

MODELISATION SPATIALE DU STRESS THERMIQUE DANS DEUX TYPES DE BATIMENTS POUR POULETS DE CHAIR.

Yann Guyot¹, Maxime Quentin¹

*1 ITAVI - L'institut technique des filières avicole, cunicole et piscicole,
7 rue du Faubourg Poissonnière, 75009 Paris, France
guyot@itavi.asso.fr*

RÉSUMÉ

La chaleur intense peut avoir plusieurs conséquences sur les poulets de chair, telles que l'inconfort, la diminution de l'ingestion et du gain de poids, ainsi qu'un taux de mortalité élevé. De plus, le réchauffement climatique tend à augmenter la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur, ce qui aggravera le phénomène. Une bonne gestion de l'environnement dans les bâtiments pour poulets de chair est cruciale pour faire face à ce problème. Un indicateur combinant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air, connu sous le nom d'indice de température humidité et vitesse d'air (THVI), peut être utilisé pour évaluer le stress thermique et la dégradation du bien-être au fil du temps. Cependant, les gradients de température, d'humidité et de vitesse d'air peuvent être importants dans les bâtiments de volailles de chair et difficiles à mesurer. Les simulations de Computational Fluid Dynamics (CFD) sont un outil efficace pour appréhender ces gradients (distribution tridimensionnelle et amplitudes). Cette étude propose de modéliser par CFD les niveaux de stress thermique à l'échelle des bâtiments. Dans un premier temps, des pré-simulations ont été menées afin d'estimer les paramètres pour modéliser la zone occupée par les animaux en tant que milieu poreux en fonction du poids vif et de la densité animale. Dans un deuxième temps, deux configurations représentatives de bâtiments typiques pour poulets de chair en France ont été conçues. Ces configurations diffèrent par leurs dimensions et leurs modes de ventilation. Pour chacune de ces configurations, des simulations CFD à l'échelle du bâtiment ont été réalisées afin d'estimer les cartographies THVI au niveau des animaux. Enfin, à partir des distributions THVI, des cartographies de stress thermique en termes d'augmentation de la température corporelle au fil du temps d'exposition ont été produites. Ce type de modélisation peut être considéré comme un outil permettant d'évaluer les risques et l'intensité de stress thermique dans des conditions climatiques chaudes et d'étudier le potentiel de refroidissement des animaux d'équipements supplémentaires (ventilateurs, pad-cooling, ...).

ABSTRACT

Spatial Modelling of Heat Stress in Two Different Broiler Houses

Intense heat can have several consequences on broilers, such as discomfort, decreased feed intake and body weight gain, as well as a high mortality rate. Furthermore, climate change tends to increase the frequency and intensity of heatwaves, exacerbating the phenomenon. Effective environmental management within broiler houses is crucial to address this issue. An indicator combining air temperature, relative humidity, and air velocity, known as the Temperature Humidity Velocity Index (THVI), can be used to assess thermal stress and welfare degradation over time. However, temperature, humidity, and air velocity gradients can be significant in broiler houses and challenging to measure. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are an efficient tool for understanding these gradients (three-dimensional distribution and amplitudes). This study proposes modeling thermal stress levels at the building scale using CFD. Initially, pre-simulations were conducted to estimate parameters for modeling the animal occupied zone as a porous medium based on live weight and animal density. Subsequently, two representative configurations of typical broiler houses in France were designed. These configurations differ in their dimensions and ventilation modes. For each of these configurations, broiler house scale CFD simulations were performed to estimate THVI maps at the animal level. Finally, based on the THVI distributions, thermal stress maps in terms of increased body temperature over time of exposure were produced. This type of modeling can be considered as a tool to assess the risks and intensity of thermal stress under hot climatic conditions and to study the cooling potential of additional equipment (fans, pad-cooling, etc.).

