



Développement et évaluation d'un modèle de conduite du troupeau de truies couplé à un modèle de fonctionnement bioclimatique des salles de gestation

Elise DUBOIS (1), Florence GARCIA-LAUNAY (1), Nathalie QUINIOU (2), Ludovic BROSSARD (1), Michel MARCON (2), Jean-Yves DOURMAD (1), David RENAUDEAU (1)

(1) PEGASE, INRAE-Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

(2) IFIP-Institut du Porc, 35651 Le Rheu, France

florence.garcia-launay@inrae.fr

Développement et évaluation d'un modèle de conduite du troupeau de truies couplé à un modèle de fonctionnement bioclimatique des salles de gestation

Le changement climatique accentue le risque d'exposition des truies à des températures ambiantes élevées, impactant les performances du troupeau et les résultats économiques de l'élevage. Un modèle bioclimatique a été développé pour, d'une part, simuler l'évolution de la température ambiante dans les salles de gestation selon la conduite de l'alimentation, la température extérieure, les caractéristiques du bâtiment et ses équipements et, d'autre part, estimer les effets induits de cette température sur les performances individuelles des truies. Le modèle, à événements discrets pour la conduite des truies, fonctionne avec un pas de temps horaire et associe un modèle individu-centré de conduite du troupeau et un modèle simulant l'équilibre thermique de la salle. La température ambiante résulte du bilan thermique entre les pertes de la salle (parois, ventilation) et les sources de production de chaleur (animaux, chauffage). La production de chaleur de chaque truie est modélisée en fonction de son stade de gestation, son poids et sa conduite alimentaire. Les données de trois bandes de truies sont utilisées pour évaluer la capacité du modèle à prédire la température ambiante. La température simulée est très proche des valeurs observées (erreur moyenne = 0,3 ; 0,2 et 0,8°C ; carré moyen de l'erreur de prédiction = 0,8 ; 0,9 et 1,2°C, respectivement pour les trois bandes). Toutefois, l'amplitude de variation simulée est plus importante que celle observée, particulièrement lors des pics de chaleur. Une meilleure description de la répartition horaire de l'ingestion et du niveau individuel d'activité devrait nous permettre d'améliorer la précision des prédictions du modèle dans le futur. À terme, le modèle devrait être intégré dans un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer la vulnérabilité au changement climatique des élevages naisseur-engraisseur.

Development and evaluation of a sow herd model coupled with a bioclimatic model of gestation rooms

Climate change increases the risk of sow exposure to high ambient temperatures, impacting herd performance and the economic results of farms. A bioclimatic model was developed to simulate dynamics of ambient temperature in gestation rooms as a function of feeding behaviour, outside temperature and characteristics of the building and its equipment, and to predict their effects on individual performances of sows in the herd. The model, with discrete events for sow management, runs on an hourly time step and couples an individual-based module of herd management with a model of the thermal balance of the room. Room temperature results from the heat balance between heat losses (walls, ventilation) and heat sources (animals, heating). The heat production of each sow is modelled as a function of its gestation stage, weight and diet. Data from three batches of sows were used to evaluate the model's ability to predict ambient temperature accurately. Simulated temperatures were very similar to the observed temperatures (mean error = 0.3, 0.2 and 0.8°C; RMSEP = 0.8, 0.9 and 1.2°C, respectively for the three batches). However, the simulated variation amplitude is larger than the observed one, especially during heat peaks. A better description of the hourly distribution of feed intake and individual activity level should improve the accuracy of model predictions. Eventually, the model should be integrated into a decision support tool to assess the vulnerability of swine systems to climate change.

