

Modélisation des performances technico-économiques et environnementales de l'atelier d'engraisement porcin à l'aide d'un modèle dynamique, mécaniste et stochastique

Alice CADERO (1, 2), Alexia AUBRY (1), Ludovic BROSSARD (2),
Jean-Yves DOORMAD (2), Yvon SALAUN (1), Florence GARCIA-LAUNAY (2)

(1) IFIP–Institut du porc, 35651 Le Rheu, France

(2) UMR1348 PEGASE, INRA-Agrocampus Ouest, 35590 Saint-Gilles, France

alice.cadero@inra.fr

Modélisation des performances technico-économiques et environnementales de l'atelier d'engraisement porcin à l'aide d'un modèle dynamique, mécaniste et stochastique

Les élevages porcins sont soumis à des enjeux économiques et environnementaux grandissants. Pour répondre à ces enjeux, différentes méthodes d'évaluation des performances des systèmes de production ont été développées. Des travaux récents montrent que simuler la variabilité des performances entre les porcs améliore la précision des résultats, en comparaison de l'utilisation d'un modèle de l'animal moyen. L'objectif de ce travail était de développer un modèle de l'atelier d'engraisement intégrant les effets des interactions entre la variabilité inter-individuelle des porcs, la structure de l'élevage et les pratiques de l'éleveur, sur les performances de l'atelier. Les pratiques d'élevage ont été représentées dans le modèle à partir d'une typologie portant sur la conduite en bandes, les règles de mise en lots, l'alimentation et la gestion des départs à l'abattoir. Les porcs ont été représentés par un modèle individu-centré adapté du modèle InraPorc. Pour illustrer son fonctionnement, quatre simulations ont été réalisées en faisant varier le plan de rationnement (*ad libitum* ou restriction à 2,5 kg/j) et la séquence alimentaire (biphase ou multiphase). Une analyse de variance a été effectuée sur les indicateurs technico-économiques et environnementaux (calculés par Analyse de Cycle de Vie) calculés par le modèle. Les effets du plan de rationnement et de la séquence alimentaire sont significatifs ($P < 0,001$). Le scénario combinant restriction et multiphase apporte la meilleure marge par porc engraisé (16,9 €/porc) et les plus faibles impacts environnementaux par kg de porc produit. A l'inverse, le scénario combinant *ad libitum* et biphase induit la plus faible marge (11,3 €/porc) et les plus forts impacts environnementaux. Une expérimentation virtuelle basée sur le modèle complète cette étude en déterminant les effets combinés des différentes pratiques.

Modelling technical, economic and environmental performance of fattening pig production systems using a dynamic, stochastic and mechanistic model

Pig livestock farming systems face economic and environmental challenges. To cope with these issues, methods to assess the performance of a pig production system have been developed. Recent studies have highlighted that taking performance variability between pigs into account improves the precision and reliability of results, compared to the use of an average animal model. Our aim was to develop a model representing the pig fattening unit, taking into account effects of interactions between the individual variability of pigs, farmer's practices and farm infrastructure on performance of the unit. Farmer practices included in the model were chosen from a typology developed from an on-farm survey focused on batch management, allocation to pens, feeding and delivery practices. Pigs are represented using an individual-based model adapted from the InraPorc model. To illustrate model abilities, four scenarios were simulated, crossing two feed rationing plans (*ad libitum*, restriction to 2.5 kg/d) and two feed sequence plans (two phases, ten phases). A variance analysis was performed on the simulated technical, economic and environmental (calculated by Life Cycle Assessment) indicators. Effects of the feed rationing plan and the feed sequence plan on these indicators were significant ($P < 0,001$). The "restriction-ten phases" scenario was the best in terms of gross margin of fattening unit (16.9 €/pig) and environmental impacts per kg pig produced ($P < 0.001$). By contrast, the "*ad libitum*-two phases" scenario induced the lowest margin (11.3 €/pig) and the highest environmental impacts. A virtual experiment based on this model will complete this study by identifying the effects of different combinations of practices.

INTRODUCTION

La production porcine est soumise à différents enjeux économiques et environnementaux. Le maintien à un niveau élevé du prix des matières premières, couplés à des variations baissières du prix du porc, entraînent une dégradation du résultat économique des élevages. La production porcine contribue par ailleurs aux phénomènes d'eutrophisation et d'acidification et aux émissions des gaz à effets de serre (de Vries et de Boer, 2010). Pour être performants, les élevages doivent donc dans le même temps optimiser leurs résultats économiques et réduire leurs impacts environnementaux.

