

Sélection pour l'efficacité alimentaire chez le porc en croissance : opportunités et challenges

Hélène GILBERT

INRA, UMR1388 GenPhySE, 24 Chemin de Borde Rouge, Auzeville, 31326 Castanet Tolosan, France

helene.gilbert@toulouse.inra.fr

Sélection pour l'efficacité alimentaire chez le porc en croissance : opportunités et challenges

L'amélioration de l'efficacité alimentaire est un enjeu majeur de la filière porcine, à la fois sur les plans économique et environnemental, mais aussi sur le plan sociétal, en limitant la compétition entre production de matières premières pour l'alimentation animale, l'alimentation humaine et la production de biocarburants. Les résultats accumulés au cours des dernières années dans des lignées expérimentales et dans des populations commerciales ont permis de mieux comprendre la génétique de l'efficacité alimentaire du porc en croissance, ainsi que ses liens avec l'ingestion et l'efficacité de la truie reproductrice. Ces études ont permis d'identifier les composantes biologiques majeures contribuant à une meilleure efficacité alimentaire, telles qu'une utilisation de l'énergie ingérée plus efficace et une réduction du niveau d'activité des animaux, entraînant une réduction du volume des rejets et du niveau de consommation d'eau des animaux. Elles ont aussi permis, avec des résultats pour le moment mitigés, de chercher des marqueurs génomiques ou biologiques de l'efficacité alimentaire, afin de caractériser plus d'animaux à moindre coût en élevage. Par ailleurs, si les animaux plus efficaces sont généralement considérés comme moins aptes à faire face à des stress et à répondre à des conditions d'élevage variées, les travaux menés jusqu'à présent ne permettent pas de valider cette hypothèse. Finalement, des limites ont été identifiées pour les stratégies de sélection actuellement mises en œuvre, en lien avec l'évolution des matières premières utilisées en élevage et la diversification des systèmes et milieux de production.

Selection for feed efficiency in the growing pig: opportunities and challenges

Improving feed efficiency is a key for the future of a sustainable pig production. It improves the economics of the production by decreasing feed costs. It also reduces the environmental impact of pig production and the competition with crop resources for human food and biofuel production. Studies in the past fifteen years on experimental lines and commercial populations provided insights on the genetics of feed efficiency of growing pigs, as well as on its relationships with the ingestion and reproductive efficiency of the sow. Major biological components of improved feed efficiency were identified, such as better use of energy intake and reduced activity, leading to reduced excretion and pig water consumption. Studies to identify biological or genomic markers of feed efficiency, that could reduce the cost of phenotyping feed intake on farm, also provided first results, however mixed and not usable in the herds at that stage. Moreover, the ability of more efficient animals to face stresses and changes in breeding conditions have been questioned, but the tests do not validate this hypothesis. Finally, the study of current breeding strategies has identified limits that are due to changing farming conditions, the use of new low-quality raw materials for feed and to the diversification of livestock systems.

INTRODUCTION

L'amélioration de l'efficacité alimentaire est un enjeu majeur pour la filière porcine, à la fois sur le plan économique en raison du coût de l'aliment, mais aussi pour réduire l'impact environnemental de la production en diminuant les rejets dans l'environnement. Elle permet aussi de diminuer la compétition entre la production de matières premières pour l'alimentation animale et les productions pour l'alimentation humaine et pour la production de biocarburants qui génèrent des pressions sociétales nouvelles sur l'élevage. Une amélioration importante de l'efficacité d'utilisation des aliments a été obtenue au cours des 30 dernières années par la combinaison de la sélection d'animaux plus efficaces, de l'ajustement de la composition de la ration à leurs besoins et de l'amélioration de leurs conditions d'élevage (maîtrise de la température, de l'humidité et de l'environnement sanitaire en particulier). Cependant, l'association de la compétition pour la disponibilité des ressources et de l'occurrence d'événements climatiques sévères (sécheresses, inondations) dans les zones majeures de production de céréales a entraîné des fluctuations importantes des prix des matières premières au cours de la dernière décennie, avec une tendance générale à la hausse (Figure 1). Dans ce contexte, le coût alimentaire continue de représenter 69% du coût de production du porc en 2013 en France.

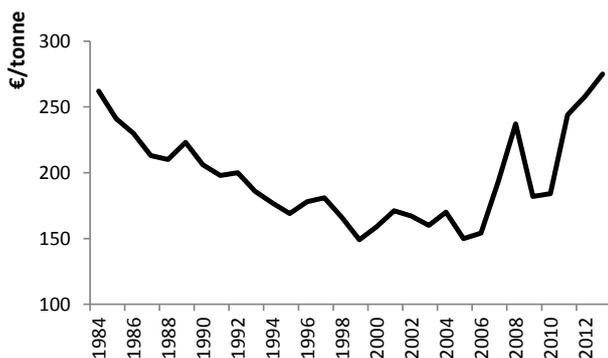


Figure 1 – Evolution du prix de l'aliment porcs charcutier entre 1984 et 2013 (source IFIP - GTE)

Des études ont été menées depuis 20 ans pour dépasser les progrès réalisés et proposer de nouvelles stratégies qui permettent d'améliorer encore l'efficacité de production, en évitant de dégrader les autres paramètres de durabilité de la filière. Celles-ci combinent l'étude de l'efficacité alimentaire dans des populations françaises en sélection (Saintilan *et al.*, 2013) et des expériences de sélection divergente sur l'efficacité alimentaire menées à l'INRA (Gilbert *et al.*, 2007) et aux Etats-Unis essentiellement (Cai *et al.*, 2008). Cet article propose de faire une synthèse de ces différents travaux et de leurs implications, et de présenter les nouveaux axes de recherche qui sont actuellement envisagés.

1. EFFICACITE ALIMENTAIRE DU PORC EN CROISSANCE : CONCEPTS ET HISTORIQUE

1.1. Concepts

L'efficacité d'utilisation des aliments par les animaux en croissance est classiquement évaluée par le rapport entre le gain de poids et la consommation alimentaire pendant une période donnée. Il s'agit d'un indicateur de rendement, compris entre 0 et 1. Dans la pratique, l'inverse de l'efficacité alimentaire est plus utilisé chez les animaux d'élevage.

Il traduit l'efficacité de conversion de l'aliment en gain de poids, et est appelé indice de consommation (IC). Il correspond à une mesure économique du coût alimentaire.

La période ciblée chez le porc est généralement la période comprise entre 10 semaines d'âge (autour de 30 kg de poids vif) et le poids d'abattage cible, actuellement autour de 115 kg de poids vif en France. Cette mesure correspond à l'IC technique rapporté chaque année par l'IFIP suite aux enregistrements de performances en stations de contrôle de performances. Plus rarement, l'IC est calculé entre le sevrage et 10 semaines d'âge, ou du sevrage au poids d'abattage. L'IC global rapporté par l'IFIP dans les bilans de gestion technico-économique (GTE) des élevages français correspond au rapport entre la quantité totale de tous les types d'aliments consommés pour la période sur la quantité de gain de poids réalisée par l'ensemble des animaux présents (croissance et reproducteurs). Très généralement, ce calcul est appliqué à l'échelle de l'animal. Il ignore les coûts alimentaires liés à la mortalité des animaux en cours de croissance ou de reproduction.

Par ailleurs, l'efficacité alimentaire pendant la période de reproduction des femelles est largement ignorée dans les indicateurs d'efficacité de production. Les raisons sont multiples, allant de la difficulté d'enregistrer l'ingéré des truies reproductrices pendant l'intégralité de leur carrière à la difficulté de quantifier le coût de leur production : le gain de poids seul de la portée n'est pas suffisant, puisque pendant la lactation les truies puisent dans leurs réserves corporelles pour couvrir les besoins de leur portée, réserves qu'elles reconstituent pendant la gestation suivante. Cette tendance est accentuée par l'élevage de types génétiques de plus en plus maigres tout en étant plus prolifiques, entraînant la production de truies dont les réserves corporelles peuvent être insuffisantes au regard des besoins de leurs portées (Prunier *et al.*, 2010). Suite à cette constatation dans le courant des années 2000, il a été proposé de favoriser l'ingéré spontané des animaux dans les lignées maternelles, de façon à ne pas générer de problèmes de reproduction.

1.2. Facteurs influençant l'efficacité alimentaire

L'IC dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le type d'animal, la quantité d'aliment disponible, la qualité de l'aliment et l'environnement d'élevage sont déterminants et interagissent de façon complexe. Ainsi, avec une alimentation à volonté, des animaux à croissance lente auront des besoins d'entretien plus importants entre 30 et 115 kg de poids vif, et des animaux plus gras auront un coût énergétique de leur gain de poids plus important. En effet, le tissu adipeux est beaucoup moins riche en eau que le tissu musculaire, et le dépôt de protéines coûte 9,1 MJ d'énergie métabolisable par kg alors que le dépôt de lipides coûte 29,2 MJ d'énergie métabolisable par kg. A vitesse de dépôt équivalente, un animal maigre a donc un IC plus favorable qu'un animal gras. En fonction du type d'animal, la restriction alimentaire a de la même façon un effet différent : chez un animal maigre, l'IC est peu affecté, la restriction affectant de façon équivalente le dépôt de protéines et le dépôt de lipides. Chez un animal gras, la restriction de l'apport énergétique produit en général une réduction du dépôt de gras en priorité. Le dépôt de maigre est maintenu à un niveau similaire à celui obtenu avec un ingéré à volonté, ce qui réduit l'IC de l'animal gras.

