

Quelles nouvelles mesures pour améliorer la sélection de l'efficacité alimentaire des porcs ?

Hélène GILBERT (1), Alban BOUQUET (2), Vanille Déru (1,3), Rob BERGSMA (4), Juan Pablo SANCHEZ (5), Miriam PILES (5), Michael Aldridge (6), Mario CALUS (6)

(1) GenPhySE, Université de Toulouse, INRAE, INPT, ENVT, 31320 Castanet-Tolosan, France

(2) IFIP- Institut du Porc, 35651 Le Rheu Cedex, France

(3) France Génétique Porc, 35651 Le Rheu Cedex, France

(4) Topigs Norsvin Research Center, 6641 Beuningen GLD, Pays-Bas

(5) Institute for Food and Agriculture Research and Technology (IRTA), Torre Marimon, 08140, Espagne

(6) Wageningen Livestock Research, 6700 AH Wageningen, Pays-Bas

helene.gilbert@inrae.fr

Avec la collaboration du consortium et le soutien financier du programme européen Feed-a-Gene.

Quelles nouvelles mesures pour améliorer la sélection de l'efficacité alimentaire des porcs ?

Les mesures de l'ingéré sont les clés d'une sélection précise de l'efficacité alimentaire. Elles sont cependant coûteuses. De plus, ces performances dépendent de nombreuses composantes, telles que le niveau de production, l'activité et le comportement des animaux, leur aptitude à répondre à des stress, et leur capacité à digérer l'aliment. L'importance relative de ces composantes dépend du système de production, en particulier de la séquence alimentaire et des conditions de logement des animaux. Cette communication propose de résumer les résultats obtenus dans le projet Feed-a-Gene sur l'évaluation de nouvelles mesures pour la sélection de l'efficacité alimentaire, en se concentrant sur les mesures les moins coûteuses qui peuvent contribuer à une plus grande durabilité de la production. Des mesures liées à l'activité des porcs, dont le comportement alimentaire, des indicateurs de bien-être (comptage des lésions et qualification des interactions entre animaux) et de stress, et des mesures d'efficacité digestive ont été évaluées. L'impact de l'effet génétique des autres individus de la loge (effets génétiques indirects) sur les performances individuelles a aussi été testé comme levier pour obtenir des valeurs génétiques plus précises. Les mesures les plus prometteuses (comportement alimentaire, interactions entre porcs, efficacité digestive, effets génétiques indirects) avaient des héritabilités comprises entre 0,18 et 0,70. Les gains de progrès génétique possibles par l'utilisation de telles mesures dans les schémas de sélection ont été évalués analytiquement pour identifier les meilleurs enregistrements à déployer en ferme.

Can new measures improve selection for feed efficiency in pigs?

Measuring feed intake is a key for accurate selection of feed efficiency. However, recording feed efficiency is expensive and depends on multiple components, including production level, activity, behaviour, responses to stress and digestion. The relative importance of these components is partly driven by the production system, especially diet and housing. This paper summarizes results obtained in the Feed-a-Gene project for new measures for feed efficiency in pigs, with a focus on how they can be used for sustainable breeding schemes. Measures related to pig activity (including feeding behaviour), measures to quantify welfare (injuries and inter-individual interactions) and stress level, and measures of individual digestibility were evaluated. The genetic impact of other animals in the pen (indirect genetic effects, IGE) on individual performance was also considered as a potential approach to better estimate individual breeding values. Some of the most promising measures (feeding activity, pig interactions, digestibility, IGE) had moderate to high heritabilities (from 0.18 to 0.70). Gains in genetic progress achievable when including these measures in breeding schemes were evaluated analytically to identify the best procedures to implement on-farm.

