

MODELISATION HORAIRE DES PRODUCTIONS DE CHALEUR ET DE DIOXYDE DE CARBONE EN ELEVAGE DE POULETS DE CHAIR

Chetouane Wejden¹, Robin Paul¹, Amand Gérard², Keïta Alassane³, Tavares Manuel³, Nicolas Christian⁴, Créach Pauline², Prigent Jean-Philippe⁵, Pigache Elodie⁶, Rousset Nathalie²

¹INRA, UMR SAS – F-35000 Rennes, France

²ITAVI – Antenne Ouest – F-22440 Ploufragan, France,

³Anses UEB – Service SELEAC – F-22440 Ploufragan, France,

⁴Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne – F-29270 Carhaix, France

⁵Avipôle Formation – F-22440 Ploufragan, France

⁶Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire – F-49105 Angers, France

chetouen_wejden@yahoo.com

RÉSUMÉ

La modélisation des productions de chaleur en élevage de poulets de chair permet de dimensionner les équipements thermiques et d'optimiser le pilotage de l'ambiance. Les modèles de référence datent d'une quinzaine d'années. L'estimation journalière des productions de chaleur y est déduite du poids vif des animaux et n'intègre ni la diversité des systèmes d'élevage, ni le progrès génétique. Les exigences en matière de bien-être animal et d'environnement nécessitent désormais des simulations à un pas horaire voire plus court. Notre objectif est de proposer un modèle horaire des productions de chaleur, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau intégrant les paramètres zootechniques spécifiques d'un lot commercial de poulets de chair. Pour actualiser les équations de référence, les flux de chaleurs de deux lots de 4580 poulets ont été mesurés, durant 33 jours, dans des conditions similaires à un élevage commercial. Les deux salles d'élevage étaient équipées de capteurs pour l'enregistrement en continu de l'hygrométrie, de la température, de la teneur en CO₂, de la durée d'éclairage, du débit de ventilation et du chauffage. Les données zootechniques usuelles nous ont permis de calculer les bilans de masse d'eau et de carbone. Une nouvelle conception pour modéliser la production de chaleur est proposée. Les principaux paramètres de la relation allométrique sont calés sur les phases nocturnes en raison de la stabilité observée des flux. Sur la durée totale du lot, à l'intérieur d'un cycle de 24 h, les productions de chaleur peuvent varier entre -1 W animal⁻¹ et + 50 % de la production de chaleur nocturne. Ne pouvant expliquer les cinétiques au cours des périodes diurnes, la production de chaleur totale est encadrée. La valeur de la conversion d'énergie en CO₂ a été actualisée à 0,197 L CO₂ h⁻¹ W⁻¹. Lorsque la température intérieure reste proche de la consigne, une baisse de l'hygrométrie intérieure entraîne une augmentation de l'évaporation diurne. Les perspectives sont d'appliquer ce modèle au pilotage de l'ambiance et au dimensionnement thermique des bâtiments de poulets.

ABSTRACT

Modeling heat and Carbon Dioxide production of a broiler house at hourly time step

Models of heat production of broilers are used to design the thermal equipment to optimize climate control. The reference models are now around fifteen years old. Daily values of heat productions are deduced from the live weight of broilers and do not integrate the diversity of livestock systems and the genetic progress's evolution. Animal welfare and environmental issues now require simulations at an hourly time step or even shorter. Our objective is to propose an hourly model of heat, carbon dioxide and water vapor productions incorporating the zootechnical parameters specific of a commercial batch of broilers. To update the reference equations, we measured the heat fluxes of two lots of 4580 chickens, during 33 days, in conditions similar to commercial farming. Both breeding rooms were equipped with sensors for continuous recording of hygrometry, temperature, CO₂ concentration, lighting duration, ventilation rate and heating. The usual zootechnical data enabled us to calculate the balance of water and carbon mass. We propose a new model design for heat production. The main parameters of the allometric relationship are calibrated with the nocturnal phases because of the observed stability of fluxes. Over the total duration of the batch, within a 24-hour cycle, heat outputs can vary between -1 W animal⁻¹ and + 50 % of the night heat output. Since we cannot explain the kinetics during the daytime periods, we propose to border the total heat production. The value of energy conversion to CO₂ has been updated to 0,197 L CO₂ h⁻¹ W⁻¹. When indoor temperature remains near the temperature setpoint, diurnal evaporation increases when indoor hygrometry decreases. The perspectives are to apply this modeling to climate control and thermal design of broiler houses.

