

Le comportement aéraluque des frigos de ressuage des carcasses peut avoir des répercussions considérables (1), à la fois, sur la qualité des produits et sur l'efficacité du fonctionnement de l'installation (consommation électrique, etc.).

En ce qui concerne l'influence de l'aéraluque sur la qualité des produits, il a été démontré depuis longtemps que le ressuage des carcasses est une étape très importante pour la conservabilité ultérieure de la viande. L'opération de ressuage a également des répercussions considérables sur les pertes de poids (2). Or, ces deux critères de qualité (conservabilité, rendement de ressuage) dépendent de la température, de l'Aw en surface de la carcasse et des coefficients de transferts de chaleur et de matière à l'interface entre la carcasse et l'air de réfrigération. Ces coefficients de transferts sont étroitement liés à la vitesse de l'air (3) et à son homogénéité à l'intérieur du frigo.

Les mesures de vitesse d'air dans une installation montrent des variations pouvant atteindre 1 à 10 selon l'emplacement (4). De même, des mesures ont montré que l'humidité était plus importante dans les zones sous ventilées, car l'hygrométrie de l'air, insuffisamment renouvelé, tend à s'équilibrer avec l'Aw de la viande (0,98). Sur le plan microbiologique, on sait qu'il est nécessaire de maintenir une Aw < 0,92 à l'interface air/carcasse pour limiter le développement bactérien.

D'autre part, des mesures effectuées dans certaines installations ont mis en évidence des erreurs de conception (ex: batteries murales et rails parallèles au mur) qui rendaient quasiment inopérant le système de réfrigération au-delà de la première rangée de carcasses (5).

Enfin, les systèmes de réfrigération sont conçus (ou modifiés) bien souvent sur la base de connaissances empiriques des frigoristes et des sociétés d'ingénierie, qui manquent d'outils fiables.

Refroidissement des carcasses de viande

Validation de la simulation de l'aéraluque pour améliorer et/ou concevoir les ressuages de gros bovins

La phase de ressuage est une étape importante dans l'industrie de la viande. C'est pourquoi la maîtrise de la circulation d'air, appelée aéraluque, est un paramètre déterminant. Grâce à la modélisation numérique, certains aménagements d'installations frigorifiques, voire même de nouveaux locaux pourront désormais être prévus à moindre coût.

PICGIRARD L. ⁽¹⁾, MIRADE P.S. ⁽²⁾

⁽¹⁾ ADIV ASSOCIATION
2 rue Chappe- 63039 CLERMONT-FERRAND Cedex 2

⁽²⁾ INRA de Theix
Unité Qualité des Produits Animaux, Equipe Couplage
Transferts-Transformations (C2T)
63122 SAINT GENES CHAMPANELLE

Science et technique

En 1997, une étude, intitulée « Caractérisation des installations de ressuage et de leur comportement aéroulque dans les abattoirs » (5) et issue de travaux de la thèse de PS. MIRADE (6) a permis :

- de mettre au point une méthode de mesure rapide et fiable des vitesses de l'air dans les ressuages (7), et donc visualiser la cartographie des vitesses d'air, quelle que soit leur configuration;
- de mettre en évidence les limites (zones de sur ou sous ventilation) des configurations de ressuage les plus souvent rencontrées en France (8);
- à l'occasion, de démontrer que la simulation en mécanique des fluides numérique pouvait être un outil précieux d'aide à l'amélioration et/ou à la conception des appareils industriels agroalimentaires: il avait été simulé, par exemple, sur un abattoir convoqué présentant un dysfonctionnement flagrant au niveau de la répartition des flux d'air, qu'une modification de l'orientation de ce flux de 45° au lieu de 0° (par rapport à l'horizontale) pouvait permettre d'améliorer significativement l'homogénéité de la répartition des vitesses d'air (9).

Cependant, si la méthode de caractérisation développée dans le programme était fiable, elle avait l'inconvénient d'être longue et non prédictive. D'autre part, il était impossible de juger de la pertinence et de la précision des solutions aéroulques proposées par la simulation numérique, puisqu'aucune validation expérimentale des modifications préconisées n'avait été réalisée.

L'objectif de l'étude est donc de valider l'efficacité et la fiabilité des outils de simulation numérique, aujourd'hui disponibles, pour la conception des frigos de ressuage et/ou l'amélioration de leur comportement aéroulque.