L'atelier d'engraissement est un levier d'action majeur concernant ces enjeux car il contribue à 70% de l'excrétion de phosphore et d'azote de l'élevage (Dourmad *et al.*, 1999) et concentre la majeure partie des charges alimentaires, et donc du coût de production. Pour optimiser les performances des animaux en engraissement, les éleveurs mettent en œuvre différentes pratiques qui visent à améliorer l'efficacité alimentaire des porcs tout en veillant à une bonne valorisation de la carcasse. Leur objectif est de réduire ainsi le coût alimentaire et d'augmenter le produit, tout en limitant le gaspillage et donc les rejets. L'augmentation des contraintes économiques et environnementales rend la gestion de l'atelier d'engraissement de plus en plus complexe, d'où l'intérêt de disposer d'outils d'aide à la décision basés sur des modèles plus précis dans le calcul de ses performances.

La plupart des modèles publiés représentant l'atelier d'engraissement porcine simulent l'effet des pratiques d'alimentation sur les performances moyennes de croissance des porcs (Heger *et al.*, 2007 ; Kebreab *et al.*, 2011), et rares sont ceux qui prennent en compte la variabilité des performances et des besoins entre les individus (Knap, 2000 ; Pomar *et al.*, 2003).

L'Analyse de cycle de vie (ACV) est une méthodologie reconnue pour l'évaluation des impacts environnementaux des productions agricoles. Cette méthode s'appuie généralement sur des modèles statiques et simplifiés de production porcine pour tester les possibilités de réduction des impacts environnementaux par l'adaptation des pratiques (Eriksson *et al.*, 2005 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014), sans prendre en compte le plus souvent la variabilité de performances des animaux. Pourtant, l'importance de l'utilisation d'un modèle individu-centré pour quantifier les effets des pratiques d'alimentation sur les performances technico-économiques et environnementales de groupes de porcs a été récemment mise en évidence (Brossard *et al.*, 2014).

Notre objectif était de développer un modèle de l'atelier d'engraissement porcine capable i) de simuler les performances individuelles des porcs en interaction avec les pratiques d'élevage, et ii) d'évaluer leurs effets sur les performances technico-économiques et les impacts environnementaux à l'échelle de l'atelier.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Description du modèle d'engraissement

Le modèle de l'atelier d'engraissement porcine MOGADOR est un modèle mécaniste, à événements discrets, et stochastique, avec un pas de temps de simulation journalier. MOGADOR repose sur une programmation orientée-objet. Dans ce modèle sont représentés le troupeau d'engraissement porcine, la

structure de l'élevage, ainsi que les pratiques de gestion par l'éleveur. Le troupeau d'engraissement porcine est organisé en plusieurs bandes, qui comprennent les porcs de leur entrée en engraissement jusqu'à leur départ à l'abattoir. La structure de l'atelier est représentée via les salles d'engraissement et leurs cases associées. La gestion par l'éleveur est représentée au travers de pratiques et d'un échancier contenant les tâches à effectuer. L'éleveur reçoit chaque jour des informations provenant du troupeau d'engraissement porcine et de l'échancier des événements. Selon ces informations et ses pratiques, l'éleveur peut modifier l'échancier en ajoutant des tâches. A chaque pas de temps, l'éleveur prend connaissance des tâches à effectuer et les applique.

La figure 1 décrit le modèle. Les principales entrées correspondent aux caractéristiques des bâtiments d'élevage et aux pratiques mises en place par l'éleveur. Ces pratiques concernent la conduite en bandes, la mise en lots à l'entrée en engraissement, l'alimentation, la gestion des fins de bandes et des départs à l'abattoir en accord avec la grille de paiement. A partir de ces entrées, la simulation est initialisée par la construction des bâtiments d'élevage, des salles et des cases et le choix d'un corps de pratiques décrivant la gestion de l'élevage par l'éleveur. A cette initialisation sont ajoutées deux autres entrées décrivant la composition des aliments et les profils des animaux. L'ensemble de ces informations sont envoyées au sous-modèle de simulation de la dynamique du troupeau d'engraissement, qui calcule les performances journalières des porcs. Ces performances, ainsi que la grille de paiement (grille Uniporc applicable au 30/03/2015) et le prix des aliments (prix de février 2014), sont ensuite utilisés par le module économique et environnemental qui calcule alors l'ensemble des indicateurs économiques et environnementaux de l'élevage.