INTRODUCTION

L'efficacité alimentaire est reconnue comme un levier majeur de compétitivité de la filière porcine. Son amélioration permet de limiter les coûts de production liés à l'aliment, ainsi que l'empreinte environnementale de la production. Améliorer l'efficacité alimentaire des lignées porcines mises à disposition des éleveurs est un enjeu de compétition importante entre les sélectionneurs porcins. Néanmoins, les progrès sur cet objectif sont fortement limités par le coût important de la mesure de ce caractère. Si la production porcine dispose depuis presque trois décennies d'automates d'enregistrement de l'ingéré individuel (DAC) de porcs élevés en groupe, la mise en place de ces appareils a un coût élevé, demande une réorganisation des infrastructures et un développement d'expertise des éleveurs vers la gestion d'automatismes et de bases de données. Les dispositifs d'enregistrement automatique de l'ingéré ont de ce fait été d'abord limités à un pourcentage faible des candidats à la sélection ou de leurs collatéraux (<10%). Ce pourcentage s'est accru durant ces 10 dernières années, pour augmenter la pression de sélection sur ce paramètre et ainsi contrer l'augmentation de la proportion des coûts alimentaires dans les coûts de production. Ainsi, en France, avec l'équipement d'un nombre accru de fermes de sélection et de stations de contrôle, plus du tiers des candidats à la sélection des lignées paternelles sont maintenant mesurés. Si cela permet d'augmenter la capacité de testage dans les dispositifs de sélection, les coûts et les développements d'infrastructures associés restent très importants. Pour augmenter encore le nombre d'animaux connus précisément sur leur efficacité alimentaire, des mesures complémentaires sont étudiées. La sélection sur la base de ces mesures est a priori moins efficace que si les animaux sont mesurés directement pour le critère de sélection cible. En revanche, si ces nouvelles mesures sont (1) suffisamment précises, (2) hérissables, (3) suffisamment corrélées au critère cible, et (4) disponibles pour tous les animaux candidats à la sélection, la perte d'efficacité relative peut être compensée par la disponibilité de la mesure sur un nombre d'animaux beaucoup plus important. De plus, certaines de ces mesures alternatives correspondent à des composantes de l'efficacité alimentaire que l'on pourrait ainsi choisir de privilégier par la sélection. En effet, l'efficacité alimentaire est un caractère complexe, qui dépend du métabolisme des animaux, de leur niveau d'activité, du niveau de stress dans lequel ils sont élevés et de leur capacité à y répondre (Gilbert *et al.*, 2017). C'est avec ce double objectif de trouver soit des mesures plus accessibles, soit des mesures des composantes de l'efficacité alimentaire, que des recherches ont été menées dans le cadre du projet européen Feed-a-Gene. Ce travail s'est organisé en trois volets : la recherche de marqueurs biologiques de l'efficacité alimentaire, celle de nouvelles mesures à appliquer aux animaux et la compréhension du rôle du microbiote dans la variabilité de l'efficacité alimentaire des animaux. Le premier volet est présenté dans la communication de Gondret *et al.* (2020) dans cette édition ; c'est le deuxième de ces volets qui est présenté ici. Les études menées dans Feed-a-Gene s'appuyaient à la fois sur des populations porcines commerciales (croisements trois voies, populations Duroc ou Large White) et sur des lignées expérimentales (lignées divergentes pour la CMJR), et intégraient si nécessaire un challenge alimentaire permettant d'évaluer la robustesse des mesures envisagées à des ressources alimentaires diversifiées. Des études précédentes ont permis de montrer que des porcs différant pour l'efficacité alimentaire en croissance ont aussi

des différences de performances, de métabolisme énergétique, d'activité et de comportement alimentaire, de capacité à répondre à des stress (Gilbert *et al.*, 2017), alors que les variations de capacité digestive restent marginales (Montagne *et al.*, 2014). Il a aussi été montré que les congénères (c'est à dire les porcs qui partagent une même loge) influencent de façon croisée les performances des individus d'une loge. La prise en compte de ces influences dans les modèles de sélection peut impacter l'efficacité alimentaire (Ellen *et al.*, 2014). Deux approches ont été retenues pour étudier ces différents aspects, d'une part la mise en place de nouvelles mesures et l'évaluation de leurs composantes génétiques, et, d'autre part, l'application de nouveaux modèles statistiques à des mesures existantes (par exemple de croissance). Une fois les caractéristiques de ces mesures disponibles, les nouveaux critères les plus intéressants ont été testés pour évaluer leur capacité à améliorer l'efficacité alimentaire.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Nouvelles mesures

Les mesures relatives au métabolisme énergétique, qui comprennent généralement des prélèvements de tissus, sont susceptibles d'être utilisées comme biomarqueurs et à ce titre sont rapportées dans Gondret *et al.* (2020).

1.1.1. Efficacité digestive

La digestion est la première étape de traitement des nutriments. Certaines études précédentes n'ont pas montré de différence de digestibilité en lien avec l'efficacité alimentaire générale (Montagne *et al.*, 2014), mais d'autres ont suggéré une variabilité génétique de la digestibilité (Noblet *et al.*, 2013). Pour mieux comprendre les liens entre les deux caractères, un dispositif expérimental s'appuyant sur la population Large White française en sélection a été mené à la station de phénotypage du Rheu (Déru *et al.*, 2020). Les digestibilités individuelles de l'énergie, de l'azote et de la matière organique ont été estimées via les coefficients d'utilisation digestive (CUD). Ces CUD ont été prédits pour 1242 porcs à partir de fèces collectées à 65 kg de poids vif et analysées par spectre proche infra-rouge. La moitié des porcs étaient nourris avec un aliment conventionnel, l'autre moitié avec un aliment dilué en énergie (-15%), en conservant le rapport Lysine digestible/énergie nette par incorporation de matières premières fibreuses.