L'ÉTUDE PORTE SUR DEUX ABATTOIRS ET SE DÉROULE EN 4 PHASES

Deux abattoirs, dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 1, ont été sollicités pour cette étude: un abattoir A, équipé d'un ressuage statique d'une capacité de 66 carcasses de gros bovins, et un abattoir B, doté d'un ressuage statique d'une capacité de 375 carcasses de gros bovins.

Pour chaque abattoir, l'étude s'est déroulée en 4 phases:

- **Phase 1**: caractérisation de l'existant,
- **Phase 2**: simulation numérique à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides numérique (code de calcul FLUENT (10)) de l'existant et des modifications envisagées pour améliorer l'aéroulque,
- **Phase 3**: réalisation des modifications dans chaque abattoir,
- **Phase 4**: mesure des écarts entre les simulations numériques faites par ordinateur et la caractérisation expérimentale des modifications, pour valider ou non la méthode, puis mesure des conséquences de la modification de l'aéroulque sur la qualité du ressuage des carcasses bovines.

PHASES DE CARACTÉRISATION, LES PHASES 1 ET 4 SONT MENÉES DE LA MÊME FAÇON

Elles comportent trois volets:

- cartographie aéroulque des locaux,
- cinétique de descente en température d'une carcasse,
- mesure de pertes de poids sur plusieurs carcasses,
- et mesure de la température et de l'hygrométrie de l'air des locaux.

Seule la phase 1 comporte une étape supplémentaire de mesure de la géomé-

trie des locaux nécessaire pour la phase de simulation numérique.

Les résultats relatifs à la réfrigération des carcasses (température et perte de poids des carcasses, température et hygrométrie des locaux) ne sont pas présentés dans cet article.

Les cartographies aéroulques des locaux ont été effectuées à partir de la méthode développée lors du programme: « Caractérisation des installations de ressuage et de leur comportement aéroulque dans les abattoirs » (5).

La méthode consiste à déplacer continûment et à vitesse faible des anémomètres à fil chaud multidirectionnels (7) qui mesurent la vitesse de l'air toutes les secondes (cf. figure 1).

Les vitesses d'air brutes obtenues en chaque point sont traitées informatiquement par une transformée de Fourier et l'application d'un filtrage passe-bas, dans le but d'éliminer les fluctuations temporelles et ne conserver que la variation spatiale des vitesses d'air moyennes. Celles-ci sont ensuite représentées graphiquement sur tableur Excel ©, par la méthode des surfaces, sous forme de coupes en 2 dimensions.

PHASE DE SIMULATION

Elle a été menée à l'aide du code général de calcul en mécanique des fluides Fluent 6© (10). Ce dernier résout les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes) qui régissent le mouvement d'un fluide.

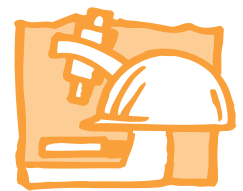
La méthodologie utilisée pour la simulation numérique consiste:

- à définir et à dessiner, très précisément dans le logiciel, la géométrie du local, en prenant en compte l'ensemble des obstacles qui a une incidence sur la circulation de l'air dans l'installation, tels que les rails, les systèmes de ventilation, les carcasses;
- à découper le volume global du local en petits volumes de forme hexaédriques et tétraédriques, i.e. créer un maillage du domaine de calcul. Pour l'abattoir A, 915000 cellules ont été utilisées et pour l'abattoir B, 1342000;
- à définir des hypothèses de calcul sur la nature de l'écoulement, ainsi que sur les modèles numériques utilisés. Pour les deux abattoirs, l'écoulement a été considéré comme stationnaire, incompressible et turbulent. La turbulence a été prise en compte au moyen du modèle k-ε standard (11). Des schémas numériques du 1er ordre

Tableau 1 : L'ÉTUDE PORTE SUR 2 ABATTOIRS DE CAPACITÉ DIFFÉRENTE

	Abattoir A	Abattoir B
Type de ressuage	Multi-espèces	Mono-espèces
Capacité Gros bovins	66	375
Nombre de rails	9	15
Longueur des rails	5,9 m	17,33 m
Hauteur sous plafond	3,95 m	6,04 m
Hauteur sous rail	3,75 m	3,5 m
Type de ventilation	Batterie sur pied avec soufflage frontal	Rangée centrale de plafonniers double flux
Taux de chargement lors de la phase 1	95 %	41 %