Les indicateurs environnementaux choisis sont les impacts calculés par ACV. Ces impacts sont estimés pour chaque porc abattu, en utilisant les émissions et l'utilisation de ressources de chaque animal ainsi que les impacts moyens des ateliers naissance et post-sevrage établis à partir des performances moyennes de la gestion technico-économique (GTE) pour l'année 2014 (IFIP, 2015). Les impacts environnementaux des aliments sont calculés à l'aide du jeu de données ECOALIM (Wilfart *et al.*, 2015), et des hypothèses de distances de transport des aliments en Bretagne établis par Garcia-Launay *et al.* (2016). Les indicateurs économiques retenus sont basés sur ceux de la GTE, et établis pour chaque porc abattu. La plus-value par kg de carcasse est calculée en accord avec la grille de paiement Uniporc en vigueur, associant à chaque porc une valeur liée aux caractéristiques de sa carcasse (poids chaud et taux de muscle des pièces-TMP).

La description des pratiques d'alimentation est adaptée du modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008). Elles associent un plan de rationnement, une séquence alimentaire et un niveau auquel ils sont appliqués (à l'individu, à la case, à la salle). Chaque séquence alimentaire définit les aliments distribués aux animaux, la proportion associée, et les règles de passage d'une phase d'alimentation à une autre (un poids ciblé, une durée d'engraissement, une quantité d'aliment distribué). Chaque plan de rationnement définit la quantité d'aliment ou d'énergie distribuée aux animaux (pourcentage de l'ingéré *ad libitum* ou une quantité constante) pour chaque période du plan. Les règles de passage d'une période du plan à une autre sont la durée d'engraissement, l'âge, le poids vif, ou la quantité d'aliment consommé ou distribué.

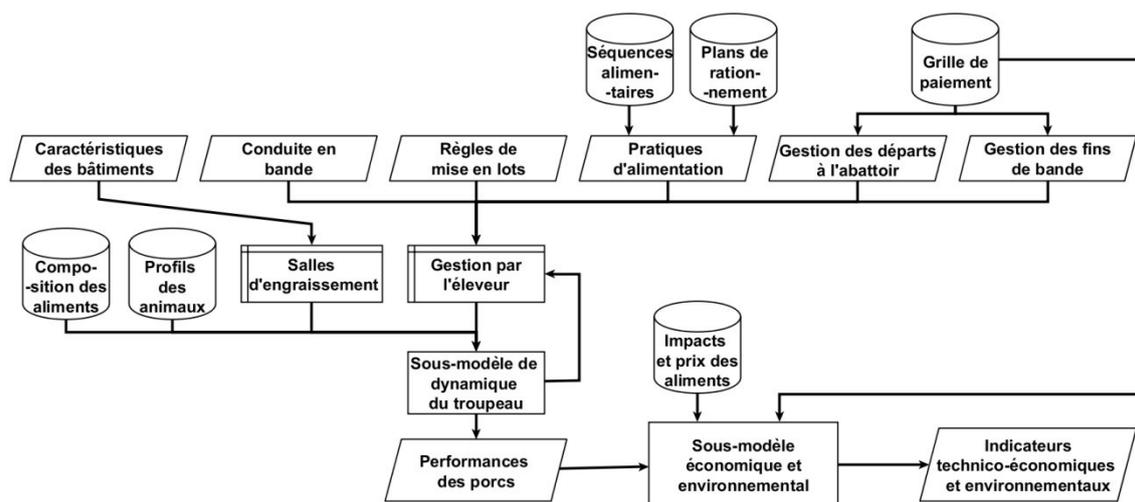


Figure 1 – Description générale du modèle de l'atelier d'engraissement porcin. Les données d'entrées sont représentées par les cylindres, les entrées modifiables par l'utilisateur et les sorties correspondent aux parallélogrammes

Tableau 1 – Description des simulations réalisées

Simulation	2Pad	2Pres	MPad	MPres
Séquence alimentaire	Biphase	Biphase	Multiphase (10 phases)	Multiphase (10 phases)
Plan de rationnement	<i>Ad libitum</i>	Restriction à 2,5 kg/j	<i>Ad libitum</i>	Restriction à 2,5 kg/j
Niveau d'application	La case	La case	La case	La case
Règle de mise en lots	Au poids	Au poids	Au poids	Au poids

Toutes ces règles sont appliquées au niveau spécifié, i.e. selon les performances de l'individu, ou les performances moyennes de la case ou encore les performances moyennes de la salle. Les porcs sont représentés à l'aide d'un modèle individu-centré, adapté du modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008). Il calcule la quantité d'aliment ingéré, les dépôts protéique et lipidique, et la croissance et l'excrétion qui en résultent pour chaque individu. A chaque porc est attribué un profil constitué d'un poids vif initial, d'un âge initial, et de cinq variables décrivant ses potentiels d'ingestion et de croissance (BW70, poids vif à 70 jours d'âge ; a et b, variables de description de la courbe d'ingestion ; PDm, le potentiel de dépôt protéique moyen en g/j ; et B_{Gompertz}, la précocité). Ces cinq variables et le poids initial sont définis à l'aide d'une matrice de covariance et d'un processus aléatoire multivarié (Vautier *et al.*, 2013). Par défaut, la population de porcs utilisée dans le modèle est composée de 50% de femelles et de 50% de mâles castrés. Les profils de tous les porcs et le taux de mortalité, constant tout au long de la simulation, sont donnés en entrée du modèle. MOGADOR est stochastique en raison du tirage aléatoire des profils animaux (Vautier *et al.*, 2013) en début de simulation et du tirage aléatoire de la mortalité à chaque pas de temps.