1.1.2. Comportement et activité

L'activité des porcs, incluant le comportement alimentaire, sont des sources de dépense énergétique importantes qui affectent l'efficacité alimentaire (Meunier-Salaün *et al.*, 2014). Par ailleurs, il a été proposé que les mesures de comportement alimentaire disponibles grâce aux enregistrements par les DAC permettent de quantifier les relations hiérarchiques entre les porcs (Boumans *et al.*, 2018), ce qui pourrait affecter leur efficacité alimentaire.

Les pourcentages d'occurrences de lésions aux oreilles, à la tête, sur le corps, les pattes avant et les pattes arrières de 304 porcs Duroc ont été enregistrés en 3 à 4 notations durant la croissance, suivant le protocole proposé par Welfare Quality (http://www.welfarequalitynetwork.net/media/1018/pig_protocol.pdf). En complément, les interactions antagonistes entre animaux ont été observées pendant 3 à 4 périodes de 20 minutes. Le nombre, pour 332 porcs, des activités de chasse, morsure, attaque et coup de tête initiés et subis a été noté.

Avec 1444 porcs de cette population Duroc, le comportement

alimentaire (vitesse d'ingestion, temps d'ingestion, fréquence de visites, intervalle entre visites) a été étudié d'après des enregistrements de DAC. Des données similaires, disponibles pour 37710 porcs croisés issus des schémas de sélection de Topigs-Norsvin, ont été utilisées pour proposer un calcul de rang social entre les porcs d'après la méthode proposée par Puppe *et al.* (2008). Cette approche n'est possible que si les DAC n'isolent pas l'animal durant la prise alimentaire, afin que les phénomènes de compétition s'expriment.

1.1.3. Indicateurs de bien-être

Les réponses à un stress, quelle que soit la nature de celui-ci, sont consommatrices de nutriments et/ou réduisent l'ingestion, affectant l'efficacité alimentaire. L'identification d'indicateurs de bien-être ou de réponses au stress (afin d'identifier les animaux peu affectés par les facteurs de stress) pourrait permettre d'intégrer ces critères dans les schémas de sélection.

Des mesures visant à quantifier le lien entre stress aigu et chronique et performances en croissance ont été évaluées sur 189 porcs Duroc. Des dosages de chromogranine A (salive), de cortisol (poils) et des numérations sanguines ont été réalisés en début et en fin de période de croissance.

Des mesures ponctuelles visant à évaluer la réponse à une stimulation standardisée de l'axe corticotrope par injection d'adrénocorticotrophine ou ACTH, par dosage du cortisol plasmatique 1h après injection (Larzul *et al.*, 2015), ont été appliquées à deux paires de lignées divergentes, à 6 semaines d'âge, une paire ayant été sélectionnée pour ce critère, et l'autre paire ayant été sélectionnée pour l'efficacité alimentaire. Les 44 animaux testés par lignée (n=196) ont ensuite été mesurés pour leurs performances de production (Gilbert *et al.*, 2019). Les réponses des lignées ont été évaluées pour quantifier les différences entre lignées intra-paire de lignées divergentes.

1.1.4. Estimations de composantes de variance

A l'exception de la dernière étude, les mesures ont été analysées à l'aide de modèles linéaires mixtes, généralisés pour les indicateurs d'activité, avec un effet animal aléatoire distribué normalement, avec une structure de variance dépendant des relations d'apparentement. De cette façon, la part de la variance phénotypique des caractères transmise à la descendance (héritabilité, ou h^2) a été quantifiée pour chaque caractère. Dans un second temps, des modèles bivariés ont été appliqués pour quantifier les corrélations génétiques avec les mesures d'efficacité alimentaire. L'amplitude de ces corrélations est un indicateur de la transmission conjointe des deux caractères à la descendance, et donc de la possibilité d'utiliser l'un pour indirectement sélectionner l'autre.

1.2. Nouveaux modèles

Les modèles testés sont des augmentations du modèle décrit en 1.1.4. La majorité s'appuie sur des données enregistrées grâce à des automates d'alimentation, éventuellement combinées à des mesures de croissance. Le principe général est d'introduire un nouvel effet aléatoire dans le modèle, qui permet d'estimer l'influence héritable de chaque animal sur ses partenaires dans la loge, appelé effet génétique indirect (EGI, Ellen *et al.*, 2014). De cette façon, la performance d'un animal dépend d'effets fixes et de covariables identifiées, de sa propre valeur génétique (ou valeur génétique directe), de la valeur génétique indirecte de ses partenaires de loge, et d'effets non identifiés, ou effets résiduels aléatoires. Avec ces nouveaux modèles, la part du caractère transmissible est donc une combinaison de variance

génétique des effets directs et indirects. Les modèles testés ici incluaient plusieurs caractères, l'efficacité alimentaire mesurée en groupe et la vitesse de croissance mesurée individuellement, afin de consolider les estimations sur le caractère cible enregistré moins précisément (Ragab *et al.*, 2018).