Caractéristiques des ressuages des abattoirs expérimentés



associés à l'algorithme de résolution SIMPLE (12) ont été utilisés pour résoudre les équations de Navier-Stokes;

- à définir une vitesse de ventilation à la sortie des batteries froides, avec un taux de turbulence arbitrairement fixé à 10 % (Abattoir B) et 20 % (Abattoir A). Le choix de la valeur de vitesse d'air a été, en fait, déterminé par mesure fixe à l'aide d'un anémomètre portatif au cours de la phase 1, i.e. 7,1 m.s⁻¹ pour l'abattoir A, et 2,3 m.s⁻¹ pour l'abattoir B;
- à représenter les rangées de carcasses par des volumes poreux (dans lesquels des coefficients sont à ajuster), afin de réduire le nombre de mailles du

modèle numérique et donc, diminuer les temps de calcul;

- à effectuer les calculs à l'aide d'un PC Pentium IV, 3 GHz doté de 2 Go de RAM.

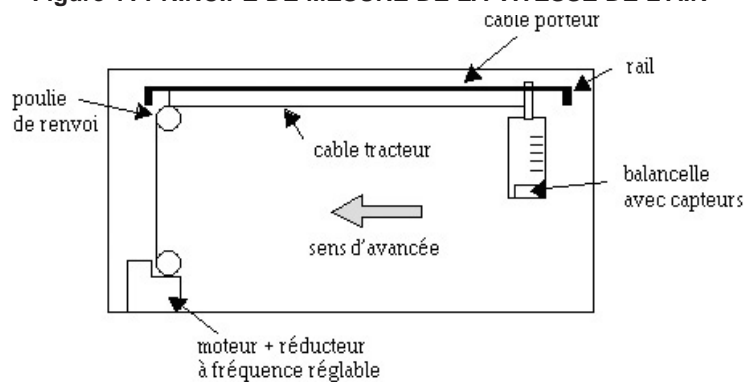
Les travaux effectués en simulation numérique se sont donc déroulés en trois étapes, pour chacun des deux abattoirs.

L'étape 1 a consisté à faire une simulation numérique de l'état des lieux et à comparer les résultats avec ceux obtenus par mesure, lors de la phase 1. Cette étape a aussi servi au calage des coefficients de porosité à entrer dans les volumes poreux modélisant les rangées de carcasses.

L'étape 2 avait pour but de tester des modifications et d'identifier une ou plusieurs solutions techniques permettant d'améliorer l'homogénéité du soufflage et/ou le niveau global de la ventilation. Les solutions imaginées devaient être simples à mettre en œuvre, peu perturbatrices en regard de l'activité des abattoirs et, surtout, peu coûteuses.

L'étape 3 a consisté à établir la corrélation entre les vitesses d'air prédites par simulation numérique pour la modification réalisée et les vitesses d'air réelles mesurées (phase 4) sur l'installation modifiée, afin de vérifier la pertinence des résultats de simulation et de juger de la fiabilité de l'outil mécanique des fluides numérique pour améliorer et/ou concevoir les installations de ressuage.

Figure 1: PRINCIPE DE MESURE DE LA VITESSE DE L'AIR



Figures 2 et 3: REMONTÉE DES CARCASSES ET MISE EN PLACE DE DÉFLECTEUR AMÉLIORENT L'HOMOGÉNÉITÉ DE LA VENTILATION

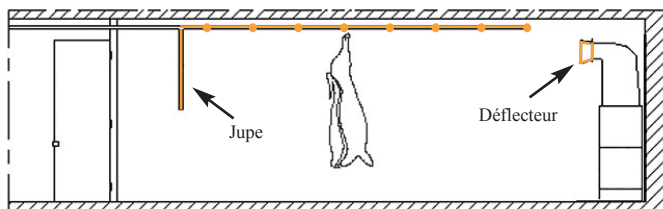


Figure 2: État des lieux du ressuage de l'abattoir A et représentation des modifications effectuées (en orange)