1.2. Description des simulations

Afin d'illustrer le fonctionnement du modèle, quatre simulations, croisant deux plans de rationnement (*ad libitum*, restriction à 2,5 kg/j) et deux séquences alimentaires (biphase, multiphase en 10 phases), ont été réalisées : 2Pad (biphase – *ad libitum*), 2Pres (biphase – restriction à 2,5 kg/j), MPad (multiphase – *ad libitum*), et MPres (multiphase – restriction à 2,5 kg/j). Les variables utilisés lors des simulations sont décrits dans le tableau 1. La conduite en bandes, avec 21 jours d'intervalle entre l'arrivée de deux bandes successives, correspond à la conduite la plus fréquente dans les élevages français. Le nombre de salles d'engraissement est de cinq, en

accord avec la conduite en bandes, avec une salle tampon de 100 places. Ces salles accueillent chacune une bande de 400 porcs, ce qui correspond à la taille moyenne des bandes d'un atelier d'engraissement porcin français (IFIP, 2015). Le plan de rationnement « restriction à 2,5 kg/j » simule une distribution *ad libitum* d'aliment jusqu'au seuil de 2,5 kg/jour. A partir de ce seuil, la distribution d'aliment reste constante à 2,5 kg/j jusqu'au départ à l'abattoir. Les aliments ont été formulés en accord avec les besoins pour le profil moyen utilisé pour générer la population de femelles (BW70 = 30 kg, a = 4,45 MJ d'énergie nette (EN)/j, b = 0,0216 MJ EN/j/kg, PDm = 143 g/jour, B_{Gompertz} = 0,0171/j, suivant une loi gamma de l'entretien, Brossard *et al.*, 2014), étant donné que les besoins des femelles sont supérieurs à ceux des mâles castrés. Les séquences alimentaires ont été définies pour subvenir à 115% des besoins du profil moyen en termes de lysine digestible pour maximiser les performances technico-économiques de la population comme suggéré dans Brossard *et al.* (2009, 2014). La séquence biphase consiste à apporter un aliment formulé à 1,13 g de lysine (Lys) digestible iléale standardisée (DIS) par MJ EN de 70 jours d'âge jusqu'à 65 kg de poids vif, puis à 0,86 g lys DIS/MJ EN de 65 kg de poids vif jusqu'à l'abattage. La séquence multiphase assure une transition progressive en 10 phases, avec passage à la phase suivante tous les 10 kg à partir de 40 kg de poids vif, pour passer de 1,13 g Lys DIS/MJ EN jusqu'à 0,55 g/MJ EN.

1.3. Analyse statistique

Une analyse de variance a été réalisée sur les indicateurs technico-économiques et environnementaux, obtenus en sorties des simulations, à l'aide d'un modèle mixte avec un effet fixe de la séquence alimentaire et du plan de rationnement et de leur interaction, et un effet aléatoire du profil animal dans la bande. Pour cette analyse, nous avons utilisé le package *lme4* (version 1.1) et la fonction *lmer* du logiciel R (R Development Core Team, 2010).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle MOGADOR a fait l'objet d'une procédure de vérification continue par expertise à chaque étape de développement pour s'assurer de la validité de ses résultats. Les résultats technico-économiques de la simulation 2Pres ont été comparés avec ceux de la GTE 2014 (IFIP, 2015) pour vérifier la validité du modèle. Ainsi l'indice de consommation (2,64 vs. 2,69 en naisseur-engraisseur), le TMP (61,0 vs. 61,0) et le poids moyen d'abattage (118,0 vs. 119,5 kg) simulés sont comparables à la moyenne de la GTE. Les impacts environnementaux sont en accord avec les résultats déjà publiés (Garcia-Launay *et al.*, 2014). Ainsi les impacts changement climatique, acidification, eutrophisation, consommation d'énergie et occupation des terres obtenus sont typiques des valeurs habituelles pour un élevage conventionnel sur caillebotis. Cela montre que notre modèle simule correctement le fonctionnement d'un atelier d'engraissement porcin.