INTRODUCTION

Des températures élevées peuvent engendrer divers effets indésirables chez les poulets de chair, tels qu'un inconfort, une réduction de l'ingéré et du gain de poids, et lors d'épisodes extrêmes, à une hyperthermie pouvant conduire à la mort. Le réchauffement climatique tend à augmenter la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur, ce qui aggraverait ces phénomènes. Une conception efficace du bâtiment d'élevage des poulets de chair facilite une gestion efficace du stress thermique (par la température, l'humidité et la vitesse d'air) et contribue à réduire la température ressentie par les animaux. Un indice utilisé pour évaluer les niveaux de stress thermique chez les poulets de chair est le THVI (Tao & Xin, 2003), qui est une combinaison de la température sèche, de l'humidité relative et de la vitesse d'air. Les auteurs fournissent également des relations mathématiques liant cet indice au temps d'exposition d'individus isolés et à l'augmentation de la température corporelle. Bien que la mesure de la température et de l'humidité en un point donné soit aisée dans un bâtiment d'élevage, la mesure précise de la distribution spatiale de ces dernières ainsi que des vitesses d'air est complexe, passant par des appareils de mesure coûteux ou imprécis. Une alternative à la prise de mesure est l'utilisation de modèles mathématiques telle que la CFD (Computational Fluid Dynamics). La CFD constitue un outil puissant pour résoudre les équations de la mécanique des fluides associées à celles de la thermodynamique, et son utilisation dans la gestion des bâtiments d'élevage est en augmentation (Du *et al*, 2019 ; Osorio Saraz *et al*, 2013; Rojano *et al*, 2015). La présente étude propose une approche CFD pour modéliser en trois dimensions (3D) les vitesses d'air, la température et l'humidité. Les projections en 2D (au sol) du THVI pour des poulets de chair et les niveaux de stress correspondants en fonction du temps d'exposition en sont ainsi extraits.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Modélisation des flux d'air et des gradients de température et d'humidité au niveau des animaux

La réalisation de simulations CFD avec un grand nombre de poulets de chair peut demander d'importantes ressources informatiques. Une stratégie classique consiste à considérer la Zone Occupée par les Animaux (ZOA) comme un milieu poreux, comme décrit dans des études précédentes (Bjerg *et al*, 2013 ; Cheng *et al*, 2018 ; Du *et al*, 2019). Une première étude préalable a été menée pour déterminer les paramètres physiques (résistances inertielles et visqueuses) nécessaires pour modéliser la ZOA comme un milieu poreux en fonction du poids vif et de la densité animale. Ces paramètres ont été obtenus en appliquant numériquement différentes vitesses dans

un volume représentatif occupé par des animaux (1m x 1m x 0.3m). Par la suite, le gradient de pression à travers le volume représentatif a été calculé, et les deux résistances ont été déterminées à l'aide d'un ajustement polynomial (Guyot *et al*, 2022).

Une fois la présence des animaux incluse dans le modèle, il est alors possible de simuler la dynamique globale de l'air et de la chaleur dans l'ensemble du bâtiment d'élevage.

Deux configurations différentes de bâtiments d'élevage de poulets de chair ont été sélectionnées, représentatives du parc Français. Le premier est un bâtiment de type « colorado », à extraction latérale (Figure 2), le deuxième correspond à une extraction longitudinale (Figure 3). Pour chacune des configurations, les coques ont été reproduites en 3 dimension à l'aide du logiciel *salome-platform* (Figures 2a et 3a) et exportée au format stéréolithographique (STL). Ensuite, un maillage du volume des bâtiments a été généré via le module *snappyhexmesh* du logiciel de CFD open-source *OpenFoam* (Greenshields 2003).

Le modèle turbulent k-ε (Mohammadi & Pironneau, 1993), a été utilisé pour modéliser l'écoulement de l'air, et les équations de transport ont été utilisées pour la température et l'humidité spécifique (quantité d'eau sous forme de vapeur). Les équations de la turbulence ont été résolues numériquement à l'aide du *solver SIMPLE* d'*OpenFOAM*. Afin d'évaluer l'effet refroidissant des dispositifs de brumisation, un terme de source volumique décrivant l'effet d'évaporation a été ajouté aux équations de transport, correspondant au débit d'eau ajoutée et à la réduction de chaleur associée (le processus physique d'évaporation n'a pas été inclus, seul l'énergie nécessaire a été retirée du bilan de 2.45 MJ pour l'évaporation d'un kilogramme d'eau). Dans le but de comparer les résultats avec et sans système de brumisation, deux simulations ont été effectuées pour chaque type de bâtiment, l'une avec une addition de 500 l/h d'humidité et l'autre avec 0 l/h. L'influence de la charge animale sur le bilan thermique a été ajoutée, les gains de chaleur sensible et latente générés par les poulets ont été inclus aux équations de la température et de l'humidité spécifique respectivement comme source volumique dans la ZOA. En l'absence de mesures actualisées en conditions de forte chaleur, les équations de la CIGR (2002) ont été utilisées pour estimer ces flux :

$$H_{tot} = 10.62BW^{0.75} \left(1 + \frac{20(20 - T)}{1000} \right)$$
$$H_{sens} = 0.61H_{tot} - \left(\frac{0.228}{1000} \right) T^2$$
$$H_{lat} = H_{tot} - H_{sens}$$