1.3. Evaluation du progrès génétique

Quand les héritabilités et les corrélations génétiques avec l'efficacité alimentaire estimées étaient différentes de 0, une évaluation du potentiel de ces nouvelles mesures pour la sélection a été faite. Une valeur de référence de la réponse à la sélection a été obtenue en quantifiant le progrès génétique sur l'efficacité alimentaire obtenu par un changement de un écart-type génétique de l'indice de consommation dans une population. En appliquant un changement similaire à chaque nouveau critère d'intérêt (déviations de un écart type génétique par rapport à la valeur actuelle du caractère), on peut évaluer quelle serait la réponse à la sélection corrélée pour l'indice de consommation dans cette même population avec ce nouveau caractère. Ces valeurs ont été mises en perspective de la référence obtenue avec l'indice de consommation.

2. RESULTATS

2.1. Composantes de variance des caractères testés

Les effectifs, moyennes et écart type, et héritabilités et corrélations génétiques avec les caractères d'efficacité alimentaire sont rapportées dans le tableau 1 pour les caractères liés à l'ingestion et au comportement, et dans le tableau 2 pour les indicateurs de bien-être.

2.1.1. Digestibilité

Les mesures de digestibilité ont été réalisées pour des porcs nourris avec un aliment conventionnel ou fibreux. La digestibilité des aliments était plus élevée avec l'aliment conventionnel. Les héritabilités étaient légèrement supérieures avec le régime fibreux ($\sim 0,55$, contre $\sim 0,40$ avec le régime conventionnel). Les corrélations génétiques entre régimes alimentaires étaient supérieures à $0,75 \pm 0,15$ (Déru *et al.*, 2020) dans cette étude. En considérant les caractères comme identiques entre aliments, les corrélations génétiques avec l'efficacité alimentaire étaient négatives, modérées avec l'indice de consommation ($\sim -0,40$) et fortes avec la CMJR ($\sim -0,65$). Cela indique que les mesures de digestibilité ont des caractéristiques intéressantes pour la sélection de l'efficacité alimentaire : améliorer de 1 écart type génétique la digestibilité avec les régimes fibreux permettrait presque de compenser l'écart d'efficacité de digestion entre régimes, par exemple.

2.1.2. Indicateurs comportementaux

Les comptages de lésions ont montré les occurrences les plus élevées au niveau des oreilles (en moyenne 0,53 lésion par porc, avec 33% des animaux affectés). Les fréquences étaient aussi élevées pour les lésions sur la tête en général (20% d'atteints) et sur les jambons (11%). En termes d'interactions enregistrées, l'action la plus fréquente était le coup de tête (53% des porcs ont initié cette action durant les tests), la seconde action étant la morsure (21% des porcs). Le nombre de coups de tête reçus avait une héritabilité faible (0,10) et une corrélation génétique positive (0,72) avec la CMJR, suggérant une association favorable entre efficacité alimentaire et cet indicateur. Pour les autres mesures d'interactions entre congénères, des variances génétiques très faibles ont été estimées et les héritabilités associées étaient généralement faibles ($< 0,10$). Le nombre de

lésions comptées sur les pattes avait une héritabilité élevée (0,64), mais avec une incidence faible de ces lésions qui incite à la précaution pour l'utilisation de cette mesure. La même observation est possible pour le nombre de poursuites reçues ($h^2=0,31$), pour une incidence de 0,03 poursuite par porc observé. En raison des faibles variances génétiques estimées pour ces caractères, des incidences réduites des événements enregistrés et des effectifs limités, les corrélations génétiques qui, en valeur, sont parfois élevées, ne peuvent être utilisées

pour évaluer des réponses à la sélection. Ces premiers résultats suggèrent que les enregistrements comportementaux, qui nécessitent un fort investissement en main d'œuvre ou en automatisation des mesures, apporteraient une valeur ajoutée limitée à la sélection pour l'efficacité alimentaire, en lien avec la relativement faible occurrence des comportements agonistiques. Ces essais montrent cependant que certains de ces enregistrements ont un potentiel pour l'amélioration d'autres objectifs, tels que le bien-être des animaux.