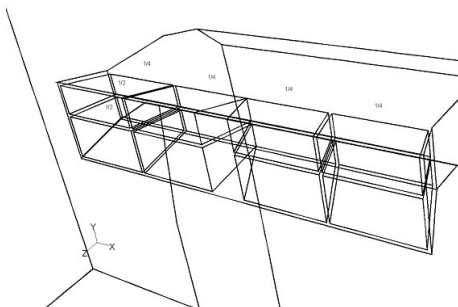


Figure 3: Schéma précis du déflecteur de 30 cm de long conçu par simulation, composé de 5 éléments verticaux orientés à 20° par rapport à la verticale et de 3 éléments horizontaux orientés à -25° (élément du bas), 0° (élément du milieu) et +10° (élément du haut) par rapport à l'horizontale

SIMULATION NUMÉRIQUE DES MODIFICATIONS: UN MOINDRE COÛT POUR DE NOMBREUX TESTS

Simulation numérique effectuée sur l'abattoir A: 64 configurations sont testées

Le ressuage de l'abattoir A a été divisé en 915 000 petits volumes. Un total de 25 calculs numériques a été réalisé pour déterminer les valeurs des coefficients de porosité à entrer dans les volumes poreux, afin de modéliser le chargement en carcasses, et établir un état des lieux de l'aérodynamique. Un temps moyen de calcul égal à 8,5 h a été nécessaire pour converger vers une solution stable.

L'état des lieux effectué sur l'abattoir A a montré que la ventilation était concentrée au centre du local et en hauteur, et que le retour d'air au niveau de l'évaporateur était faible. Ce phénomène était vraisemblablement dû à la présence de carcasses de porc sur tynets à rallonge devant la batterie froide au niveau de cette aspiration.

Plusieurs solutions d'amélioration ont donc été testées. Elles se sont attachées à améliorer l'homogénéité de la ventilation par :

- une remontée des carcasses
- et la mise en place de déflecteurs.

Un total de 64 configurations d'amélioration a été testé, pour, au final, n'en retenir qu'une, i.e. celle représentant le meilleur rapport qualité/prix. Cette dernière a consisté à installer un déflecteur à la sortie de l'organe de soufflage et à installer une jupe fixée au plafond derrière le dernier rail de carcasses. Les schémas de l'état des lieux de l'abattoir A et de la modification entreprise sont donnés dans les figures 2 et 3.

