

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

Nathalie QUINIOU (1), Alice CADERO (1,2), Michel MARCON (1), Ludovic BROSSARD (2)

(1) IFIP-Institut du Porc, BP 35104, 35651 Le Rheu cedex, France

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

nathalie.quiniou@ifip.asso.fr

ludovic.brossard@inrae.fr

Avec la collaboration de Jean-Yves DOURMAD (2), Florence GARCIA-LAUNAY (2) et David RENAUDEAU (2)

et le financement ANR n°16-SUSN-0003-02, dans le cadre du projet européen H2020 Pigsys (SusAn ERA-Net, n°696231).

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

Un modèle de croissance du porc élevé dans des conditions de thermoneutralité (InraPorc) est combiné à un modèle permettant de simuler l'équilibre thermique de la salle d'engraissement selon la chaleur apportée par l'air entrant, les équipements ou les animaux, et les déperditions par la ventilation ou les parois (ThermiSim). La jonction de ces deux modèles repose sur le choix d'un pas de temps commun (1 heure), la définition de la zone de confort thermique pendant l'engraissement, la quantification des effets de l'exposition au chaud ou au froid sur la quantité d'énergie disponible pour la croissance, et enfin la répartition dynamique de la chaleur produite par les animaux au cours de la journée. Les résultats d'un essai *in vivo* sont utilisés pour évaluer la précision de prédiction de la température ambiante par ce modèle, appelé ThermiPig ; elle est en moyenne de 0,6°C (RMSEP, erreur de la prédiction). Des simulations sont ensuite réalisées pour évaluer l'incidence d'un changement des règles de régulation du boîtier de ventilation et de l'installation de nouveaux équipements (chauffage ou *pad cooling*) sur les performances de croissance du groupe de porcs, leurs rejets azotés, leur consommation d'énergie directe (électrique) et indirecte (aliment). En comparant les résultats des simulations, il est possible d'identifier la situation la plus intéressante sur la base de ces différents critères. La différence entre la valorisation des carcasses dans la grille de paiement et le coût alimentaire et en électricité pour faire fonctionner les équipements, qui dépend de la source d'énergie utilisée pour produire l'électricité, permet d'évaluer la performance économique. Toutefois, la prédiction de ce critère doit encore être affinée par une prise en compte plus précise de l'influence de la température sur la conformation des porcs et sur leur métabolisme protéique.

Simulating with the ThermiPig model the impact of fattening room characteristics under different climates on the performance of pigs

The dynamic model ThermiPig was developed to simulate thermal balance at the fattening room scale, as the result of the balance between the heat produced by the group of pigs or provided by incoming air and equipment and that lost due to air renewal or thermal conductivity of the walls and ceiling. A growth model (assuming thermoneutral conditions, InraPorc) and a bioclimatic model (ThermiSim) were combined to create ThermiPig; it considers a common time step (1 hour), definition of the pig thermoneutral zone, evaluation of impacts of cold and hot exposure on the amount of available energy for growth, and the circadian distribution of heat produced daily by each pig. Data collected *in vivo* were used to evaluate the accuracy of the prediction of ambient temperature, which averaged 0.6°C (RMSEP, error of prediction). ThermiPig was used to simulate impacts of alternative regulations for ventilation or the use of new equipment (heater, *pad cooling*) on growth performance of pigs, N excretion, and indirect energy (from feed intake) and direct energy (from electricity consumed by equipment) consumption. Comparison of multi-criteria performance *in silico* helps identify the most interesting option. Economic performance depends on carcass value (based on the French payment grid) minus costs of feed intake and electricity (depending on the energy source). However, more accurate prediction of carcass value is expected in the next version of the model by considering effects of ambient temperature on the distribution of body fat and protein metabolism.

INTRODUCTION

Compte tenu de l'étroitesse de sa plage de températures de confort, le porc est le plus souvent élevé en bâtiment sous les climats tempérés et continentaux. Les caractéristiques des bâtiments et des équipements installés aujourd'hui encore dans la plupart des élevages reposent sur une expertise développée au fil du temps pour adapter l'isolation des salles et le pilotage des équipements de régulation de l'ambiance aux conditions climatiques locales.

La combinaison de choix techniques jugée pertinente au niveau local est aujourd'hui remise en question par le réchauffement climatique et l'évolution des performances des animaux. Onze des 12 années les plus chaudes jamais enregistrées en Europe sont intervenues depuis l'an 2000 et l'année 2019 est la première dans ce classement (C3S, 2019). Selon l'Agence européenne de l'environnement (2020), l'aggravation tendancielle du changement climatique devrait par ailleurs s'accompagner d'événements climatiques extrêmes plus fréquents. Quand rien n'est mis en œuvre dans l'élevage pour atténuer les effets du climat extérieur, les caractéristiques d'ambiance dérivent et peuvent exposer le porc à des conditions de stress thermique plus ou moins intenses et prolongées qui pénalisent ses performances (Quiniou *et al.*, 2021) voire compromettent sa survie.