Tableau 1 – Caractéristiques de la digestibilité, des comptages de lésions et des caractères comportementaux

Caractère	N	Race ¹	Moyenne ajustée	Ecart type / SE	h ²	Corrélation génétique avec CMJR	Corrélation génétique avec IC
Digestibilité²							
Energie, AC (%)	654	LW	84,30	0,15	0,38		
Energie, AF (%)	588	LW	78,13	0,15	0,54	-0,65	-0,39
Azote, AC (%)	654	LW	78,74	0,16	0,41		
Azote, AF (%)	588	LW	73,82	0,16	0,56	-0,64	-0,37
Matière organique, AC (%)	654	LW	83,53	0,13	0,40		
Matière organique, AF (%)	588	LW	77,81	0,14	0,54	-0,65	-0,43
Lésions³							
Nb lésions/porc	304	Duroc	2,33	1,66	0,02	-0,74	
Nb lésions oreilles	304	Duroc	1,53	0,91	0,01	0,64	
Nb lésions tête	304	Duroc	1,28	0,69	0,04	-0,88	
Nb lésions corps	304	Duroc	1,31	0,74	0,03	-0,69	
Nb lésions jambon	304	Duroc	1,16	0,53	0,02	-0,77	
Nb lésions pattes	304	Duroc	1,05	0,24	0,64	-0,09	
Nb combats initiés	332	Duroc	1,10	0,39	0,10	0,40	
Nb combats reçus	332	Duroc	1,10	0,37	0,02	0,22	
Nb coups de tête initiés	332	Duroc	2,26	1,73	0,06	0,39	
Nb coups de tête reçus	332	Duroc	2,27	1,75	0,10	0,72	
Nb de morsures données	332	Duroc	1,33	0,74	0,02	0,54	
Nb de morsures reçues	332	Duroc	1,33	0,70	0,01	0,63	
Nb de poursuites données	332	Duroc	1,03	0,19	0,09	-0,32	
Nb de poursuites reçues	332	Duroc	1,03	0,17	0,31	0,19	
Comportement alimentaire							
Vitesse d'ingestion, g/min	1144	Duroc	38,60	7,41	0,30		0,40
Temps ingestion, min/j	1144	Duroc	60,72	10,27	0,23		-0,28
Nb visites/j	1144	Duroc	10,11	2,98	0,48		0,15
Temps entre visites, h	1144	Duroc	3,93	1,03	0,47		0,04

¹LW= Large White

²AC = aliment conventionnel ; AF = aliment fibreux

³Tous les caractères de comptage ont été incrémentés de 1,0001 (pas de lésions = 1,0001) pour faciliter les traitements statistiques.

Les indicateurs de comportements alimentaires sont généralement héritables ($h^2 > 0,10$). Cependant, étant données les erreurs standards des estimées de corrélations avec l'indice de consommation, seule la vitesse d'ingestion avait une corrélation non nulle avec l'indice de consommation, suggérant une meilleure efficacité alimentaire des porcs qui ingèrent plus lentement. Ces résultats sont contradictoires avec ceux décrits chez le porc Large White, qui montraient plutôt une meilleure efficacité alimentaire des porcs qui passaient moins de temps à ingérer (Gilbert *et al.*, 2009).

Finalement, un rang intra-loge corrigé pour le nombre de porcs dans la loge a été calculé comme indicateur de la hiérarchie sociale entre les animaux, à partir des enregistrements de DAC (Puppe *et al.*, 2008). Pour ce critère, les 20% des animaux les plus dominants (c'est-à-dire ceux chassant les autres individus du DAC pour manger) ont été rassemblés dans un groupe noté 1, et les 20% des porcs les moins dominants (c'est-à-dire le plus souvent chassés du DAC) dans un groupe noté 3. Les 60% restant étaient dans un groupe intermédiaire, noté 2. Ce critère présentait une héritabilité faible (0,12), et une corrélation génétique significative ($> 0,25$) avec l'indice de consommation,

suggérant que les animaux dominants auraient une efficacité alimentaire réduite.

2.1.3. Indicateurs de bien-être (Tableau 2)

Les mesures de cortisol dans les poils et de chromogranine A à la fin du test étaient supérieures à celles réalisées en début de test. Les héritabilités étaient faibles et seule celle de dosage de cortisol dans les poils en fin de contrôle était supérieure à 0,10. Les corrélations génétiques de ces dosages avec la CMJR correspondent à des valeurs plus faibles chez les porcs génétiquement plus efficaces. Cependant, les effectifs étaient limités et ces estimations, nouvelles chez le porc, devront être consolidées sur des populations de plus grande taille. Des estimations précédentes d'héritabilité du cortisol dans les poils dans des espèces non domestiques (singe, Fairbanks *et al.*, 2011) conduisaient à des héritabilités relativement élevées ($\sim 0,30$), suggérant un contrôle génétique de la réponse à un état de stress chronique. En contrepartie, la chromogranine A est plutôt liée à un stress aigu (Casal *et al.*, 2017) qui ne correspond peut-être pas aux conditions d'élevage habituelles des porcs, ne permettant pas l'expression d'une variabilité suffisante de cet indicateur dans la population testée.