La figure 2 représente les courbes de croissance des porcs d'une même bande de l'entrée en engraissement jusqu'au départ à l'abattoir. La courbe noire représente le poids moyen des porcs de la bande. L'écart-type des poids des porcs est initialisé au début de la période d'engraissement et augmente durant la simulation. Les réductions brutales du poids moyen observées à partir de 155 jours d'âge sont dues aux départs successifs à l'abattoir des porcs les plus lourds de la bande. En accord avec la combinaison de conduite en bandes et de nombre de salles d'engraissement choisie, ces salles doivent être vidées quand la bande atteint 171 jours d'âge (101 jours d'engraissement). A cette date, tous les porcs pesant plus de 105 kg sont envoyés à l'abattoir et ceux restants sont transférés en salle tampon où une stratégie alimentaire spécifique leur est appliquée (biphase – *ad libitum*). Le nombre moyen de départs à l'abattoir par bande est différent selon la simulation. En moyenne, il y a 4,0 départs par bande dans les simulations 2Pad et MPad, 2,9 dans

la simulation 2Pres et 2,4 dans la simulation MPres. Il y a donc environ 1,5 départ à l'abattoir en plus par bande dans les simulations en *ad libitum* que dans les simulations avec restriction. La prise en compte de la variabilité des performances individuelles nous permet de représenter plus finement les mécanismes mis en œuvre dans les pratiques d'élevage. La plupart des modèles publiés ne représentent en effet qu'un départ à l'abattoir correspondant à la fin de la simulation. Or avec un intervalle entre bandes de 21 jours, on observe entre trois et cinq départs par bande dans les élevages (Aubry *et al.*, 2016). Le modèle de Lurette *et al.* (2008) fixe un départ à l'abattoir par bande toutes les 2 semaines avec utilisation d'une salle tampon, ce qui permet de représenter environ quatre départs par bande. Dans ce dernier modèle comme dans le nôtre, chaque départ à l'abattoir peut concerner des porcs de plusieurs bandes distinctes, mélangés dans un même camion. La différence de gestion des départs à l'abattoir entre ces deux modèles réside dans les modalités de déclenchement. Dans le modèle de Lurette *et al.* (2008), les départs à l'abattoir sont prédéterminés et ont lieu toutes les 2 semaines, à partir de la 14^{ème} semaine d'engraissement, avec un effectif de porcs décidé au moment du départ. Dans notre modèle, le nombre de porcs de chaque bande qui devraient atteindre le poids d'abattage objectif (correspond au poids de milieu de gamme) au moment du départ (prévu 10 jours plus tard) est évalué chaque semaine. Si le nombre total de porcs prêts atteint le seuil de décision minimal de 50 porcs, alors un départ à l'abattoir est programmé dans l'échéancier, précédé d'une constitution du lot d'abattage 3 jours avant.

La figure 3 représente le pourcentage de porcs d'une même bande dont les besoins en lysine digestible ont été couverts en fonction du poids vif moyen de la case. En effet, les pratiques d'alimentation ont été appliquées à l'échelle de la case, i.e. le passage d'une phase à une autre et la quantité d'aliment distribué par porc ont été décidés en fonction des performances moyennes de chaque case.