INTRODUCTION

La Directive qui établit des normes minimales de bien être pour la protection des poulets de chair (CCE, 2007) fixe un seuil maximum de teneur de dioxyde de carbone (CO₂) de 3000 ppm au sein du bâtiment d'élevage, sur toute la durée de l'élevage. Le CO₂ est apporté principalement par les animaux. Cependant, le chauffage est susceptible d'y contribuer fortement en cas de combustion directe à l'intérieur du bâtiment. La concentration en CO₂ diminue lorsque le débit de ventilation augmente. Pendant la période endothermique, l'augmentation de la ventilation engendre une surconsommation d'énergie nécessaire au fonctionnement des appareils de chauffage. Il en résulte un impact économique non négligeable pour l'éleveur et une augmentation de l'impact environnemental de l'élevage. La modélisation des productions de chaleur en élevage de poulets de chair permet de dimensionner le chauffage, la ventilation et l'isolation thermique du bâtiment et d'optimiser le paramétrage des boîtiers de régulation d'ambiance. La précision horaire du modèle permet de moduler l'optimum de débit minimum entre la nuit (refroidissement extérieur et augmentation du chauffage), le jour (activité des animaux et diminution du besoin de chauffage) et les journées humides (augmentation de la ventilation pour garder une litière sèche). Les exigences en matière de bien-être animal et d'environnement nécessitent désormais des simulations à pas de temps horaires voire plus courts. Or, les modèles de référence datent d'une quinzaine d'années (CIGR, 2002 ; Xin *et al.*, 2001). L'estimation journalière y est déduite du poids vif des animaux (PV) et n'intègre ni la diversité des systèmes d'élevage, ni le progrès génétique. Ces modèles sont assez fiables en valeur moyenne mais la dispersion de leurs valeurs horaires de chaleur (Xin *et al.*, 2001) et de production de CO₂ (Calvet *et al.*, 2011) ne permettent pas une prédiction précise. Le métabolisme énergétique des poulets est à l'origine de ces flux, d'où le recours à des facteurs de conversion de la chaleur produite en CO₂ (Pedersen *et al.*, 2008). Il existe deux sources d'incertitudes pour cette conversion : les spécificités du lot élevé (litière, aliment, mode d'abreuvement, climat, ventilation, ...) et la dynamique des émissions, notamment les transitions entre les phases nocturnes et diurnes (Calvet *et al.*, 2011). L'objectif de l'étude est de proposer un modèle horaire des productions de chaleur, de CO₂ et de vapeur d'eau pouvant s'adapter aux paramètres zootechniques spécifiques d'un lot commercial de poulets de chair.

1. MATERIELS ET METHODES

Bâtiment expérimental

Deux salles identiques de 270 m² et indépendantes, situées dans le même bâtiment (ANSES, Ploufragan), ont été utilisées avec le même régime lumineux en

période printanière (10 à 25 °C extérieur). Une salle était équipée d'un brassage d'air modéré destiné à homogénéiser l'ambiance (SB). La salle non brassée (SNB) était exposée à la stratification thermique en début de lot. Seules les observations sur la salle brassée ont été utilisées pour caler le modèle. Les observations sur la salle non brassée ont été utilisées pour évaluer la validité du modèle. Les mêmes consignes de température et d'hygrométrie ont été utilisées pour réguler la ventilation de chaque salle. Le débit minimum est resté stable à 1 m³ h⁻¹ kg⁻¹ PV durant tout le lot, hormis deux journées pour tester l'effet du débit minimum sur les consommations de gaz et les teneurs en CO₂ (J₆ et J₇) et une journée où un aérotherme était en panne (J₅). Les mêmes aliments commerciaux ont été distribués (starter : J₁ à J₁₂, croissance : J₁₃ à J₂₁, finition : J₂₂ à J₃₀, retrait : J₃₁ à J₃₃). La mortalité quotidienne a été relevée.