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées pour atténuer les effets du climat, seules ou de façon combinée. Dans les bâtiments existants, les règles de pilotage des boîtiers de régulation de la ventilation peuvent être modifiées et de nouveaux équipements installés. De nouvelles préconisations d'isolation peuvent être appliquées lors de la construction de nouveaux bâtiments. La conduite alimentaire des animaux peut également être revue, par exemple par une baisse de la teneur en protéines de l'aliment (Le Bellego *et al.*, 2002a) ou une modulation des quantités allouées. Dans un objectif d'utilisation parcimonieuse des ressources, l'évaluation de ces stratégies doit être réalisée par une approche multicritère des performances (zootechnique, environnementale, économique). L'article présente comment le modèle de croissance du porc élevé à la thermoneutralité (InraPorc) a été combiné à un modèle bioclimatique (ThermiSim) afin de simuler les performances du groupe de porcs selon les conditions de température extérieures (T). Des simulations sont réalisées avec ce nouveau modèle, appelé ThermiPig, pour tester l'incidence des caractéristiques de la salle ou des règles de pilotage des équipements sur les performances des porcs en fonction du climat.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Assemblage des modèles InraPorc et ThermiSim

Le modèle ThermiPig est développé dans le langage Python. Il résulte de l'assemblage des modèles ThermiSim (Marcon *et al.*, 2016) et InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008), auxquels sont associés des modules annexes permettant le fonctionnement avec un pas de temps horaire, intermédiaire entre leurs pas de temps respectifs de 30 secondes et 1 jour. La température de la salle d'engraissement résulte de l'équilibre entre la chaleur apportée par l'air entrant et celle produite par les animaux et le fonctionnement des équipements d'une part, et les déperditions par la ventilation ou les parois d'autre part. Les composantes du bilan thermique, calculées par le modèle

ThermiSim au jour J, sont intégrées par heure. Un module spécifique permet par ailleurs de répartir sur une base horaire les résultats journaliers issus des simulations d'InraPorc. Pour cela, la quantité journalière ingérée le jour J, en conditions de thermoneutralité, est répartie par heure (en tenant compte des déclarations de l'utilisateur) soit en alimentation à volonté (avec des hypothèses de répartition horaire) soit en alimentation rationnée (avec répartition en repas à heures définies). La production de chaleur liée à l'effet thermique du repas à court terme est alors répartie pendant les heures qui suivent la prise alimentaire sur la base des cinétiques post-prandiales décrites par Le Bellego *et al.* (2002b). L'extra-chaleur à long terme de l'aliment et la production de chaleur de base sont réparties de façon uniforme sur la journée. Ces calculs sont réalisés pour chaque porc du groupe, puis la production de chaleur horaire de tous les animaux présents est additionnée pour le calcul du bilan thermique à l'échelle de la salle par ThermiSim.

La zone de thermoneutralité est définie par les températures critiques inférieure (TCi, adaptée pour des porcs élevés sur caillebotis ; Verstegen et van der Hel, 1974 ; Holmes et Close, 1977) et supérieure (TCs ; Renaudeau *et al.*, 2001), qui évoluent selon le poids vif (PV, kg) respectivement comme suit :

$$TCi (^{\circ}C) = 22,5 - 0,031 PV$$

$$TCs (^{\circ}C) = 40,9 - 4,4 \ln (1 + PV)$$

En situation de stress thermique ($T_{\text{ambiante}} > TCs$), un coefficient d'abattement est appliqué à l'ingéré horaire de référence à la thermoneutralité, pour calculer l'ingestion spontanée horaire, la production de chaleur horaire associée et les performances de croissance résultantes au bout de 24 heures (Renaudeau *et al.*, 2011). Au froid ($T_{\text{ambiante}} < TCi$), le besoin en énergie pour la thermorégulation est supposé être compensé par une ingestion supplémentaire spontanée d'aliment (NRC, 2012) si les porcs pèsent plus de 50 kg. Chez les porcs plus légers ou rationnés, la couverture du besoin de thermorégulation est réalisée au détriment de l'énergie disponible pour la croissance. Comme les performances sont simulées par pas journalier avec le modèle InraPorc, l'effet d'une température horaire simulée par ThermiSim à l'heure H du jour J en-dehors de la zone de thermoneutralité n'est pas pris en compte en temps réel mais à l'heure H du jour J+1.

1.2. Données d'entrée du modèle

La salle d'engraissement est caractérisée par un ensemble de données statiques qui correspondent au nombre de places en engraissement et aux dimensions de la salle, aux ouvertures (nombre et dimensions), à l'isolation des parois, au système de ventilation (nombre et diamètre des ventilateurs) et aux autres équipements éventuellement présents (chauffage, *pad cooling*). Sont également considérées les règles de pilotage des équipements et leur consommation énergétique.