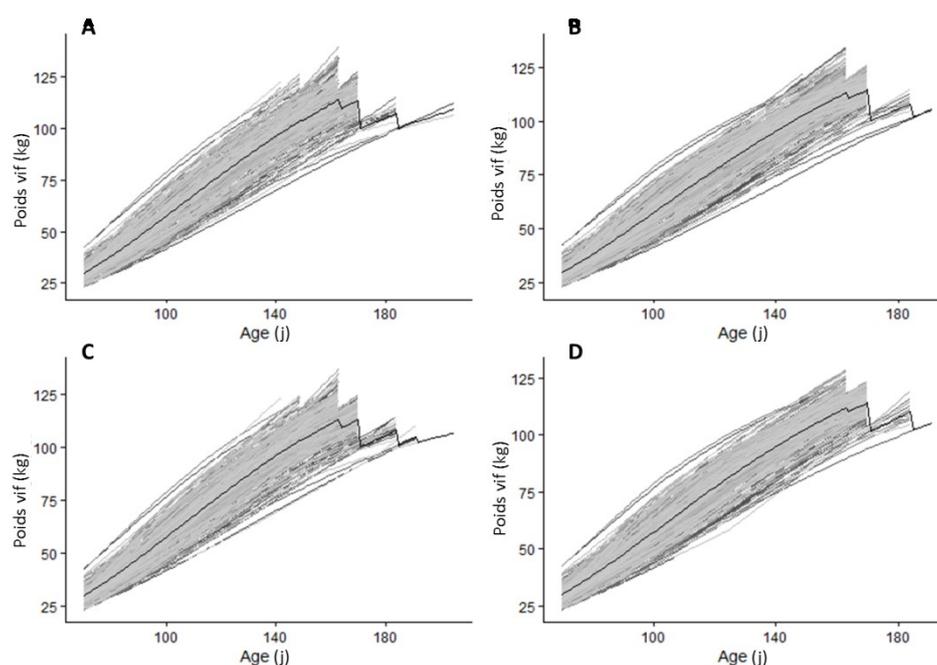


Figure 2 – Courbes de croissance des porcs d'une même bande en fonction de la simulation. Les courbes en noir représentent le poids moyen des porcs de la bande (simulation A : 2Pad, biphase + *ad libitum* ; simulation B : 2Pres, biphase + restriction ; simulation C : MPad, multiphase + *ad libitum* ; simulation D : MPres, multiphase + restriction)

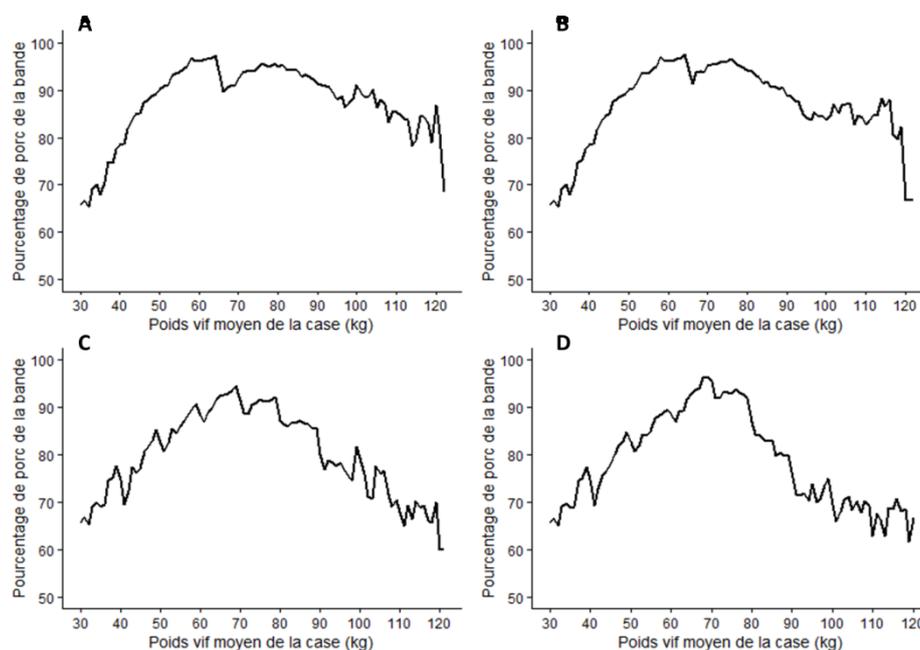


Figure 3 – Evolution du pourcentage de porcs dont les besoins en lysine digestible sont couverts, en fonction de la simulation (simulation A : 2Pad, biphase + *ad libitum* ; simulation B : 2Pres, biphase + restriction ; simulation C : MPad, multiphase + *ad libitum* ; simulation D : MPres, multiphase + restriction)

Tableau 2 – Résultats de l'analyse de variance des indicateurs technico-économiques et environnementaux des quatre simulations¹

	Conduite alimentaire				Ecart-type résiduel	P-value		
	2Pad	2Pres	MPad	MPres		SA	PR	SAXPR ²
Performances techniques								
Aliment ingéré (kg/porc)	236,6 ^c	230,6 ^a	237,4 ^d	231,4 ^b	10,3	0,001	<0,001	NS
Azote excrété (kg/porc)	3,33 ^d	3,19 ^c	2,99 ^b	2,87 ^a	0,21	<0,001	<0,001	0,01
Phosphore excrété (kg/porc)	0,60 ^c	0,58 ^b	0,58 ^b	0,56 ^a	0,04	<0,001	<0,001	NS
Taux de muscle des pièces (%)	60,2 ^b	61,1 ^d	59,7 ^a	60,6 ^c	1,3	<0,001	<0,001	NS
Indice de consommation (kg/kg)	2,69 ^c	2,64 ^a	2,71 ^d	2,68 ^b	0,073	<0,001	<0,001	0,03
Résultats économiques								
Coût d'alimentation (€/porc)	57,6 ^d	56,3 ^c	54,5 ^b	53,1 ^a	2,33	<0,001	<0,001	NS
Produit brut (€/porc)	131,1 ^b	133,4 ^d	129,8 ^a	132,2 ^c	3,16	<0,001	<0,001	NS
Marge brute (€/porc)	11,3 ^a	15,2 ^c	13,4 ^b	16,9 ^d	4,22	<0,001	<0,001	0,04
Résultats environnementaux³								
CC (kg eq CO ₂ /kg poids vif)	2,53 ^d	2,51 ^c	2,47 ^b	2,45 ^a	0,05	<0,001	<0,001	0,001
AC (g eq SO ₂ /kg poids vif)	45,78 ^d	44,73 ^c	43,65 ^b	42,99 ^a	1,38	<0,001	<0,001	0,003
EU (g eq PO ₄ /kg poids vif)	16,41 ^d	16,14 ^c	15,83 ^b	15,62 ^a	0,44	<0,001	<0,001	0,003
CE (MJ/ kg poids vif)	15,1 ^d	14,9 ^c	14,6 ^b	14,5 ^a	0,27	<0,001	<0,001	0,002
OT (m ² .a/kg poids vif)	3,57 ^c	3,53 ^b	3,53 ^b	3,50 ^a	0,07	<0,001	<0,001	0,006

