

Comment caractériser la performance des porcs en croissance face à des challenges liés à leur environnement d'élevage ?

Masoomeh TAGHIPOOR, Ludovic BROSSARD, Jaap VAN MILGEN

PEGASE, INRA, AgroCampus Ouest, 35590, Saint-Gilles, France

Email : Masoomeh.Taghipoor@inra.fr

Comment caractériser la performance des porcs en croissance face à des challenges liés à leur environnement d'élevage ?

L'objectif de ce travail est de décrire, à l'aide d'un modèle mécaniste, l'influence d'une perturbation dans l'environnement sur la consommation d'aliment des porcs en croissance. Cette dernière étant considérée comme un indicateur de stress environnemental, sa représentation permet de mieux appréhender les modifications de la cinétique de croissance chez les porcs. De plus, avec les nouvelles technologies de monitoring, il est maintenant possible d'évaluer l'impact de ces perturbations sur la consommation journalière et sur la performance de l'animal en temps réel et à très haut débit. Le modèle développé est basé sur deux sous-modèles : un premier qui permet de décrire la performance des porcs en croissance dans un environnement standard (InraPorc), et un second connu en physique pour décrire le comportement d'un système face aux perturbateurs extérieurs (système de ressort et amortisseur). Le couplage de ces deux modèles a permis de décrire l'influence des perturbateurs sur l'ingestion de porcs en croissance, et de caractériser par deux paramètres la réponse de porcs face à une perturbation. La comparaison de ces paramètres permet alors de classer les animaux en fonction de leur résistance et leur degré de résilience ainsi que leur aptitude à retrouver plus ou moins rapidement une croissance normale après une perturbation. Les résultats montrent que contrairement aux animaux avec une croissance lente, les animaux avec une croissance rapide sont moins robustes face à la perturbation et mettent plus du temps à regagner leur trajectoire de croissance normale. Pour le moment, le modèle permet d'étudier la performance des animaux face à une seule perturbation. Les futurs développements du modèle ont pour objectif de l'adapter à la détection automatique et l'étude de plusieurs perturbations d'origines connues ou inconnues.

Characterization of growing pigs' adaptive response when faced with environmental perturbations.

The main objective of this work is to develop a mechanistic model to describe the influence of a generic and unknown perturbation on the feed intake of growing pigs. This latter is considered as a reliable indicator of stress in the environment, its representation by a model is useful to better understand the influence of the stress on the growth kinetics of pigs. Moreover, with novel monitoring technologies, it is now possible to evaluate the impact of these perturbations on animal performance in real time and with a high frequency. The proposed model is based on two sub-models: InraPorc, a model to describe growing pigs' performance in standard conditions, and a well-known model in physics (spring and damper system) to describe the behavior of a system in the presence of external perturbations. Coupling these two models made it possible to represent the influence of environmental perturbations on the feed intake of growing pigs. In this new model, we introduced two parameters to characterize the response of animals when faced with perturbations. The main interest of this characterization is to define new standards to rank animals based on their performance and on their capacity to recover normal growth after perturbation. The results show that unlike animals with a slow growth, animals with rapid growth are less robust when faced with perturbations and take longer time to regain their standard growth trajectory. Currently, the model is able to simulate the performance of animals facing with a given stress; future development of the model will adapt it to the automatic detection and simulation of several perturbations with known or unknown origins.

INTRODUCTION

La performance se définit comme la capacité de production d'un animal (la capacité d'ingestion d'aliment, le gain de poids, le ratio des tissus maigre et gras, le rendement en carcasse, etc.). Cette performance est en partie déterminée par le potentiel génétique de l'animal dont l'expression est fortement influencée par les facteurs environnementaux. Les animaux d'élevage doivent de plus en plus faire face à des contraintes environnementales liées à des milieux changeants et contrastés en termes de température (pic de chaleur, hausse des températures moyennes, etc.), d'hygiène, de modifications de l'espace alloué aux animaux (élevage en groupe, en systèmes d'alimentation automatiques, etc.). Ainsi, la plupart des animaux n'expriment pas la totalité de leur potentiel de production en raison de contraintes au cours de la vie productive, mais aussi parce que l'environnement d'élevage est différent de celui dans lequel l'animal a été sélectionné. Une meilleure connaissance de l'adaptation de l'animal face à des contraintes environnementales susceptibles de perturber sa physiologie et ses performances est indispensable pour garantir une production compatible avec les enjeux de la durabilité (Bolhuis et Kemp, 2016). Dans ce travail, nous nous focalisons sur les perturbations ponctuelles ou à court terme. Ce type de challenge influence ponctuellement les cinétiques des performances des animaux au cours de leur vie productive, contrairement à une perturbation chronique (à long terme) qui change plus globalement le phénotype de l'animal.