INTRODUCTION

Les effets du changement climatique deviennent de plus en plus rapides et visibles ces dernières années. Au niveau mondial, celui-ci entraîne une augmentation des températures moyennes (Geist, 2022). L'élevage serait responsable de 15 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique (Renaudeau et Dourmad, 2021), incriminées dans cette évolution. Cependant, l'élevage est également impacté par ce changement de manière indirecte et directe (Renaudeau, 2014 ; Renaudeau et Dourmad, 2021). Les effets directs sont imputés aux effets de températures élevées sur les animaux. L'équilibre thermique des truies n'est plus maintenu au-delà d'une température critique (Renaudeau, 2014). Ce seuil critique se situe entre 20 et 22°C en lactation et entre 25 et 32°C en gestation. Au-delà de ce seuil, des mécanismes d'adaptation se mettent en place. Ils permettent de dissiper la chaleur produite et limiter sa production, mais sont associés à une diminution des performances de production (Quiniou *et al.*, 2000). Chez les truies gestantes, l'effet de la température ambiante sur l'ingestion est difficile à observer car celle-ci est limitée par le plan d'alimentation appliqué, en revanche des effets sont observés sur la prolificité des truies, la réussite à l'insémination et la mortalité (Renaudeau *et al.*, 2022). Les fœtus subissent également un stress thermique, ce qui modifie leur composition corporelle, avec un dépôt adipeux accru et un moindre dépôt protéique (Mayorga *et al.*, 2018), ce qui peut conduire à une moindre qualité de carcasse, et donc à des pertes économiques. En France comme en Europe, la majorité des porcs et des truies sont élevés en bâtiment. Les bâtiments ont pour avantage d'offrir des conditions d'ambiance contrôlées aux animaux (température, humidité). Ainsi, les animaux sont moins exposés aux effets directs de la température extérieure. Cependant, les caractéristiques des bâtiments et des équipements de régulation de l'ambiance disponibles ne permettent pas toujours d'atténuer l'incidence de variations importantes de la température extérieure, ce qui conduit alors à des conditions de températures dégradées à l'intérieur des salles d'élevage. Afin de mesurer les pertes économiques engendrées par des fortes températures, il est important de disposer d'outils permettant de simuler les effets du climat sur la température des salles et les performances des animaux selon leur niveau de production, mais également selon la conduite d'élevage et notamment les pratiques d'alimentation. Il existe un modèle bioclimatique pour les porcs en engraissement (ThermiPig), qui simule les effets de la température sur les performances des bandes à l'engraissement (Quiniou *et al.*, 2021). Un modèle représentant les effets de la température sur les performances du troupeau de truies est en cours de développement à INRAE. L'objectif de cet article est la description et l'évaluation du couplage d'un modèle de bilan thermique (ThermiSim, Marcon *et al.*, 2016) à un modèle de troupeau de truies (Martel, 2008) intégrant le volet truie du modèle InraPorc (Dourmad *et al.*, 2008) à l'échelle des salles de gestation.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Description et couplage des trois modèles de base

Le modèle développé provient du couplage de trois modèles qui fonctionnent avec des pas de temps différents. Ces trois

modèles sont décrits ci-dessous, ainsi que les adaptations qui ont été nécessaires pour les coupler avec un pas de temps commun. Tout comme pour le modèle ThermiPig, le pas de temps de l'heure a été retenu (Quiniou *et al.*, 2021).

Le modèle de troupeau (Martel, 2008) est un simulateur de conduite de troupeau de truies individu-centré. Ce modèle fonctionne au pas de temps de l'heure et applique des événements liés à la reproduction et aux pratiques de l'éleveur. Il représente les salles dans lesquelles se trouvent les animaux, en termes de stade, de nombre de places, et de temps d'occupation.

Les pratiques d'alimentation sont décrites dans le modèle InraPorc et l'évolution des caractéristiques de la truie est calculée d'après les équations de Dourmad *et al.* (2008) avec un pas de temps journalier. Elles permettent d'estimer la production de chaleur chaque jour pour chaque individu par une approche factorielle qui distingue deux compartiments : l'entretien (qui dépend du poids métabolique de la truie et d'un niveau d'activité physique supposé être le même pour toutes les truies toutes la journée) et l'effet thermique de l'aliment (TEF) qui dépend de la rétention de protéines et de lipides dans les réserves maternelles ou dans les produits de la conception.

Pour estimer la production de chaleur avec un pas de temps horaire, la production de chaleur journalière est répartie entre une composante stable tout au long des 24 heures de la journée (ensuite divisée par 24) et une composante variable qui dépend de l'heure de distribution des repas (heure, quantité et qualité de l'aliment) (van Milgen *et al.*, 2000). La part stable de la production de chaleur correspond à la somme de l'effet thermique de l'aliment à long terme (TEF_{lt}) et de la production de chaleur liée à l'entretien de la truie. L'effet thermique de l'aliment à court terme (TEF_{ct}) représente la part variable de la production de chaleur totale. Sur la base des résultats de Ramonet *et al.* (2000), le TEF_{ct} est supposé représenter 66% de l'effet thermique de l'aliment total (TEF). Cette part de chaleur est ensuite répartie sur les heures qui suivent la distribution du ou des repas sur la base des travaux de Le Bellego *et al.* (2001).