La composition de la ration alimentaire a par ailleurs un rôle majeur dans la réponse en termes d'IC. Le facteur déterminant

est la quantité d'énergie nette disponible dans la ration. Dans une limite de valeurs essentiellement déterminées par la capacité d'ingestion des animaux, la quantité d'énergie nette ingérée par les porcs en croissance (au-delà de 50 kg de poids vif) reste constante en proportion de leur gain de poids. De façon complémentaire, la composition en acides aminés de la ration influence la composition du gain de poids, et donc l'efficacité de dépôt : une carence en un ou plusieurs acides aminés limite ainsi le dépôt de protéines, entraînant un dépôt accru de lipides, et une augmentation corrélée de l'IC.

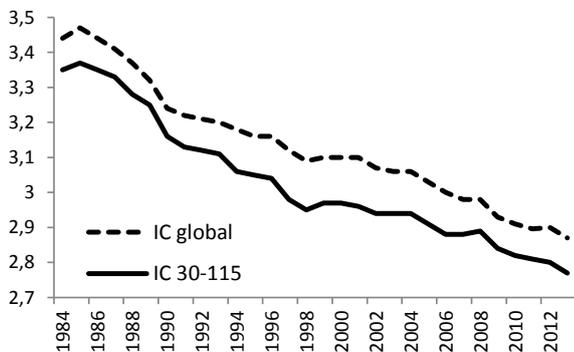


Figure 2 – Amélioration de l'indice de consommation technique entre 30 et 115 kg de poids vif (IC 30-115), et de l'indice de consommation global (IC global) en élevage porcin entre 1984 et 2013 (source IFIP-GTE)

Ces éléments ont été décisifs pour l'amélioration historique de l'efficacité alimentaire du porc en croissance (Figure 2). D'une part, la composition de la ration (énergie et acides aminés) a été ajustée aux besoins des animaux, et le rationnement en élevage de production a permis d'améliorer l'IC. D'autre part, l'efficacité alimentaire a été fortement améliorée génétiquement de façon indirecte par la sélection d'animaux maigres et à croissance rapide, avant même que des dispositifs d'enregistrement individuel de l'ingéré ne soient disponibles.

1.3. Mesure de l'ingéré

L'enregistrement de l'ingéré individuel a été d'abord effectué sur des animaux élevés en cages individuelles. Ces mesures présentent deux inconvénients :

- L'animal est isolé, et son comportement n'est donc pas représentatif des interactions sociales qui surviennent dans un groupe,
- Ces dispositifs sont rarement automatisés, et mobilisent une main d'œuvre importante pour peser l'aliment distribué et les refus pendant la période de contrôle.

Depuis les années 90, différents dispositifs automatiques d'enregistrement de l'ingéré des animaux en groupe (distributeurs automatiques de concentré ou DAC) ont été développés commercialement. Ces dispositifs permettent de maintenir le comportement social des animaux pendant la période d'enregistrement. Les ingérés individuels d'un nombre important d'animaux ont alors pu être mesurés, et des études génétiques des caractères liés à l'ingéré ont pu être menées. Ainsi, l'équipement en DAC en 1990-1991 des stations de contrôle de performance de Le Rheu (Ille-et-Vilaine), Argentré (Mayenne) et Mauron (Morbihan) a permis en 1998 de produire de premières estimations de paramètres génétiques intégrant des caractères liés à l'ingéré dans les populations porcines Large White et Landrace en sélection en France (Garreau *et al.*, 1998).

Depuis, de nouveaux systèmes ont été développés, qui permettent par exemple la distribution d'aliment aux truies gestantes en groupe en fonction de leurs besoins individuels et l'enregistrement des quantités ingérées pendant cette période.

1.4. Mesures de l'efficacité alimentaire

1.4.1. Mesures

Au niveau individuel, la mesure classiquement utilisée est le rapport de la quantité ingérée et du gain de poids de l'animal pendant la croissance. Les éléments donnés plus haut ont montré que cet indice de consommation est fortement lié à la vitesse de croissance et à la composition corporelle des animaux, ainsi qu'à leurs besoins d'entretien. En conditions d'élevage classique, les différences de sexe, de poids, de conditions d'élevage (saison ou épisode sanitaire par exemple) expliquent environ un tiers de la variabilité de l'ingéré chez le porc en croissance (Figure 3). Si ces différents éléments sont enregistrés en élevage, ils peuvent être relativement maîtrisés dans l'estimation de l'efficacité alimentaire. Les facteurs tels que vitesse de croissance et composition corporelle expliquent aussi environ un tiers de cette variabilité. Un autre tiers n'est pas expliqué par les facteurs identifiés classiquement en élevage. Différentes mesures ont été proposées qui permettent de travailler sur les différentes composantes de l'efficacité alimentaire, la mesure de l'IC étant un critère global qui intègre toutes les sources de variations sans les distinguer.

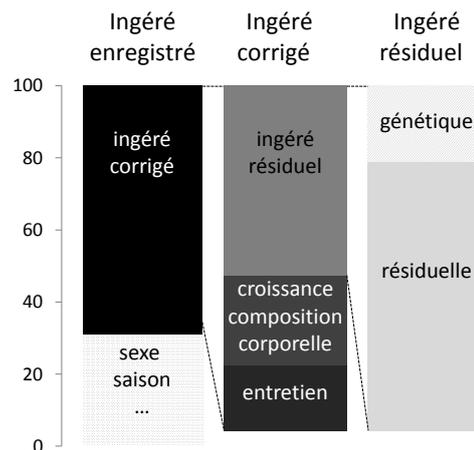


Figure 3 – Décomposition de l'ingéré enregistré en ses différentes composantes chez un porc Large White contrôlé entre 10 semaines d'âge et 115kg de poids vif.

La première mesure proposée revient à quantifier une efficacité alimentaire nette des besoins de production des animaux. Il s'agit alors de corriger la quantité ingérée par les facteurs d'élevage identifiables, par les besoins de production liés à la croissance et par les besoins d'entretien liés au poids métabolique des animaux, de façon à calculer une efficacité alimentaire indépendante des caractères de production. Cette correction peut être obtenue par simple régression linéaire multiple de l'ingéré moyen journalier sur la vitesse de croissance (typiquement le gain moyen quotidien), la composition corporelle (typiquement une mesure d'épaisseur de lard aux ultra-sons en fin de croissance, ou une estimation du taux de muscle des pièces à l'abattoir), et le poids métabolique moyen (poids vif moyen de l'animal pendant la période à la puissance 0,60). La résiduelle de cette régression est appelée consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR) ou ingéré résiduel (Figure 3). Elle représente les 30 à 40 % de la variabilité de l'ingéré du porc en croissance non expliqués par d'autres facteurs identifiés.

Par construction, la moyenne de la CMJR est nulle. Une CMJR négative correspond à un ingéré plus faible que l'ingéré prédit d'après les performances de l'animal, et donc à un animal plus efficace, alors qu'une CMJR positive correspond à un animal qui ingère plus que la quantité prédite par l'équation, et donc un animal moins efficace (Figure 4).

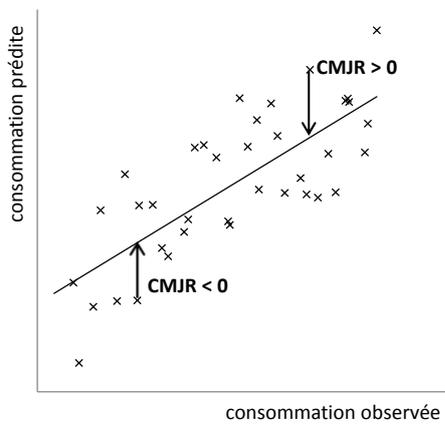


Figure 4 – Relations entre consommation moyenne journalière observée, prédite d'après les besoins de production et d'entretien des animaux, et résiduelle (CMJR)

Parmi les mesures visant à quantifier l'efficacité alimentaire et proposées dans la littérature, la vitesse de croissance résiduelle constitue une alternative intéressante. Il s'agit d'un concept miroir de celui de CMJR : plutôt que de corriger l'ingéré par les besoins d'entretien et de production, la vitesse de croissance résiduelle est obtenue par la correction par régression linéaire de la vitesse de croissance observée par l'ingéré enregistré. On obtient ainsi un critère d'efficacité de croissance indépendant de la quantité d'aliment ingérée par l'animal. Une valeur positive correspond à un animal qui grossit plus vite que prédit d'après son ingéré, donc un animal plus efficace, alors qu'une valeur négative correspond à un animal qui grossit moins vite que prédit. Sélectionner pour ce critère revient à sélectionner pour une vitesse de croissance augmentée à ingéré constant, alors que sélectionner pour la CMJR revient à sélectionner pour un ingéré réduit à vitesse de croissance et composition corporelle constantes.

1.4.2. Unités

L'ensemble des critères décrits précédemment suppose que l'on travaille en unité de poids de l'ingéré et du gain de poids. Il est possible, en particulier pour lisser des variations de composition de l'aliment dans le temps, d'exprimer l'ensemble de ces critères en unité d'énergie (MJ), qui est le déterminant essentiel de l'efficacité d'utilisation de la ration. Il est aussi envisagé de décomposer l'efficacité globale en efficacité d'utilisation des différents nutriments, par exemple des acides aminés ou des minéraux de la ration. Cependant peu d'études rapportent des résultats sur ce type d'approche actuellement, qui présente des difficultés de quantification à grande échelle des nutriments ingérés et retenus par les animaux.