Avec les nouvelles technologies de monitoring, il est maintenant possible d'évaluer plus précisément l'impact d'événements perturbateurs ou challenges ponctuels (par exemple pic de chaleur, événement sanitaire, ...) sur la cinétique des performances de l'animal. La compréhension des mécanismes mis en œuvre par l'animal pour résister à ces challenges et rebondir après un ou plusieurs challenges successifs est importante pour proposer des stratégies de gestion dans l'élevage. Prendre en compte les perturbations dans la gestion d'un élevage constitue un enjeu majeur pour l'élevage de précision (via e.g. l'alimentation de précision ou la médication de précision). Les impacts socio-économiques potentiels (considération de l'animal comme « individu », détection des problèmes et apport de solutions individuelles et/ou collectives, réductions de l'utilisation des antibiotiques...) sont indéniables et justifient la prise en compte de ces perturbations dans le cadre de la durabilité de l'élevage et de la production (Berckmans, 2014). Différentes études expérimentales ont été menées pour observer et comprendre l'influence de l'environnement sur la performance des animaux d'élevage (Renaudeau *et al.*, 2013 ; Campos *et al.*, 2014) mais restent insuffisantes pour envisager une grande diversité de challenges, de conditions d'application, et de réponses individuelles.

La réponse de l'animal aux perturbations est complexe et doit être analysée de façon systémique, c'est-à-dire que l'on ne peut se contenter de faire la somme des différents éléments de cette réponse pour en comprendre la nature. De ce fait, une approche multidisciplinaire basée sur la modélisation mathématique de la réponse adaptative de l'animal est plus appropriée que les expérimentations successives pour caractériser cette réponse. Différents modèles existent pour décrire le phénotype des porcs en croissance dans un environnement donné et stable (van Milgen *et al.*, 2008 ; Fraga *et al.*, 2015). Ces modèles permettent d'étudier l'influence des

différents régimes et des stratégies alimentaires sur la performance d'un animal sans tenir compte des fluctuations ponctuelles de l'environnement (Strathe *et al.*, 2015). Le modèle de Wellock *et al.* (2003) décrit l'impact d'un stress social sur l'ingestion chez les porcs. Ces modèles, malgré leur aspect mécaniste et leur bonne capacité de prédiction, ne tiennent pas compte de l'influence des changements dans l'environnement de l'animal sur l'ensemble de sa performance ; ils ne modélisent pas ou qu'imparfaitement les ruptures de croissance et les éventuels rebonds (capacité de résilience des animaux) au cours de la vie productive. Les technologies actuellement disponibles permettent de suivre la performance des animaux de façon individuelle et à haute fréquence. Ceci nous permet de détecter des perturbations de performance et d'étudier la capacité d'adaptation du système. Cette capacité est caractérisée par (i) le degré de résistance du système défini par l'amplitude de la réponse du système face à la perturbation, qui dépend en outre à l'intensité de perturbation et (ii) par sa résilience ou capacité de récupération du système après la perturbation (Sauvant et Martin, 2010).

Nous proposons dans ce travail (i) de caractériser la réponse des porcs en croissance aux perturbations de l'environnement par une démarche de modélisation, (ii) de proposer des lois de réponses adaptatives en s'attachant notamment aux phases caractérisant la résistance puis la résilience animale. L'aspect générique de ce modèle le rend applicable à tous types de stress, y compris ceux dont l'origine est inconnue.

1. DESCRIPTION DU MODELE

1.1. Modélisation de la performance du porc en croissance en conditions non perturbées

Comme mentionné précédemment, différents modèles existent pour décrire la performance phénotypique des porcs en croissance dans un environnement stable. Nous nous basons ici sur le modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008) qui permet de caractériser les porcs en croissance avec cinq paramètres majeurs.

Dans ce modèle, parmi différentes fonctions du poids vif (PV) de l'animal, la capacité d'ingestion d'aliment *ad libitum* de l'animal (exprimée en kg ou MJ) peut être décrite par une fonction Gamma dépendant de l'énergie nécessaire pour l'entretien de l'animal. Nous avons ainsi :

$$QI(t) = \Gamma(PV(t), a, b),$$

où a et b sont des paramètres phénotypiques dépendant de l'ingestion potentielle de l'animal quand ce dernier atteint 50 kg et 100 kg PV (QI50 et QI100), respectivement.

