



# Etude génétique de critères statiques et dynamiques de la robustesse chez le porc en engraissement

Guillaume LENOIR (1,2,3), Nicolas C. FRIGGENS (1), Loïc FLATRES-GRALL (3), Rafael MUÑOZ-TAMAYO (1), Ingrid DAVID (2)

(1) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

(2) GenPhySE, INRAE, ENVT, Université de Toulouse, 31326 Castanet-Tolosan, France

(3) AXIOM, 37310 Azay-sur-Indre, France

[glenoir@axiom-genetics.com](mailto:glenoir@axiom-genetics.com)

## Etude génétique de critères statiques et dynamiques de la robustesse chez le porc en engraissement

Les objectifs de cette étude étaient d'étudier plusieurs approches d'évaluation de la robustesse chez les porcs en engraissement (de 75 à 150 jours d'âge) et d'estimer leurs paramètres génétiques. Au total, 3028 mâles, issus d'une lignée Piétrain NN, ont été élevés à la station de testage AXIOM. Deux approches ont été testées : une approche statique avec une évaluation lors du contrôle en ferme à 100 kg et une approche dynamique impliquant les données journalières issues des distributeurs automatiques de concentrés (DAC). Pour l'approche statique, les observations relevées lors du contrôle ont été combinées avec les enregistrements de traitements médicamenteux afin de déterminer trois critères catégoriels : R1, R2 et R3. Pour l'approche dynamique, les données des DAC ont permis de caractériser l'évolution du facteur d'allocation ( $\alpha_t$ ) entre l'énergie nette cumulée disponible pour la croissance, estimée à partir de l'ingestion d'aliment, et le gain de poids cumulé pendant la période d'engraissement. Dans une première étape, le critère répété  $\alpha_t$  a été analysé à l'aide d'un modèle linéaire animal. Dans une deuxième étape, l'héritabilité des résidus journaliers (LSR) issus du modèle de l'étape 1 a été estimée. Le critère LSR caractérise la sensibilité à son environnement de chaque individu. Les héritabilités des quatre critères étaient faibles, comprises entre  $0,03 \pm 0,01$  pour LSR et  $0,06 \pm 0,02$  pour R3. Les corrélations génétiques entre ces critères et les critères sous sélection ont été estimées, montrant un lien favorable avec la croissance et défavorable avec l'efficacité alimentaire.

## Genetic study of static and dynamic traits that characterise robustness in fattening pigs

The objectives of this study were to investigate several indicators to characterise robustness in fattening pigs (75-150 days of age) and to determine their genetic parameters. A total of 3028 pigs, from the Piétrain NN French line, were raised at the AXIOM boar testing station. Two approaches were tested: a static approach, based on evaluation during an on-farm test at 100 kg, and a dynamic approach, based on daily data recoded by automatic feeding systems (AFS). For the static approach, the observations recorded during individual testing were combined with the recordings of medical treatments to determine three categorical traits: R1, R2 and R3. For the dynamic approach, the data collected from the AFS, feed intake and body weight were used. We used a dynamic linear regression model to characterize the evolution of the allocation factor ( $\alpha_t$ ) between cumulative net energy available, estimated from feed intake, and cumulative weight gain during the fattening period. In a first step, the repeated trait  $\alpha_t$  was analysed using a linear animal model. In a second step, the heritability of the daily allocation factor residuals (LSR) calculated from the model of step 1 was estimated. The LSR trait characterizes the sensitivity of each individual to its environment (i.e., its robustness). The heritabilities of the four traits were low, from  $0.03 \pm 0.01$  for LSR to  $0.06 \pm 0.02$  for R3. The genetic correlations between these robustness traits and the traits under selection were estimated, showing a favourable relation with growth and unfavourable relation with feed conversion ratio.

## INTRODUCTION

Depuis les années 1960, l'intensification de l'élevage a permis d'augmenter considérablement le potentiel de productivité et d'efficacité des animaux d'élevage. A l'échelle de la sélection entre 1975 et 2015, la prolificité a augmentée de plus de 4 et de 5 porcelets nés vivants pour les races Landrace et Large-White, respectivement (Bidanel *et al.*, 2020). Cependant, l'orientation des objectifs de sélection vers la productivité et l'intensification des conditions d'élevage ont eu aussi un impact défavorable sur d'autres fonctions physiologiques du fait de corrélations génétiques défavorables (Rauw *et al.*, 1998) et dont les effets sont de plus en plus visibles avec l'accumulation du progrès génétique. Selon la théorie d'allocation des ressources, les ressources sont limitées et utilisées en priorité pour une fonction au détriment d'autres fonctions, l'animal ne pouvant maximiser l'expression de chaque fonction biologique (Stearns, 1992).