1.4.3. Décomposition biologique

Un autre type de décomposition de l'efficacité alimentaire concerne les niveaux d'utilisation de la ration par l'animal. En effet, entre l'ingéré brut et l'ingéré effectivement utilisé pour assurer le gain de poids,

- l'efficacité d'utilisation digestive incomplète de l'aliment entraîne une perte sous forme de fèces (environ 18% de l'énergie ingérée, par exemple)

- l'efficacité d'utilisation métabolique incomplète de l'aliment entraîne une perte sous forme de d'urines et de production de gaz (environ 3% de l'énergie ingérée)

- l'efficacité de fixation incomplète de l'aliment entraîne une perte sous forme d'extra-chaaleur dégagée lors des réactions métaboliques (environ 21% de l'énergie ingérée).

Il reste alors entre 40 et 60% de l'ingéré disponible, en fonction de la fraction de la ration que l'on considère, pour les fonctions d'entretien de l'animal et son gain de poids. Cette décomposition permet de cibler une des étapes de l'utilisation de l'aliment par l'animal lors de l'étude de l'efficacité alimentaire. En volaille, il a ainsi été montré qu'une sélection spécifiquement sur l'efficacité digestive est possible (Mignon-Grasteau *et al.*, 2004). En porc, les travaux de Noblet *et al.* (2013) ont montré une probable variabilité génétique de l'utilisation digestive des aliments chez le porc en croissance, mais aucune étude de grande ampleur n'a ciblé cette composante de l'efficacité alimentaire jusqu'à présent.

2. GENETIQUE DE L'EFFICACITE ALIMENTAIRE DU PORC EN CROISSANCE

2.1. Héritabilité et réponses à la sélection

L'efficacité alimentaire est un caractère héritable. Quel que soit le critère retenu (IC ou CMJR), la proportion de variance du caractère transmise d'une génération à l'autre (héritabilité) est comprise entre 0,20 et 0,40 dans les quatre populations Large White femelle (part de la variabilité d'origine génétique de l'ingéré résiduel dans la Figure 3), Landrace, Piétrain et Large White mâle en sélection collective en France (Saintilan *et al.*, 2013). Ce sont des valeurs moyennes, qui permettent d'envisager de bonnes réponses à la sélection. Cependant, le progrès génétique dans une population en sélection dépend aussi de la précision de la sélection, qui est fonction de la précision de l'évaluation des valeurs génétiques des animaux sélectionnés. Elle résulte du nombre d'animaux ayant des performances enregistrées pour ce caractère et de leur niveau d'apparentement avec les candidats à la sélection (candidats eux-mêmes, parents, plein-frères, cousins...). Plus l'apparentement est étroit et le nombre d'individus avec mesures est élevé, plus la précision de la sélection est grande. Pour la sélection de l'efficacité alimentaire, c'est ce dernier facteur qui est le plus souvent limitant, en particulier en raison du coût du phénotypage de l'ingéré : l'enregistrement de l'ingéré individuel est réalisé sur un nombre limité d'animaux. Actuellement, c'est l'IC qui est le plus souvent intégré aux indices de sélection dans les populations porcines pour sélectionner pour l'efficacité alimentaire. Les coefficients de détermination (CD) des valeurs génétiques pour les caractères consommation moyenne journalière et IC, qui quantifient leurs précisions d'estimation, sont respectivement autour de 0,17 et 0,27 lors de la sélection des reproducteurs dans les populations porcines françaises. Cela revient à dire que l'essentiel de la précision d'estimation pour l'IC est apportée par une précision relativement plus élevée de l'estimation sur la vitesse de croissance, qui est un caractère disponible chez tous les candidats à la sélection et leurs apparentés. Une précision nettement plus importante, et donc un progrès génétique accru, seraient obtenus pour l'efficacité alimentaire si l'ingéré était enregistré sur les candidats eux-mêmes dans les élevages de sélection : passer d'un CD de 0,27 à un CD de 0,40 sur l'IC permettrait de multiplier par 1,22 le progrès génétique actuel sur ce caractère, et passer à un CD de 0,50 multiplierait par 1,36 le progrès génétique.

Tableau 1 – Corrélations génétiques (erreurs standards) des caractères d'efficacité alimentaire indice de consommation (IC) et consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR) avec les caractéristiques de production enregistrées en stations de contrôle de performance (d'après Saintilan *et al.*, 2013)

Caractères ¹	CMJR						IC					
	Landrace		Large White femelle		Piétrain		Landrace		Large White femelle		Piétrain	
IC	0.53	(0.07)	0.52	(0.05)	0.85	(0.04)	–	–	–	–	–	–
CMJ	0.61	(0.06)	0.55	(0.05)	0.48	(0.09)	0.51	(0.07)	0.37	(0.06)	0.20	(0.11)
GMQ	0.07	(0.11)	0.16	(0.08)	–0.05	(0.12)	–0.51	(0.07)	–0.39	(0.06)	–0.42	(0.09)
Nr	0.41	(0.07)	0.38	(0.06)	0.83	(0.04)	0.97	(0.01)	0.97	(0.01)	0.98	(0.01)
Pr	0.52	(0.07)	0.52	(0.05)	0.86	(0.04)	0.99	(0.01)	0.99	(0.01)	0.99	(0.01)
TMP	0.03	(0.08)	0.08	(0.07)	–0.15	(0.12)	–0.74	(0.04)	–0.64	(0.04)	–0.25	(0.11)
ELD	–0.11	(0.08)	–0.06	(0.07)	0.07	(0.13)	0.56	(0.05)	0.54	(0.05)	0.21	(0.12)
Rendement	0.03	(0.10)	0.01	(0.08)	–0.11	(0.12)	–0.02	(0.09)	0.18	(0.07)	0.07	(0.12)
L*	–0.08	(0.10)	–0.17	(0.08)	–0.42	(0.14)	–0.32	(0.08)	–0.35	(0.07)	–0.34	(0.14)
pHu	0.11	(0.11)	0.14	(0.08)	0.22	(0.14)	0.01	(0.09)	0.18	(0.07)	0.13	(0.13)
rétenion d'eau	–0.13	(0.11)	0.14	(0.09)	0.30	(0.22)	–0.34	(0.09)	–0.12	(0.08)	0.25	(0.23)
IQV	0.07	(0.10)	0.17	(0.08)	0.31	(0.13)	0.03	(0.09)	0.21	(0.07)	0.21	(0.13)

¹IC = indice de consommation ; CMJR = consommation moyenne journalière résiduelle ; CMJ = consommation moyenne journalière ; GMQ= gain moyen quotidien ; Nr = proportion d'azote retenue par rapport à l'ingéré ; Pr = proportion de phosphore retenue par rapport à l'ingéré ; TMP = taux de muscle des pièces ; ELD = épaisseur de lard dorsal mesurée sur la carcasse ; Rendement= rendement de carcasse froide ; L* = luminance mesurée sur le muscle gluteus superficialis 24 h après abattage ; pHu = pH mesuré 24 h après abattage sur le muscle semimembranosus ; IQV = indice de qualité de viande.

2.2. Corrélations génétiques et réponses indirectes

2.2.1. Caractères de croissance

L'IC et la CMJR, qui sont les caractères d'efficacité alimentaire les plus documentés chez le porc en croissance, sont fortement corrélés entre eux, la corrélation allant de 0,52 à 0,85 dans les principales races françaises testées en stations de contrôle de performance (Tableau 1). Ces deux caractères présentent des corrélations moyennes à fortes avec la consommation moyenne journalière, légèrement supérieures avec la CMJR comparée à l'IC. Ces corrélations correspondent à une réduction d'ingéré journalier en réponse à l'amélioration de l'efficacité alimentaire. Les études récentes ont par ailleurs montré que cette réduction d'ingéré est naturellement associée à une réduction de la consommation d'eau par les animaux, dans des proportions supérieures à la réduction d'ingéré : entre lignées divergentes, les animaux les plus efficaces consomment 12% de moins d'eau par kg d'aliment ingéré que les animaux moins efficaces (Renaudeau *et al.*, 2013).

En revanche, IC et CMJR ont par construction des corrélations génétiques différentes avec la vitesse de croissance et la composition corporelle des animaux. Les corrélations génétiques de la vitesse de croissance avec la CMJR sont généralement proches de zéro, alors qu'elles sont moyennes à fortes avec l'IC, traduisant une augmentation de la vitesse de croissance en réponse à une diminution de l'IC. Dans d'autres études, il a pu être rapporté des corrélations génétiques positives entre CMJR et vitesse de croissance, correspondant à une diminution de la vitesse de croissance en réponse à une diminution de la CMJR (Clutter, 2011). Pour ce qui est de la composition corporelle, la majorité des études rapportent une réponse significative sur la composition corporelle lors de la sélection pour la CMJR, de moindre ampleur que celle obtenue lorsque la sélection est effectuée sur l'IC. Cette réponse significative en dépit de la correction pour la composition corporelle dans le calcul de la CMJR est due à deux éléments :

- la correction au niveau phénotypique ne permet pas de tenir compte exactement de la corrélation génétique entre les caractères. C'est vraisemblablement le même phénomène qui induit une légère réponse sur la vitesse de croissance en relation avec la sélection sur la CMJR dans certaines populations.