Paramètres techniques et de bien être

Un effectif de 4580 poussins ROSS 308 a été mis en place dans chaque salle. A J₁₂, J₂₂, J₂₆ et J₃₂, un échantillon représentatif de 200 poulets par salle a été pesé individuellement pour déterminer le poids moyen et les indices de consommation correspondants. La date d'abattage (33 jours) a été définie en tenant compte du poids moyen objectif de l'abattoir (1,67 kg PV poulet⁻¹ pour les 2 lots).

Paramètres environnementaux

La température, le taux d'hygrométrie relative et la teneur en CO₂ intérieure et extérieure ont été mesurées en continu de J₀ à J₃₂ (Vaisala HMD70 ; Innova 1412 ; Vaisala GMP 252 ; Campbell Scientific 21X et 23X). Les temps de fonctionnement des aérothermes, des ventilateurs et de l'éclairage ont été enregistrés par des pinces ampèremétriques (Kimo). La quantité de fumier a été pesée après le départ des animaux à l'abattoir. Six échantillons de fumier par salle ont été prélevés pour l'analyse de matière sèche.

Calage des paramètres du flux de chaleur totale

La forme mathématique choisie pour représenter la production de chaleur totale est une relation allométrique (CIGR 2002 ; équation [1]) :

$$[1] \quad \varphi_{tot} = a_{Htot} PV^{b_{Htot}}$$

où φ_{tot} est la production de chaleur totale en W poulet⁻¹, PV est le poids vif en kg poulet⁻¹, a_{Htot} et b_{Htot} sont des coefficients de calibration, variables selon les auteurs, pour lesquels la CIGR (2002) propose de retenir 10,62 et 0,75 pour des poulets en croissance élevés sur litière. En raison de la stabilité nocturne des flux de production de chaleur totale, par opposition à la variabilité diurne des flux, les coefficients de cette relation allométrique ont été calés sur les seuls flux nocturnes dans notre cas. Ce choix permet de réduire l'incertitude de prédiction déjà observée par Xin *et al.* (2001). Les coefficients sont

déduits de la régression linéaire entre les logarithmes de la chaleur totale et les logarithmes du poids vif.

Le calage d'une seule relation de J_0 à J_{32} induit un biais, notamment sur l'estimation de la production de chaleur durant la phase de démarrage. Pour le réduire, deux relations ont été calées en se basant sur le changement d'aliment à J_{13} .

L'augmentation des flux diurnes est attribuée à l'activité des animaux, difficilement prédictible. En conséquence, pour représenter la dispersion possible des flux sur 24 h, la valeur théorique est encadrée par une valeur minimale ($\max[\varphi_{tot} - 1 ; \varphi_{tot} \times 0,5]$) et une valeur maximale ($\max[\varphi_{tot} + 1 ; \varphi_{tot} \times 1,5]$).

Calage des flux de chaleur latente et de CO_2

La part de chaleur latente nocturne ($\varphi_{lat} : \varphi_{tot}$) a augmenté de J_0 à J_3 (23 à 55 %) puis a diminué, pour rester stable à 40 % à partir de J_{15} . Comme déjà observé par Xin *et al.* (2001), la part de chaleur latente augmente lorsque l'hygrométrie intérieure diminue. Dans l'étude réalisée la part de chaleur latente augmentait d'environ 40 % en période diurne (φ_{lat} à $\varphi_{lat} \times 1,4$) lorsque l'hygrométrie baissait de 70 à 50 %.