Les filières de productions animales européennes doivent également faire face à de nouveaux défis liés à des changements rapides du contexte économique, sociétal et environnemental (Phocas *et al.*, 2016). Parmi ces défis, le changement climatique a un impact direct sur les conditions d'élevage des animaux par l'augmentation du nombre et de la durée des vagues de chaleurs et un impact indirect sur la disponibilité, le coût et la qualité des matières premières nécessaires à l'alimentation (Renaudeau et Dourmad, 2022). En parallèle, la pression sociétale sur le « manger plus sain » ainsi que la prise en compte des problématiques de santé publique associées à l'antibiorésistance ont fait évoluer les modes d'élevages des porcs et entraînent notamment une diminution de l'usage des antibiotiques (Hémonic *et al.*, 2019). Ces changements profonds que subissent les élevages impliquent que les animaux doivent pouvoir s'adapter à une variabilité de conditions d'élevage de plus en plus importante tout en maintenant un haut niveau de performances. Il est possible d'associer cette capacité à s'adapter à un environnement dégradé ou changeant au concept de robustesse des animaux. Dans le contexte de la sélection porcine, Knap (2005) la définit comme « *la capacité à combiner un haut potentiel de production avec la résilience aux perturbations environnementales, permettant l'expression de ce potentiel de production sans problème associé dans une large gamme de conditions environnementales* ». L'objectif est donc de transférer la maîtrise des effets de l'environnement gérée par le système de production à la maîtrise de ces effets par l'animal lui-même (Bodin *et al.*, 2010) par l'intermédiaire de la sélection génétique. La dualité est de pouvoir combiner la sélection de la robustesse avec les critères de production. La sélection pour l'amélioration de la robustesse nécessite d'être en mesure de quantifier et d'évaluer de manière objective la valeur de robustesse de chaque individu. Cette quantification est d'autant plus difficile qu'elle est associée à un concept complexe associant l'animal et les effets de l'environnement dans lequel il évolue.

L'objectif de cette étude était de caractériser la robustesse des porcs en engraissement, de 75 à 150 jours d'âge, au travers d'indicateurs et d'estimer leurs paramètres génétiques. Pour y répondre, deux approches ont été étudiées de manière concomitante à partir des données collectées dans la station de testage Axiom. La première approche dite « statique » se base sur l'utilisation des phénotypes enregistrés en routine, notamment lors du contrôle en ferme. La seconde approche

dite « dynamique » porte sur l'utilisation des données longitudinales issues des automates d'alimentation afin de développer un modèle d'allocation des ressources. Les objectifs sont de caractériser des indicateurs de la robustesse des porcs en engraissement au travers de l'analyse de leur trajectoire d'allocation.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Animaux

Les 3028 porcs mâles non castrés intégrés à cette étude sont issus de la lignée paternelle Piétrain NN Axiom, indemne de l'allèle de sensibilité à l'halothane. Les animaux considérés dans cette étude sont nés dans deux élevages différents. Au sevrage, à  $27,9 \pm 2,5$  jours d'âge, ils ont été transférés et élevés dans la station de testage des verrats Axiom jusqu'au contrôle individuel, à  $148,7 \pm 3,7$  jours d'âge. Les animaux sont entrés dans la station au rythme d'un groupe toutes les trois semaines et ont été contrôlés entre janvier 2019 et avril 2022, soit 54 bandes. Ils sont issus de 1306 portées ( $2,3 \pm 1,3$  porcelets/portée), et de 130 pères à raison de  $23,3 \pm 14,2$  porcelets/père.

Après leur arrivée, les porcelets ont été élevés en cases de 14 animaux issus du même élevage pendant cinq semaines en salle de quarantaine puis pendant deux semaines en salle de post-sevrage. A un âge moyen de  $74,5 \pm 2,6$  jours, les animaux ont été transférés en salle d'engraissement et élevés pendant  $74,3 \pm 4,0$  jours jusqu'au contrôle individuel. Au cours de cette période d'engraissement, ils ont été nourris à volonté avec un aliment dont la teneur en énergie nette (EN) était de 9,85 MJ/kg, la teneur en protéines brutes de 156 g/kg et en lysine digestible de 9 g/kg (AGRIAL; Caen; France). Chaque case d'engraissement de 14 porcs était équipée d'un distributeur automatique de concentrés (DAC) Nedap PPT (Nedap N.V.; Groenlo; Pays-Bas). L'environnement et les conditions techniques d'élevage des animaux sont détaillées dans Lenoir *et al.* (2022a).

