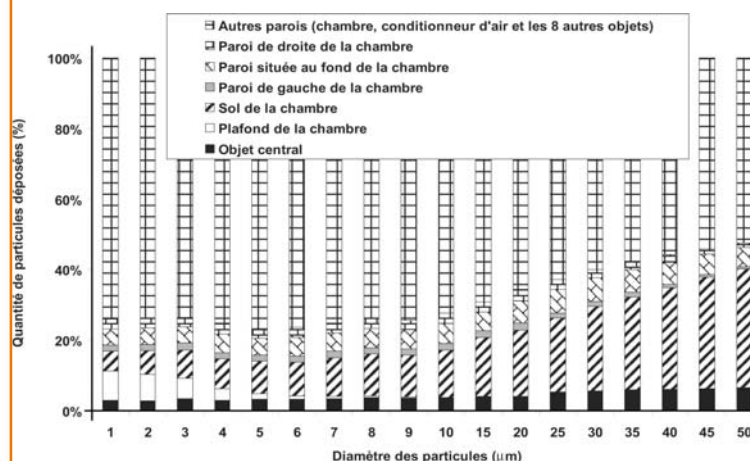
sité égale à celle de l'eau et de diamètre compris entre 1 et 50 μm, préalablement injectées dans l'écoulement de manière uniforme, selon un profil situé à mi-hauteur de la zone de soufflage du conditionneur d'air. La propagation des particules, depuis leur lieu d'injection jusqu'aux différentes parois de la chambre froide et des objets, a été modélisée au moyen d'une approche Lagrangienne, dans laquelle la trajectoire de chaque parti-

Figure 4
UNE GÉOMÉTRIE DE CHAMBRE FROIDE SIMPLE A ÉTÉ CHOISIE POUR MODÉLISER LE DÉPÔT DE PARTICULES



Vue schématique de la géométrie de chambre froide de 90 m³ remplie de 9 objets parallélépipédiques et choisie pour développer une méthodologie permettant de prédire par CFD le transport et le dépôt de particules contaminantes

Figure 5
LA QUANTITÉ DE PARTICULES DÉPOSÉES SUR CHAQUE TYPE DE PAROI VARIE AVEC LE DIAMÈTRE DES PARTICULES



Prédiction par CFD de la quantité de particules déposées sur chacune des parois d'une chambre froide de 90 m³ remplie de 9 objets parallélépipédiques, les particules avaient été préalablement injectées uniformément selon une ligne horizontale située à mi-hauteur de la zone de soufflage du conditionneur d'air

¹Ce projet a été réalisé grâce au financement de l'ANR – Agence Nationale de la Recherche – dans le cadre du Programme National de Recherche en Alimentation et nutrition humaine, projet ANR-05-PNRA-015

culé est calculée individuellement. Le caractère stochastique de la propagation des particules implique de réaliser plusieurs répétitions pour l'injection, avant de procéder au traitement statistique des résultats donnant la quantité de particules déposées sur chacune des parois. Pour chacune des trois répétitions réalisées, le temps de calcul a été d'environ 12 h sur un PC doté de quatre processeurs à 3 GHz et de 32 Mo de mémoire vive.

L'analyse de la figure 5 permet de se rendre compte que la quantité de particules déposées sur une paroi varie avec la taille de la particule : par exemple, la quantité de particules déposée sur le sol est d'autant plus grande que leur diamètre (et donc leur poids) est grand; le phénomène de gravité devient donc prépondérant dans leur mécanisme de dépôt. À l'inverse, au plafond, seules les particules les plus fines (diamètres inférieurs à environ 5 µm) arrivent à se

déposer, du fait de l'écoulement tourbillonnaire. Sur les surfaces de l'objet central (figure 4), la quantité de particules déposée croît avec leur taille [12].

Cet exemple illustre bien l'aptitude des codes CFD à prédire le dépôt de particules dans les procédés alimentaires, dépôt qui peut être préjudiciable s'il s'agit de particules contaminantes mais aussi, bénéfique, par exemple, dans le cas de particules aromatiques (procédés de fumage).

CONCLUSION

Cet article montre une nouvelle fois l'aptitude et l'utilité de l'outil CFD pour appréhender, voire améliorer, la distribution de l'écoulement de l'air au sein des installations de réfrigération des viandes. Les bénéfices de la modélisation et de la simulation numérique sont, bien entendu, bien réels pour l'ensemble des procédés

alimentaires, et mériteraient, très sérieusement, d'être étendus à la conception des nouvelles installations, afin d'optimiser le plus tôt possible leur comportement aérodynamique.

De plus, du fait de l'apparition récente de PC multiprocesseurs, l'outil CFD présente un fort potentiel de développement avec un champ d'application étendu, avec notamment, la modélisation et la simulation du couplage existant entre l'écoulement de l'air et les produits alimentaires traités, ainsi que celles de la propagation et du dépôt de particules aéroportées dans les appareils.

Toutefois, il convient de garder à l'esprit que les résultats numériques obtenus ne sont pas plus précis que les modèles physiques sur lesquels ils sont basés. Ils doivent donc absolument être validés, dans la mesure du possible, par des données expérimentales.

B I B L I O G R A P H I E

[1] **BOWATER F.J. (1986)**. The economics of modern beef chilling systems. In : Proceedings of the International Institute of Refrigeration Commission C2 meeting, Bristol, UK, 165-170.
 [2] **WOOTON A.E. (1986)**. Factors affecting the chilling rate of beef sides. In : Proceedings of the International Institute of Refrigeration Commission C2 meeting, Bristol, UK, 115-121.
 [3] **MIRADE P.S., PICGIRARD L. (2001)**. Assessment of airflow patterns inside six industrial beef carcass chillers. *Int. J. Food. Sci. Technol.*, 36, 463-475.
 [4] **MIRADE P.S., PICGIRARD L. (2001)**. Mesure et modélisation de l'aérodynamique dans les procédés de réfrigération et de séchage de l'industrie de la viande. *Ind. Alim. Agric.*, octobre, 21-25.
 [5] **PICGIRARD L., MIRADE P.S. (2005)**. Validation de la simulation de l'aérodynamique pour améliorer et/ou concevoir les ressurgences de gros bovins. *Viandes et Produits Carnés*, 24, 131-136.
 [6] **MIRADE P.S., DAUDIN J.D. (1998)**. A new experimental method for measuring and visualising air flow in large food plants. *J. Food. Eng.*, 36, 31-49.
 [7] **ANONYMOUS (2001)**. Fluent user's guide. Fluent Inc., Lebanon.

[8] **PICGIRARD L., MIRADE P.S. (2006)**. Improved ventilation inside a large meat carcass chiller following CFD modelling. In : Proceedings of the 4th International Conference on Simulation in Food and Bio-industries, Naples, Italy, 8p.
 [9] **MIRADE P.S., PICGIRARD L. (2006)**. Improvement of ventilation homogeneity in an industrial batch-type carcass chiller by CFD investigation. *Food Res. Int.*, 39, 871-881.
 [10] **PHAM Q.T., TRUJILLO F.J., MCPHAIL N. (2009)**. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients. *Int. J. Refrig.*, 32, 102-113.
 [11] **TRUJILLO F.J., PHAM Q.T. (2006)**. A computational fluid dynamics model of the heat and moisture transfer during beef chilling. *Int. J. Refrig.*, 29, 998-1009.
 [12] **CHOREL F. (2007)**. Contribution à l'étude de l'aérocontamination dans les chambres froides : étude du dépôt et de la captation sur des parois solides de particules contaminantes aéroportées. Mémoire de stage d'ingénieur ISIMA, Clermont-Ferrand, 73p.