Tableau 2 – Caractéristiques des indicateurs de bien-être (plasma, salive, poils) et des formules sanguines, porcs Duroc

Caractère	N	Moyenne	Ecart type	h ²	Corrélation génétique avec CMJR
Indicateurs de bien-être					
Cortisol poils, fin contrôle, log(pg/mg)	64	4,49	1,47	0,12	0,38
Cortisol poils, début contrôle, log(pg/mg)	63	5,12	0,47	0,08	0,62
Chromogranine A salive, fin contrôle, µg/ml	214	0,50	0,60	0,02	0,70
Chromogranin A salive, début de contrôle, µg/ml	148	0,90	0,83	0,05	-0,20
Formules sanguines					
Début de contrôle					
Hématocrite, %	189	33,28	2,44	0,33	-0,06
Hémoglobine, g/dL	189	10,54	0,86	0,29	-0,06
Volume globulaire moyen, fL	189	51,05	3,20	0,60	-0,11
Teneur corpusculaire moyenne en hémoglobine, pg	189	16,18	1,20	0,52	-0,11
Concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine, g/dL	189	31,67	0,84	0,18	-0,15
Nb globules rouges, Million cellules/µL	189	6,54	0,52	0,70	0,06
Globules blancs, 1000 cellules/µL	189	18,59	6,01	0,12	-0,83
Eosinophiles, 1000 cellules/µL	170	0,31	0,20	0,18	-0,79
Lymphocytes, 1000 cellules /µL	189	10,76	3,48	0,04	-0,82
Monocytes, 1000 cellules/µL	189	0,47	0,31	0,09	-0,18
Neutrophiles, 1000 cellules/µL	189	7,04	3,56	0,21	-0,54
Rapport neutrophiles / lymphocytes	189	0,70	0,38	0,38	0,04
Fin de contrôle					
Hématocrite, %	184	37,75	2,74	0,11	0,88
Hémoglobine, g/dL	184	12,46	0,94	0,11	0,88
Volume globulaire moyen, fL	184	51,98	4,22	0,27	-0,12
Teneur corpusculaire moyenne en hémoglobine, pg	184	17,16	1,42	0,08	-0,29
Concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine, g/dL	184	33,02	1,01	0,11	0,02
Nb globules rouges, Million cellules/µL	184	7,30	0,67	0,40	0,47
Globules blancs, 1000 cellules/µL	184	17,02	4,46	0,20	0,04
Eosinophiles, 1000 cellules/µL	183	0,38	0,24	0,44	-0,51
Lymphocytes, 1000 cellules/µL	184	10,73	3,48	0,29	0,45
Monocytes, 1000 cellules/µL	182	0,37	0,17	0,15	0,03
Neutrophiles, 1000 cellules/µL	180	5,53	1,86	0,22	-0,86
Rapport neutrophiles / lymphocytes	180	0,55	0,22	0,41	-0,82

Les caractères issus des formules sanguines avaient des héritabilités non nulles pour la majorité des critères mesurés en début et en fin de contrôle. Dans l'ensemble, les héritabilités des caractéristiques des globules rouges étaient supérieures en début de contrôle, alors que celles des globules blancs étaient supérieures en fin de contrôle. Les corrélations génétiques des dosages de globules blancs avec la CMJR étaient élevées et négatives en début de contrôle, alors que les valeurs étaient plus hétérogènes pour ces caractères en fin de contrôle. Les corrélations avec la quantité de neutrophiles et d'éosinophiles restaient négatives, alors qu'elle devenait positive pour les lymphocytes, conduisant à une corrélation génétique nulle avec la quantité globale de globules blancs en fin de test, alors qu'elle était très négative (-0,83) en début de test. A l'opposé, les corrélations entre CMJR et caractéristiques des globules rouges étaient plutôt faibles en début de contrôle, alors que certaines étaient élevées et positives en fin de test (hématocrite et quantité d'hémoglobine, 0,88 ; nombre de globules rouges, 0,47). Les héritabilités des différentiels de dosage entre début et fin de contrôle étaient modérées pour certains globules blancs (éosinophiles et neutrophiles, et le rapport neutrophiles/lymphocytes). Par ailleurs, seuls ces caractères montraient des estimations d'héritabilité du même ordre de grandeur aux deux moments, suggérant une bonne répétabilité de la mesure pendant le test, contrairement aux autres dosages. Dans la littérature, Jégou *et al.* (2016), avec des effectifs réduits de porcs Large White de lignées divergentes pour la CMJR et de poids intermédiaire, rapportaient plutôt des caractéristiques de globules rouges plus faibles chez des porcs de la lignée moins efficace, et pas de différence pour les globules blancs.