### 1.2. Mesures réalisées au cours de la période d'engraissement

Le poids en début de contrôle (PEE), lors du transfert en engraissement, a été mesuré. A chaque visite d'un animal dans le DAC, son poids (PV, kg) et son ingéré alimentaire (I, kg) ont été mesurés. Lorsque le poids moyen du groupe était d'environ 100 kg, le poids vif (PFE), les épaisseurs moyennes de lard dorsale (L) et de muscle *longissimus dorsi* (X5) ont été enregistrés en suivant le protocole de mesures de l'Institut Technique du Porc (2004). Les animaux pesant moins de 70 kg ont été exclus (HC). Les mesures L et X5 ont été ajustées à 100 kg de poids vif, L100 et X5100 respectivement. Une observation visuelle des animaux a été réalisée par le technicien chargé des mesures afin de relever les défauts morphologiques, les anomalies et signes cliniques de maladies selon le référentiel de l'Institut Technique du Porc (2004), noté défaut observable. Ces observations ont été faites par la même personne au sein d'un groupe d'engraissement donné. De plus, tout traitement antibiotique ou anti-inflammatoire reçu par chaque animal pendant la période d'engraissement a été enregistré. Le gain moyen quotidien (GMQ) a été calculé comme la différence entre PFF et PEE divisée par le nombre de jours de contrôle. L'indice de consommation (IC) et la consommation moyenne journalière (CMJ) ont été calculés sur la même période que le GMQ, à partir des consommations enregistrées par les DAC.

La CMJ résiduelle (CMJR) a été calculée comme étant les résidus d'une régression linéaire de la CMJ sur le poids moyen métabolique, le GMQ et L100, selon la méthode proposée par Labroue *et al.* (1999) et en utilisant la fonction lm sous R.

1.2.1. Indicateurs statiques de la robustesse

Trois indicateurs catégoriels associés à la robustesse (R1, R2 et R3) ont été construits à partir des données collectées lors du contrôle individuel et des enregistrements de traitements curatifs, sur la base de ceux proposés par Lenoir *et al.* (2022a). Les objectifs de ces critères synthétiques étaient de décrire la capacité de l'animal à être présents au contrôle individuel, c'est-à-dire à être vivant et à peser au moins 70 kg, et à être en bonne santé, c'est à dire sans défaut observable, et sans avoir reçu de traitement. Leur construction et les modalités sont détaillées dans le Tableau 1.

**Tableau 1** – Description des critères de robustesse R1, R2 et R3

Critère / Modalité		Commentaire	
R1	0	Absent	Animal pesant moins de 70kg au contrôle individuel (HC) ou mort
	1	Présent	Animal vivant et contrôlé
R2	0	Non sélectionnable	Animal « Absent (R1) » ou « Présent (R1) » mais avec un défaut observable
	1	Sélectionnable	Animal « Présent (R1) » et sans observation négative
R3	0	Non sélectionnable	Animal « Absent (R1) » ou « Présent (R1) » mais avec un défaut observable
	1	Sélectionnable avec injection	Animal « Sélectionnable (R2) » et ayant reçu au moins une injection
	2	Sélectionnable sans injection	Animal « Sélectionnable (R2) » et n'ayant reçu aucune injection

1.2.2. Indicateur dynamique de la robustesse

Les données brutes PV et I issues de chaque visite dans les DAC ont été contrôlées et nettoyées selon la procédure proposée par Revilla *et al.* (2022). Le poids (PVit - kg) et l'apport alimentaire (lit - kg) pour chaque animal i et chaque jour d'engraissement t ont ensuite été calculés, t étant le temps en jours depuis le transfert vers la salle d'engraissement. Ensuite, lit a été convertie en ingestion d'énergie nette (Elit – MJ EN) en utilisant la densité en énergie nette de l'aliment. L'énergie nette disponible pour la croissance au jour t (EICit) a été calculée comme la différence entre Elit et les besoins en énergie pour l'entretien au jour t (EEit). La valeur de EEit a été estimée selon l'équation (1) proposée par Noblet *et al.* (2016).

$$EE_{it} = 1,05 * PV_{it}^{0,6} * 0,74 \quad (1)$$

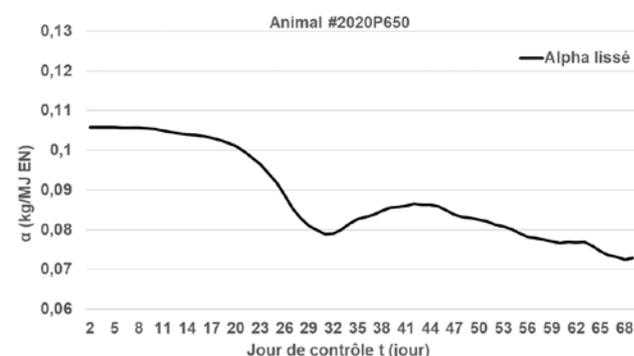
Nous avons supposé dans cette étude qu'une perturbation environnementale provoque un changement dans l'allocation de l'énergie disponible à la croissance au cours du temps. Un modèle de régression linéaire dynamique (DLM; West et Harrison, 1997) a été utilisé pour estimer le facteur journalier d'allocation de l'énergie à la croissance ( $\alpha_t$  - kg / MJ; Lenoir *et al.*, 2022b). Pour caractériser  $\alpha_{it}$  pour un animal i au temps t, un DLM a été construit sur la base de deux équations : une équation des observations (2), reliant le gain de poids au temps

t (CPVit) et EIC cumulé au temps t-1 (CEICit-1), et une équation du système (3), décrivant l'évolution de  $\alpha_{it}$  (variable d'état non observée) d'un jour à l'autre selon un processus stochastique.