Le troisième modèle utilisé, Thermisim, est un modèle de bilan thermique (Marcon *et al.*, 2016) qui fonctionne avec un pas de temps de 30 secondes. Outre le nombre de places, il prend en compte les caractéristiques de construction des salles (dimension, matériaux de construction), les équipements disponibles et les règles de pilotage appliquées pour réguler l'ambiance. Il calcule la température résultante dans la salle en prenant en compte les productions de chaleur (chauffage, production de chaleur des animaux) et les pertes (ventilation, déperdition à travers les parois selon l'isolation) selon la température et l'hygrométrie extérieures. Pour réaliser le couplage avec les deux autres modèles, le fonctionnement de ce modèle est modifié pour calculer un bilan thermique sur la base de températures et hygrométries moyennes horaires.

Compte tenu du fonctionnement journalier d'InraPorc, de même que dans le modèle ThermiPig, les données de température et hygrométrie extérieures horaires du jour J influencent les caractéristiques de la truie au jour J+1, donc le bilan thermique de la salle également au jour J+1.

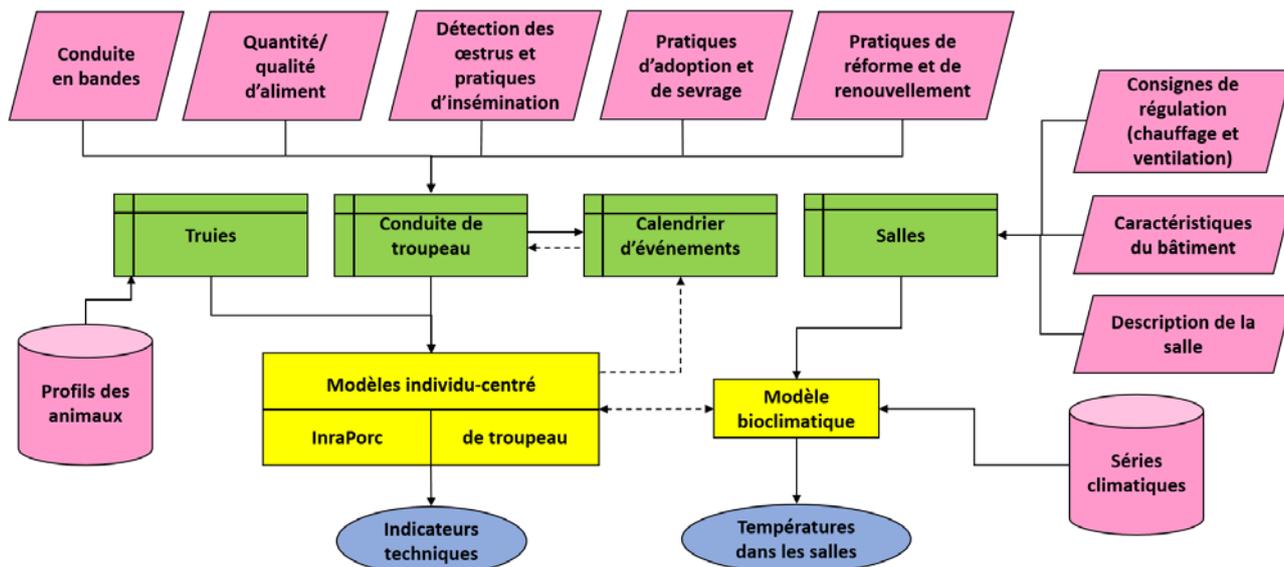


Figure 1 - Diagramme général du modèle

(en rose : les entrées du modèle, en vert : les entités principales, en jaune : les modèles, en bleu : les sorties)

1.2. Structure générale du modèle

Le modèle est basé sur quatre entités principales qui sont les truies, les salles, la conduite d'élevage mise en œuvre par l'éleveur ainsi qu'un calendrier d'événements. La Figure 1 décrit la structure générale du modèle : ses entrées, ses sorties, les principaux objets créés en début de simulation et les modèles de base.

Plusieurs jeux de données sont utilisés en entrée : les séquences alimentaires et les caractéristiques des aliments, les caractéristiques individuelles des truies (*i.e.* les profils individuels InraPorc) et les séries climatiques. En fonction de ces entrées, le modèle peut simuler le fonctionnement d'un atelier naisseur pendant plusieurs années. Ainsi, il représente la conduite en bandes, les entrées des cochettes et les réformes des truies.