Des éléments de base de la conduite des animaux sont renseignés, qui correspondent aux entrées du modèle Mogador (Cadéro, 2017) adapté de InraPorc pour simuler les performances à l'échelle de la bande. Le profil de croissance et d'ingestion des porcs en conditions de thermoneutralité, les poids d'entrée, l'objectif de poids de sortie, le nombre de départs et les caractéristiques nutritionnelles des aliments utilisés (teneurs en acides aminés, énergie digestible, métabolisable et nette) sont également décrits.

Quand le modèle est utilisé *a posteriori*, les simulations peuvent être lancées sur plusieurs semaines d'affilée avec un jeu de

données de température et humidité relative extérieures correspondant aux conditions climatiques horaires sur la période. Le modèle peut aussi être utilisé de façon plus dynamique, en réalisant des simulations toutes les 24 heures qui intègrent les données collectées la veille dès qu'elles sont disponibles.

1.3. Sorties et calculs

A partir des fichiers de sortie du modèle, des calculs sont réalisés sous R pour décrire l'évolution des caractéristiques de la salle (température ambiante sur la période, consommation d'énergie par les équipements) et calculer les performances de croissance moyennes à l'échelle de l'individu ou du groupe (consommation moyenne journalière, CMJ ; gain moyen quotidien, GMQ ; indice de consommation, IC) ou leur impact environnemental.

Des calculs sont réalisés dans un premier temps pour évaluer la précision de prédiction du modèle ThermiPig, puis pour simuler l'incidence d'une modification des caractéristiques de la salle ou de la conduite dans différentes conditions climatiques. La précision est évaluée par la racine du carré moyen de l'erreur de prédiction (RMSEP ; Wallach *et al.*, 2014), dans la même unité que celle du critère considéré ou en pourcentage de la valeur attendue. La fonction *goodness.of.fit* du paquet ZeBook (R Development Core Team, 2016 ; Wallach *et al.*, 2014) est utilisée pour ces calculs.

2. EVALUATION DU MODELE THERMIPIG

2.1. Données d'entrée du modèle

Les caractéristiques d'une des salles d'engraissement de la station IFIP (Romillé, 35) sont renseignées dans le modèle. Cette salle est dimensionnée pour accueillir 96 porcs (10,41 x 11,61 x 2,6 m). Les parois sont constituées de brique monolithe dont les trois couches successives présentent, respectivement, une épaisseur de 5, 8 et 7 cm et une conductivité thermique de 1,7, 0,032 et 1,7 W.m⁻¹.°C⁻¹. La salle est équipée de deux ventilateurs de 400 mm de diamètre qui fonctionnent en mode normal entre 14 et 100 % de leur capacité au débit maximal (≈4500 m³.h⁻¹) sur une plage de température de 6°C. La température de consigne du boîtier de ventilation est fixée à 21°C pendant 27 jours, puis à 22°C pendant 17 jours et enfin à 23°C jusqu'à la sortie de tous les porcs, le même jour.

Un groupe de 48 mâles castrés et 48 femelles, croisés Piétrain x (Large White x Landrace), a été élevé dans la salle entre le 08/01 et le 14/04/2020. Les porcs étaient alimentés à volonté avec une séquence de deux aliments formulés pour une teneur en énergie nette (EN) commune de 9,75 MJ/kg et des apports respectifs de lysine digestible de 0,9 puis 0,8 g/MJ EN.

Les données collectées sur les animaux permettent de calibrer pour chaque sexe un profil de croissance (courbe de Gompertz) et d'ingestion (courbe Gamma) avec InraPorc. Trente populations virtuelles de 48 porcs de chaque sexe sont générées sur la base des profils moyens à l'aide du générateur de populations développé par Vautier *et al.* (2013). La liste des matières premières et leurs taux d'incorporation sont renseignés en entrée du modèle pour le calcul de la production de chaleur associée à l'utilisation digestive et métabolique des aliments. Les données d'inventaire de cycle de vie Ecoalim sont utilisées pour calculer la quantité d'énergie non renouvelable consommée de façon indirecte par les animaux (Wilfart *et al.*, 2016).

La température et l'hygrométrie extérieures, mesurées toutes les heures pendant la période d'engraissement, sont retenues en données d'entrée pour simuler le bilan thermique à l'échelle de la salle. Pour chacune des 30 populations virtuelles de porcs, la température ambiante horaire résultante est ensuite comparée à la valeur moyenne calculée à partir des enregistrements automatiques réalisés toutes les 15 minutes par le système de régulation de l'ambiance.