- la prédiction de l'ingestion pour couvrir les variations de composition corporelle suppose une estimation précise de cette composition corporelle des animaux, alors que celle-ci n'est généralement obtenue que par le biais d'une mesure d'épaisseur de lard dorsal *in vivo*, ou par la prédiction de la teneur en muscle des pièces à l'abattoir, qui ne représentent qu'imparfaitement la distribution muscles/gras de la carcasse.

L'augmentation de l'adiposité des porcs moins efficaces a été mise en relation essentiellement avec leur niveau d'ingéré plus élevé : la restriction alimentaire de porcs d'une lignée sélectionnée pour une CMJR élevée (moins efficaces) au niveau d'ingestion de porcs d'une lignée sélectionnée pour une CMJR réduite (plus efficaces) génère des niveaux de composition corporelle comparable entre les animaux des deux lignées (Gondret *et al.*, 2014).

2.2.2. Excrétion

Les travaux récents sur les relations génétiques entre efficacité alimentaire et niveau d'excrétion des animaux ont permis de quantifier les corrélations entre ces différents caractères, soit par l'utilisation d'équations de prédiction de la composition du gain de poids (Saintilan *et al.*, 2013), soit par des mesures directes par marquage des aliments (Shirali *et al.*, 2012). Dans ces différentes études, les corrélations génétiques estimées sont très fortes entre efficacité alimentaire et excrétion de phosphore et d'azote, qui ont été les principaux composants examinés (Tableau 1). Ces estimations confirment l'impact majeur de l'amélioration de l'efficacité alimentaire sur la réduction des rejets, en particulier azotés et phosphorés, et permettent de quantifier l'impact de l'amélioration de l'efficacité alimentaire sur les niveaux de rejets en élevage.

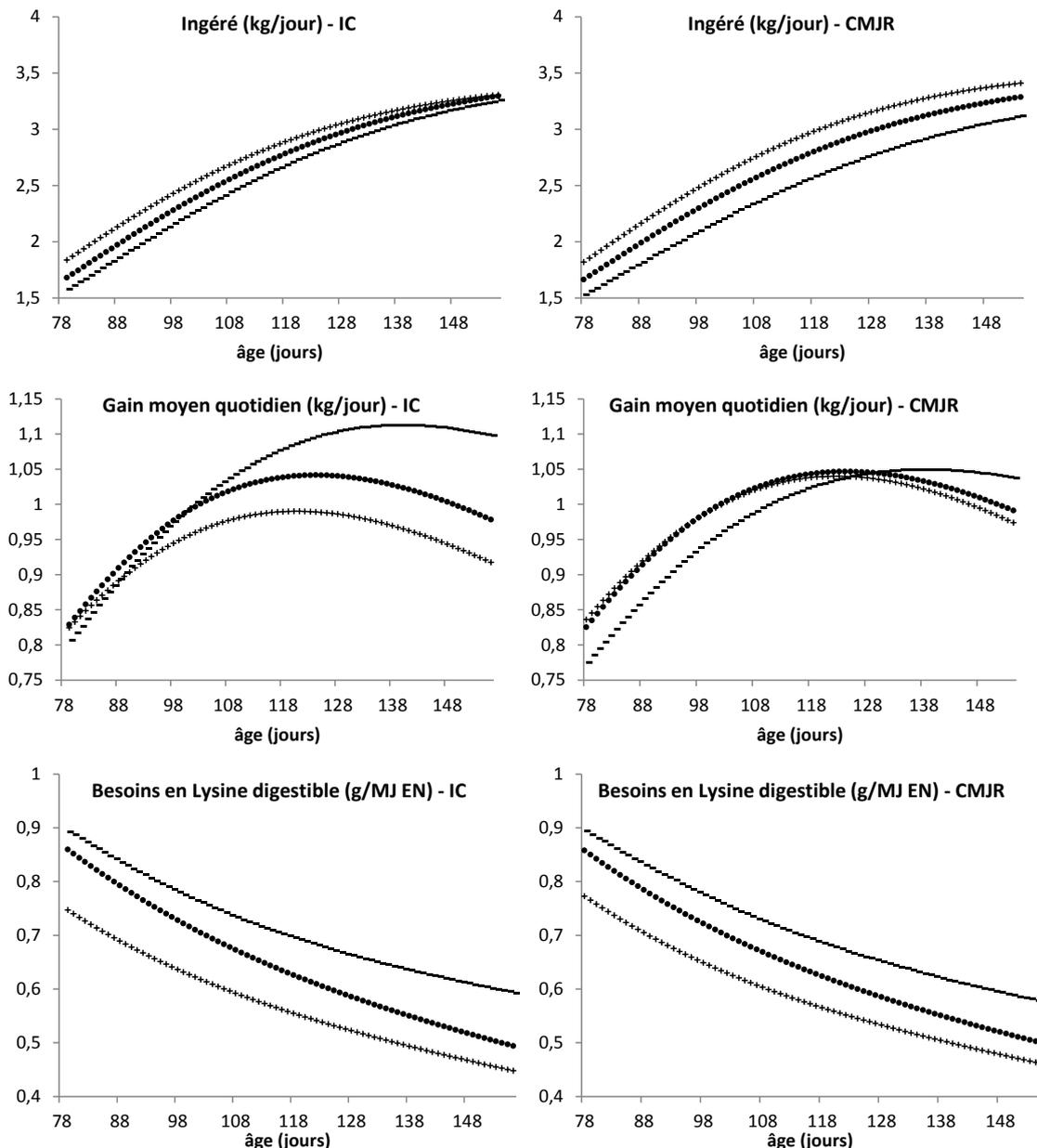


Figure 5 – Ingéré, gain moyen quotidien et besoins en lysine digestible en fonction de l’âge de porcs Large White femelle (jours) et de leur niveau d’efficacité alimentaire évalué par l’indice de consommation (à gauche, IC) ou la consommation moyenne journalière résiduelle (à droite, CMJR). Le groupe des 25% de porcs (89 porcs) ayant les plus faibles valeurs (meilleure efficacité alimentaire) est représenté par les courbes en tires, le groupe des 50% de porcs (178 porcs) ayant les valeurs intermédiaires est représenté par les courbes en points, et le groupe des 25% de porcs (89 porcs) ayant les plus hautes valeurs (moins bonne efficacité alimentaire) est représenté par les courbes en croix (d’après Saintilan *et al.*, 2014).

2.2.3. Dynamiques de croissance et d’ingestion et besoins nutritionnels

La comparaison d’animaux de CMJR réduite ou accrue a permis de modéliser précisément les différences de dynamiques de croissance et d’ingestion de porcs plus ou moins efficaces à l’aide du logiciel INRAPorc®. En comparant ces dynamiques avec celles des mêmes animaux regroupés selon leur IC, des différences de dynamiques de croissance et d’ingestion ont été mises en évidence en fonction des groupes d’animaux (Figure 5), qui ont permis de conclure à des différences de dynamiques de besoins en acides aminés pendant la croissance. En termes d’ingéré, les animaux à IC plus faibles ont des consommations journalières plus faibles en début de croissance, mais elles ne sont plus significativement différentes des autres groupes dans le dernier tiers de la période de contrôle, alors que les animaux à plus faible CMJR ont des ingérés journaliers réduits par rapport aux autres

groupes pendant toute la croissance. En termes de vitesse de croissance, si les animaux triés selon leur IC ont des vitesses de croissance similaires en début de contrôle, elles divergent à partir du milieu de la croissance, les animaux les plus efficaces ayant en fin de contrôle une vitesse de croissance nettement accrue par rapport aux autres. Les animaux à faible CMJR ont en revanche une vitesse de croissance réduite en début de contrôle par rapport aux autres animaux, mais une vitesse de croissance plus élevée en fin de période. Ces différences conduisent à des vitesses de croissance globalement identiques entre les groupes CMJR quand on considère la période de contrôle complète. Les dynamiques de dépôts relatifs de protéines et de lipides sont de même fortement impactées par le niveau d’efficacité alimentaire des animaux, mais il est vraisemblable que les modèles doivent être affinés pour intégrer des indicateurs de composition corporelle enregistrés sur les animaux et décrire au mieux la répartition

du gain de poids entre protéines et lipides (Saintilan *et al.*, 2014). Finalement, cela se traduit par des besoins en lysine digestible par MJ d'énergie nette dans la ration supérieurs chez les animaux les plus efficaces quelle que soit la mesure retenue pour l'efficacité alimentaire : environ 0,9 g/MJ d'énergie nette pour les 25% d'animaux Large White les plus efficaces en début de contrôle (Figure 5) et 0,95 g/MJ d'énergie nette quand il s'agit d'animaux Piétrain (Saintilan *et al.*, 2014). Ces estimations indiquent que la sélection d'animaux plus efficaces doit s'accompagner d'une vigilance sur la concentration en acides aminés de la ration, mais vraisemblablement aussi en autres nutriments, et d'une reformulation régulière des aliments pour répondre aux besoins des animaux les plus performants. Cette vigilance devra être renforcée si l'élevage de mâles entiers, plus maigres que les mâles castrés et plus efficaces, se généralise.