Le potentiel de croissance de l'animal est représenté dans ce modèle par le dépôt protéique qui est décrit par une fonction Gompertz dans des conditions environnementales standards. Cette fonction sigmoïdale compare l'état actuel de l'animal (i.e., la masse des protéines corporelles) par rapport à un état prévu. Au lieu de paramétrer cette fonction par la masse de protéines corporelles à la maturité, les auteurs ont utilisé la moyenne du dépôt de protéines entre le début et la fin d'une simulation (PDmoyen). De plus, ce paramétrage permet de changer la forme de la courbe de croissance (à l'aide d'un paramètre nommé *Précocité*) sans changer la moyenne du dépôt de protéines. Le modèle nécessite aussi de connaître le PV de l'animal en début de croissance (PVinit). Ce modèle permet alors de caractériser le potentiel phénotypique d'un porc en croissance par cinq paramètres (QI50, QI100, PDmoyen, Précocité, PVinit).

A titre d'exemple, l'évolution en fonction de l'âge du PV réel de deux porcs en croissance est représentée dans la figure 1a en considérant un aliment avec 8,85 MJ/kg d'énergie nette (EN). Les données montrent une croissance plus rapide chez le porc A. Ces données ainsi que les mesures d'ingestion journalières ont été utilisées afin d'estimer les cinq paramètres du modèle permettant de caractériser ces deux animaux. Les résultats sont

présentés dans le tableau 1. Cette caractérisation confirme que le porc A possède un potentiel de croissance plus important que le porc B, traduit par un PDmoyen plus élevé, en accord avec les courbes de PV. Le dépôt journalier de protéines, simulé par InraPorc en utilisant les paramètres du tableau 1, est représenté dans la figure 1b.

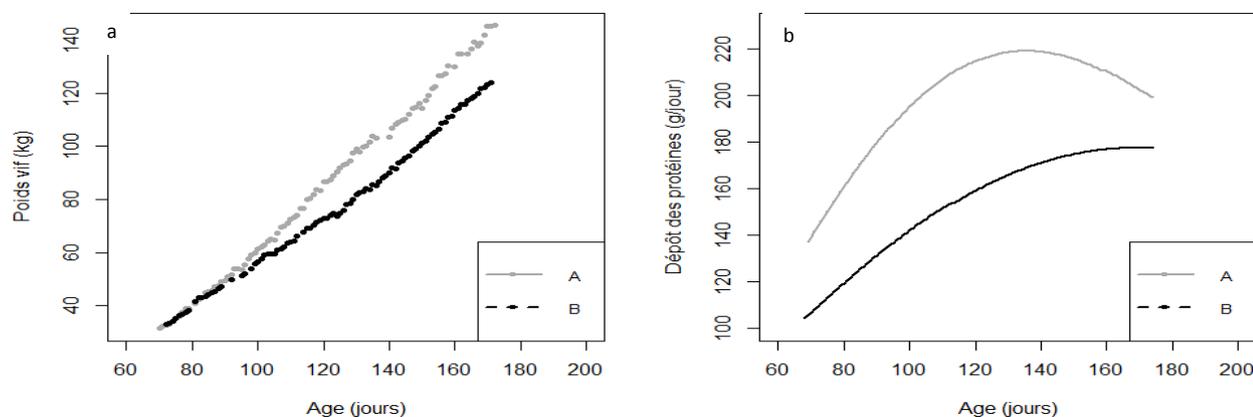


Figure 1 - Représentation en fonction de l'âge a) des profils des poids vifs de deux porcs en croissance dans un environnement standard et en absence de perturbation et b) des courbes de dépôt de protéines, simulées par le modèle InraPorc en utilisant les paramètres du tableau 1.

Tableau 1 - Valeurs des paramètres InraPorc estimés à partir des données de poids vif et l'ingestion de deux porcs en croissance

Porc	PVinit, kg	Précocité, /j	PDmoyen, g/j	QI50, MJ EN/j	QI100, MJ EN/j
A	31,67	0,01	198,13	15,39	31,67
B	32,91	0,01	151,97	14,29	24,65

RMSEP de porc A = 2,63, RMSEP de porc B = 2,26 ; où RMSEP est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de la prédiction.