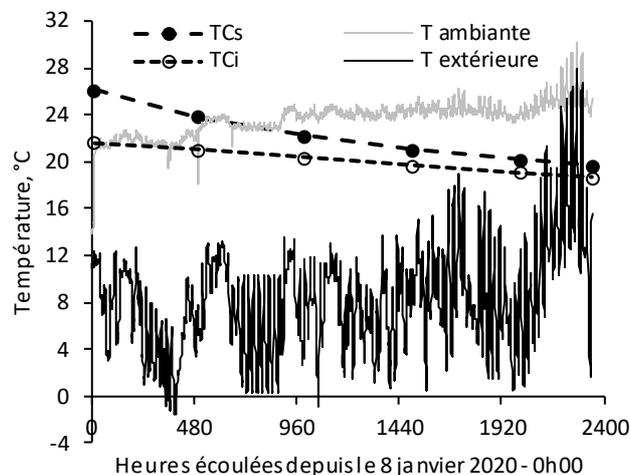


Figure 1 – Evolutions des températures extérieure et ambiante et des températures critiques inférieure (TCi) et supérieure (TCs) calculées en fonction du poids vif moyen des porcs présents dans la salle (8 janvier - 14 avril 2020)

2.2. Evaluation des résultats de simulation

Obtenir par simulation un niveau d'ingestion et une efficacité alimentaire proches de la réalité est une condition *sine qua non* de l'évaluation du modèle, car ces deux critères sont deux déterminants majeurs de la quantité de chaleur produite par les animaux. Le modèle fonctionne sur la base de profils de porcs obtenus en conditions de thermoneutralité, sur lesquels sont appliqués ensuite les effets de l'exposition au chaud ou au froid. Or, en comparant les valeurs de TCi et de TCs calculées à partir du résultat des pesées réalisées en cours d'engraissement à la température ambiante mesurée dans la salle (Figure 1), on constate que les porcs sont exposés à une température chaude à partir du 44^{ème} jour d'engraissement. Les profils de porcs intègrent donc déjà les conséquences de la température et de ce fait l'utilisation du modèle conduit à dupliquer l'effet de la température ambiante, d'où des performances moyennes sous-estimées (Tableau 1). Le profil type a donc été corrigé pour permettre d'obtenir par simulation un niveau de performance moyen similaire à celui observé, en suivant la procédure décrite par Cadéro (2017). L'objectif de PV à l'abattage, le dépôt protéique moyen (PDm) et la CMJ sont ainsi ajustés par étapes successives, avec au final une augmentation du PDm de 0,7% et de la CMJ de 6,2% dans le profil théorique à la thermoneutralité.

Tableau 1 – Performances moyennes observées pendant l'essai ou obtenues par simulation

	Essai	Simulation avec profil initial	Simulation avec profil corrigé
CMJ, kg/j	2,49	2,42	2,49
GMQ, g	982	963	982
IC	2,53	2,53	2,55
Durée, j	97,0	97,5	97,5
PV final, kg	124,1	119,7	123,7

¹ Abréviations : CMJ : consommation moyenne journalière, GMQ : gain moyen quotidien, IC : indice de consommation, PV : poids vif.

Après ajustement du profil, les performances moyennes simulées sont similaires à celles observées (Tableau 1). Le RMSEP relatif est ainsi inférieur à 1 % pour la CMJ, le GMQ, l'IC et le poids final d'abattage. La température ambiante horaire obtenue par simulation est alors comparée aux valeurs enregistrées pendant l'élevage des porcs. A partir des 2119 couples de valeurs disponibles pour chaque bande en moyenne, le RMSPE obtenu est de 0,6°C, soit 2,6 % (Figure 2).

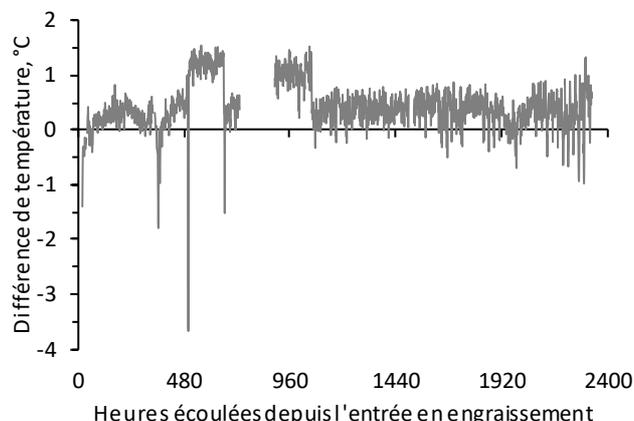


Figure 2 – Ecart entre la température ambiante observée et les valeurs obtenues par simulation (janvier – avril 2020)