$$CPV_{it} = \alpha_{it} * CEIC_{it-1} + v_{it} \quad v_i \sim N(0, I\sigma_{iv}^2) \quad (2)$$

$$\alpha_{it} = \alpha_{it-1} + w_{it} \quad w_i \sim N(0, I\sigma_{iw}^2) \quad (3)$$

Le modèle a été construit en utilisant la fonction dlmModReg du package dlm de R (Petris *et al.*, 2009). Il comprenait deux paramètres inconnus ( $\sigma_{iv}^2$  et  $\sigma_{iw}^2$ ) qui ont été estimés par maximum de vraisemblance avec la fonction dlmMLE pour chaque animal séparément. Les valeurs de  $\alpha_{it}$  ont été calculées indépendamment pour chaque animal à l'aide de l'algorithme de lissage de Kalman (fonction dlmSmooth). Une valeur de  $\alpha_{it}$  a été estimée pour chaque animal i à chaque jour de contrôle t (Figure 1), sauf à t=1 car la consommation à t=0 était inconnue.



**Figure 1** – Exemple d'évolution du facteur d'allocation  $\alpha_t$  pour le porc en engraissement n° 2020P650 au cours de la période de contrôle

1.3. Analyses statistiques

Les paramètres génétiques ont été estimés à l'aide du logiciel ASReml 4.2 (Gilmour *et al.*, 2021) en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance restreinte.

1.3.1. Critères R1, R2 et R3

Pour l'estimation des paramètres génétiques des critères R1, R2 et R3, les effets fixes retenus étaient la bande d'engraissement (54 niveaux) et la ferme de naissance (2 niveaux). De plus, deux effets aléatoires ont été inclus dans le modèle : l'effet commun de portée de naissance et l'effet additif génétique de l'animal. Les composantes de variance et covariance ont été estimées avec un modèle animal linéaire multivarié à cinq caractères incluant les quatre caractères sous sélection (GMQ, L100, X5100, IC) et le caractère à estimer (R1, R2, R3). Le choix d'utiliser un modèle linéaire pour ces caractères catégoriels a été discuté dans Lenoir *et al.* (2022a).

1.3.2. Critère  $\alpha_t$

La part génétique du facteur d'allocation  $\alpha$  incluse dans la variance résiduelle a été estimée en utilisant une approche en deux étapes (San Cristobal-Gaudy *et al.*, 1998). Dans une première étape, nous avons estimé la variance génétique du critère  $\alpha$  à l'aide d'un modèle animal linéaire uni-caractère, incluant les effets fixes significatifs ( $P < 0,05$ ) de la bande d'engraissement, de la ferme de naissance, l'effet case intra-bande ainsi que l'âge de l'animal comme covariable. Les trois effets aléatoires inclus dans le modèle étaient l'effet d'environnement permanent, l'effet commun de portée de naissance et l'effet additif génétique de l'animal. Ces effets aléatoires ont été considérés comme indépendants. Dans une seconde étape, l'indicateur de robustesse (LSR) a été calculé par transformation logarithmique du carré des résidus issus de la

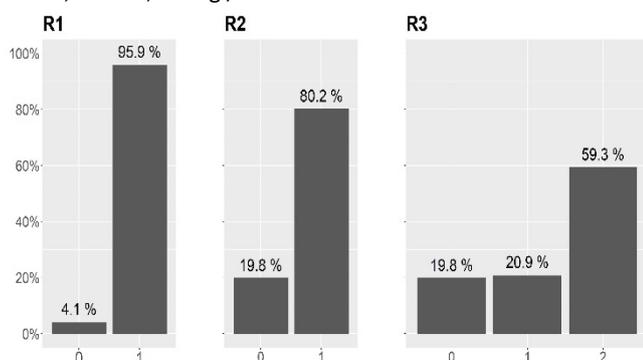
première étape. Une faible valeur de LSR est associée à une plus grande robustesse aux perturbations environnementales, l'animal ayant eu un faible écart entre son allocation potentielle et l'allocation réalisée. Les composantes de variance et covariance ont été estimées avec un modèle animal linéaire multivarié à cinq caractères incluant les quatre caractères sous sélection (GMQ, L100, X5100, IC) et le caractère LSR. Les effets fixes et aléatoires étaient les mêmes que ceux inclus lors de la première étape pour LSR et que ceux inclus précédemment pour les critères sous sélection.