1.2. Intégration de perturbations dans le modèle

Afin de développer un modèle qui permet de caractériser la réponse des animaux face à une perturbation dans l'environnement, il faut tout d'abord caractériser l'environnement perturbé, pour ensuite l'intégrer dans le modèle InraPorc. En effet, un challenge thermique peut facilement être caractérisé avec la différence des températures entre conditions standards et perturbées (Renaudeau, 2015). Or, il n'est pas toujours possible de caractériser une perturbation environnementale, quand il s'agit de l'état d'hygiène d'un élevage ou les modifications non contrôlées dans l'environnement (Sandberg *et al.*, 2007). Dans un second temps et compte tenu de la variabilité entre les individus dans un élevage, il faut décrire la perception de cette perturbation par chaque individu. En effet, l'intensité des réponses varie selon les individus. Nous cherchons alors un indicateur de la présence de la perturbation dans l'environnement qui reflète comment elle a été perçue par chaque animal. L'ingestion d'aliment (et donc l'acquisition des ressources) est un des premiers facteurs influencé lors des modifications dans l'environnement de l'élevage. Ce facteur permet non seulement de détecter la présence des perturbations dans l'environnement mais représente aussi les caractères adaptatifs de chaque animal face à cette perturbation ou, en d'autres termes, sa perception. L'ingestion a aussi l'avantage d'être facilement mesurable avec les outils d'élevage de précision. Des courbes d'ingestion

obtenues par le processus d'analyse des données fonctionnelles avec le package fda (Ramsay, 2005) du logiciel R (3.2.0, R Core Team, 2015) chez sept porcs en croissance entre 110 et 130 jours d'âge (base de données interne) sont représentées dans la figure 2a. Nous pouvons constater dans toutes les courbes d'ingestion une baisse de consommation suivie par un rebond, mais avec des intensités différentes ; en d'autres termes nous observons une résistance face à la perturbation environnementale suivie par une période de résilience. Pour caractériser la réponse des animaux face à une perturbation, nous utilisons le modèle Kelvin-Voight (Marques et Creus, 2012) qui représente le comportement d'un système de ressort-amortisseur face à une force extérieure. Sadoul *et al.* (2015) ont montré que ce modèle est adéquat pour décrire la réponse des animaux face aux perturbations dans l'environnement. Ainsi, pour modéliser des courbes d'ingestion présentant des formes indiquant une perturbation, nous proposons un modèle d'ingestion d'aliment sous la forme d'une fonction de Gamma intégrant un système de ressort et amortisseur en équilibre. Ce système est alors soumis à une force extérieure lors des perturbations environnementales. Nous intégrons donc à la fonction Gamma proposée dans le modèle InraPorc, une fonction $\alpha(t)$ qui décrit les déviations de cette courbe optimale suite à la présence des perturbations dans l'environnement. Le nouveau modèle d'ingestion est alors présenté la fonction IQ_p .

$$IQ_p(t) = \alpha(t, K, C) \times \Gamma(a, b, PV(t)) ;$$

où $\alpha(t, K, C)$ est une fonction positive qui représente le système ressort et amortisseur. La fonction α est la solution de l'équation Kelvin-Voight :

$$percF \times \frac{d^2\alpha}{dt^2}(t) = percF - K \times \alpha(t) - C \times \frac{d\alpha}{dt}(t) ,$$

dans lequel t représente la période de perturbation le paramètre percF représente la perception de la perturbation par l'animal, K la constante de ressort et C le coefficient de l'amortisseur (pour plus de détails sur le système ressort et amortisseur, voir Sadoul *et al.*, 2015).