2.2. Différences entre lignées extrêmes

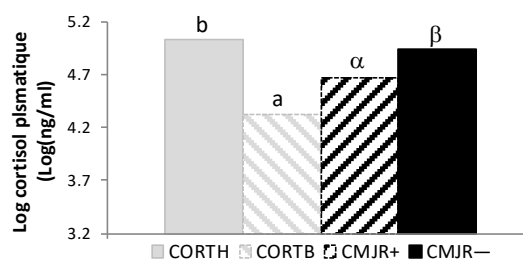


Figure 1 – Cortisol plasmatique mesuré 1 h après injection d'ACTH à 6 semaines d'âge, sur des lignées sélectionnées pour un haut (CORTH) et bas (CORTB) cortisol plasmatique 1 h après injection d'ACTH, et pour une consommation moyenne journalière résiduelle faible (CMJR-) ou élevée (CMJR+). N=192. D'après Gilbert *et al.* (2019).

Les lettres latines (lignées CORTISOL) et grecques (lignées CMJR) différentes indiquent des valeurs différentes ($P < 0,05$) entre les lignées.

La lignée sélectionnée pour une meilleure efficacité alimentaire (CMJR-) avait un cortisol plasmatique supérieur à la CMJR+ en réponse à l'injection d'ACTH (Figure 1), et les lignées sélectionnées pour leur niveau de cortisol plasmatique une heure après injection d'ACTH ne différaient pas significativement pour les caractères de production ($P > 0,05$), sauf pour la composition corporelle à l'abattage ($P < 0,002$ pour l'épaisseur de lard dorsal, la teneur en muscle des pièces et le rendement), avec des animaux à cortisol élevé plus maigres (Gilbert *et al.*, 2019).

Le dosage du cortisol plasmatique une heure après injection d'ACTH ne semble donc pas corrélé avec l'efficacité alimentaire des animaux et ne peut être utilisé pour compléter la sélection sur ces critères.

2.3. Réponses à la sélection

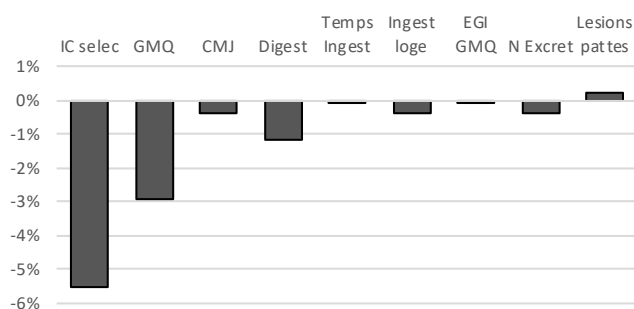


Figure 2 – Réponses à la sélection attendues sur l'indice de consommation (IC) pour une déviation de 1 écart type pour des caractères liés à l'efficacité alimentaire, en pourcentage du niveau d'IC initial. Digest=digestibilité de la matière sèche ; Ingest. = temps d'ingestion ; EGI=effets génétique indirects

Une sélection de caractères présentant les caractéristiques les plus attractives (paramètres génétiques, mais aussi facilité d'enregistrement) a été évaluée pour la réponse à la sélection attendue sur l'indice de consommation (Figure 2). Cela suggère que les caractères les plus intéressants seraient le GMQ et une mesure de digestibilité, qui permettent d'obtenir une déviation de plus de 1% de l'IC et, dans une moindre mesure, la quantité d'azote excrétée (ingéré - retenu) et le niveau d'ingestion par loge (quand il n'y a pas de DAC disponible, Ragab *et al.*, 2018).

La réponse favorable au GMQ est un levier de sélection indirecte qui a été largement utilisé pour améliorer l'efficacité alimentaire en l'absence de mesures individuelles de l'ingéré. Des poids économiques pour ces critères seront nécessaires pour tester différents index de sélection, afin de co-sélectionner de nouveaux caractères fonctionnels (lésions par exemple).