Les corrélations génétiques entre les critères R1, R2, R3, LSR et CMJR ont été estimées à l'aide d'analyses bi-caractères.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

### 2.1. Statistiques élémentaires

La figure 2 présente les distributions des modalités des critères R1, R2, R3. Environ 96% des animaux transférés en engraissement ont été contrôlés (R1 – Note = 1) et 80 % étaient « sélectionnables » (R2 – Note = 1). Le taux de mortalité des animaux sur la période considérée était de 2,4 %. La proportion d'animaux « présents » au contrôle avec un défaut observable était de 15,7 %. Parmi les 80,2 % d'animaux « sélectionnables », 20,9 % ont reçu au moins une injection d'antibiotiques ou d'anti-inflammatoires. Ces valeurs sont équivalentes à celles présentées dans l'étude précédente mais sur un jeu de données plus restreint (Lenoir *et al.*, 2022a). Le GMQ moyen des animaux était de  $0,992 \pm 0,111$  kg/jour pour une CMJ de  $2,257 \pm 0,285$  kg/jour. L'ingéré moyen énergétique journalier (EI) était  $22,23 \pm 6,29$  MJ EN/jour dont  $9,83 \pm 1,90$  MJ EN/jour alloués à l'entretien, soit environ 44 % de l'ingéré énergétique. La valeur moyenne du facteur d'allocation de l'énergie ( $\alpha_t$ ) à la croissance était  $0,100 \pm 0,026$  kg / MJ EN.



**Figure 2**– Proportion d'animaux transférés en engraissement par modalité pour les indicateurs R1, R2 et R3.

### 2.2. Héritabilités

Les héritabilités estimées pour les critères R1, R2 et R3 (Tableau 2) sont faibles. Elles sont proches de celles publiées précédemment dans Lenoir *et al.* (2022a), même si elles tendent à être inférieures, entre  $0,06 \pm 0,03$  à  $0,08 \pm 0,03$ . Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles estimées chez le lapin (Gunia *et al.*, 2018) ou chez le porc (Putz *et al.*, 2019) sur des critères proches. Les animaux ont été élevés dans des conditions standards, c'est-à-dire conçues pour limiter l'exposition à perturbations environnementales. Ces conditions peuvent expliquer la faible héritabilité de ces critères du fait d'un environnement ne permettant pas une expression du potentiel de robustesse des animaux. En effet, Gunia *et al.* (2018) ont mis en avant une héritabilité plus élevée du critère

de résistance non-spécifique aux maladies chez le lapin en conditions de challenge sanitaire par à un élevage en conditions standards.

Le critère  $\alpha_t$ , décrivant l'allocation d'énergie nette à la croissance pendant la période d'engraissement, présente une héritabilité modérée de  $0,14 \pm 0,03$ . Lorsque le critère considéré est la moyenne de  $\alpha_t$  et non la donnée répétée, l'héritabilité obtenue est du même ordre de grandeur :  $0,16 \pm 0,05$  (Lenoir *et al.*, 2022c). L'IC, critère d'efficacité alimentaire, présente une héritabilité supérieure à celle de  $\alpha_t$ ,  $0,21 \pm 0,02$ . Les héritabilités des critères GMQ, L100 et X5100 sont respectivement  $0,32 \pm 0,02$ ,  $0,42 \pm 0,02$  et  $0,29 \pm 0,02$ . Ces valeurs pour les critères IC et GMQ sont inférieures à celles publiées par Saintilan *et al.* (2013) ou Putz *et al.* (2019). L'héritabilité du critère LSR est faible mais non nulle,  $0,03 \pm 0,01$ . Dans une revue, Hill et Mulder (2010) ont fait état d'héritabilités de la variance environnementale comprises entre 0 et 0,048 lorsque les estimations sont réalisées par des méthodes REML.

**Tableau 2** – Composantes de la variance totale des critères de robustesse (RA, R2, R3 et LSR) et du facteur d'allocation  $\alpha_t$  : héritabilités ( $h^2$ ), effet commun de portée de naissance ( $p^2$ ) et effet d'environnement permanent ( $envp^2$ )

Critère	$h^2$	$p^2$	$envp^2$
R1	$0,03 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,02$	/
R2	$0,05 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,02$	/
R3	$0,06 \pm 0,02$	$0,05 \pm 0,02$	/
$\alpha_t$	$0,14 \pm 0,03$	$0,01 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,02$
LSR	$0,03 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$