La CIGR (2002) propose un facteur de $0,185 \text{ L } CO_2 \text{ h}^{-1} \text{ W}^{-1}$ pour déduire la production de CO_2 de la production de chaleur totale (équation [1]). Le facteur de conversion est voisin de 0,12 (0,117 à 0,127) pour la combustion de propane. Le facteur augmente lorsque davantage de CO_2 est émis par le métabolisme anaérobie, notamment celui de la litière. Ici, la valeur de $0,197 \text{ L } CO_2 \text{ h}^{-1} \text{ W}^{-1}$ a été déduite de la confrontation des pertes de chaleur totale de chaque salle (animaux + litière + aérotherme) et des émissions de CO_2 , sachant que la contribution de l'aérotherme, majoritaire en début de lot, s'annule en fin de lot.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Production de chaleur totale

Les paramètres des relations allométriques ont été déduits des régressions observées sur la salle SB (Figure 1a). La production de chaleur totale nocturne pour la phase de croissance (J_0 à J_{13}) est représentée par l'équation [2] :

$$[2] \quad \varphi_{tot, nuit} = 17,05 \times PV^{1,22}$$

pour la phase de finition (J_{13} à J_{33}) par l'équation [3] :

$$[3] \quad \varphi_{tot, nuit} = 8,76 \times PV^{0,78}$$

L'exposant pour la phase de finition est proche de celui du poids métabolique ($PV^{0,75}$). Le facteur de la relation allométrique pour la phase de finition est dans la gamme observée par Pedersen et Thomsen (2000 : 8,2 à 11,5 ; entre J_{16} et J_{35}). Le calage sur la phase nocturne peut expliquer la valeur faible du facteur dans l'équation [3]. Pour la période de démarrage, les trois valeurs observées par Pedersen *et al.* (2008) confirment nos observations (Figure 1a).

La production de chaleur totale augmente en période diurne (Figure 1b). L'amplitude voisine de 50 % de la chaleur nocturne (ou au minimum 1 W poulet^{-1}) est confirmée par les observations de Xin *et al.* (2001). Le déterminisme de cette augmentation reste incertain (Xin *et al.*, 2001 ; Calvet *et al.*, 2011). Il est en conséquence plus robuste de prédire simplement un intervalle de confiance des valeurs horaires de chaleur totale au cours d'une période de 24 h. La production de chaleur nocturne étant stable, la modulation de l'estimation théorique est envisageable, dans les élevages équipés d'une mesure de ventilation, en fonction des observations de bilan thermique.

Les productions de chaleur latente sont représentées avec moins de dispersion par le modèle développé que les productions de chaleur totale (Figure 2 ; hypothèse d'une augmentation moyenne de 25 % de la production de chaleur totale diurne). Le calcul de chaleur sensible déduit de la chaleur latente a permis une prédiction fiable des consommations d'énergie thermique sur le lot. Ce résultat confirme celui de Xin *et al.* (2001) qui observait déjà une meilleure prédiction de la chaleur latente en utilisant l'hygrométrie de l'air intérieur. En revanche le modèle CIGR (2002) surestime fortement les valeurs. Cette surestimation est due à l'influence de la température ambiante, avec une hypothèse de thermoneutralité des poulets à $20 \text{ }^\circ\text{C}$, alors que la température ambiante descend progressivement de 32 à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dioxyde de carbone

Les concentrations en CO_2 ont été élevées en début de lot (2500 à 6000 ppm) en raison de la combustion de gaz du chauffage à l'intérieur de la salle d'élevage et d'un débit d'air faible, légèrement supérieur à la préconisation européenne ($0,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ PV}$; SCAHAW, 2000).

La prédiction de la production de CO_2 est basée sur un facteur de conversion de la production de chaleur totale en CO_2 . Le facteur calé dans le modèle ($0,197 \text{ L } CO_2 \text{ h}^{-1} \text{ W}^{-1}$) est légèrement supérieur à la gamme indiquée par Pedersen *et al.* (2008 ; 0,154 à 0,185 pour les poulets). Il est nettement inférieur à celui observé par Calvet *et al.* (2011 ; 2,60 à $3,71 \text{ L h}^{-1}$ pour un poulet de 1 kg PV alors que notre calcul indique 1,73). Il est en revanche identique à la moyenne observée par Para *et al.* (2003 ; $1,72 \text{ L h}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ PV}$). Ces écarts peuvent être dus à une contribution de la litière pouvant varier entre 4 et 35 % (Pedersen *et al.*, 2008 ; Calvet *et al.*, 2011 ; Para *et al.*, 2003). En conséquence, il apparaît souhaitable de calculer les flux cumulés de carbone sur le lot pour s'assurer de l'absence de biais dans l'estimation des prédictions de CO_2 (Henn *et al.*, 2015).