2.2.4. Caractères de qualité de la viande

Dès 2000, Tribout et Bidanel (2000) ont mis en évidence une relation génétique défavorable entre l'IC et les indicateurs de rendement technologique du jambon. En combinant des études récentes de la CMJR dans les populations françaises en sélection (Saintilan *et al.*, 2013) et une expérience de sélection divergente sur la CMJR menée à l'INRA (Gilbert *et al.*, 2007), une relation défavorable d'ampleur similaire entre qualité technologique de la viande mesurée par l'indice de qualité de viande (IQV ; Tribout *et al.*, 2004) et CMJR a été démontrée (Tableau 1). Pour contrer une possible détérioration de ce critère en réponse à l'amélioration de l'efficacité alimentaire, une contrainte est appliquée au caractère IQV dans les indices de sélection des populations en sélection collective, qui vise au maintien du niveau actuel de l'IQV dans les populations en sélection.

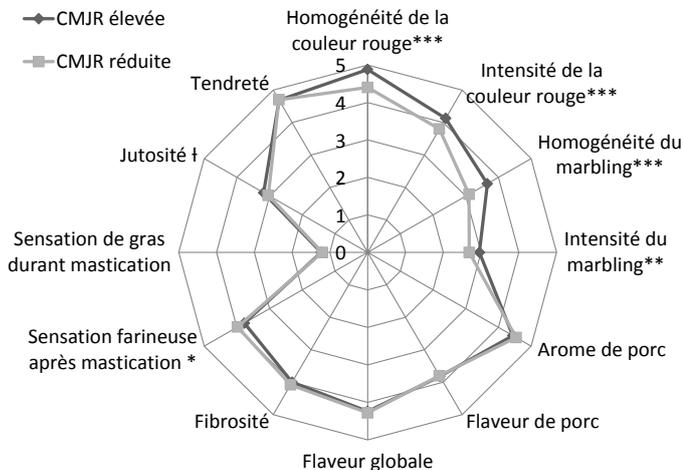


Figure 6 – Qualité sensorielle de la longe (représentée sur une échelle de 0 à 5 mais notée entre 0 (absent) et 10 (très fort)) pour des porcs d'une lignée sélectionnée pour une consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR) réduite (plus efficaces, n = 24) et des porcs d'une lignée sélectionnée pour une CMJR plus élevée (moins efficaces, n = 24). Les différences entre les moindres carrés moyens de chaque lignée sont représentées. Les niveaux de signification inférieurs à 0,1 sont indiqués pour chaque critère : *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; † $0,05 \leq P < 0,1$ (d'après Faure *et al.*, 2013)

De façon corrélée, la proportion de gras intramusculaire est diminuée chez les animaux plus efficaces, le potentiel glycolytique du muscle et la structure des fibres musculaires sont modifiés (Lefaucheur *et al.*, 2011). Cependant, une étude de l'impact de ces phénomènes sur la qualité gustative de la viande de porc chez des animaux plus ou moins efficaces n'a

pas permis d'identifier l'émergence de viandes à défaut en lien avec l'amélioration de l'efficacité alimentaire (Faure *et al.*, 2013), ni de détérioration significative des qualités sensorielles de la viande (Figure 6). Dans des types génétiques américains, cette corrélation défavorable entre efficacité alimentaire et indicateurs de qualité de la viande n'est pas retrouvée (Smith *et al.*, 2011).

2.2.5. Caractères de reproduction

La décroissance forte de l'ingéré volontaire des porcs en croissance au cours des années 80, accompagnée par une réduction des réserves lipidiques des animaux et une augmentation de la prolificité des truies, a fait craindre une réduction de la capacité d'ingestion des truies qui ne leur permette plus à terme d'assurer la croissance de la portée et le retour en phase de reproduction après le sevrage (Knap, 2009). Ceci a conduit à proposer des stratégies de sélection pour maintenir, voire augmenter, l'ingéré spontané des animaux dans les lignées maternelles. La question de l'impact des stratégies de sélection actuelles sur l'ingéré volontaire des truies et leur capacité à nourrir leurs porcelets reste une question majeure. Les travaux sur les performances de reproduction des truies de lignées divergentes pour la CMJR établies à l'INRA et dans une université américaine ont montré que les truies des lignées améliorées pour la CMJR ont un ingéré volontaire réduit pendant la lactation (-7 kg avec un sevrage à 28 jours à l'INRA après 7 générations de sélection, Gilbert *et al.*, 2012) associé à une utilisation accrue de leurs réserves corporelles pendant la lactation (réduction de 36,1 kg de poids vif et 5,6 mm d'épaisseur de lard dorsal dans la lignée plus efficace contre 30,5 kg et 4,3 mm dans la lignée moins efficace). En contrepartie, une différence de +0,5 porcelets nés et sevrés a été rapportée en faveur de la lignée plus efficace, associée à une croissance de la portée équivalente dans les deux lignées. Le bilan de ces différents aspects, quantifié par le calcul d'une consommation moyenne journalière résiduelle en lactation, indique une meilleure efficacité alimentaire des truies en lactation dans la lignée plus efficace. En complément, il n'a pas été observé de détérioration de la capacité de ces truies à revenir à la reproduction après le sevrage, ni de réduction de leur longévité. Elles semblent reconstruire efficacement leurs réserves pendant la gestation, ce qui leur permet de débiter la lactation suivante avec des réserves corporelles intactes. Ces résultats montrent que la seule augmentation d'ingéré volontaire chez les truies ne garantit pas un bénéfice pour la portée. Il serait donc pertinent, pour identifier les truies les plus aptes à fournir à leurs porcelets les nutriments nécessaires à leur croissance, d'évaluer la dynamique de reconstitution des réserves corporelles après lactation et d'évaluer une efficacité alimentaire globale des femelles durant leur carrière, plutôt que de segmenter les lactations.

2.3. Marqueurs génétiques de l'efficacité alimentaire

Une difficulté majeure de la sélection pour l'efficacité alimentaire réside dans le coût du phénotypage, qui limite le nombre d'animaux dont le niveau de performances est testé, c'est un caractère de choix pour l'utilisation de marqueurs moléculaires associés à la variabilité du caractère. En effet, l'identification de marqueurs génomiques associés préférentiellement avec des valeurs hautes ou basses du caractère permettrait de génotyper tous les candidats à la sélection, d'en déduire une prédiction de leur niveau de performance, et d'augmenter ainsi la précision de la sélection.

Parmi les gènes à effet majeur identifiés en porc, le gène de sensibilité à l'halothane, qui est en ségrégation en race Piétrain, a un effet connu sur l'indice de consommation, les animaux porteurs de l'allèle sensible ayant un IC réduit par rapport aux animaux porteurs de l'allèle non sensible. En revanche, cette différence d'effets n'est pas retrouvée sur la CMJR, indiquant que l'essentiel de l'effet observé sur l'IC est lié à l'impact du gène de sensibilité à l'halothane sur la distribution de l'ingéré entre la vitesse de croissance et la composition corporelle des animaux, et non pour les fonctions représentées par la CMJR (Saintilan *et al.*, 2012).

Les études moléculaires ne ciblant pas des gènes a priori connus chez le porc de façon à identifier de nouveaux locus impliqués dans le déterminisme du caractère, n'ont à l'heure actuelle pas permis d'identifier de régions chromosomiques à effet important sur le caractère, alors que des régions plus nombreuses impliquées dans le déterminisme de la vitesse de croissance, de la composition corporelle ou de la qualité de viande sont rapportées (par exemple, Sanchez *et al.*, 2014). Il semble que cela soit lié à la nature intégrative de l'efficacité alimentaire : deux porcs peuvent ainsi présenter une efficacité alimentaire similaire en ayant des stratégies métaboliques différentes pilotées par des régions du génome différentes. Il semble dès lors plus simple d'envisager l'identification des marqueurs du génome impliqués dans le déterminisme des composantes de l'efficacité alimentaire, plutôt que du caractère qui en résulte.

3. BIOLOGIE DE L'EFFICACITE ALIMENTAIRE

Différentes fonctions sont impliquées dans les variations d'efficacité d'utilisation de l'ingéré. Afin d'aller plus loin dans la compréhension de l'efficacité alimentaire, des études nombreuses se sont intéressées à la biologie du caractère.

3.1. Métabolisme basal

Un facteur important influençant l'efficacité alimentaire est l'énergie mobilisée par le métabolisme de base. Il s'agit du métabolisme nécessaire au maintien des fonctions vitales au repos. Il comprend par exemple l'activité cardiaque, la respiration et le maintien de la température corporelle. Ainsi, une mobilisation d'énergie par le métabolisme basal supérieure de 10% a été rapportée chez les animaux sélectionnés pendant 5 générations pour une CMJR élevée par rapport à ceux présentant une CMJR faible (Barea *et al.*, 2010).