Avec H_{tot} la chaleur totale (W), H_{sens} la chaleur sensible, H_{lat} la chaleur latente et T la température au niveau de l'animal. Pour chaque configuration de bâtiment, des simulations ont été réalisées avec un

poids vif de 1,8 kg et une densité animale de 21 animaux/m² qui correspondent à la fin de la période d'élevage de poulet à croissance rapide, période la plus sensible au stress thermique.

1.2. Conditions de bord

Afin d'illustrer la capacité du modèle à cartographier les niveaux de stress thermique au niveau des animaux, des conditions de bords (valeurs extérieures au domaine de calcul) estivales de 30°C et 45% ont été ajoutées au modèle. La vitesse d'air a quant à elle été fixée au niveau des extracteurs comme la valeur correspondant au débit maximal de chaque turbine et ventilateur (40000 et 25000 m³/h respectivement), comme cela serait le cas en période de forte chaleur. Dans les conditions simulées, l'hypothèse a été faite que les transferts thermiques par les parois soient négligeables par rapport aux transferts par convection (292 et 230 m³/h/m² pour le Colorado et le longitudinal respectivement).

1.3. Calcul du stress thermique

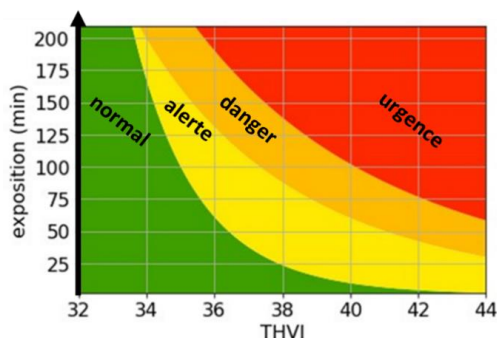
Après chaque simulation CFD (2 bâtiments × 2 niveaux de brumisation), une coupe au niveau de la ZOA a été réalisée afin d'extraire la cartographie 2D des variables clefs (vitesses d'air (Figure 2b et 3b), température sèche et humidité relative) et d'en générer celle du THVI. Tao & Xin (2003) expriment le THVI comme suit :

$$THVI = (0.85 \cdot T_{db} + 0.15 \cdot T_{wb})u^{-0.058}$$

Avec T_{db} la température sèche, T_{wb} la température humide et u la vitesse d'air. Les cartographies des THVI sont visibles en Figure 2c et 3c. Les auteurs relient cet indice au stress thermique en présentant des équations pour l'accroissement de la température corporelle de poulets en cages individuelles (ΔT_b) et définissent quatre états d'homéostasie ($\Delta T_b = 1^\circ\text{C}$, 2.5°C , 4°C et $>4^\circ\text{C}$, ou normal, alerte, danger et urgence, respectivement) avec trois durées d'exposition différentes (DE) pour passer d'un état à un autre (Figure 1) en fonction du THVI

$$DE = \begin{cases} 2 \cdot 10^{29} \cdot THVI^{-17.68} \text{ pour } \Delta T_b = 1^\circ\text{C} \\ 4 \cdot 10^{13} \cdot THVI^{-7.38} \text{ pour } \Delta T_b = 2.5^\circ\text{C} \\ 3 \cdot 10^{11} \cdot THVI^{-5.91} \text{ pour } \Delta T_b = 4^\circ\text{C} \end{cases}$$

Figure 1. Temps d'exposition pour passer d'un état d'homéostasie à un autre en fonction du THVI



A partir de ces relations mathématiques, des cartographies de l'évolution des niveaux de stress au cours des 3h qui suivent le début de l'exposition aux températures élevées constantes ont été générées (Figures 2d et 3d).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des simulations pour chaque type de bâtiment peuvent être observés sur la Figure 2 (ventilation latérale, Colorado) et la Figure 3 (ventilation longitudinale).