Figure 4: ABATTOIR A - CARTOGRAPHIE AÉRAULIQUE HORIZONTALE À 135 CM DU SOL

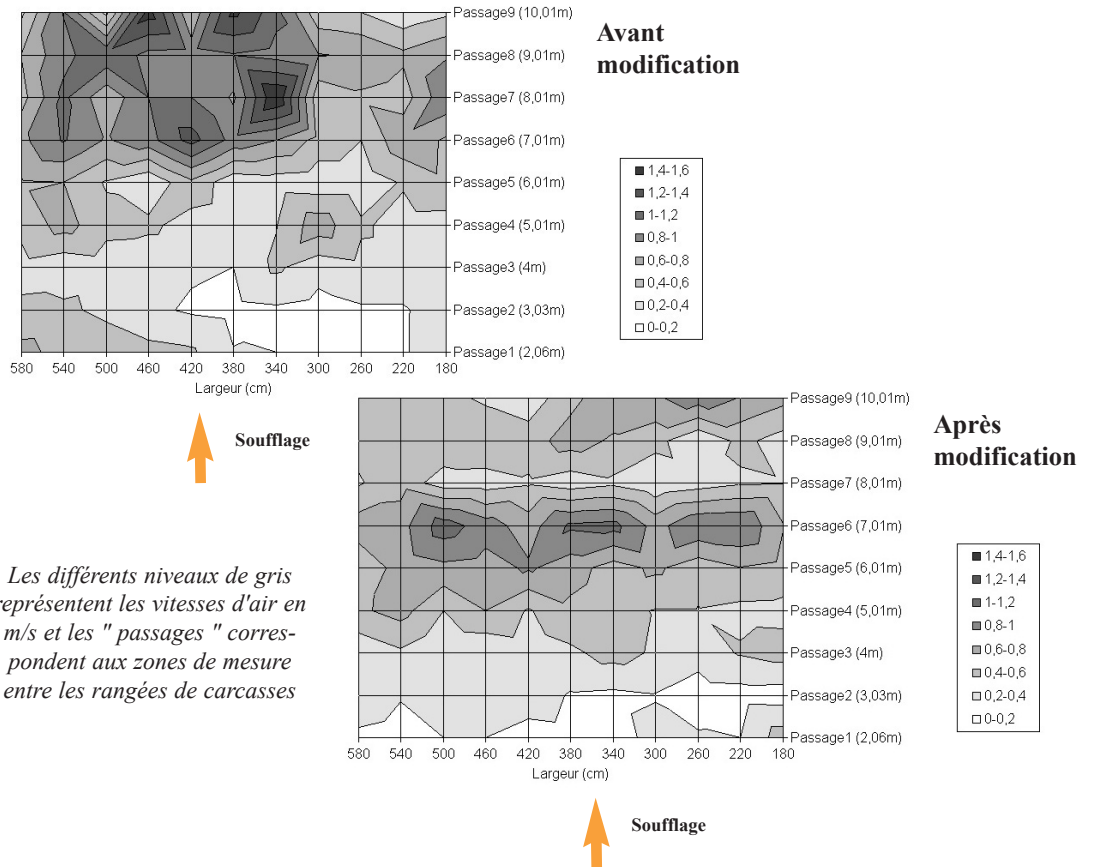
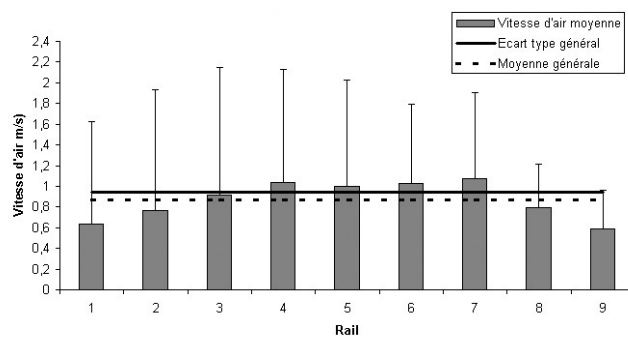
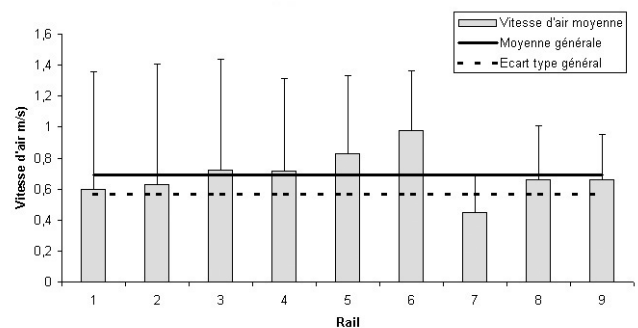


Figure 5: EFFET DES MODIFICATIONS PRÉCONISÉES PAR SIMULATION NUMÉRIQUE SUR LES VITESSES D'AIR MOYENNES MESURÉES POUR CHAQUE RAIL (OU RANGÉE DE CARCASSES)



ABATTOIR A: Moyenne et écart-type des vitesses d'air mesurées par rail, avant modification



ABATTOIR A: Moyenne et écart-type des vitesses d'air mesurées par rail, après modification

Le coût de la modification effectuée s'est élevé à 900 □ HT, fournitures et pose comprises.

Simulation numérique de l'abattoir B : 17 h nécessaires pour la résolution des calculs

Le ressage de l'abattoir B a été divisé en 1 342 000 cellules. À la différence de l'abattoir A, où chaque rangée de carcasses a été modélisée par un volume poreux indépendant, le chargement du ressage a été intégré au calcul au moyen de trois grands volumes poreux, et ce, afin de faciliter la création du maillage tridimensionnel. La résolution des calculs pour retrouver l'état des lieux aéraulique défini lors de la phase 1 a nécessité 17 h.

L'analyse de l'état des lieux montre que le ressage B a une ventilation hétérogène et sous dimensionnée. La hauteur sous plafond disponible étant suffisante, la solution retenue a consisté à ajouter deux rangées de six ventilateurs supplémentaires sur la poutraison support du réseau aérien. Chaque rangée a été implantée à mi-distance entre les parois latérales et la rangée centrale de batterie froide.

Le coût de cette modification, soit la fourniture et la pose de 12 ventilateurs, s'est élevé à 3 700 □ HT environ.

EFFET DES MODIFICATIONS SIMULÉES SUR L'AÉRAULIQUE DES LOCAUX : UNE VENTILATION PLUS HOMOGENE

Les 2 cartographies aérauliques de la figure 4 montrent que, pour l'abattoir A, les modifications préconisées par simulation numérique ont permis d'améliorer l'homogénéité de la ventilation dans le sens de la largeur du local.