3.2. Activité et comportement alimentaire

L'activité des animaux joue de la même façon un rôle important dans l'utilisation de l'énergie ingérée. Des enregistrements vidéo sur des animaux de lignées divergentes pour la CMJR ont permis d'estimer une différence de temps passé debout après 7 générations de sélection de 30 min par jour (143 min chez les animaux plus efficaces contre 178 min chez les animaux moins efficaces) chez des porcs de 17 semaines d'âge (environ 65 kg de poids vif). Le coût de ce temps supplémentaire passé debout par les animaux moins efficaces a été évalué à 14% de la différence d'énergie ingéré enregistrée entre ces animaux (Meunier-Salaün *et al.*, 2014). Ces différences d'activité ont été reliées à des différences de comportement alimentaire importantes entre animaux efficaces et animaux moins efficaces. Les plus efficaces, qui ingèrent moins, font globalement moins de repas de plus grand volume, ce qui réduit proportionnellement la quantité

d'énergie qu'ils doivent consacrer à leur comportement d'alimentation. Parmi l'ensemble des caractéristiques du comportement alimentaire, c'est ainsi souvent le nombre de visites à l'auge réalisées chaque jour par les animaux qui est le plus corrélé au niveau d'efficacité alimentaire.

3.3. Digestion

Une autre composante potentiellement majeure de l'efficacité d'utilisation de la ration alimentaire est l'étape de digestion. Des études répétées montrent cependant que l'efficacité digestive de l'animal, ou digestivité, n'est pas améliorée, ou seulement marginalement (Harris *et al.*, 2012), lorsque les animaux sont sélectionnés sur la base d'un aliment de bonne qualité, facile à digérer (Barea *et al.*, 2010), et cela même lorsqu'ils sont soumis à un challenge digestif à l'aide d'un aliment contenant une proportion accrue de fibres (Montagne *et al.*, 2014). En revanche, il a été montré qu'il existe une variabilité génétique chez le porc de la digestivité quand les animaux sont soumis à un aliment fibreux (Noblet *et al.*, 2013). Ces deux faisceaux de résultats suggèrent que seule une stratégie de sélection incluant l'utilisation d'un aliment qui stimule la digestion permettrait d'identifier les animaux les plus à même de digérer efficacement des aliments fibreux, et donc d'améliorer l'efficacité de cette composante.

3.4. Métabolismes énergétique et protéique

Métabolisme protéique. L'impact de la sélection pour l'efficacité alimentaire sur le métabolisme protéique des animaux n'est pas encore complètement éclairci. Certaines études rapportent des différences de métabolisme protéique dans le foie ou le muscle à différents stades chez des animaux plus efficaces ou moins efficaces, mais il ne semble pas actuellement se dégager de schéma systématique qui engendre une meilleure efficacité des animaux (Le Naou *et al.*, 2012 ; Cruzen *et al.*, 2013).

Métabolisme énergétique. L'amélioration de l'efficacité alimentaire entraîne, comme nous l'avons montré plus haut, une réduction de la fraction lipidique déposée par les animaux. De façon corrélée, l'ensemble du métabolisme énergétique des animaux plus efficaces est orienté vers un métabolisme plus glycolytique que lipidique (Le Naou *et al.*, 2012 ; Faure *et al.*, 2013). Des indications de modification de l'efficacité d'utilisation de l'énergie par les mitochondries suggèrent une influence de ces acteurs encore peu explorés.

Finalement, l'ensemble des activités cataboliques sont augmentées chez les animaux moins efficaces, générant vraisemblablement une déperdition d'énergie, qui peut être reliée à l'augmentation du métabolisme basal préalablement décrite pour ces animaux.

3.5. Marqueurs biologiques de l'efficacité alimentaire

De la même façon que des marqueurs génétiques de l'efficacité alimentaire permettraient d'avoir des indicateurs du niveau d'efficacité d'un nombre accru d'animaux en sélection, l'identification de marqueurs biologiques utilisables en routine pourrait être utile.

Mesures sanguines. Le seul marqueur biologique sanguin associé à l'efficacité alimentaire en croissance et identifié de façon répétable dans la littérature est le niveau d'IGF1 mesuré une semaine après sevrage chez le jeune porc (Bunter *et al.*, 2005). Ce métabolite est lié à la synthèse protéique, et ne diffère généralement pas entre des animaux ayant été

efficaces ou peu efficaces pendant la croissance quand on le mesure en fin d'engraissement. En revanche, des niveaux élevés d'IGF1 après le sevrage sont vraisemblablement associés à une efficacité alimentaire moindre pendant la période de croissance. Il est cependant vraisemblable que sélectionner directement sur ce critère aurait un impact majeur sur la dynamique de croissance des animaux, et de plus amples études sont nécessaires pour évaluer l'impact de ce critère avant d'envisager son utilisation en élevage.

Mesures « omiques ». Des recherches en aveugle d'indicateurs du métabolisme associés à des niveaux contrastés d'efficacité alimentaire ont été menées d'une part au niveau des transcrits de l'ADN, qui représentent l'ensemble des portions d'ADN transformées en ARN messagers (ARNm) pour utilisation par les cellules, et d'autre part au niveau protéomique, qui représente l'ensemble des protéines obtenues par traduction des ARNm. A partir de ces analyses, une augmentation de l'expression des gènes associés à la synthèse protéique et une diminution de l'expression des gènes et protéines liées au métabolisme oxydatif ont été identifiées chez les porcs les plus efficaces (Louveau *et al.*, 2013). En revanche, aucune différence en lien avec l'expression de gènes liés à la synthèse lipidique n'a pu être observée. En résumé, si certaines de ces conclusions confortent les analyses du métabolisme, elles ne permettent pas actuellement de cibler une voie ou un indicateur biologique particulier à doser, qui permette de prédire rapidement et efficacement chez un grand nombre d'animaux le niveau d'efficacité alimentaire.

4. STRESS, ROBUSTESSE ET EFFICACITE ALIMENTAIRE

Une partie des ressources alimentaires est mobilisée en cas de stress. La théorie de l'allocation des ressources va plus loin, suggérant que la réduction de l'ingéré non productif, estimé par la CMJR, diminue les ressources tampon des animaux qui leur permettent de faire face à des stress ou des situations de challenge. Par exemple, un challenge immunitaire entraîne la redirection d'une fraction importante des acides aminés de la ration pour la réponse immunitaire. Dans ce sens, il a été montré que les indicateurs de la capacité du muscle à maintenir son équilibre physico-chimique semblent dégradés chez les animaux les plus efficaces, suggérant une plus grande flexibilité métabolique chez les animaux les moins efficaces (Faure *et al.*, 2013). Différentes études ont été développées pour documenter plus précisément les relations entre efficacité alimentaire et réponse au stress, afin de ne pas dégrader la robustesse des animaux en sélectionnant pour une meilleure efficacité alimentaire.

4.1. Aplombs

Des travaux préliminaires en volaille ont suggéré que l'amélioration de l'efficacité alimentaire entraînerait des problèmes d'aplombs chez les animaux. Pour évaluer ce facteur chez le porc, un enregistrement des blessures et boiteries de porcs comparés pour leur activité et leur comportement a été réalisée (Meunier-Salaün *et al.*, 2014). Aucune réponse défavorable en lien avec la sélection pour la CMJR n'a été observée dans cette étude. La tendance était en revanche à plus de blessures et de cannibalisme dans la lignée moins efficace, probablement en lien avec des changements de position plus fréquents et des interactions accrues entre les animaux.

4.2. Réponse de l'axe corticotrope

Une seconde façon d'appréhender le niveau de stress des animaux est d'évaluer la réponse de leur axe corticotrope par dosage des principales molécules impliquées dans cette réponse suite à un stress ou à une stimulation spécifique de l'axe par injection d'ACTH. Ces approches n'ont pas à ce stade permis de conclure à un niveau différent de stress ou de réponse au stress chez les animaux plus efficaces (Gilbert et Dekkers, 2013).

4.3. Réponse à un challenge inflammatoire

Les différents challenges inflammatoires menés sur des porcs de lignées divergentes pour la CMJR ont montré à la fois une réaction plus rapide à très court terme des animaux les plus efficaces (Gilbert et Dekkers, 2013), avec par exemple une augmentation plus forte de la température corporelle après une injection d'adjuvant de Freund dans les heures qui suivent l'injection, mais aussi une résolution de l'inflammation et une reprise de la croissance plus rapides chez ces mêmes animaux. Ces résultats, qui concernent pour le moment un nombre limité d'animaux et ont ciblé des challenges spécifiques, suggèrent plutôt un avantage des animaux efficaces dans leur mobilisation des leurs nutriments pour répondre aux challenges, et restent à confirmer.

4.4. Réponse à un challenge thermique

Le changement climatique est une des composantes majeures des changements environnementaux actuels auquel l'élevage porcin doit faire face. Le porc, comme tous les animaux d'élevage, répond à une température ambiante élevée par une réduction de son ingéré spontané, de façon à limiter sa production de chaleur, que ce soit pendant la période de croissance ou pendant la reproduction. Deux hypothèses peuvent être envisagées : 1. les porcs les plus efficaces peuvent avoir un avantage en situation chaude en raison de leur plus faible production de chaleur liée à un métabolisme basal moins actif, 2. les porcs les plus efficaces peuvent avoir un désavantage en situation chaude en raison d'une sensibilité accrue à la restriction alimentaire générée par la réduction de l'ingéré spontané. Des comparaisons de porcs de lignées divergentes pour la CMJR en situations expérimentales (Campos *et al.*, 2014) et en situation d'élevage tropical (Renaudeau *et al.*, 2014) montrent que la résultante de ces deux aspects ne donne pas d'avantage particulier à l'une ou l'autre lignée. Il peut être noté que les truies de la lignée plus efficace élevées en environnement tropical montraient des pertes corporelles exacerbées par rapport à l'élevage en environnement tempéré en raison de la réduction de leur ingéré, mais sans perdre leur avantage en termes de croissance de la portée par rapport aux truies de la lignée moins efficace, et cela sans impact notable sur la longévité des animaux (Renaudeau *et al.*, 2014).