La dispersion importante des prédictions de chaleur totale induit dans le cas de l'étude une dispersion des prédictions de CO_2 (Figure 3). Calvet *et al.* (2011) constatent également que la variabilité des émissions nocturnes de CO_2 est moindre qu'en période diurne.

Ils suggèrent que cette difficulté de prédiction est liée à l'absence de synchronisation des flux horaires de chaleur totale (thermique) et de CO₂ (métabolique). En conséquence, les débits de ventilation déduits d'hypothèses sur le flux de CO₂ devraient être associés à une incertitude voisine de ± 25 %.

Bilans de carbone et d'eau

La vérification du calcul basé sur la production de chaleur a été faite par des bilans d'eau et de carbone simplifiés (évaporation = ingéré x 0,88 – gain PV x 0,6 ; émission C = ingéré x 0,76 – gain PV x 0,2). Pour les flux cumulés d'évaporation et de CO₂ le biais de notre modèle est inférieur à 5 %, ce qui fournit une estimation plus juste que celle de la CIGR (2002).

CONCLUSION

Des équations ont été établies pour prédire la production de chaleur totale des poulets en fonction du poids vif au pas de temps horaire. En s'appuyant sur des valeurs stables de chaleurs totale et latente, en période nocturne, le modèle peut être adapté à chaque lot de poulet.

Le CO₂ produit dans le bâtiment d'élevage dépend du poids vif, du stade physiologique, de la contribution de la litière et du programme lumineux. Pour les lots observés, il était en moyenne de 0,197 L CO₂ h⁻¹ W⁻¹.

Les flux de chaleur et la production métabolique de CO₂ ne sont pas nécessairement synchronisés. Une incertitude voisine de ± 25 % devrait être associée à

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Calvet, S., F. Estellés, M. Cambra-López, A. G. Torres, and H. F. A. Van den Weghe, 2011. The influence of broiler activity, growth rate, and litter on carbon dioxide balances for the determination of ventilation flow rates in broiler production. *Poultry Science*, 90, 2449–2458.
- CCE, 2007. Directive du Conseil 2007/43/EC fixant des règles minimales de protection des poulets destinés à la production de viande. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32007L0043>
- CIGR, 1984. Report of working group on Climatization of Animal Houses. Editors: Scottish Farm Building Investigation Unit. Craibstone, Aberdeen, Scotland. ISBN 0 902433 33 4. 80p. <http://www.cigr.org/documents/CIGR-Workinggroupreport1984.pdf>
- CIGR, 2002. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. Heat and moisture production at animal and house levels. Editors: Pedersen, S. & Sällvik, K. ISBN 87-88976-60-2. http://www.cigr.org/documents/CIGR_4TH_WORK_GR.pdf, 46p.
- Henn, J. D., L. Bockor, R. Borille, A. Coldebella, A. M. L. Ribeiro, and A. M. Kessler, 2015. Determination of the equation parameters of carbon flow curves and estimated carbon flow and CO₂ emissions from broiler production. *Poultry Science*, 94, 2303–2312.
- ITAVI-CNEVA, 1998. La gestion technique des bâtiments avicoles. *Sciences et Techniques Avicoles* 1998, hors série, 64 p.
- Para, L., Bis-Wencel, H., Ondrasovic, M., Vargova, M., Ondrasovicova, O., 2003. Production of water vapours and carbon dioxide by broilers under experimental and operation conditions. *Folia veterinaria*, 47, 66-70.
- Pedersen, S., V. Blanes-Vidal, H. Jorgensen, A. Chwalibog, A. Haeussermann, M. J. Heetkamp, and A. J. A. Aarnink, 2008. Carbon dioxide production in animal houses: A literature review. *The CIGR e-Journal*, X, 1-19.
- Pedersen, S., and M. G. Thomsen, 2000. Heat and moisture production of broilers kept on straw bedding. *J. Agric. Eng. Res.*, 75, 177–187.
- SCAHAW, 2000. The Welfare of Chickens Kept for Meat Productions (Broilers). Scientific Committee on Animal Health and Animal Welfare, European Commission, 150p.
- Xin H., Berry I.L., Tabler G.T., and Costello T.A., 2001. Heat and Moisture Production of Poultry and Their Housing Systems: Broilers. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1851-1857.

l'estimation du taux de ventilation horaire déduit d'hypothèses sur les flux de CO₂.