### 2.3. Corrélations génétiques

Les corrélations génétiques entre les critères de robustesse et les critères sélectionnés sont présentées dans le tableau 3. Les corrélations entre R1 et R2, R3, LSR et CMJR n'ont pas pu être estimées (absence de convergence). Pour le critère R1, la situation est probablement liée à la faible prévalence de la note 0 (4,1 %). Le critère R2 est favorablement et fortement corrélés avec R3,  $0,74 \pm 0,23$ , ainsi qu'avec LSR,  $-0,92 \pm 0,20$ . Les critères de robustesse sont favorablement et fortement corrélés avec la croissance, entre  $0,71 \pm 0,14$  et  $0,87 \pm 0,13$  pour R1, R2 et R3, et  $-0,84 \pm 0,15$  pour LSR. Dans cette situation, la capacité d'un animal à être robuste semble fortement liée à sa capacité à exprimer une croissance optimale. En effet, la croissance est un axe de sélection majeur depuis plus de 20 ans, le manque de croissance ou un faible développement corporel font partie des causes majeures d'exclusion des animaux lors du contrôle en ferme. En revanche, R1, R2 et R3 sont positivement corrélés avec l'efficacité alimentaire, entre  $0,68 \pm 0,16$  et  $0,71 \pm 0,16$ , soit une relation défavorable. La corrélation entre LSR et IC est modérément négative,  $-0,53 \pm 0,19$ . Les animaux les plus robustes tendraient à avoir une moins bonne efficacité alimentaire. La corrélation défavorable entre les critères de robustesse et l'IC pourrait être aussi liée à la corrélation positive entre le GMQ et l'IC ( $0,37 \pm 0,06$ ). Cette relation défavorable pourrait s'expliquer par l'utilisation de critères bruts plutôt que standardisés. Les animaux ont été contrôlés sur une période de temps identique mais leurs performances n'ont pas été standardisées entre deux poids de départ et d'arrivée (GMQ 40

- 100 kg par exemple). Ainsi, certains des animaux testés ont atteint leur poids à maturité avant la fin de la période de contrôle, entraînant une baisse de l'efficacité alimentaire même s'ils avaient auparavant une forte croissance. En effet lorsque l'IC est standardisé entre 40 et 100kg (IC40-100), la corrélation génétique avec le GMQ est favorable ( $-0,58 \pm 0,09$ ) et du même ordre de grandeur que les valeurs estimées par Saintilan *et al.* (2013). Les caractères IC40-100 et LSR ont une corrélation génétique proche de 0 ( $0,05 \pm 0,26$ ). La corrélation

entre LSR et CMJR est forte et négative ( $-0,81 \pm 0,18$ ), indiquant un lien défavorable. Cette corrélation va à l'encontre de l'analyse réalisée par Chatelet *et al.* (2018) où la sélection pour une faible CMJR n'a pas compromis la capacité des animaux à faire face aux challenges aussi bien en conditions conventionnelles que sous optimales. En revanche, ce lien défavorable entre robustesse et efficacité alimentaire évaluée sur la période d'engraissement conforte l'hypothèse associée à la théorie de l'allocation.

**Tableau 3** – Corrélations génétiques entre les critères de robustesse (R1, R2, R3 et LSR) et les caractères de croissance, d'efficacité alimentaire et de composition corporelle.

Critère	GMQ	L100	X5100	IC	R1	R2	R3	LSR	CMJR
R1	$0,75 \pm 0,21$	$0,45 \pm 0,20$	$-0,17 \pm 0,20$	$0,71 \pm 0,23$	/	NC	NC	NC	NC
R2	$0,87 \pm 0,13$	$0,44 \pm 0,15$	$-0,43 \pm 0,14$	$0,71 \pm 0,16$	NC	/	$0,74 \pm 0,23$	$-0,92 \pm 0,20$	$0,54 \pm 0,24$
R3	$0,71 \pm 0,14$	$0,55 \pm 0,16$	$-0,37 \pm 0,15$	$0,68 \pm 0,16$	NC	$0,74 \pm 0,23$	/	$-0,55 \pm 0,22$	$0,41 \pm 0,22$
LSR	$-0,84 \pm 0,15$	$-0,19 \pm 0,19$	$-0,34 \pm 0,17$	$-0,53 \pm 0,19$	NC	$-0,92 \pm 0,20$	$-0,55 \pm 0,22$	/	$-0,81 \pm 0,18$

NC : absence de convergence ; GMQ : gain moyen quotidien ; L100 : épaisseur de lard estimée à 100 kg ; X5100 : épaisseur de muscle à 100kg ; IC : indice de consommation ; CMJR : consommation moyenne journalière résiduelle.