5. CHALLENGES POUR L'AMELIORATION DE L'EFFICACITE ALIMENTAIRE

L'ensemble des éléments rapportés plus haut montre que la sélection pour une meilleure efficacité alimentaire induit une réduction de l'ingéré volontaire des porcs et de leur consommation d'eau, réduisant la quantité d'intrants mobilisée sur les élevages.

De plus, elle conduit à la production de porcs plus maigres, à métabolisme énergétique plus efficace, n'induit pas de modification de l'efficacité digestive mais une réduction significative du métabolisme basal et du niveau d'activité des animaux, sans affecter de façon délétère les performances de reproduction des truies, au moins quand le critère retenu est la CMJR. La dégradation des paramètres de qualité technologique de la viande ne semble pas induire la production de viandes à défaut, mais la qualité de la viande reste un point de vigilance important dans les stratégies de sélection pour l'efficacité alimentaire, de même que la composition nutritionnelle de la ration alimentaire. De plus, la capacité de réponse à des stress ou des changements de conditions d'élevage ne semble pas affectée par la sélection, contrairement à ce que suggère la littérature sur la théorie de l'allocation des ressources. Par ailleurs, les stratégies de sélection appliquées jusqu'à présent, dans un système d'alimentation *ad libitum* et sur la base de rations alimentaires faciles à digérées, n'ont pas permis d'améliorer génétiquement l'efficacité digestive des porcs pendant la période de croissance. Une amélioration de l'efficacité digestive pourrait être un élément crucial de compétitivité pour la valorisation de ressources alimentaires fibreuses à moindre coût. A partir de telles études, un certain nombre de défis s'ouvrent pour poursuivre l'amélioration de ce caractère et répondre à l'évolution des contraintes de l'élevage.

5.1. Phénotypage

Il n'a pas été possible jusqu'à présent de trouver des marqueurs biologiques ou génomiques précoces de l'efficacité alimentaire utilisable en élevage pour sélectionner plus efficacement les porcs sur ces critères. Les efforts doivent naturellement être poursuivis dans ce sens et l'émergence de l'utilisation de la génomique pour l'amélioration des populations d'élevage est une piste prometteuse. Cependant, la stratégie la plus pertinente reste de mesurer l'ingéré sur un nombre important d'animaux pour avoir une précision de sélection élevée.

5.2. Efficacité alimentaire et carrière reproductive

Les résultats obtenus en lien avec la sélection pour la CMJR amènent à s'interroger sur les stratégies de sélection et de conduite des truies proposées dans la littérature : la sélection pour une augmentation simple de l'ingéré volontaire des truies ne semble pas nécessairement produire des truies dirigeant plus efficacement leurs ressources pour l'alimentation de leur portée, et les truies les plus efficaces globalement semblent être celles qui mobilisent et reconstruisent le mieux leurs ressources. Pour aller plus loin sur ce volet, l'examen de la carrière des truies depuis leur mise à la reproduction jusqu'à leur réforme permettrait de proposer des critères de sélection qui intègrent une notion d'efficacité globale et n'entraîne pas la détérioration de l'appétit des femelles à la reproduction. Un suivi de leur métabolisme sur plusieurs lactations compléterait efficacement les connaissances sur ce volet.

5.3. Evolution des pratiques / restriction alimentaire / élevage de précision

La majorité des élevages porcins est actuellement conduite en lots homogènes en âge, éventuellement sexés, auxquels sont délivrés des quantités d'aliment légèrement restreintes à l'échelle du groupe.

La pratique de la restriction, généralisée à l'origine pour accentuer la teneur en maigre de la carcasse, entraîne quand elle est appliquée à des types génétiques maigres une réduction simultanée des dépôts de protéines et de lipides par les animaux, réduisant la vitesse de croissance proportionnellement à l'ingéré, sans amélioration significative de l'IC. Le contexte a évolué : les porcs produits sont de plus en plus maigres, et le ban de la castration à l'horizon 2018 par l'Union Européenne va limiter la production de mâles castrés, type sexuel plus gras que les mâles entiers et les femelles. Finalement, les nouvelles technologies de DAC permettent à termes d'envisager des conduites alimentaires ajustées à la dynamique des besoins de l'animal. A l'extrême, on envisage maintenant la distribution automatique de rations composées en fonction des besoins individuels des animaux, estimés d'après leur poids, leur composition corporelle, leur sexe et leur type génétique par exemple. L'ensemble de ces éléments suggère la possibilité de faire évoluer rapidement les pratiques d'élevage pour inclure le potentiel offert par les stratégies d'alimentation de précision.

5.4. Changements de ressources alimentaires

Pour réduire la compétition entre productions de céréales pour l'alimentation animale, l'alimentation humaine et les biocarburants, une solution consiste à introduire dans l'alimentation animale des ressources végétales de moins bonnes qualités. Que ce soient des matières premières différentes ou des coproduits de processus industriels, il s'agit généralement de ressources présentant des proportions de fibres plus importantes que les aliments standards pour porc. La capacité spontanée des porcs à dégrader les fibres n'est cependant pas élevée, en particulier chez le jeune animal, et nous avons montré que la sélection d'animaux plus efficaces sans les exposer à des régimes difficiles à digérer ne permet pas d'améliorer l'efficacité digestive. Deux défis sont à relever pour aller plus loin sur cette efficacité :

- organiser un challenge systématique d'animaux en croissance en combinaison avec un contrôle de performances classique permettrait de quantifier les interactions entre niveaux d'efficacité alimentaire et régimes alimentaires,
- mesurer spécifiquement cette efficacité en élevage permettrait d'estimer la part de l'efficacité digestive dans l'efficacité alimentaire mesurée par l'IC ou la CMJR, deux critères qui intègrent tout le processus d'utilisation des aliments depuis l'ingestion jusqu'au dépôt.

Ces deux éléments permettraient de planifier des études spécifiques de cette composante pour sélectionner pour la valorisation de ressources dégradées afin de maintenir la compétitivité de la production.

5.5. Flore intestinale et efficacité alimentaire

Un acteur largement ignoré dans l'étude de l'ingéré et de l'efficacité alimentaire jusqu'à présent est le microbiote intestinal. Ce microbiote est un partenaire à part entière de l'utilisation de l'aliment par l'animal, permettant sa fermentation et sa transformation en composants absorbables par le tractus digestif, typiquement sous forme d'acides gras volatiles et de glucides. Son action affecte 10 à 20 % de l'énergie digestible chez le porc. Le microbiote intestinal agit essentiellement en facilitant la digestion, en particulier celle des fibres alimentaires.

L'évolution des matières premières pour l'alimentation animale vers des produits plus fibreux en fait donc un partenaire potentiellement important de l'élevage, mais il a aussi été montré que la composition de la flore pouvait varier entre porcs plus ou moins efficaces sans que leur efficacité digestive soit affectée. Pour examiner plus avant ce composant, il faut évaluer son impact sur la variabilité de l'efficacité alimentaire des porcs, et décomposer cet impact entre la fraction dépendante de la génétique de l'animal, la fraction dépendante des conditions d'élevage et la fraction transmise par la mère à la naissance et pendant la lactation. Si à l'issue de ces études le microbiote est confirmé dans son rôle clé dans l'expression de l'efficacité alimentaire des porcs, des méthodes de phénotypage haut débit de la flore intestinale devront être développées pour utiliser cette information en élevage.

5.6. Changements des conditions d'élevage

L'évolution des conditions d'élevage, au-delà de la qualité des ressources alimentaires, concerne d'une part la multiplication des élevages de production dans la zone inter-tropicale (Chine, Brésil...) sur la base de types génétiques sélectionnés en régions tempérées, et d'autre part la capacité des animaux à maintenir des performances élevées en environnement de production dégradé. L'environnement d'élevage est par essence variable, en lien avec les saisons, la qualité de l'aliment et de l'eau, et l'état sanitaire du troupeau.