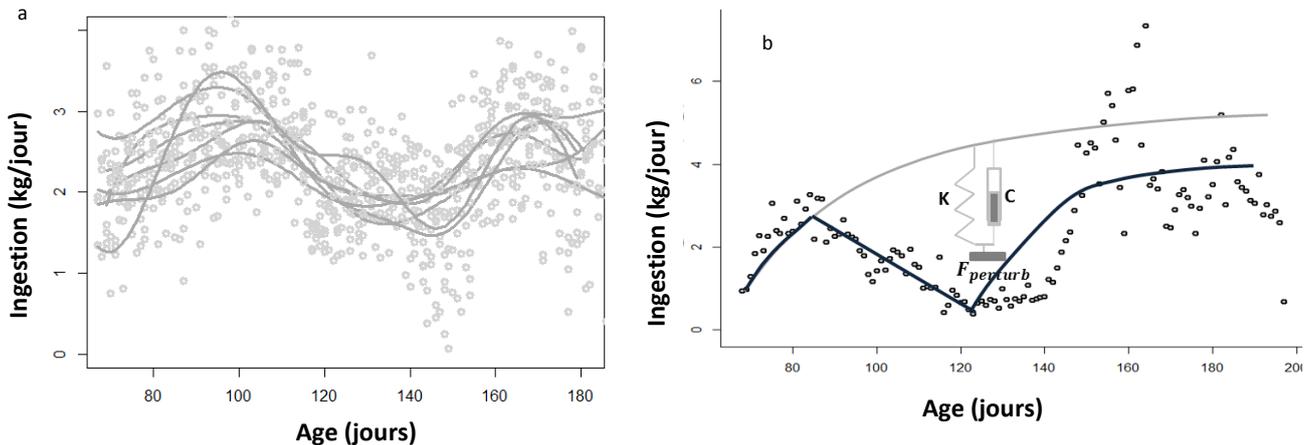


Figure 2 - a) Courbes d'ingestion en fonction de l'âge de 7 porcs en croissance, soumis à une perturbation dans l'environnement dont l'origine est inconnue. b) En présence d'une perturbation, le modèle propose de considérer la courbe d'ingestion comme un ressort influencé par une force extérieure (F_{perturb}). Les deux paramètres de K (constante de ressort) et C (coefficient d'amortisseur) permettent de caractériser la réponse adaptative de l'animal.

En présence des perturbations, la fonction α induit des déviations de la trajectoire d'ingestion prédite par InraPorc, pour suivre la nouvelle trajectoire de l'ingestion (I_{Q_p}). La figure 2b indique comment la réponse de l'animal peut être caractérisée par les deux paramètres du système ressort-amortisseur. En effet, les paramètres K (constante de ressort) et C (coefficient d'amortisseur) permettent de représenter la réponse de l'animal en termes de résistance face à la perturbation et de rebond après la perturbation. Une grande valeur de K est associée à une grande résistance du système et une petite valeur de C est associée à un rebond rapide du système. La capacité de résilience d'un système peut aussi être représentée ici par le paramètre de décroissance exponentielle dans l'équation de ressort-amortisseur $T = C/K$. Une perturbation dans l'environnement d'élevage peut influencer la performance des porcs en croissance à deux niveaux : (i) modification de l'ingestion d'aliment, (ii) modification de l'allocation de l'énergie à différents compartiments de l'animal. Nous sommes conscients qu'un modèle ne reflète qu'une partie de la réalité et permet surtout d'affiner les modèles existants. Par exemple, les données de la figure 2b montrent que l'animal ne retrouve pas sa consommation initiale après la perturbation, ce qui indique que 1) la perturbation se poursuit jusqu'à la fin ou 2) la perturbation a changé les paramètres du modèle ou le phénotype de l'animal via l'adaptation à ce nouveau changement dans l'environnement. D'autre part, nous observons une augmentation de l'ingestion après la perturbation, qui peut indiquer une consommation compensatrice. Dans cet article nous nous focaliserons sur les modifications dans les courbes de l'ingestion d'aliment à la suite d'une perturbation ponctuelle de l'environnement sur une période donnée et nous évoquerons ensuite les possibilités d'amélioration de ce modèle.

La figure 3 représente un schéma simple de ce modèle. Il montre que la consommation *ad libitum* d'aliment dépend de l'environnement : elle est représentée par la fonction Gamma de l'entretien dans un environnement standard et qui est influencée par un système de ressort-amortisseur dans un environnement perturbé. Le modèle contient sept paramètres principaux associés à la performance de l'animal, dont deux (K et C) qui caractérisent en termes de consommation *ad libitum* la réponse à une perturbation dans l'environnement d'élevage.

Afin d'en tester le comportement, le modèle a été utilisé pour caractériser la réponse en termes d'ingestion de quatre des animaux de la figure 2. La trajectoire de croissance de ces animaux a été influencée par une perturbation dans l'environnement dont l'origine est inconnue. Cependant, nous faisons l'hypothèse que c'est la seule perturbation survenue pendant la durée de croissance de ces animaux et qu'elle a duré 20 jours, entre 110 et 130 jours d'âge. Les six paramètres du modèle décrivant les caractéristiques de l'animal ont été estimés en utilisant le logiciel Matlab (MATLAB 2015b, The MathWorks, Natick, 2015).