La température ambiante est prédite avec une précision comparable à celle d'autres modèles bioclimatiques qui fonctionnent sur la base des caractéristiques d'un animal moyen. D'autres investigations réalisées avec le modèle ThermiPig indiquent que l'amélioration de la précision de prédiction de la température est de 0,2°C lorsque la variabilité des porcs est prise en compte. A l'échelle de la salle, les performances moyennes et la production de chaleur cumulée du groupe simulé sont en effet similaires à celles du porc témoin dupliqué autant de fois qu'il y a de places dans la salle (i.e., x 96). La prise en compte de la variabilité inter-individuelle trouve son intérêt dans le fait qu'au jour J tous les porcs n'ont pas le même poids (donc pas les mêmes valeurs de TCi ou TCs) ni le même niveau d'ingestion. Ainsi, pour une température donnée, certains peuvent encore être dans des conditions de thermoneutralité quand les autres subissent les effets du froid ou du chaud. Tenir compte de la variabilité inter-individuelle permet de considérer que tous les animaux ne répondent pas de façon uniforme à la modification des conditions d'ambiance initiée par une modification des conditions d'élevage ou d'alimentation.

3. SIMULATIONS

3.1. Situation de référence et objectif

Le modèle ThermiPig est utilisé pour évaluer l'incidence d'une modification du pilotage de l'ambiance ou l'ajout de nouveaux équipements dans la salle décrite dans le chapitre précédent, équipée au départ seulement de ventilateurs.

Les sorties du modèle permettent de calculer les performances techniques moyennes comme évoqué précédemment, ainsi que les rejets en N par différence entre les quantités ingérées et retenues, la marge sur coût alimentaire (et coût électrique) par différence entre la valeur des carcasses vendues et le coût de l'aliment ingéré (et de l'électricité consommée par les équipements) et enfin la quantité d'énergie directe consommée par les équipements (électricité d'origine nucléaire) ou dans l'aliment ingéré (consommation indirecte). Le modèle intègre un taux de pertes de 5% entre l'entrée en engraissement et le

départ pour l'abattoir (Cadéro, 2017), qui correspond à la valeur observée pendant le calibrage du profil. Les calculs sont réalisés à l'échelle de la salle pour une durée d'occupation maximale de 110 jours et un départ pour l'abattoir en deux lots à 7 jours d'intervalle si plus de 30 porcs atteignent 115 kg plus tôt que les autres. Ces résultats sont ensuite ramenés par porc sur la base de l'effectif d'animaux présents à l'entrée en engraissement.

La grille Uniporc est utilisée pour classer les animaux sur la base du poids de carcasse chaude et du taux de muscle des pièces (TMP). Ce dernier est calculé dans le module InraPorc comme une fonction linéaire de la teneur corporelle en protéines et en lipides. Pour l'évaluation économique, la cotation base 56 TMP moyenne de décembre 2019 est utilisée, soit 1,496 €/kg de carcasse froide avec un taux de ressuage à 2,5 %. Le prix des aliments se fonde sur le prix des matières premières de la note de Conjoncture IFIP de décembre 2019 et inclut 20 €/tonne de frais d'approche. Le coût de l'électricité est la valeur moyenne observée en France (soit 0,09 €/kWh).

Trente populations de 96 porcs sont générées à partir d'un profil type. Chaque condition de simulation est appliquée aux 30 populations et les différentes variantes sont comparées sur la base de la moyenne des performances obtenues pour les 30 populations ou relativement à une condition considérée comme référence en base 100.

3.2. Influence du choix de la règle de ventilation

Trois règles de régulation du boîtier de ventilation sont comparées en conditions hivernales très froides, en programmant l'entrée des porcs dans la salle le 1^{er} janvier sous des conditions climatiques telles qu'observées au nord de l'Europe. Les règles diffèrent par la température de consigne initiale (24 ou 20°C) et/ou finale (22 ou 17°C) et le nombre de jours fixé pour effectuer la transition entre les deux (Tableau 2).

Tableau 2 – Comparaison des résultats obtenus par porc avec trois règles de ventilation en conditions climatiques froides

Règles de ventilation	1	2	3
Température de consigne			
Initiale	24	24	20
Finale	22	17	17
Durée de la transition, j	15	77	77
Performances zootechniques, /porc¹			
CMJ, kg/j	2,40	2,47	2,50
GMQ, g	852	859	856
IC, kg/kg	2,84	2,90	2,94
PV final, kg	118,0	118,4	118,4
TMP	56,3	56,0	56,1
Impact environnemental			
N excrété, % règle 1	100	104	106
Energie totale utilisée, % règle 1	100	102	103
Dont aliment, % total par règle	87	87	87
Résultats économiques			
Coût alimentaire (CA), Δ €	/	+1,26	+2,21
Marge sur CA, Δ €	/	-2,11	-2,81
Coût électrique (CE), Δ €	/	+0,01	+0,01

¹ Pour une durée d'occupation maximale de la salle de 110 jours. CMJ : consommation moyenne journalière (à volonté), GMQ : gain moyen quotidien, IC : indice de consommation, PV : poids vif, TMP : taux de muscle des pièces.