Les résultats montrent une diminution du stress thermique pour le bâtiment équipé d'un système de refroidissement. La proportion de poulets non exposés à un stress particulier est de 71% pour les bâtiments Colorado équipés de brumisation contre 5% pour ceux non équipés, et ce au bout de 3h d'exposition (pourcentage calculé comme l'aire de la zone d'homéostasie normale (vert) sur la surface totale, Figure 2e). Cette différence est de 61% (avec brumisation) contre 14 % (sans brumisation) pour les bâtiments longitudinaux (Figure 3e). Les deux bâtiments ont tendance à montrer des zones de THVI élevés, principalement en raison de vitesses d'air très faibles dans certaines zones (sous les entrées d'air pour les deux configurations ou à l'opposé des extracteurs pour la configuration longitudinale).

L'apport de chaleur par les animaux s'appuie sur le modèle CIGR (2002), cependant, une incertitude pouvant aller jusqu'à 50% existe autour de cette moyenne (Chétouane *et al* 2019). Cette variabilité, notamment due aux variations entre nuit et jour, pourrait impliquer une sous-estimation du stress.

Le modèle fait l'hypothèse que la température n'évolue pas au cours des 3h qui suivent le début de l'exposition au stress, ce qui peut être le cas lors de chaudes journées d'été. Cependant d'autres configurations météorologiques sont possibles (fortes températures sur un court pas de temps suivies d'heures plus froides, température modérées fluctuantes pouvant également conduire à un stress thermique moins important mais tout de même potentiellement dommageable. L'approche stationnaire développée ici permet une étude du dimensionnement des équipements de refroidissement, en cherchant par exemple à minimiser les zones à fort THVI. Une approche instationnaire permettrait de tenir compte de ce type de fluctuations journalières, cependant, les différences d'échelles (temps et espace) rendraient les simulations extrêmement coûteuses en temps et capacités de calculs.

Le modèle considère également une densité animale homogène dans toute la ZOA, Ceci constitue une limitation du modèle, en effet il n'est pas rare que les animaux fuient les zones du bâtiment où le THVI est élevé, entraînant des densités hétérogènes pouvant aggraver le phénomène de stress thermique en

déplaçant et accentuant les zones de forts THVI (zones très denses donc très chaudes).

Quantifier plus finement les niveaux de stress endurés par les animaux au cours d'un lot permettrait également d'apporter des connaissances plus fines sur les relations entre fortes chaleurs et performances zootechniques. Par exemple, il pourrait être envisagé de calculer *a posteriori* la charge thermique (degré-jour) d'un lot de poulet aux performances données et d'en déterminer des lois de réponse. De telles lois pourraient être utilisées pour prospecter les potentielles pertes dues au réchauffement climatique et d'envisager les solutions appropriées.

CONCLUSION

La présente étude propose une méthodologie numérique pour évaluer le niveau de stress thermique des poulets de chair dans des bâtiments dynamiques. Une approche multi-échelle a été développée (échelle des animaux et échelle du bâtiment) afin de prendre en compte l'incidence du poids vif et de la densité animale sur les vitesses d'air. Des simulations multi physiques ont été réalisées pour obtenir la cartographie

du THVI au niveau des animaux pour une condition donnée (climat extérieur, présence ou non d'un système de refroidissement). Le présent modèle pourrait être utile dans le dimensionnement des systèmes de brumisation et de brassage d'air en permettant de trouver le meilleur compromis entre des zones de stress les plus petites possibles et une utilisation modérée de l'eau, dans un contexte de raréfaction de la ressource. Le modèle peut être utilisé comme outil d'objectivation du bien-être des poulets dans un bâtiment donné, en cas de chaleur importante. Il pourrait également être utilisé comme outil d'évaluation de l'efficacité d'un système de ventilation donné. Le modèle peut également être utilisé comme outil prospectif pour évaluer le potentiel de brasseurs d'air : modèle, nombre et position pour éviter les zones à fort THVI.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec l'aide financière du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire dans le cadre du projet CASDAR MelBA(2020-2022).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bjerg, B., Cascone, G., Lee, I.-B., Bartzanas, T., Norton, T., Hong, S.-W. Zhang, G. 2013. Biosyst Eng, 116(3), 259-275.
- Cheng, Q. Y., Li, H., Rong, L., Feng, X. L., Zhang, G. Q., & Li, B. M. 2018. Comput Electron Agric, 151, 165-174
- Chetouane W., Robin P, Amand G., Keita A., Tavares M., Nicolas C., Créach P., Prigent JP., Pigache E., Rousset N., (2019), JRAPFG
- CIGR. S. Pedersen, K. Sälvik (Eds.), Dan Inst Agric Sci. 2002, pp. 1-46
- Du, L. H., Yang, C. W., Dominy, R., Yang, L., Hu, C. M., Du, H. R., . . . Jiang, X. S. 2019. Comput Electron Agric 159, 1-15
- Greenshields, C. (2023). OpenFOAM v11 User Guide. The OpenFOAM Foundation.
- Guyot Y, Cissé S, Quentin M, (2022) JRAPFG
- Mohammadi, B., & Pironneau, O. (1993). Analysis of the k-epsilon turbulence model.
- Osorio Saraz, J. A., Arêdes Martins, M., Oliveira Rocha, K. S., Silva Machado, N., & Ciro Velasques, H. J. 2013. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 16, 159-166.
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2015). Biosyst Eng, 136, 25-38
- Tao, Xiuping & Xin, Hongwei. (2003). Transaction of the ASAE 46(2), 491