De même, la figure 5, qui représente la vitesse d'air moyenne de chaque rail et son écart-type, montre également l'amélioration de l'homogénéité apportée pour l'ensemble du ressage.

Enfin, le tableau 2 prouve que les modifications préconisées par simulation numérique ont permis, pour l'abattoir A, d'améliorer la répartition globale des vitesses d'air, tant entre les différents rails de carcasses que pour un même rail, et pour l'abattoir B, d'augmenter le niveau de ventilation globale, en améliorant légèrement l'homogénéité de celle-ci. On peut toutefois constater que, pour l'abattoir A, les modifications préconisées se sont traduites par une diminution du niveau global de ventilation. Cette chute du débit global de ventilation est en fait artificielle. En effet, les mesures des vitesses d'air

ne sont effectuées, pour des raisons techniques, que dans les zones où se situent les carcasses. Les zones de circulation dans lesquelles les carcasses ne sont pas stockées ne sont pas prises en compte. Or, la modification aéraulique proposée, qui s'est traduite par un balayage latéral plus important du flux d'air en sortie de la batterie froide, a certainement conduit à distribuer une partie de ce flux d'air dans les couloirs de circulation non caractérisés. De ce fait, le débit d'air distribué directement sur les rails a été réduit.

CORRÉLATION ENTRE SIMULATION NUMÉRIQUE ET MESURES SUR SITE : DES RÉSULTATS SIGNIFICATIFS

Pour valider la pertinence de la simulation numérique, il convenait de vérifier la corrélation existant entre les valeurs de vitesse d'air sur site et celles prédites par simulation numérique pour chaque point de mesure.

Cette corrélation a été mesurée, tant avant modification des ressages, pour vérifier si la simulation numérique permettait de recréer l'état des lieux aéraulique, qu'après ressage, pour vérifier si les solutions préconisées par simulation numérique étaient justes.

Dans les deux cas de figure, les relations entre valeurs mesurées et valeurs simulées sont linéaires et les corrélations statistiquement significatives.

La figure 6 montre un exemple de relation constatée pour l'abattoir A entre les vitesses d'air simulées et les vitesses d'air mesurées après modification du ressage.

Tableau 2 : LA RÉPARTITION GLOBALE DES VITESSES D'AIR EST AMÉLIORÉE

		Moyenne générale des vitesses d'air (m/s)	Écart type des vitesses d'air	% de l'écart type par rapport à la moyenne
Abattoir A	Avant modification	0,87	0,94	108 %
	Après modification	0,7	0,58	80 %
Abattoir B	Avant modification	0,7	0,32	45 %
	Après modification	0,97	0,39	40 %

Effet des modifications préconisées par simulation numérique sur l'aéraulique des 2 ressages

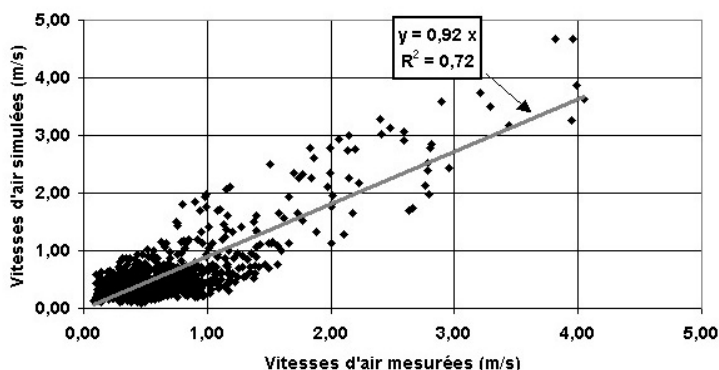


Figure 6 : COMPARAISON DES VITESSES D'AIR MESURÉES ET SIMULÉES APRÈS MODIFICATION DU RESSAGE DE L'ABATTOIR A

Le tableau 3 reprend l'ensemble des relations obtenues entre cas simulé et mesuré, pour les deux abattoirs et les deux cas de figure (avant et après modification).

Le coefficient de corrélation minimum noté entre les deux grandeurs est de 0,69, ce qui est très significatif, compte tenu du nombre de valeurs choisies pour le calcul de la corrélation qui était supérieur à 100 dans tous les cas.