Au sein des bandes, le modèle représente chaque truie, ses changements d'état au cours des différents cycles de production, ses variations de poids et d'état corporel et sa consommation d'aliment journalière. Le modèle simule également les pratiques de reproduction (insémination, gestion des mises bas, adoption des porcelets...) et les changements d'états physiologiques associés (attente saillie, gestation, lactation).

Le modèle simule les effets de la température extérieure sur la température ambiante dans les salles à partir d'un bilan thermique et les conséquences sur les performances de reproduction, la consommation d'aliment et l'évolution du poids et de l'état corporel des truies au cours des cycles.

Le modèle produit en sortie des indicateurs techniques permettant de décrire les performances de l'élevage, ainsi que des données de carrière de chaque truie, avec ses performances individuelles, sa bande, le moment auquel

survient chaque événement. On peut ainsi suivre la carrière de chaque truie depuis son achat jusqu'à sa réforme, et la dynamique de ses performances au cours des cycles. Les données quotidiennes de chaque truie sur son stade physiologique et son état corporel sont également produites.

1.3. Evaluation du modèle à partir de données observées

Afin de simuler les températures dans des salles ainsi que les performances des truies issues de trois bandes, les données suivantes ont été collectées en salle de gestation à la station expérimentale de l'Unité Expérimentale Physiologie et Phénotypage des Porcs ([doi : 10.15454/1.5573932732039927E12](https://doi.org/10.15454/1.5573932732039927E12)) (Tableau 1) : les caractéristiques des truies (âge, rang de portée, poids vif et épaisseur de lard dorsal à la saillie) et leur ingestion journalière (avec des stations d'alimentation de précision Gestal). Les caractéristiques des salles ont été collectées : surface, isolation, taille du ventilateur, consignes du boîtier de régulation). La température dans les salles a été mesurée à raison de quatre données par heure. Une donnée sur quatre a été conservée par heure pour l'évaluation du modèle.

Des séries de températures extérieures correspondant au séjour des trois bandes en salle de gestation, ont été extraites de la base de données Climatik d'INRAE. Les séries débutent, respectivement pour les trois bandes, le 28 juin 2021, le 19 juillet 2021 et le 14 décembre 2021 et se terminent le 31 octobre 2021, le 20 novembre 2021 et le 17 avril 2022.

Afin de prédire au mieux les températures dans les salles, les horaires d'ingestion ont été récupérés dans la base des enregistrements des distributeurs d'aliment. L'ingestion moyenne a été calculée à partir des données individuelles des truies. Une liste de 24 entrées contenant ces ingestions horaires est lue en entrée du modèle.

Tableau 1 – Caractéristiques moyennes des truies dans les bandes observées

Bande	Rang de portée	A l'insémination artificielle			Poids après la mise bas, kg	Ingestion, kg/j	Nombre de truies
		Age, j	Poids, kg	Epaisseur de lard, mm			
1	3,9 ± 2,0	722 ± 320	219,0 ± 34,7	14,5 ± 2,3	261,5 ± 22,4	3,0 ± 0,2	20
2	3,3 ± 2,4	628 ± 388	204,5 ± 41,0	14,1 ± 2,5	247,6 ± 30,1	2,9 ± 0,3	20
3	3,8 ± 2,6	708 ± 407	219,4 ± 42,3	15,9 ± 4,3	254,9 ± 28,0	2,8 ± 0,3	19

1.4. Simulations et traitement de données

Afin d'évaluer la fiabilité des températures simulées dans les salles par le modèle, les données des trois bandes observées ont été utilisées pour simuler la température dans des salles de caractéristiques comparables, avec des truies dont les profils individuels correspondaient à ceux présents dans chaque salle observée. Le modèle fonctionne en supposant que les truies entrent dans le troupeau après l'IA, directement en salle de gestation. Les caractéristiques des séries de températures extérieures utilisées dans les simulations sont identiques en termes de date et d'heure à celles observées pour reproduire le plus fidèlement possible les températures dans les salles.

Les règles de conduite de troupeau, d'alimentation et de régulation de l'ambiance dans le bâtiment sont identiques pour les trois bandes, hormis le minimum de ventilation abaissé à 10% pour la bande 3 (vs 20% pour les autres). Cette simulation est réalisée sur la période hivernale. Les consignes de régulation dans le bâtiment étant données à titre indicatif et n'étant pas enregistrées, elles peuvent donc varier selon la saison, particulièrement lors des périodes hivernales. Les séries de températures simulées sont ensuite comparées aux séries de températures mesurées dans le bâtiment.