¹ Analyse de variance : un modèle mixte avec en effets fixes la séquence alimentaire (SA), le plan de rationnement (PR) et leur interaction (SAXPR), et en effet aléatoire le profil animal dans la bande a été utilisé. Des lettres différentes sur une même ligne indiquent que les valeurs sont différentes au seuil de 5%.

NS, non significatif.

² Un modèle sans prise en compte de l'interaction est appliqué aux indicateurs pour lesquelles l'interaction est non significative.

³ CC, changement climatique ; AC, acidification ; EU, eutrophisation ; CE, consommation d'énergie ; OT, occupation des terres.

Pour chacune des quatre simulations, les variations brutales observées à partir de 100 kg de poids vif moyen sont dues aux départs à l'abattoir des porcs les plus lourds de la bande. Pour les simulations biphase, le saut aux environs de 65 kg de poids vif moyen correspond au passage entre la 1^{ère} et la 2^{ème} phase. Pour les simulations multiphase, neuf sauts sont notables tous les 10 kg à partir de 40 kg de poids vif moyen, correspondant à la transition entre deux phases. Le poids et l'âge moyens des porcs à l'abattage est de 119,0 (± 7,0) kg à 167,8 (± 5,4) jours pour la simulation 2Pad, de 118,0 (± 6,2) kg à 169,1 (± 3,5) jours

pour la simulation 2Pres, de 118,2 (± 6,4) kg à 168,1 (± 5,1) jours pour la simulation MPad, et de 117,0 (± 5,3) kg à 169,4 (± 3,0) jours pour la simulation MPres. Les écart-types obtenus pour chaque simulation montrent que les porcs n'ont pas atteint le poids d'abattage au même âge, en raison de la variabilité des poids initiaux et des potentiels de croissance et d'ingestion. Les valeurs des écart-type d'âge sont plus faibles d'environ 2 jours pour les simulations sous restriction par rapport aux simulations en *ad libitum*, ce qui est en accord avec le nombre plus faible de départs à l'abattoir pour les simulations sous restriction par

rapport aux simulations en *ad libitum*. Ces résultats confirment que la restriction permet de réduire la variabilité des poids dans une population de porc (Quiniou *et al.*, 2012).

Le tableau 2 montre les résultats des analyses de variances sur les performances technico-économiques et les impacts environnementaux pour les quatre scénarios étudiés. La séquence alimentaire et le plan de rationnement ont un effet significatif sur tous les indicateurs. L'interaction entre le plan de rationnement et la séquence alimentaire est significative pour la quantité d'azote excrété, l'indice de consommation, la marge brute, et l'ensemble des indicateurs environnementaux. La simulation 2Pad est celle qui obtient les moins bons résultats de marge par porc engraisé (11,3 €/porc) et d'impacts environnementaux (impacts changement climatique de 2,53 kg eq CO₂/kg poids vif). Inversement, la simulation MPres est celle qui obtient la meilleure marge (16,9 €/porc) et les plus faibles impacts environnementaux (impacts changement climatique de 2,45 kg eq CO₂/kg poids vif). Ces deux simulations aboutissent à un indice de consommation similaire et un TMP moyen proche, mais significativement différents. Ces résultats, en accord avec la littérature, confirment qu'à performances équivalentes, l'utilisation d'une séquence multiphase permet de réduire les impacts environnementaux (Dourmad et Jondreville, 2007 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014) tout en améliorant les résultats économiques dans ce contexte de prix des matières premières.