CONCLUSION

Les analyses menées dans les populations porcines du projet Feed-a-Gene ont permis d'identifier des caractères prometteurs pour l'amélioration de l'efficacité alimentaire. La dernière année du projet a permis d'évaluer plus précisément l'opportunité d'intégrer certains de ces caractères dans des index de sélection, soulignant notamment l'intérêt de la digestibilité et des mesures de groupe pour accélérer le progrès génétique. Ces analyses génétiques ont été réalisées sur des porcs alimentés à volonté, ignorant la restriction alimentaire comme levier d'amélioration de l'indice de consommation. Certains caractères, tels que les effets de groupe, prennent plus d'importance en situation de restriction, ce qui renforce leur intérêt pour la production dans ces conditions d'alimentation, mais la majorité des caractères reste à évaluer.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des participants aux études rapportées dans cet article. Le programme Feed-a-Gene a reçu le soutien de la Communauté Européenne au sein de l'action H2020 729 (agrément no 633531).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boumans I.J.M.M., de Boer I.J.M., Hofstede G.J., Bokkers E.A.M., 2018. Unravelling variation in feeding, social interaction and growth patterns among pigs using an agent-based model. *Physiol. Behav.*, 191, 100-115.
- Casal N., Manteca X., Escribano D., Cerón J.J., Fàbrega E., 2017. Effect of environmental enrichment and herbal compound supplementation on physiological stress indicators (chromogranin A, cortisol and tumour necrosis factor α) in growing pigs. *Animal* 11, 1228-1236.
- Déru V., Bouquet A., Labussière E., Ganier P., Blanchet B., Carillier-Jacquin C., Gilbert H., 2020. L'efficacité digestive est-elle un caractère intéressant pour améliorer l'efficacité alimentaire chez le porc ? Journées Rech. Porcine, sous presse.
- Ellen E.D., Rodenburg T.B., Albers G.A., Bolhuis J.E., Camerlink I., Duijvesteijn N., Knol E.F., Muir W.M., Peeters K., Reimert I., Sell-Kubiak E., 2014. The prospects of selection for social genetic effects to improve welfare and productivity in livestock. *Front. Genet.*, 5, 377.
- Fairbanks L.A., Jorgensen M.J., Bailey J.N., Breidenthal S.E., Grzywa R., Laudenslage M.L., 2011. Heritability and genetic correlation of hair cortisol in vervet monkeys in low and higher stress environments. *Psychoneuroendocrinology* 36, 1201-1208.
- Gilbert H., Al Aïn S., Bidanel J.P., Lagnat H., Billon Y., Guillouet P., Noblet J., Sellier P., 2009. Sélection divergente sur la consommation alimentaire résiduelle du porc en croissance : effets corrélatifs sur le comportement alimentaire. *Journées Rech. Porcine*, 41, 31-32.
- Gilbert H., Billon Y., Brossard L., Faure J., Gatellier P., Gondret F., Labussière E., Lebreton B., Lefaucheur L., Le Floc'h-Burban N., Louveau I., Merlot E., Meunier-Salaün M.C., Montagne L., Mormède P., Renaudeau D., Riquet J., Rogel-Gaillard C., Van Milgen J., Vincent A., Noblet J., 2017. Sélection pour la consommation alimentaire moyenne journalière résiduelle chez le porc : impacts sur les caractères et défis pour la filière. *INRA Prod. Anim.*, 30, 439-53.
- Gilbert H., Terenina E., Ruesche J., Gress L., Billon Y., Mormède P., Larzul C., 2019. Efficacité alimentaire et activité de l'axe corticotrope : comparaison des caractères de production dans des lignées divergentes soumises à un aliment fibreux. *Journées Rech. Porcine*, 51, 321-326.
- Gondret F., Skou Hedeman M., Messad F., Verhuren L., Wang J., de la Fuente G., Gilbert H., Jansman A., 2020. Identification de biomarqueurs de l'efficacité alimentaire. *Journées Rech. Porcine*, sous presse.
- Jégou M., Gondret F., Vincent A., Tréfeu C., Gilbert H., Louveau I., 2016. Whole blood transcriptomics is relevant to identify molecular changes in response to genetic selection for feed efficiency and nutritional status in the pig. *PLoS ONE*, 11, e0146550.
- Larzul C., Terenina E., Foury A., Billon Y., Louveau I., Merlot E., Mormède P., 2015. The cortisol response to ACTH in pigs, heritability and influence of corticosteroid-binding globulin. *Animal*, 9, 1929-1934.
- 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.
- 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 fed a fibrous diet. *Animal*, 7, 1259-1264.
- Puppe B., Langbein J., Bauer J., Hoy S., 2008. A comparative view on social hierarchy formation at different stages of pig production using sociometric measures. *Livest. Sci.*, 113, 155-162.
- Ragab M., Piles M., Quintanilla R., Sánchez J.P., 2018. Indirect genetic effect model using feeding behaviour traits to define the degree of interaction between mates: an implementation in pigs growth rate. *Animal*, 13, 231-239.