Le logiciel R (packages `chillR` et `ggplot2`) est utilisé pour évaluer la qualité des données prédites sur la base du coefficient de détermination (R^2), du carré moyen de l'erreur de prédiction (RMSEP), du biais systématique à la première bissectrice, de la rotation à la première bissectrice et de l'erreur aléatoire calculés comme suit :

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{sim}})^2}$$

$$\text{Biais}_{\text{systematique}} = (\bar{Y}_{\text{sim}} - \bar{Y}_{\text{obs}})$$

$$\text{Rotation} = (1 - b)^2 * \sum (Y_{\text{simn}} - \bar{Y}_{\text{sim}}) / N$$

$$\text{Erreur}_{\text{aleatoire}} = (1 - R^2) * \sum (Y_{\text{obsn}} - \bar{Y}_{\text{obs}}) / N$$

avec Y_{obs} et Y_{sim} respectivement les valeurs observées et simulées pour un critère Y , qui est ici la température ; N le nombre de données de l'échantillon ; \bar{Y} la moyenne de la série de données (simulées ou observées) ; b l'ordonnée à l'origine de l'équation de la droite de régression ; R^2 le coefficient de détermination de la droite de régression.

2. RESULTATS

2.1. Ingestion et gain de poids net de gestation

L'écart de poids vif simulé entre la saillie et après la mise-bas, correspondant au gain de poids net de gestation, est comparé aux écarts observés (Tableau 2). Pour les trois bandes, la différence (i.e., écart simulé – écart observé) est négative (-13,9, -4,4 et -2,1 kg, respectivement en moyenne pour les bandes 1, 2 et 3). La prise de poids simulée est donc moins importante que celle observée. Par ailleurs, la différence entre l'ingestion simulée et observée est également négative ou nulle (-0,2, -0,1 et 0 kg/j). La prise alimentaire simulée est donc moins importante que la prise alimentaire des truies observées.

Tableau 2 – Différence entre gain de poids vif et ingestion simulés et observés

Bande	Gain net de poids vif, kg		Ecart de gain de poids net, kg	Ecart d'ingestion, kg/j
	Simulé	Observé		
1	31,7 ± 9,3	42,4 ± 17,7	-13,9 ± 17,5	-0,2 ± 0,2
2	37,8 ± 12,5	43,1 ± 19,2	-5,4 ± 15,7	-0,1 ± 0,3
3	32,5 ± 12,0	35,4 ± 18,4	-2,1 ± 12,3	-0,0 ± 0,3

2.2. Evaluation de la température prédite dans les salles

Les séries de températures horaires sur la durée de la gestation pour les bandes simulées sont illustrées par la figure 2. Pour les bandes 1 et 2, les températures simulées suivent bien l'évolution des températures observées. Cependant, les données simulées varient de façon plus importante avec la température extérieure que les données observées. Les résultats donnent, pour les bandes 1 et 2, une corrélation de 0,88 entre les données de températures extérieures et simulées, contre 0,76 en moyenne pour les données de températures extérieures et observées. Concernant la simulation de la bande 3, pour laquelle la ventilation minimale a été abaissée à 10%, les températures simulées atteignent des valeurs supérieures aux données observées lors des pics de températures élevées alors qu'elles sont proches des observations quand il s'agit de pics de températures basses. La répartition des données observées en fonction des données simulées est présentée dans la figure 3.

La relation entre les données observées et simulées est linéaire pour les trois bandes, à l'exception des températures les plus basses pour les bandes 1 et 2.

Le tableau 3 présente les indicateurs principaux d'évaluation de la précision du modèle, dont une erreur aléatoire très faible qui indique que les données observées sont fiables. L'erreur moyenne de prédiction de la température ambiante est inférieure à 0,5°C pour les bandes 1 et 2, et inférieure à 1°C pour la bande 3. Les coefficients de détermination sont égaux ou supérieurs à 0,9 pour les trois bandes. L'incertitude moyenne de prédiction, donnée par le RMSEP, est inférieure à 1°C pour les bandes 1 et 2 et de 1,2°C pour la bande 3. Le biais systématique, soit l'écart entre la droite de régression et la première bissectrice, est très faible pour les bandes 1 et 2, et plus important pour la bande 3. Le biais de rotation entre les deux mêmes droites est de la même manière faible pour les bandes 1 et 2 et plus important pour la bande 3, comme on peut le voir sur la figure 3.