Pendant les 10 premiers jours d'engraissement la température extérieure est proche de 0°C mais les porcs, alimentés à volonté, produisent suffisamment de chaleur pour que la température ambiante atteigne la valeur de la consigne initiale de la règle 3 (20°C) mais pas celle des règles 1 et 2 (24°C) (Figure 3).

Pendant les 10 jours suivants, la température extérieure de l'air chute en-deçà de -10°C et cela s'accompagne d'une diminution de la température de la salle indépendamment de la règle de ventilation. Par la suite, dès lors que la température extérieure remonte autour de 0°C , la température ambiante remonte également et atteint des valeurs qui dépendent de la règle de ventilation appliquée. Un décrochage est observé en fin d'engraissement, en relation avec une réduction de la production de chaleur d'origine animale quand les premiers porcs partent pour l'abattoir.

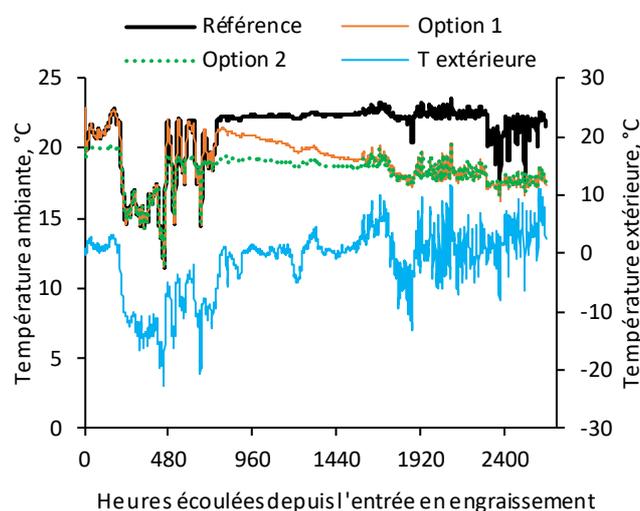


Figure 3 – Evolution de la température en saison froide selon la règle de régulation de la ventilation (voir Tableau 2)

La température ambiante est en-deçà des valeurs de consigne pendant un nombre limité de jours, quand l'air extérieur est très froid et les porcs légers, d'où des écarts de performances relativement limités entre les règles de ventilation (Tableau 2). La CMJ augmente de 100 g/j et l'IC de $0,10$ point avec la règle 3 par rapport à la règle 1. Des résultats intermédiaires sont obtenus avec la règle 2. L'augmentation de l'IC est associée à un accroissement de 4% du coût alimentaire et de l'ingestion d'azote, de 6% de l'excrétion azotée, et de 3% de l'énergie totale consommée. En parallèle d'un impact environnemental un peu moins élevé, la règle 1 permet d'atteindre une marge sur coût alimentaire plus élevée d'environ 2 €/porc .

3.3. Intérêt du chauffage

Afin d'évaluer l'impact de la puissance de chauffage installée dans des conditions plus contrastées que celles du paragraphe 3.2, les simulations sont réalisées en fixant de façon arbitraire la température extérieure à -30°C . Quatre niveaux de puissance de chauffage installée sont comparés (0 , $18,8$, $37,6$ et $50,0\text{ kW/porc}$), avec un fonctionnement variant entre 0 et 100% pour une température de consigne qui diminue de $24,5$ à $22,0^{\circ}\text{C}$ sur les 15 premiers jours d'engraissement. La règle de ventilation appliquée correspond à la règle 1 décrite plus haut.

L'installation d'un système de chauffage de plus en plus puissant sous des conditions climatiques très froides (données ambiantes non présentées) permet de réduire l'intensité du stress dû à l'exposition à des températures trop basses et donc la quantité d'énergie alimentaire utilisée pour couvrir les besoins de thermorégulation. Le GMQ augmente, l'IC diminue ainsi que le coût alimentaire (Tableau 3).

En conditions d'alimentation à volonté, le poids moyen des porcs à la fin de l'engraissement est satisfaisant dans les quatre situations, qui diffèrent de moins de 1 centime d'€ pour la plus-value moyenne liée au poids (non présentée). Les kg de carcasse

supplémentaires vendus par porc par rapport à la situation sans chauffage conduisent quand même à une amélioration de la marge sur coût alimentaire. La progression de ce critère est cependant freinée par la diminution du TMP de $0,8$ point (-1 point après ajustement pour le poids final) entre la puissance de chauffage maximale et la situation sans chauffage et ne permet pas de compenser la dépense supplémentaire en électricité de 4 à 12 €/porc (pour $0,09\text{ €/kWh}$). Chauffer l'air ambiant est en revanche intéressant économiquement quand le gain de GMQ obtenu permet d'alourdir les porcs en fin d'engraissement et faire en sorte qu'ils soient mieux classés dans la grille de paiement des carcasses. Cette situation est illustrée dans le tableau 3 pour des porcs rationnés. L'alourdissement des porcs en fin d'engraissement induit par le chauffage permet alors un gain de marge sur coût alimentaire $2,5$ fois plus élevé que le surcoût électrique.