2. RESULTATS-DISCUSSION

Le tableau 2 présente pour les quatre animaux sélectionnés les paramètres de la performance et la réponse à la perturbation ainsi que l'erreur résiduelle (RMSEP) en kg. Nous nous focalisons principalement sur les deux paramètres (K , C) décrivant les caractères adaptatifs de ces animaux. Nous faisons l'hypothèse qu'un retour rapide sur la trajectoire standard de l'ingestion est équivalent à une meilleure adaptation de l'animal. Les valeurs de coefficient de résilience T (Tableau 2), montrent que l'animal 5070 a une résilience très rapide et le porc 5073 une résilience très lente comparé aux autres animaux. Nous avons utilisé ces paramètres pour prédire les courbes d'acquisition d'aliment en se basant sur le modèle d'ingestion proposé dans cet article. La figure 4 montre, pour les quatre animaux sélectionnés, les données expérimentales d'ingestion (points gris), l'ingestion prédite avec notre modèle (courbe noire) et l'ingestion prédite par InraPorc (courbe pointillée). Nous observons une baisse importante de l'ingestion chez les animaux 5144 et 5073 face à cette perturbation, alors que l'ingestion des porcs 5070 et 5071 est moins influencée. D'autre part, ces derniers ont tendance à récupérer rapidement, ce qui est attendu en se basant sur leur coefficient de résilience ($T = 13,80$ et $T = 16,9$, respectivement). Nous pouvons en déduire que ces animaux ont une capacité d'adaptation plus importante face à cette perturbation comparé aux deux autres dont les coefficients de résilience sont plus élevés. Cependant, nous pouvons constater que malgré une adaptation rapide, ces animaux présentent une ingestion plus faible après la phase de rebond comparativement à l'ingestion des porcs 5073 ou 5144.

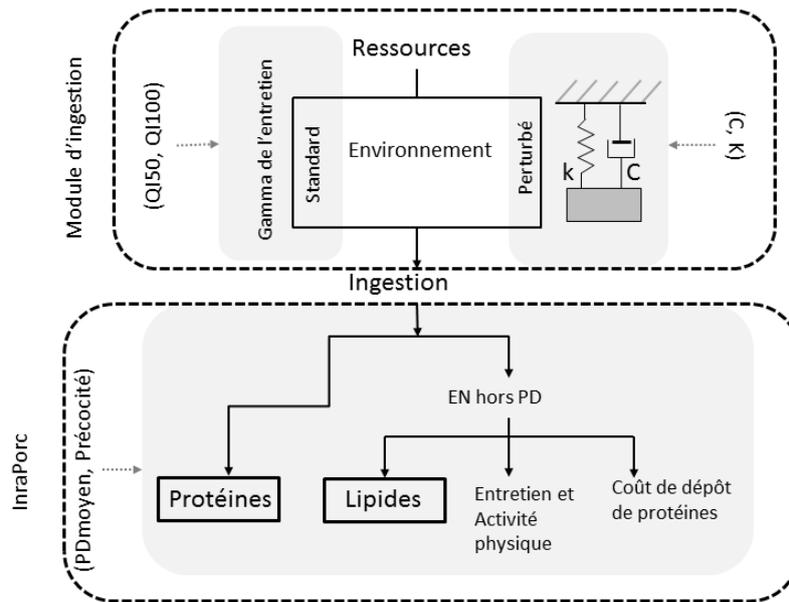


Figure 3 - Schéma de principe du modèle proposé pour décrire l'influence des perturbations dans l'environnement sur l'alimentation *ad libitum*. Les flèches (->) représentent les flux de nutriments ou d'énergie.

Tableau 2 - Valeurs des paramètres de quatre porcs en croissance, estimés à partir des données de poids vif et d'ingestion. Le paramètre T représente la capacité de résilience de l'animal après la fin de la perturbation

Porc	Paramètres du modèle ¹								
	PVinit, kg	Précocité, /j	PDmoyen, g	QI50, MJ EN	QI100, MJ EN	K (sans unité)	C, N/m	T = C/K	RMSEP
5070	22,89	0,0002	150,50	26,39	20,06	0,17	2,39	13,80	6,36
5071	21,44	0,005	142,60	26,98	21,41	0,17	2,86	16,9	1,65
5073	21,09	0,001	161,43	29,42	30,96	0,051	2,54	49,67	3,20
5144	25,06	0,00003	149,72	28,58	22,25	0,07	2,85	35,40	3,26

¹Précocité, PDmoyen : paramètres de la fonction de Gompertz décrivant le potentiel de dépôt protéique ; QI50, QI100 : potentiel d'ingestion de l'animal à 50 kg et 100 kg de poids vif, respectivement ; K : constante de ressort ; R : coefficient d'amortisseur ; T : la capacité de résilience.