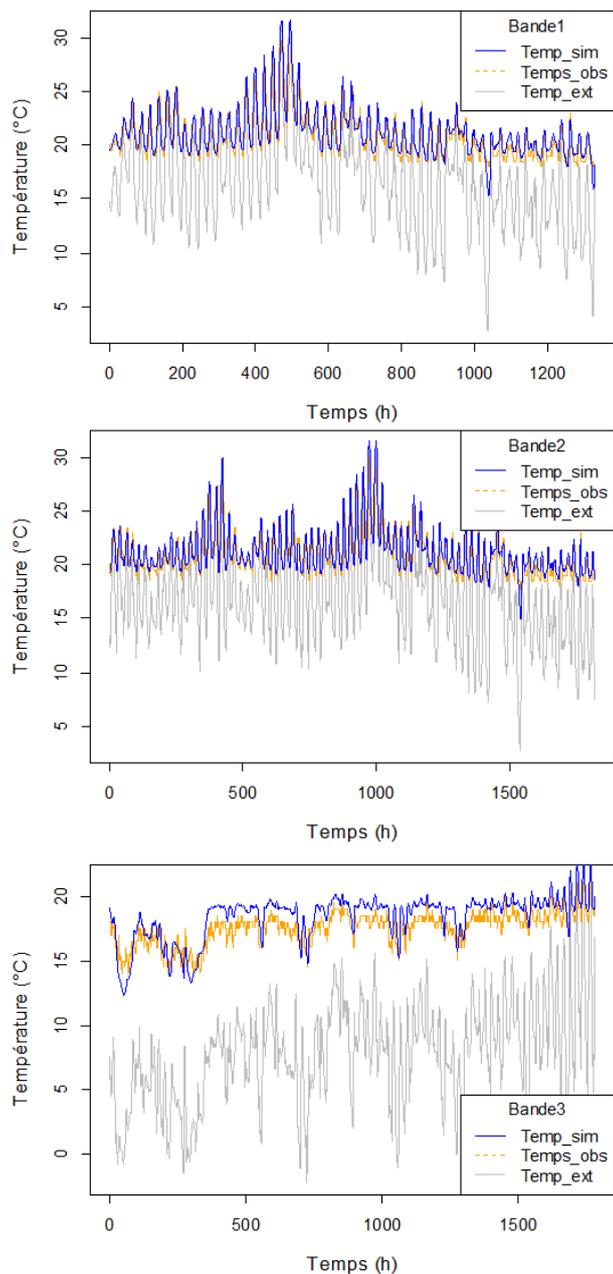


Figure 2 - Evolution des températures extérieures (Temp_ext), observées (Temp_obs) et simulées (Temp_sim) selon la bande