Les cumuls estimés permettent d'évaluer le biais entre le modèle horaire et les flux de carbone et d'eau entrant dans le bâtiment.

Ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer le paramétrage des boîtiers de régulation d'ambiance des bâtiments équipés de capteurs CO₂ et hygrométrie, notamment pour optimiser le débit minimum et détecter une dérive des capteurs.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet GESTCO₂, piloté par l'ITAVI dans le cadre du programme de l'UMT SANIVOL, et financée par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Nous remercions sincèrement l'ensemble des personnes ayant participé aux expérimentations de cette étude, notamment M. Lecomte (INRA), P. Galliot (ITAVI), J. Allain et C. Szypula (ANSES) ainsi que le personnel administratif ayant concouru à sa réalisation (Tiphaine Labbé, INRA ; Katell Gallouet, ITAVI). Nous remercions enfin le cluster ELINNOVE et les participants aux Comités de Pilotage du projet GestCO₂ (Alain Christien, Philippe Roslagadec, Jacques Lemeur, Tuffigo-Rapidex ; Fabrice Poisbeau, Sodalec Distribution ; Anthony Gobin, Lead Leroy Concept ; Philippe Gouault, Cobb Europe ; Claude Toudic, Hubbard Breeders ; David Labbé, éleveur ; Yves Guyon, éleveur).

FIGURES

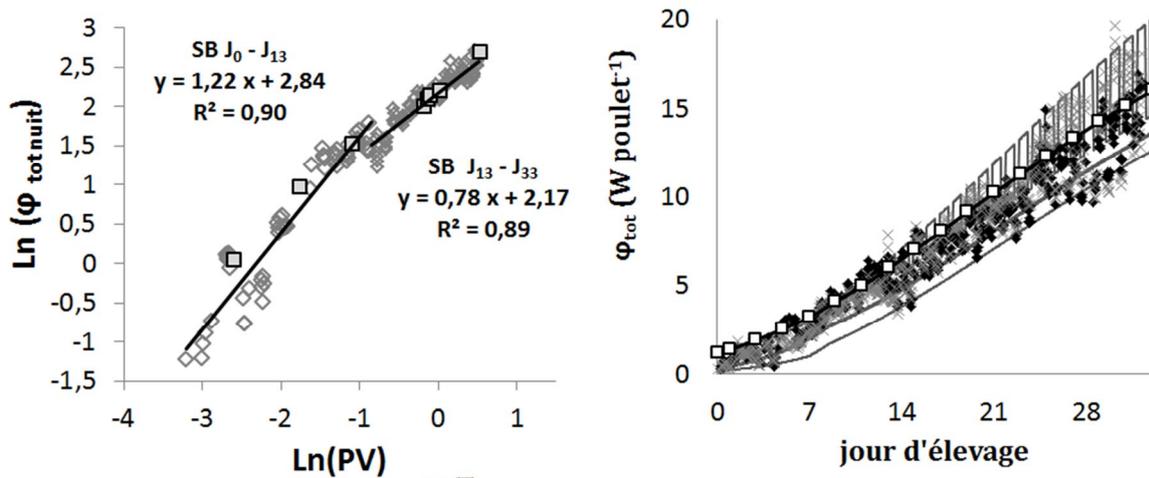


Figure 1 Modèle des flux de chaleur totale nocturne. (a) calage des régressions linéaires sur la salle brassée [SB] ; les losanges représentent nos observations, les carrés sont issus de Pedersen *et al.* (2008). (b) comparaison des flux calculés et observés ; les traits gris représentent la chaleur totale nocturne et les valeurs minimales et maximales de la production de chaleur totale ; les carrés blancs représentent le modèle CIGR (2002) ; les losanges et les croix représentent respectivement les observations des salles SB et SNB.