Une tendance à une moindre maîtrise de l'environnement d'élevage pourrait de plus s'amorcer pour réduire l'empreinte énergétique des élevages. La quantification de la sensibilité des animaux à ces variations permet de produire des indicateurs de robustesse, c'est-à-dire de la capacité des animaux à maintenir des performances élevées en dépit des variations de la qualité de leur environnement. La production porcine étant basée sur la sélection d'animaux de lignées pures dans des environnements d'élevage de sélection protégés, pour produire des animaux croisés dans des environnements moins maîtrisés, la sélection doit veiller à maintenir la capacité des porcs à produire à haut niveau quelle que soit la qualité de l'environnement. Des premières études montrent que les porcs de lignée sélectionnée pour une meilleure CMJR ont un niveau d'ingéré et une vitesse de croissance moins affectés par la qualité de l'environnement que des porcs de lignée sélectionnée pour une moins bonne CMJR (Gilbert *et al.*, 2014). Si ces résultats sont confirmés sur d'autres populations, cela permettra d'associer sans difficulté robustesse et efficacité alimentaire dans les schémas de sélection. Dans le cas contraire, des études complémentaires seront nécessaires pour proposer des stratégies de sélection qui n'affectent pas la capacité des animaux à maintenir leur niveau de performance quand les conditions d'élevage sont dégradées. Dans tous les cas, ce type d'étude permettra d'identifier les facteurs environnementaux majeurs affectant la variabilité des performances en élevage, et pourra alimenter l'évolution des recommandations pour la conduite des troupeaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barea R., Dubois S., Gilbert H., Sellier P., van Milgen J., Noblet J., 2010. Energy utilization in pigs selected for high and low residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 88, 2062-2072.
- Bunter K.L., Hermes S., Luxford B.G., Graser H.-U., Crump R.E., 2005. Insulin-like growth factor-I measured in juvenile pigs is genetically correlated with economically important performance traits. *Austr. J. Exp. Agr.*, 45, 783-792.
- Cai W., Casey D.S., Dekkers J.C.M., 2008. Selection response and genetic parameters for residual feed intake in Yorkshire swine. *J. Anim. Sci.*, 86:287-298.
- Campos P.H.R.F., Noblet J., Jaguelin-Peyraud Y., Gilbert H., Mormède P., de Oliveira Donzele R.F.M., Donzele J.L., Renaudeau D., 2014. Thermoregulatory responses during thermal acclimation in pigs divergently selected for residual feed intake. *Int. J. Biometeorol.*, 58, 1545-1557.
- Clutter A.C., 2011. Genetics of performance traits. In: M. F. Rothschild & A. Ruvinsky (Eds). *The genetics of the pig*. 2nd ed., 325-389. CAB International, Wallingford, UK.
- Cruzen S.M., Harris A.J., Hollinger K., Punt R.M., Grubbs J.K., Selsby J.T., Dekkers J.C.M., Gabler N.K., Lonergan S.M., Huff-Lonergan E., 2013. Evidence of decreased muscle protein turnover in gilts selected for low residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 91, 4007-4016.
- Faure J., Lefaucheur L., Bonhomme N., Ecolan P., Meteau K., Métayer Coustard S., Kouba M., Gilbert H., Lebret B., 2013. Consequences of divergent selection for residual feed intake in pigs on muscle energy metabolism and meat quality. *Meat Sci.*, 93, 37-45.
- Garreau H., Tribout T., Bidanel J.-P., 1998. Nouvelle estimation des paramètres génétiques des caractères de production dans les races Large White et Landrace Français. *TechniPorc*, 21, 37-43.
- Gilbert H., Bidanel J.-P., Gruand J., Caritez J.-C., Billon Y., Guillouet P., Lagant H., Noblet J., Sellier P., 2007. Genetic parameters for residual feed intake in growing pigs, with emphasis on genetic relationships with carcass and meat quality traits. *J. Anim. Sci.*, 85, 3182-3188.
- Gilbert H., Bidanel J.-P., Billon Y., Lagant H., Guillouet P., Sellier P., Noblet J., Hermes S., 2012. Correlated responses in sow appetite, residual feed intake, body composition, and reproduction after divergent selection for residual feed intake in the growing pig. *J. Anim. Sci.*, 90, 1097-1108.
- Gilbert H., Dekkers J.C.M., 2013. Improvement of feed efficiency: lessons from residual feed intake studies in pigs, part 1. Proc. 63th annual meeting of the EAAP. 53. Feed efficiency in non-ruminants. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.
- Gilbert H., David I., Billon Y., Hermes S., 2014. Does selection for RFI affect the sensitivity to environmental variation in pigs? 10^{ème} WCGALP, abstract 123, Vancouver, Canada, 17-22 août 2014.
- Gondret F., Tacher S., Gilbert H., 2014. Modulation of hepatic redox state in pigs differing in feed efficiency as revealed by a proteomic analysis. Proc. 64th annual meeting of the EAAP. Appetite control - mechanisms and comparative aspects. 161. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.
- IFIP-GTE, 2014. GTE : évolution des résultats moyens nationaux - naisseurs – engraisseurs. Ed IFIP.
- Harris A.J., Patience J.F., Lonergan S.M., Dekkers J.C.M., Gabler N.K., 2012. Improved nutrient digestibility and retention partially explains feed efficiency gains in pigs selected for low residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 90, 164-166.
- Knap P.W., 2009. Voluntary feed intake and pig breeding. In: D. Torrallardona & E. Roura (Eds), *Voluntary feed intake in pigs*. 13-36, Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.

- Lefaucheur L., Lebret B., Ecolin P., Louveau I., Damon M., Prunier A., Billon Y., Sellier P., Gilbert H., 2011. Muscle characteristics and meat quality traits are affected by divergent selection on residual feed intake in pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 996-1010.
- Le Naou T., Le Floc'h N., Louveau I., Gilbert H., Gondret F., 2012. Metabolic changes and tissue responses to selection on residual feed intake in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 90, 4771-4780.
- Louveau I., Vincent A., Gondret F., Gilbert H., Lefaucheur L., 2013. Divergent selection on residual feed intake influences gene and protein expressions in pig muscle. Proc. 63th annual meeting of the EAAP. 53. Feed efficiency in non-ruminants. 590. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.
- Meunier-Salaün M.C., Guérin C., Billon Y., Sellier P., Noblet J., Gilbert H., 2014. Divergent selection for residual feed intake in group-housed growing pigs: characteristics of physical and behavioural activity according to line and sex. *Animal*, 8, 1898-1906.
- Mignon-Grasteau S., Muley N., Bastianelli D., Gomez J., Peron A., Sellier N., Millet N., Besnard J., Hallouis J.M., Carré B., 2004. Heritability of digestibilities and divergent selection for digestion ability in growing chicks fed a wheat diet. *Poult. Sci.*, 83, 860-867.
- Montagne L., Loisel F., Le Naou T., Gondret F., Gilbert H., Le Gall M., 2014. Difference in short-term responses to a high-fiber diet in pigs divergently selected for residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 92, 1512-1523.
- Noblet J., Gilbert H., Jaguelin-Peyraud Y., Lebrun T., 2013. Evidence of genetic variability for digestive efficiency in the growing pig. *Animal*, 7, 1259-1264.
- Prunier A., Heinonen M., Quesnel H., 2010. High physiological demands in intensively raised pigs: Impact on health and welfare. *Animal*, 4, 886-898.
- 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.
- Renaudeau D., Gourdine J.-L., Fleury J., Ferchaud S., Billon Y., Noblet J., Gilbert H., 2014. Selection for residual feed intake in growing pigs: Effects on sow performance in a tropical climate. *J. Anim. Sci.*, 92, 3568-3579.
- Saintilan R., Sellier P., Billon Y., Gilbert H., 2012. Genetic correlations between males, females and castrates for residual feed intake, feed conversion ratio, growth rate and carcass composition traits in Large White growing pigs. *J. Anim. Breed. Genet.*, 129, 103-106.
- Saintilan R., Mérour I., Brossard L., Tribout T., Dourmad J.Y., Sellier P., Bidanel J., van Milgen J., Gilbert H., 2013. Genetics of residual feed intake in growing pigs: relationships with production traits, and nitrogen and phosphorus excretion. *J. Anim. Sci.*, 91, 2542-2554.
- Saintilan R., Brossard L., Vautier B., Sellier P., Bidanel J., van Milgen J., Gilbert H., 2014. Phenotypic and genetic relationships between growth and feed intake curves and feed efficiency and amino acid requirements in the growing pig. *Animal*. doi:10.1017/S1751731114002171.
- Sanchez M.-P., Tribout T., Iannuccelli N., Bouffaud M., Servin B., Tenghe A., Dehais P., Muller N., Schneider M.P., Mercat M.J., Rogel-Gaillard C., Milan D., Bidanel J.-P., Gilbert H., 2014. A genome-wide association study of production traits in a commercial population of Large White pigs: evidence of haplotypes affecting meat quality. *Genet. Sel. Evol.*, 46, 12.
- Shirali M., Doeschl-Wilson A., Knap P. W., Duthie C., Kanis E., van Arendonk J.A.M., Roehe R., 2012. Nitrogen excretion at different stages of growth and its association with production traits in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 90, 1756-1765.
- Smith R.M., Gabler N.K., Young J.M., Cai W., Boddicker N.J., Anderson M.J., Huff-Lonergan E., Dekkers J.C.M., Lonergan S.M., 2011. Effects of selection for decreased residual feed intake on composition and quality of fresh pork. *J. Anim. Sci.*, 89, 192-200.
- Tribout T., Bidanel J.-P., 2000. Genetic parameters of meat quality traits recorded on Large White and French Landrace station-tested pigs in France. In: C. Wenk, J.A. Fernandez & M. Dupuis (Eds), EAAP Publication No 100: quality of meat and fat in pigs as affected by genetics and nutrition. 37-41. Wageningen Pers, Wageningen, NLD.
- Tribout T., Caritez J.C., Gogué J., Gruand J., Bouffaud M., Billon Y., Péry C., Griffon H., Brenot S., Le Tiran M.H., Bussièrès F., Le Roy P., Bidanel J.-P., 2004. Estimation, par utilisation de semence congelée, du progrès génétique réalisé en France entre 1977 et 1998 dans la race porcine Large White: Résultats pour quelques caractères de production et de qualité des tissus gras et maigres. *Journ. Rech. Porcine*, 36, 275-281.