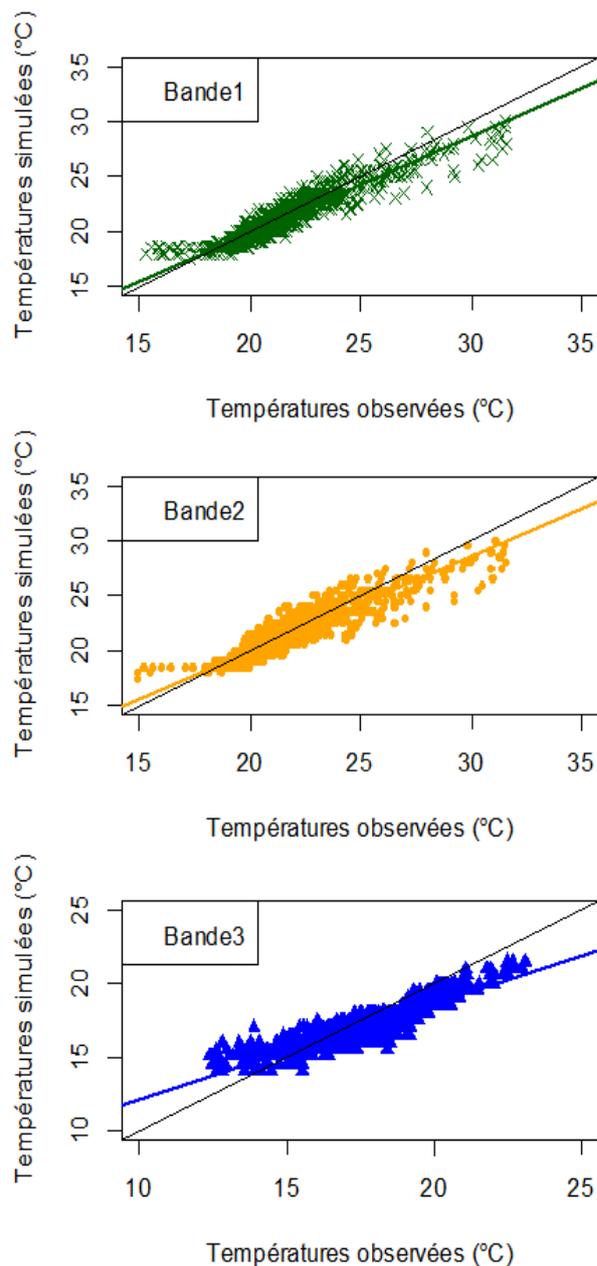


Figure 3 - Répartition des températures observées en fonction des températures simulées selon la bande

Tableau 3 – Coefficient de détermination et carré moyen de l’erreur de prédiction (RMSEP) entre les températures observées et prédites dans les salles pour chaque bande

Bande	Erreur moyenne, °C	Coefficient de détermination	RMSEP, °C	Biais systématique	Rotation	Erreur aléatoire
1	0,3 ± 1,3	0,94	0,8	0,08	0,006	0,00020
2	0,2 ± 1,0	0,92	0,9	0,05	0,006	0,00009
3	0,8 ± 0,8	0,90	1,2	0,71	0,040	0,00020

3. DISCUSSION

Le modèle est issu du couplage de plusieurs modèles avec des pas de temps différents. Le pas de temps de l’heure est un compromis entre les pas de temps journalier (modèle InraPorc), horaire (modèle de troupeau), et toutes les 30 secondes (modèle ThermiSim). La capacité du modèle à prédire une diversité de performances du troupeau de truies et de situations d’élevage est originale et inédite.

Peu de modèles de troupeaux de truies existent et ceux-ci n’intègrent pas l’effet de la température, ne prennent pas en compte la variabilité individuelle, ni les températures extérieures de cette façon.

L’écart entre gain de poids net simulé et observé provient vraisemblablement d’une différence entre les règles de calcul de l’apport alimentaire décrites et utilisées dans le modèle et celles appliquées dans l’élevage. Ceci est confirmé par le fait

que l'écart de prise de poids est lié à l'écart de consommation d'aliment. En effet, plus la différence dans la prise alimentaire est élevée, plus la différence sur l'écart de poids vif est importante. Toutefois, les pratiques d'alimentation renseignées dans le modèle sont identiques pour toutes les truies et ne tiennent pas compte du fait qu'en réalité certaines étaient alimentées avec une stratégie de précision en termes de couvertures des besoins en nutriments autres que l'énergie (résultats non présentés). L'écart de gain de poids net pourrait également provenir d'une mauvaise prise en compte de l'activité physique des truies, celle-ci étant supposée identique pour tous les animaux et régulière sur 24 h.

Ces premières simulations suggèrent que, malgré des différences obtenues, le comportement du modèle est cohérent. Les températures ambiantes simulées pendant l'été sont proches de celles observées, avec un écart moyen plus petit que la précision de la sonde de mesure de 0,5°. Pendant l'hiver (bande 3), l'écart moyen de 0,8°C est obtenu avec des incertitudes sur les règles de pilotage réellement appliquées. Une meilleure description en entrée du modèle des règles de régulation mises en œuvre réellement permettrait certainement d'améliorer la prédiction des simulations réalisées pendant la saison froide.

D'autres critères sont à intégrer pour améliorer la précision du calcul du bilan thermique horaire. Par exemple, la composante de la production de chaleur liée à l'activité physique s'appuie sur une durée d'activité identique pour toutes les truies. Elle s'appuie par ailleurs sur la production de chaleur quand la truie est debout (Noblet *et al.*, 1993) et n'intègre pas l'incidence d'autres types d'activité telle que la locomotion (Marcon *et al.*, 2020). La prise en compte des effets de la température sur les caractéristiques des porcelets à la naissance permettrait également de mieux décrire l'évolution de la production de chaleur liée au développement fœtal pendant la gestation.

CONCLUSION

En complément des travaux déjà réalisés sur l'atelier d'engraissement, le modèle présenté propose de représenter l'atelier naisseur avec une approche novatrice permettant d'intégrer les caractéristiques du climat pour simuler ses effets sur les multiples composantes de la performance à l'échelle de l'élevage. Les premiers résultats, obtenus pour la phase de gestation, permettent d'observer une prédiction des températures ambiantes avec une erreur de prédiction réduite.