CONCLUSION

Le modèle MOGADOR représente le fonctionnement d'un atelier d'engraissement porcin en prenant en compte les interactions entre variabilité individuelle, pratiques d'élevage, et structure de l'atelier. Cette représentation de la variabilité individuelle permet de simuler de façon adéquate l'effet des pratiques et de la structure de l'élevage sur le fonctionnement de l'atelier. C'est à notre connaissance le premier modèle individu-centré qui simule les performances techniques et qui produit également des résultats d'impacts environnementaux par ACV. Ce type de modèle permettra de tester les effets des pratiques d'élevage et des caractéristiques de l'élevage sur les performances technico-économiques et environnementales de l'élevage, et donc d'évaluer les possibilités d'amélioration des performances de l'atelier d'engraissement porcin. Ce modèle sera intégré à un outil d'aide à la décision.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Alain Valancogne pour ses conseils lors de l'intégration du modèle InraPorc dans MOGADOR. Ce travail a bénéficié du financement d'une thèse CIFRE de l'ANRT avec un co-financement de l'appel à projets « Recherche finalisée et innovation » du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubry A., Lescot M., Cadéro A., Garcia F., Corregé I., Quiniou N., 2016. La gestion des fins de bande en élevage porcin : analyse des stratégies décisionnelles des éleveurs et des enjeux économiques associés. Journées Rech. Porcine, 48, 225-230.
- Brossard L., Dourmad J.Y., Rivest J., van Milgen J., 2009. Modelling the variation in performance of a population of growing pig as affected by lysine supply and feeding strategy. *Animal*, 3, 1114-1123.
- Brossard L., Vautier B., van Milgen J., Salaun Y., Quiniou N., 2014. Comparison of in vivo and in silico growth performance and variability in pigs when applying a feeding strategy designed by simulation to control the variability of slaughter weight. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 1939-1945.
- de Vries M., de Boer I.J.M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livest. Sci.*, 128, 1-11.
- Dourmad J.Y., Jondreville C., 2007. Impact of nutrition on nitrogen, phosphorus, Cu and Zn in pig manure, and on emissions of ammonia and odours. *Livest. Sci.*, 112, 192-198.
- Dourmad J.Y., Sève B., Latimier P., Boisen S., Fernandez J., van der Peet-Schwering C., Jongbloed A.W., 1999. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 261-264.
- Eriksson I.S., Elmquist H., Stern S., Nybrant T., 2005. Environmental systems analysis of pig production - The impact of feed choice. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 10, 143-154.
- Garcia-Launay F., van der Werf H.M.G., Nguyen T.T.H., Le Tutour L., Dourmad J.Y., 2014. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in pig production using Life Cycle Assessment. *Livest. Sci.*, 161, 158-175.
- Garcia-Launay F., Wilfart A., Dusart L., Nzally C., Gaudré D., Espagnol S., 2016. Multi-objective formulation is an efficient methodology to reduce environmental impacts of pig feeds. In: Proc. of the 10th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector; 19-21 October 2016; Dublin, Ireland.
- Heger J., Krizova L., Sustala M., Nitrayova S., Patras P., Hampel A., 2007. Assessment of statistical models describing individual and group response of pigs to threonine intake. *J. Anim. Feed Sci.*, 16, 420-432.
- IFIP-GTE, 2015. Porcs performances 2014 – Résultats de gestion des élevages de porcs – Références GTT-GTE. Edition IFIP, Paris, 32 p.
- Kebreab E., Strathe A.B., Yitbarek A., Nyachoti C.M., Dijkstra J., Lopez S., France J., 2011. Modeling the efficiency of phosphorus utilization in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 2774-2781.
- Knap P.W., 2000. Stochastic simulation of growth in pigs: relations between body composition and maintenance requirements as mediated through protein turn-over and thermoregulation. *Anim. Sci.*, 71, 11-30.
- Lurette A., Belloc C., Touzeau S., Hoch T., Seegers H., Fourichon C., 2008. Modelling batch farrowing management within a farrow-to-finish pig herd: influence of management on contact structure and pig delivery to the slaughterhouse. *Animal*, 2, 1751-1753.
- Pomar C., Kyriazakis I., Emmans G.C., Knap P.W., 2003. Modeling stochasticity: Dealing with populations rather than individual pigs. *J. Anim. Sci.*, 81, E178-E186.
- Quiniou N., Brossard L., van Milgen J., Salaun Y., Quesnel H., Gondret F., Dourmad J.Y., 2012. La variabilité des performances animales en élevage porcin : description et implications pratiques. *INRA Prod. Anim.*, 25, 5-16.
- R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org>.
- 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.
- Wilfart A., Dauguet S., Tailleur A., Willmann S., Laustriat M., Magnin M., Garcia F., Gac A., Espagnol S., 2015. ECOALIM: une base de données des impacts environnementaux des matières premières utilisées en France pour l'alimentation animale. *Rencontres Autour Rech. Rumin.*, 22, 74.