#### 2.4. Avantages et limites

L'objectif dans la définition des critères R1, R2 et R3 était de construire des indicateurs pertinents de la robustesse à partir d'informations enregistrées couramment dans les élevages commerciaux. Ces indicateurs doivent répondre aux attentes des éleveurs de porcs, c'est-à-dire qu'ils permettent d'identifier les animaux présents à la fin de la période d'engraissement en bonne santé, avec une croissance acceptable et ayant reçu le moins possible de traitements médicaux. Le choix de combiner des critères sous-jacents en trois critères synthétiques a pour but de limiter les critères à inclure dans l'objectif de sélection. Parmi ces trois critères, R2 semble répondre à l'objectif de trouver un caractère opérationnel sélectionnable pour tendre vers une amélioration de la robustesse en engraissement. Il est génétiquement fortement corrélé ( $0,74 \pm 0,23$ ) avec R3 mais nécessite moins d'informations pour être calculé. Une limite de ce critère de robustesse est la difficulté d'estimer l'impact de l'évolution génétique de ce critère synthétique sur chacun de ses critères sous-jacents. Le critère R3 présente l'intérêt d'apporter une information sur les traitements.

Le critère LSR, calculé à partir de la résiduelle de  $\alpha_t$  sur la période de mesure, peut être considéré comme un indicateur de la réponse de l'animal aux perturbations/stress. En effet, les animaux plus robustes étant moins impactés par les perturbations, nous pouvons supposer que ces animaux ont un  $\alpha_t$  suivant une trajectoire « plus stable » et par conséquent une valeur de LSR plus faible. La forte corrélation avec le critère R2 tend à confirmer que ce critère peut être associé à la robustesse. Une sélection visant à réduire la résiduelle de  $\alpha_t$  aurait un impact négatif sur l'IC. Ces résultats montrent l'intérêt d'utiliser la méthode de régression linéaire dynamique pour estimer l'évolution temporelle de l'allocation ( $\alpha_t$ ) et définir des indicateurs de robustesse sur la base de l'allocation énergétique. La mise en place de mesures supplémentaires sur les animaux à intervalles réguliers au cours de la période de contrôle, telles que les épaisseurs de lard ou de muscle, permettraient d'améliorer la construction du modèle d'allocation.

Afin de prolonger ce travail, il serait opportun de pouvoir réaliser ces mesures dans des conditions d'élevage non-

optimales sur la température, la qualité de l'aliment, la pression sanitaire, afin d'en évaluer l'impact sur l'expression de ces critères de robustesse. Lors du choix des conditions environnementales des élevages de sélection, il convient de trouver un compromis entre des conditions permettant l'expression du potentiel de croissance et d'efficacité alimentaire et entre des conditions perturbées (température, sanitaire, alimentaire...) qui favorisent l'expression du potentiel de robustesse. C'est une question pertinente pour les futures stratégies de sélection visant à produire des animaux à la fois efficaces et robustes.

Cette étude s'est concentrée sur l'évaluation de la robustesse sur une période spécifique à l'échelle de la vie d'un porc reproducteur. Au-delà de la phase de croissance, il serait pertinent d'étudier si une sélection sur ou plusieurs des caractères de robustesse proposés a un impact favorable sur la robustesse des animaux au cours de leur vie reproductive. En effet certaines études, notamment Silalahi *et al.* (2016), ont mis en avant les effets négatifs de la sélection sur les critères de production sur la durée de vie productive des truies.

#### CONCLUSION

Ce projet a permis d'évaluer deux approches d'évaluation de la robustesse des porcs en engraissement. D'un côté, l'approche dite « statique » permet, à partir de données collectées dans les élevages de sélection, de construire des critères héréditaires et pouvant être intégrés facilement à large échelle dans l'objectif de sélection de la lignée concernée, notamment le critère R2. Cependant ces caractères caractérisent seulement l'état dans lequel se trouve l'animal à la fin de la période de contrôle mais pas la trajectoire qu'il a eu au cours de cette période. De plus du fait de la sélection, ce type de caractère catégoriel peut rapidement devenir peu informatif. Le critère LSR permet de proposer une première approche afin de caractériser la robustesse à partir de la dynamique d'allocation de chaque individu. Cet indicateur nécessite des données généralement non disponibles à l'échelle de l'ensemble de la population mais permet d'avoir une évaluation plus fine des effets de l'accumulation des perturbations au cours du temps. Les deux approches semblent donc complémentaires.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les techniciens de la station testage d'Azay-sur-Indre pour l'élevage des animaux et la réalisation des mesures ainsi que le personnel Axiom impliqué dans la gestion des données issues des DAC.