Figure 2. Résultats de simulations pour le bâtiment Colorado a) représentation tri-dimensionnelle du bâtiment et de la ZOA (rouge). b) répartition des vitesse d'air dans la ZOA. c) cartographies des THVI avec (gauche) ou sans brumisation (droite). d) zones à risques en termes d'accroissement de la température corporelle au bout de 3 heures e) évolution temporelle du pourcentage de la ZOA exposées pour chaque zone à risque

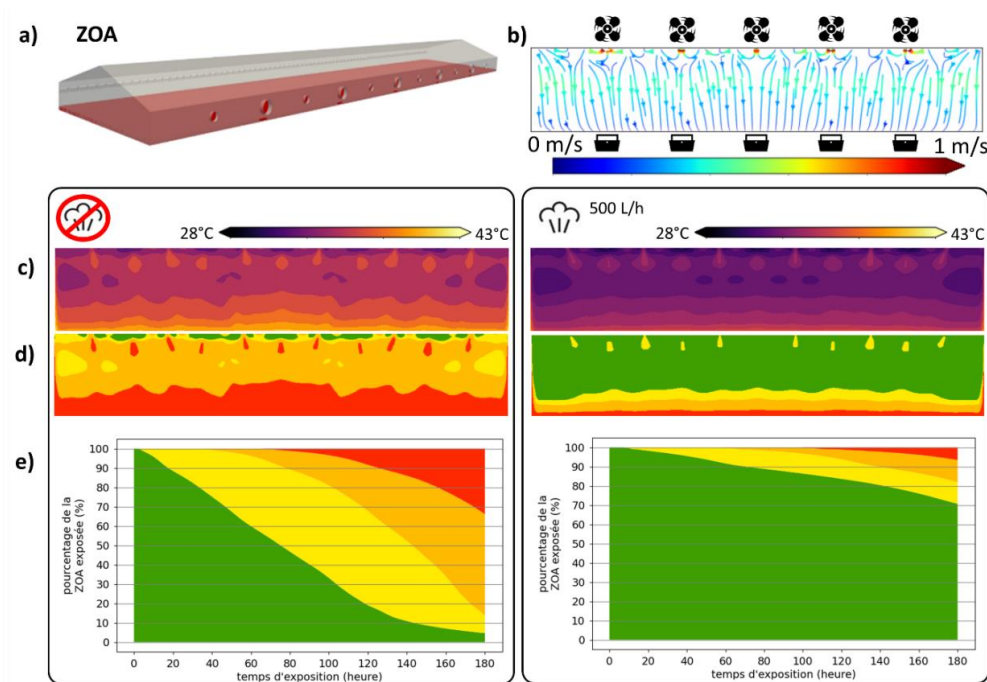


Figure 3. Résultats de simulations pour le bâtiment à ventilation longitudinale. a) représentation tri-dimensionnelle du bâtiment et de la ZOA (rouge). b) répartition des vitesse d'air dans la ZOA. c) cartographies des THVI avec (gauche) ou sans brumisation (droite). d) zones à risques en termes d'accroissement de la température corporelle au bout de 3 heures e) évolution temporelle du pourcentage de la ZOA exposées pour chaque zone à risque