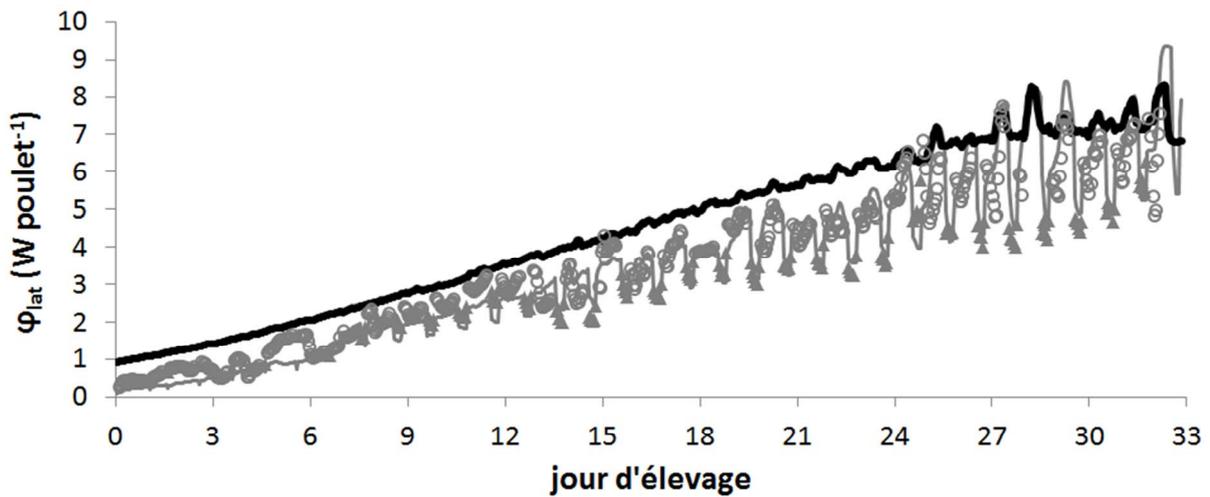


Figure 2 Production de chaleur latente de la salle SNB. Le trait noir représente le modèle CIGR (2002) ; le trait gris notre modèle ; les triangles, les observations nocturnes ; les cercles, les observations diurnes.

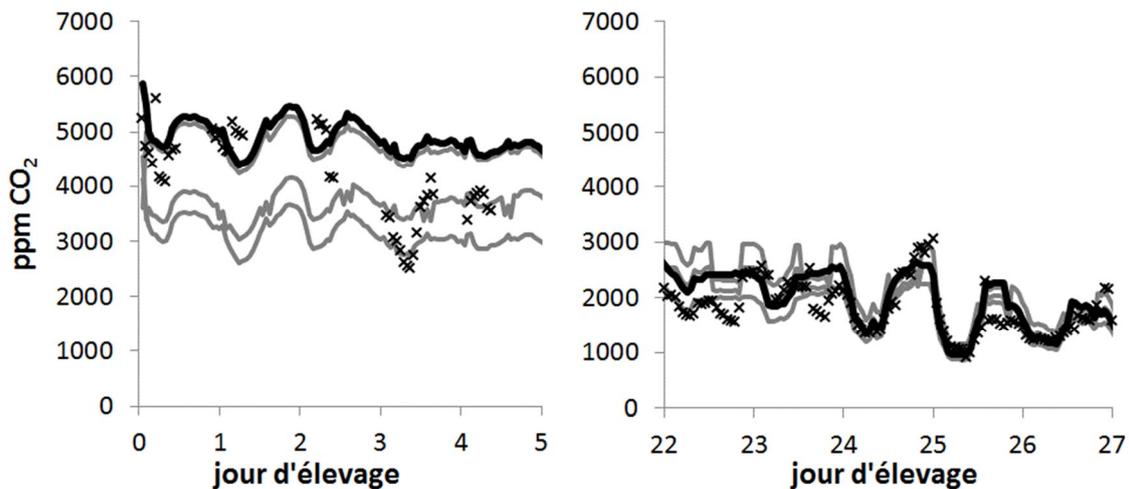


Figure 3 Concentration en CO₂ de la salle SNB en semaine 1 (a) et 4 (b). Les croix représentent les observations ; le trait noir, le modèle GIGR (2002) ; les traits gris, le modèle proposé ici