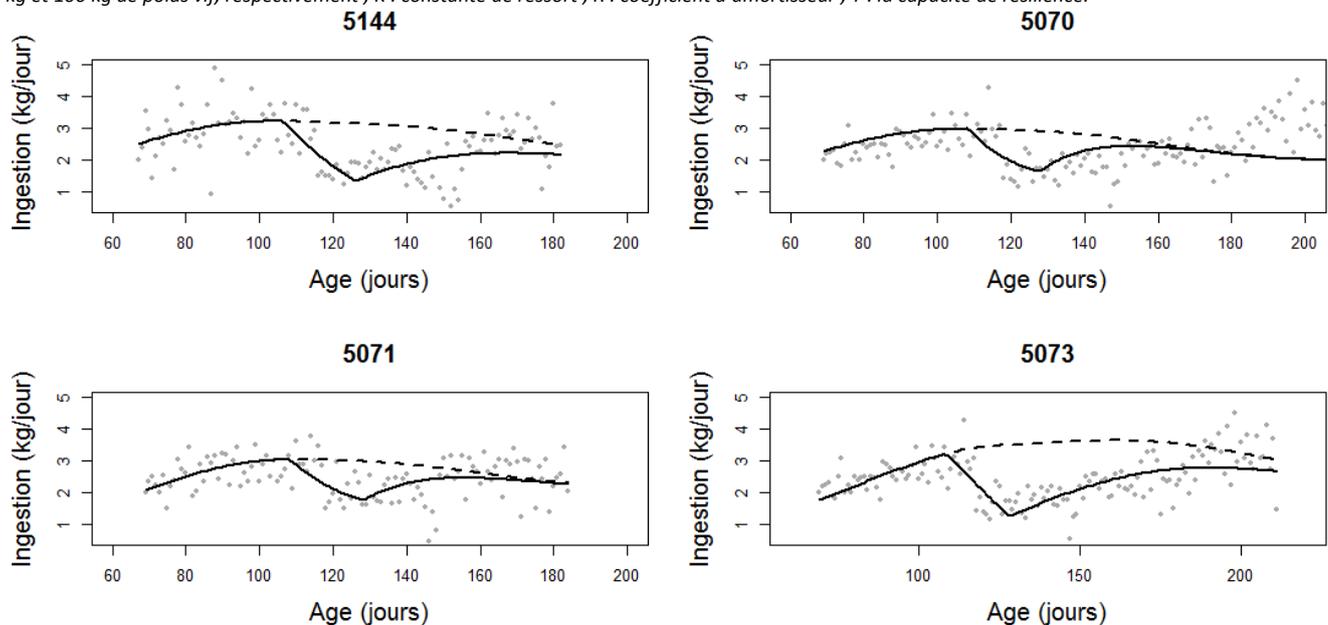


Figure 4 - Courbes d'ingestion *ad libitum* de quatre porcs entre 110 et 130 jours d'âge et ayant subi une perturbation d'origine inconnue entre 110 et 130 jours d'âge : courbe obtenue par simulation avec le modèle proposé ici (courbe noire), courbe obtenue avec le modèle IntraPorc (courbe pointillée) et mesures expérimentales (points gris).

Plusieurs explications peuvent justifier ce comportement : (i) cela peut être dû à une deuxième perturbation qui influence l'ingestion du porc 5070 et qui n'a pas été prise en compte dans notre modèle. Cependant nous pouvons constater la présence d'autres perturbations également dans les profils

d'ingestion des autres animaux (diminution de l'ingestion). (ii) Ce comportement peut aussi être expliqué par un compromis entre les différentes fonctions d'un animal (Douhard *et al.*, 2014). En effet, il a été montré que les animaux avec une performance de production importante, ont tendance à

allouer plus de ressources à la production (ici le dépôt des protéines) plutôt qu'à la fonction adaptation ou défense immunitaire. Les animaux plus performants en production (5073 et 5144) sont alors plus fragiles face aux perturbations.

CONCLUSION

Nous avons proposé un modèle permettant de caractériser la réponse adaptative des animaux aux perturbations dans l'environnement. Ce modèle permet de caractériser la performance de production des animaux en tenant compte de leur comportement alimentaire face à une perturbation. Cette approche permet d'envisager de proposer des facteurs complémentaires de sélection qui permettent de progresser vers des stratégies durables de sélection et de conduite des animaux (Friggens *et al.*, 2010). Dans cet article, nous avons traité le cas de perturbations avec des origines inconnues. Une connaissance sur l'origine des perturbations permettra d'affiner les moyennes des paramètres K et C et avoir des estimations plus réalistes.