Les futurs développements du modèle ont pour ambition de permettre, à terme, l'évaluation de la vulnérabilité des élevages naisseurs dans un contexte de réchauffement climatique et de simuler l'intérêt d'équipements supplémentaires (cooling, brumisation...) pour en atténuer les effets, notamment en cas de vagues de chaleur. La modification des règles de pilotage et de la conduite des truies constituent d'autres leviers intéressants à explorer avec le modèle. Ce dernier est destiné à intégrer un outil d'aide à la décision permettant de représenter l'élevage dans sa globalité. Cet outil devrait également comprendre le module ThermiPig pour le stade d'engraissement, et un module (en cours de développement) dédié aux salles de lactation afin de pouvoir prédire les effets des conditions d'ambiance sur l'ensemble du cycle de reproduction ou la carrière des truies.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Charlotte Gaillard pour la mise à disposition des données d'élevage et la Région Bretagne pour le soutien financier apporté dans le cadre du projet Fermadapt (convention 21001726).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Dourmad J. Y., Etienne M., Valancogne A., Dubois S., van Milgen J., Noblet J., 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of sows. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 143, 372-386.
- Geist J.N., 2022. Quel climat pour demain ? Synthèse vulgarisée du WG I du 6ème rapport du GIEC-Développement durable & responsabilité sociétale dans l'enseignement supérieur, les formations et la recherche.
- Le Bellego L., van Milgen J., Noblet J., 2002. Effect of high temperature and low-protein diets on the performance of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.*, 80, 691-701.
- Marcon M., Massabie P., Kergourlay F., Dourmad J.Y., Salaün Y., 2016. Un modèle dynamique des flux d'énergie directe et indirecte dans les bâtiments d'élevage de porcs pour l'aide à la décision : structure du modèle et premières applications. *Journées Rech. Porcine*, 48, 177-182
- Marcon M., Quiniou N., Courboulay C., Rousselière Y., Melot G., Meunier-Salaün M.C., Labussière E., Ramonet Y., Cherel P., Le Mer M., 2020. Améliorer les performances et le bien être des truies gravides par la mobilisation de nouvelles technologies pour une alimentation de précision et la détection de signaux comportementaux. *Innov. Agro.*, 79, 245-256.
- Martel G., 2008. Pratiques d'élevage, productivité des troupeaux de truies et rythmes de travail des éleveurs en production porcine: une approche par modélisation (Doctoral dissertation, AgroParisTech).
- Mayorga E. J., Renaudeau D., Ramirez B. C., Ross J. W., Baumgard L. H., 2019. Heat stress adaptations in pigs. *Anim. Frontiers*, 9, 54-61.
- Noblet J., Shi X.S., Dubois S., 1993. Energy cost of standing activity in sows. *Livest. Prod. Sci.*, 34, 127-136.
- Quiniou N., Renaudeau D., Collin A. et Noblet J., 2000. Effets de l'exposition au chaud sur les caractéristiques de la prise alimentaire du porc à différents stades physiologiques. *INRA Prod. Anim.* 13, 233-245
- Quiniou N., Cadéro A., Marcon M., Brossard L., 2021. Simuler avec le modèle bioclimatique ThermiPig les performances des porcs en croissance en tenant compte des conditions climatiques et des caractéristiques de la salle d'engraissement. *Journées Rech. Porcine*, 53, 89-94.
- Ramonet Y., Van Milgen J., Dourmad J. Y., Dubois S., Meunier-Salaun M. C., Noblet J., 2000. The effect of dietary fibre on energy utilisation and partitioning of heat production over pregnancy in sows. *Brit. J. Nutr.*, 84, 85-94.
- Renaudeau D., Dourmad J.Y., 2021. Future consequences of climate change for European Union pig production. *Animal*, 100372.
- Renaudeau D., Collin A., Laloë D., Mandonnet N., Naves M., Thevenon S., Zerjal T., 2014. L'adaptation des systèmes d'élevage au changement climatique. In *Club climat agriculture*, 63-72
- Renaudeau D., Denece B., Corre P., Boulot S., Badouard B., Dourmad J.Y., 2022. Evaluation des impacts de la chaleur sur le taux de réussite à la saillie chez la truie. *Journées Rech. Porcine*, 54, 263-268.