Tableau 3 – Comparaison des résultats obtenus par porc selon la puissance de chauffage installée quand il fait -30°C dehors¹

Puissance de chauffage W/porc	P1 0	P2 18,8	P3 37,6	P4 50,0
Porcs à volonté				
CMJ, kg/j	2,70	2,67	2,63	2,60
GMQ, g	777	797	814	822
IC, kg/kg	3,49	3,37	3,25	3,18
PV final, kg	114,6	115,3	116,6	117,1
TMP	57,6	57,3	57,0	56,8
TMP ajusté sur le PV final	57,7	57,3	57,0	56,7
N excrété, % P1	100	96	92	90
Energie totale utilisée, % P1	100	149	199	233
Dont aliment, % total	89	58	42	36
Aliment (CA), Δ €	/	-1,8	-3,2	-4,1
Marge sur CA, Δ €	/	+2,5	+4,7	+5,7
Electricité (CE), Δ €	/	+4,4	+8,9	+11,8
Porcs rationnés				
CMJ, kg/j	2,24	2,24	2,24	2,24
GMQ, g	552	606	652	678
IC, kg/kg	4,10	3,73	3,46	3,33
PV final, kg	90,8	96,8	101,9	104,8
TMP	63,2	62,5	61,7	61,1
TMP ajusté sur le PV final	62,6	62,3	61,9	61,6
N excrété, % P1	100	96	92	90
Energie totale utilisée, % P1	100	149	199	233
Dont aliment, % total	87	53	39	33
Aliment (CA), Δ €	/	+0,5	+0,8	+0,9
Marge sur CA, Δ €	/	+11,2	+21,8	+27,4
Electricité (CE), Δ €	/	+4,4	+8,9	+11,8

¹ Voir Tableau 2.

Les valeurs de TMP obtenues apparaissent cependant en désaccord avec la littérature. Selon Rinaldo et Le Dividich (1991) et Čobanović *et al.* (2020), l'exposition au froid modifie la répartition des dépôts adipeux, avec une prédominance au niveau périphérique (bardière) et un moindre développement interne (panne). L'équation de prédiction du TMP renseignée par défaut dans InraPorc n'en tenant pas compte, le TMP est probablement d'autant plus surestimé dans nos simulations que la puissance de chauffage installée diminue. En d'autres termes, quand celle-ci augmente, la valorisation des carcasses dans la grille de paiement sur la base de leur TMP diminue sans doute de façon moins importante que ce qui est présenté dans le tableau 3, avec pour corollaire une plus grande augmentation de la marge sur coût alimentaire, susceptible de compenser le surcoût électrique tout en améliorant le confort thermique des animaux et en diminuant les risques de problèmes de santé.

3.4. Intérêt du *pad cooling*

L'utilisation du *pad cooling* est simulée en fixant de façon arbitraire la température extérieure à 30°C et l'humidité relative à 41 %. Le déclenchement étant programmé dès que la température extérieure dépasse 25°C, ce choix permet de simuler les performances quand le *pad cooling* fonctionne tout au long de l'engraissement. Cet équipement permet alors d'augmenter la CMJ (2,29 vs 1,91 kg/j) et le GMQ (839 vs 730 g) et ainsi aux porcs d'être en moyenne 7 kg plus lourds en fin d'engraissement (117 vs 110 kg). L'augmentation de la marge sur coût alimentaire (+1,7 €/porc) est probablement sous-estimée en raison d'une baisse importante du TMP (-3,4 point) à considérer avec prudence pour des raisons identiques à celles invoquées précédemment au froid. Outre une meilleure estimation de ce critère en relation avec la répartition des masses lipidiques, la prise en compte de l'effet de la chaleur sur le métabolisme est également nécessaire, i.e. sur le besoin d'entretien ou l'appétit comme l'ont fait par ailleurs Knap (2000) et Wellock *et al.* (2003), et sur la synthèse protéique (Le Bellego *et al.*, 2002b ; Serviento *et al.*, 2020).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Différentes combinaisons de choix techniques peuvent être comparées au moyen du modèle ThermiPig pour concevoir les salles d'engraissement de l'élevage de demain. Ce modèle permet de simuler l'environnement thermique des animaux

avec une précision d'un demi degré Celsius, soit une précision meilleure que celle des sondes de température habituellement installées en élevage. Dans un contexte de déploiement des capteurs en élevage pour caractériser l'ambiance, les animaux... cette précision permet d'envisager une utilisation du modèle en temps réel pour générer des alertes dès que la température ambiante diverge des valeurs attendues (Grausa *et al.*, 2020), voire pour modifier les réglages des équipements de façon anticipée quand des événements climatiques sont annoncés.