Ce projet a été soutenu par l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) dans le cadre du financement d'une thèse CIFRE (2019/0705).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bidanel J.P., Silalahi P., Tribout T., Canario L., Ducos A., Garreau H., Gilbert H., Larzul C., Milan D., Riquet J., Schwob S., Mercat M.J., Hassenfratz C., Bouquet A., Bazin C., Bidanel J., 2020. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives. *INRAE Prod. Anim.*, 33, 1-16.
- Bodin L., Bolet G., Garcia M., Garreau H., Larzul C., David I., 2010. Robustesse et canalisation : vision de généticiens. *INRAE Prod. Anim.*, 23, 11-22.
- Gilmour A.R., Gogel B.J., Cullis B.R., Welham S.J., Thompson R., 2021. *ASReml User Guide Release 4.2 Functional Specification*. VSN International Ltd, Hempstead, UK, 365p.
- Gunia M., David I., Hurtaud J., Maupin M., Gilbert H., Garreau H., 2018. Genetic parameters for resistance to non-specific diseases and production traits measured in challenging and selection environments, application to a rabbit case. *Front. Genet.*, 9, 467, 1-10.
- Hémonic A., Poissonnet A., Chauvin C., Corrége I., 2019. Evolution des usages d'antibiotiques dans les élevages de porcs en France entre 2010 et 2016 au travers des panels INAPORC. *Journées Rech. Porcine*, 51, 277-282.
- Hill W.G., Mulder H.A., 2010. Genetic analysis of environmental variation. *Genet. Res.*, 92, 381-395.
- Institut Technique du Porc, 2004. *La sélection porcine collective en France*. ITP ed., Paris, France, 76 p.
- Knap P., 2005. Breeding robust pigs. *Aust. J. Exp. Agric.*, 45, 763-773.
- Labroue F., Maignel L., Sellier P., Noblet J., 1999. Consommation résiduelle chez le porc en croissance alimenté à volonté : Méthode de calcul et variabilité génétique. *Journées Rech. Porcine*, 31, 167-174.
- Lenoir G., Flatres-Grall L., Friggens N.C., David I., 2022a. Robustness scores in fattening pigs based on routinely collected phenotypes: determination and genetic parameters. *J. Anim. Sci.*, 100, 1-10.
- Lenoir G., Kashefifard, K., Chesnet, C., Flatres-Grall, L., Muñoz-Tamayo, R., 2022b. Dynamic data of body weight and feed intake in fattening pigs, and the determination of energetic allocation factors using a dynamic linear model. *Anim. Open Space*, 1, 100014.
- Lenoir G., Muñoz-Tamayo R., Flatres-Grall L., David I., Friggens N.C., 2022c. Towards the characterisation of animal robustness by dynamic energy allocation indicators in fattening pigs. *Proc. Conference "WCGALP"*, Rotterdam, Pays-Bas, 09(10).
- Noblet J., Dourmad J.Y., Milgen J. van, 2016. Etat des lieux et perspectives sur la nutrition du porc. *Journées Rech. Porcine*, 48, 85-96.
- Putz A.M., Harding J.C.S., Dyck M.K., Fortin F., Plastow G.S., Dekkers J.C.M., PigGen Canada, 2019. Novel resilience phenotypes using feed intake data from a natural disease challenge model in wean-to-finish pigs. *Front Genet.*, 9, 660.
- Phocas F., Belloc, C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Frappat B., González-García E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2016. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. II. Breeding strategies. *Anim. Int. J. Anim. Biosci.*, 10, 1760-1769.
- Rauw W., Kanis E., Noordhuizen-Stassen E.N., Grommers F.J., 1998. Undesirable side effects of selection for high production efficiency in farm animals: a review. *Livest. Prod. Sci.*, 56, 15-33.
- Renaudeau D., Dourmad J.Y., 2022. Review: Future consequences of climate change for European Union pig production. *Animal*, 16, 100372.
- Revilla M., Lenoir G., Flatres-Grall L., Muñoz-Tamayo R., Friggens N.C., 2022. Quantifying growth perturbations over the fattening period in swine via mathematical modelling. *Peer Community J.*, 2(e9).
- Saintilan R., Mérour I., Brossard L., Tribout T., Dourmad J.Y., Sellier P., Bidanel J., Milgen J. van, Gilbert H., 2013. Genetics of residual feed intake in growing pigs: relationships with production traits, and nitrogen and phosphorus excretion traits. *J. Anim. Sci.*, 91, 2542-2554.
- San Cristobal-Gaudy M., Elsen J.M., Bodin L., Chevalet C., 1998. Prediction of the response to a selection for a canalization of a continuous trait in animal breeding. *Genet. Sel. Evol.*, 30, 423-451.
- Silalahi P., Tribout T., Prunier A., Billon Y., Gogue J., Bidanel J.P., 2016. Estimation of the effects of selection on French Large White reproductive performance using frozen semen. *J. Anim. Sci.*, 94, 3655-3662.
- Stearns S.C., 1992. *The Evolution of Life Histories*. Oxford University Press, Oxford, UK, 264p.
- West M., Harrison J., 1997. *Bayesian forecasting and dynamic models (2nd ed.)*. Springer-Verlag, New-York, USA, 681p.