On peut donc conclure que la simulation est un bon outil de prédiction des modifications du comportement aérodynamique d'une installation, même si elle a tendance à sous-estimer les valeurs réelles de vitesse. Au pire des cas, la sous-estimation des valeurs réelles atteindra 25 %.

CONCLUSION

La simulation numérique permet donc de simuler à moindre coût des modifications pertinentes des installations frigorifiques, sans avoir recours à des campagnes de mesures de longue durée. Seuls un relevé de la géométrie des locaux sur site et une mesure de la vitesse d'air à la sortie des organes de soufflage suffisent. Elle a aussi

Tableau 3 : RELATION ENTRE VITESSES D'AIR PRÉDITES PAR SIMULATION NUMÉRIQUE ET VALEURS MESURÉES

AVANT modification des ressuges		
	Équation de la courbe	R ²
Abattoir A	Y = 0,86 x	0,81
Abattoir B	Y = 0,78 x	0,77
APRÈS modification des ressuges		
	Équation de la courbe	R ²
Abattoir A	Y = 0,92 x	0,72
Abattoir B	Y = 0,74 x	0,69

Y = valeurs de vitesses d'air simulées
x = valeurs de vitesses d'air mesurées

l'avantage de représenter l'aérodynamique sur l'ensemble de l'installation, contrairement aux mesures, qui ne caractérisent que les zones occupées par les carcasses.

Ainsi, il semble désormais possible d'envisager des études de conception de ressuges neufs, avec l'outil de mécanique des fluides numérique. Toutefois, pour renforcer l'attrait et la précision de la simulation numérique, il conviendrait d'affiner la définition des conditions limites (module et orientation des vecteurs vitesses d'air à la sortie des organes de soufflage) et de tester de nouveaux modèles de résolution des équations.

De même, il conviendrait de développer une méthodologie permettant de déterminer « scientifiquement » les coefficients des volumes poreux représentant les rangées de carcasses, à partir de la forme et des dimensions des carcasses, et à partir de la manière dont ces dernières sont agencées sur les rails.

Les auteurs souhaitent remercier L'Interbev et l'Ofival sans le concours financier desquels cette étude n'aurait pu être menée, ainsi que les abattoirs qui ont participé à l'expérimentation.

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

- (1) F.J. BOWATER (1986) – The economics of modern beef chilling systems - Proceedings of the International Institute of Refrigeration, Commission C2, Bristol, Vol.3, p.165-170.
- (2) A.E. WOOTON (1986) – Factors affecting the chilling rate of beef sides – Proceedings of the International Institute of Refrigeration, Commission C2, Bristol, Vol.3, p.115-121.
- (3) A. KONDJOYAN, J.D. DAUDIN (1997) – Heat and mass transfer coefficients at the surface of a pork hindquarter – Journal of Food Engineering, 32(2), p.225-240.
- (4) J.D. DAUDIN, R.J.M. VAN GERWEN (1996) – Air circulation: how to cope with this critical point? – New Developments in Meat Refrigeration, Utrecht, p.30-37.
- (5) L. PICGIRARD, P.S. MIRADE (1999) – La maîtrise de l'aérodynamique en abattoir – VPC, Vol.20 (6), p123-130
- (6) P.S. MIRADE (1996) – Contribution à l'amélioration du procédé de traitement de solide grâce à la description et à la simulation de l'aérodynamique – Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers – 125 p.

- (7) P.S. MIRADE, J.D. DAUDIN (1998) – A new experimental method for measuring and visualising air flow in large food plants – Journal of Food Engineering, 36, p.31-49.
- (8) P.S. MIRADE, L. PICGIRARD (2001) – Assessment of airflow patterns inside six industrial beef carcass chillers – International Journal of Food Science and Technology, 36, p.463-475.
- (9) P.S. MIRADE, L. PICGIRARD (1999) – Modélisation de l'aérodynamique d'un local de ressuage de carcasses de boeuf – Revue Générale du Froid, n°999, p.32-36.
- (10) Anonymous (2001) – User's guide – Lebanon: Fluent Inc.
- (11) B.E. LAUNDER, D.B. SPALDING (1972) – Mathematical models of turbulence – London and New York: Academic Press.
- (12) S.V. PATANKAR, D.B. SPALDING (1972) – A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows – International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, p.1787-1806.