A terme le modèle pourra aussi être intégré à un outil d'aide à la décision pour évaluer l'intérêt d'une modification de la conduite, des caractéristiques de la salle d'engraissement ou l'installation de nouveaux équipements par une approche multicritère de la performance. Cela suppose au préalable quelques évolutions du modèle à l'échelle des animaux ou de la salle. Au regard de l'importance que le TMP a sur le paiement des porcs en France, il est crucial de mieux décrire le lien entre la composition chimique corporelle prédite par le modèle et les critères de classement. Cela implique de représenter les changements métaboliques induits par le froid ou la chaleur chez des populations de femelles et de mâles, castrés ou non. La prise en compte des effets des conditions d'ambiance sur la santé et le bien-être des animaux devra également être envisagée. Enfin, les pertes de chaleur par le sol, les apports par le rayonnement solaire et la prise en compte du rôle du lisier stocké sous les animaux seront également à considérer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- C3S (Copernicus Climate Change Service), 2019. European state of the climate 2019, summary. Ed. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), <https://doi.org/10.24381/zw9t-hx58>
- Cadéro A., 2017. Modélisation de l'atelier d'engraissement porcin pour prédire ses résultats économiques et ses impacts environnementaux. Thèse Agrocampus Ouest, 188 pp.
- Čobanović N., Stajković S., Blagojević B., Betić N., Dimitrijević M., Vasilev D., Karabasil N., 2020. The effects of season on health, welfare, and carcass and meat quality of slaughter pigs. *Int. J. Biometeorol.*, 11 pp, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01977-y>
- Grausa K., Komasilovs V., Brossard L., Quiniou N., Marcon M., Querné M., Kviesis A., Bumanis N., Zacepins A., 2020. Usability improvements of the ThermiPig model for precision pig farming. *Agronomy Res.*, 18(S2), 1300-1306.
- Holmes C.W., Close W.H., 1977. The influence of climatic variables on energy metabolism and associated aspects of productivity in the pig. In: *Nutrition and the climatic environment*, Ed: Haresign W., Swan H. et Lewis D., Butterworths, UK, chapter 4, 51-73.
- Knap P., 2000. Stochastic simulation of growth in pigs: relations between body composition and maintenance requirements as mediated through protein turnover and thermoregulation. *Anim. Sci.*, 71, 11-30.
- Le Bellego L., van Milgen J., Noblet J., 2002a. Effect of high temperature and low-protein diets on the performance of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.*, 80, 691-701.
- Le Bellego L., van Milgen J., Noblet J., 2002b. Effect of high ambient temperature on protein and lipid deposition and energy utilization in growing pigs. *Anim. Sci.*, 75, 85-96.
- Marcon M., Massabie P., Kergourlay F., Dourmad J.Y., Salaün Y., 2016. Médiabate, 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.
- NRC 2012. *Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition*. The National Academies Press, Washington, DC. 400 pp.
- Quiniou N., Renaudeau D., Dumas G., 2021. Influence du rationnement et de la couverture des besoins en acides aminés sur les performances du porc en croissance selon les conditions climatiques. *Journées Rech. Porcine*, 53, 169 – 174.
- Renaudeau D., Gourdine J.L., St-Pierre N.R., 2011. A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 2220-2230.
- Rinaldo D., Le Dividich J., 1991. Influence de la température ambiante sur les performances de croissance du porc. *INRA Prod. Anim.*, 4(1), 57-65.
- Serviento A.M., Le Bret B., Renaudeau D., 2020. Chronic prenatal heat stress alters growth, carcass composition, and physiological response of growing pigs subjected to postnatal heat stress. *J. Anim. Sci.*, 98 (5), DOI:10.1093/jas/skaa161
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J. Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.
- Vautier B., Quiniou N., van Milgen J., Brossard L., 2013. Accounting for variability among individual pigs in deterministic growth models. *Animal* 7, 1265-1273.
- Verstegen M.W.A., van der Hel W., 1974. The effects of temperature and type of floor on metabolic rate and effective critical temperature in groups and growing pigs. *Anim. Prod.*, 18, 1-11.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.W., Brun F. 2014. *Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment (Second Edition)*. Academic Press, Waltham, MA. 487 pp.
- Wellock I.J., Emmans G.C., Kyriazakis I., 2003. Modelling the effects of thermal environment and dietary composition on pig performance: model logic and concepts. *Anim. Sci.*, 77, 255-266.
- Wilfart A., Espagnol S., Dauguet S., Tailleur A., Gac A., Garcia-Launay F., 2016. ECOALIM: a dataset of environmental impacts of feed ingredients used in French animal production. *PLOS ONE* 11, e0167343.