Dans le cadre de l'élevage et de l'alimentation de précision, ce modèle peut permettre de détecter précocement des déviations de la trajectoire de performances de l'animal (liées à des perturbations de l'environnement identifiables ou pas), et de proposer des stratégies de gestion afin de lui permettre de regagner sa trajectoire « optimale » de performance. Dans la version actuelle du modèle, les intervalles de perturbations

sont introduits par l'utilisateur en observant les déviations de la trajectoire d'ingestion prédite par InraPorc. Cependant, nous savons qu'en présence des perturbations, les prédictions d'InraPorc sont fortement biaisées par les données perturbées, ce qui diminue la moyenne générale d'ingestion prédite pendant toute la durée de croissance. Afin de rendre le modèle applicable dans l'alimentation de précision, (i) il faut déterminer la trajectoire optimale de l'ingestion dans les conditions standards et en absence de perturbation, (ii) le modèle doit être capable de détecter automatiquement la survenue des perturbations (une ou plusieurs) ou des déviations de cette trajectoire optimale d'ingestion. A terme, ceci permettra d'intégrer ce modèle dans un outil d'aide à la décision utilisable dans le cadre de l'élevage de précision, afin de déclencher une alarme dès l'apparition d'une perturbation et cela au niveau de chaque individu.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet européen Feed-a-Gene (programme H2020, Union Européenne, numéro d'agrément 633531) pour le soutien financier apporté à ce travail. Le contenu de cet article ne reflète que le point de vue des auteurs et la Communauté Européenne ne peut pas être tenue responsable de quelque utilisation qui pourrait être faite des informations qui y sont présentées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Berckmans D., 2014. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Rev. Sci. Tech.*, 33, 189–96.
- Bolhuis J.E., Kemp B., 2016. Improving welfare, health, and productivity in pigs by optimizing adaptation. *J. Anim. Sci.*, 94 Suppl. 2, 11-12.
- Campos P.H.R.F., Labussiere E., Hernandez-Garcia J., Dubois S., Renaudeau D., Noblet J., 2014. Effects of ambient temperature on energy and nitrogen utilization in lipopolysaccharide-challenged growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 92, 4909–4920.
- Douhard F., Tichit M., Amer P.R., Friggens N.C., 2014. Synergy between selection for production and longevity and the use of extended lactation: insights from a resource allocation model in a dairy goat herd. *J. Anim. Sci.*, 92, 5251–5266.
- Fraga B.N., Lovatto P.A., Roberto P., Rorato N., Oliveira V. De, Augusto C., Rossi R., Lehnen C.R., 2015. Modeling performance and nutritional requirements of pigs lots during growth and finishing. *Cienc. Rural*, 45, 1841–1847.
- Friggens N.-C., Sauvant D., Martin O., 2010. Vers des définitions opérationnelles de la robustesse s'appuyant sur des faits biologiques : l'exemple de la nutrition. *INRA Prod. Anim.*, 23, 43–51.
- Marques S., Creus G., 2012. *Computational Viscoelasticity*, Springer-Verlag Ed., Berlin Heidelberg, 124 p.
- MATLAB version 8.6. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- R Core Team, 2015. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.
- Ramsay J.O., 2005. *MATLAB, R and S-PLUS Functions for Functional Data Analysis 1–66*.
- Renaudeau D., 2015. Adaptation to high ambient temperature and solutions for coping with thermal heat stress, *Proc World Conference on Innovative Animal Nutrition and Feeding (Wianf)* ; Budapest, Hongrie, 50–57.
- Renaudeau D., Frances G., Dubois S., Gilbert H., Noblet J., 2013. Effect of thermal heat stress on energy utilization in two lines of pigs divergently selected for residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 91, 1162–1175.
- Sadoul B., Martin O., Prunet P., Friggens N.C., 2015. On the use of a simple physical system analogy to study robustness features in animal sciences. *PLoS One* 10, e0137333.
- Sandberg F.B., Emmans G.C., Kyriazakis I., 2007. The effects of pathogen challenges on the performance of naïve and immune animals: the problem of prediction. *Animal*, 1, 67-86.
- Sauvant D., Martin O., 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage : définitions systémique et biologique des différents concepts. *INRA Prod. Anim.*, 23, 5–10.
- Strathe A.B., Danfær A., Jørgensen H., Kebreab E., 2015. A dynamic growth model for prediction of nutrient partitioning and manure production in growing – finishing pigs: Model development and evaluation. *J. Anim. Sci.*, 93, 1061–1073.
- 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.
- Wellock I.J., Emmans G.C., Kyriazakis I., 2003. Predicting the consequences of social stressors on pig food intake and performance. *J. Anim. Sci.*, 81, 2995–3007.