

Composition corporelle et caractéristiques métaboliques de porcs en croissance à efficacité alimentaire contrastée et nourris avec des régimes plus ou moins riches en fibres et en lipides

Florence GONDRET (1,2), Julie LALANDE-MARTIN (3), Isabelle LOUVEAU (1,2), Maëva JÉGOU (1,2), Illa TEA (3), Jaap VAN MILGEN (1,2), Hélène GILBERT (4)

(1) INRA, UMR1348 PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, 35000 Rennes, France

(3) CEISAM-Université de Nantes, Plate-forme Corsaire, 44300 Nantes, France

(4) INRA, UMR1388 GenPhySe, 31327 Castanet-Tolosan, France

florence.gondret@rennes.inra.fr

Avec la collaboration du personnel de l'élevage, du moulin et de l'abattoir (1,2),

de Nathalie BONHOMME, Sophie DARE, Yolande JAGUELIN, Agnès STARCK, Sandrine TACHER, Christine TREFEU et Annie VINCENT (1,2) et d'Yvon BILLON et Aurélie PRIET (INRA, UE1372 GenESI, Le Magneraud, 17700 Surgères, France)

Composition corporelle et caractéristiques métaboliques de porcs en croissance à efficacité alimentaire contrastée et nourris avec des régimes plus ou moins riches en fibres et en lipides

L'utilisation et la répartition de l'énergie alimentaire sont des éléments importants pour expliquer les variations d'efficacité productive des porcs en croissance. Dans cette étude, les réponses de 48 mâles castrés Large White issus de deux lignées divergentes sélectionnées pour la consommation journalière résiduelle ont été comparées en fonction de la source d'énergie dans l'aliment. Entre 10 et 20 semaines d'âge, les porcs ont été nourris (n = 12 par régime et par lignée) avec deux régimes différents (iso-énergie métabolisable et iso-protéiques), soit riche en céréales (LF) soit comprenant une proportion élevée de fibres alimentaires et d'huiles (HF). De manière similaire pour les deux lignées, la consommation journalière et la vitesse de croissance sont réduites avec le régime HF comparativement au régime LF. Le régime HF réduit l'adiposité corporelle et la teneur en lipides intramusculaires dans les deux lignées ; il augmente la teneur en lipides hépatiques seulement pour les porcs de la lignée la moins efficace. Pour les deux lignées, la triglycéridémie est plus élevée et la glycémie est réduite avec le régime HF comparativement au régime LF. Une analyse métabolomique révèle des concentrations plasmatiques en créatine, proline, histidine, lysine, tyrosine et phénylalanine de 10 à 25% inférieures avec le régime HF. Cette étude suggère une modification des métabolismes énergétiques et protéiques en réponse aux régimes, et une interaction avec la lignée dans la partition de l'énergie.

Body composition and metabolic traits of growing pigs with a contrasted feed efficiency and fed diets differing in fiber and lipid contents

The ways growing pigs use and partition dietary energy are key elements of their productive efficiency. In the present study, 48 Large White castrated males from two divergent lines selected for residual feed intake were compared for responses to dietary energy source. Between 10 and 20 weeks of age, pigs were fed (n = 12 by diet and by line) two different diets (same metabolizable energy level, same protein content) rich in cereals (LF) or rich in crude fiber sources and oil (HF). In the two lines, daily feed intake and average daily gain were lower when diet HF was fed. As compared with the LF diet, the HF diet also reduced body fatness and intramuscular fat content in both lines, but hepatic lipids were increased specifically in the less efficient line. Triglyceridemia was higher and plasma glucose concentration was lower when pigs were fed the HF diet compared to the LF diet. Metabolomics revealed lower plasma concentrations (-10 to -25%) in creatine, proline, histidine, lysine, tyrosine and phenylalanine in pigs fed the HF diet than in those fed the LF diet. These results suggest that both energy and protein metabolisms are affected by dietary energy sources and that the partition of dietary energy among tissues is dependent on genetics.

INTRODUCTION

Les tensions mondiales sur le marché des céréales justifient la recherche de formules alimentaires permettant leur substitution partielle par d'autres matières premières, et d'animaux susceptibles de les valoriser efficacement. La possibilité d'améliorer l'efficacité alimentaire a été récemment revisitée par la sélection expérimentale de porcs sur leur consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR). Celle-ci est calculée comme la différence entre la consommation réelle d'aliment d'un animal et sa consommation théorique définie par rapport aux besoins de production et d'entretien d'une population de référence (Gilbert *et al.*, 2007). Les conséquences d'une telle sélection sur les performances de croissance et la qualité de la viande ont été établies pour des porcs nourris avec des régimes riches en céréales (Le Naou *et al.*, 2012 ; Faure *et al.*, 2013 ; Gilbert et Dekkers, 2013). Comparativement aux porcs à CMJR élevée, les porcs sélectionnés pour une faible CMJR (les plus efficaces) se caractériseraient aussi par une dégradation moindre de leur performances de croissance, lorsqu'ils sont nourris pendant 3 semaines avec un régime peu concentré riche en fibres et peu digestible (Montagne *et al.*, 2014). A plus long-terme, il est difficile de conclure quant à l'existence d'une réelle interaction entre lignées et régime fibreux quant aux performances (Hauptli *et al.*, 2013). Dans la mesure où la teneur en énergie de l'aliment affecte l'efficacité alimentaire (Lawrence *et al.*, 1994), l'addition d'huiles dans un régime fibreux peut être une solution pour compenser la diminution de la concentration en énergie métabolisable (EM) induite par la présence de fibres peu digestibles. Cela constitue surtout un modèle expérimental pertinent pour mieux comprendre l'utilisation et la répartition de l'énergie, et en particulier, la flexibilité des métabolismes sous-jacents et leurs relations avec la composition des tissus ou l'efficacité alimentaire. En effet, après digestion, l'amidon dérivé des céréales et les glucides complexes contenus dans les fibres végétales sont oxydés dans les cellules pour produire l'ATP, la part de glucose en excès par rapport aux besoins en énergie étant stockée (plus ou moins temporairement) sous forme de glycogène dans les muscles et de lipides synthétisés *de novo* dans les tissus adipeux. Les lipides alimentaires sont oxydés avec une efficacité similaire ou légèrement inférieure au glucose, mais ils sont déposés dans les tissus avec une efficacité bien supérieure à celle du glucose (Patience, 2012).

Cette étude a pour objectifs de comparer les performances de croissance, la composition tissulaire et les caractéristiques métaboliques de porcs sélectionnés de manière divergente pour la CMJR, lorsqu'ils sont nourris pendant 10 semaines avec des régimes iso-protéiques et iso-énergétiques (en EM), mais contrastés quant à la source d'énergie alimentaire (glucides amyliques ou lipides).

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

Quarante-huit mâles castrés Large White de deux lignées divergentes pour la CMJR (génération 8) ont été élevés après le sevrage à l'INRA de Saint Gilles (UMR PEGASE) en deux répétitions décalées de 3 semaines. Au début de la période d'engraissement ($74 \pm 0,3$ jours), les porcs des lignées basse (CMJR⁻) et haute (CMJR⁺) sont placés en cases individuelles

(caillebotis intégral), et répartis (deux plein-frères de poids similaire) entre les régimes expérimentaux LF ou HF (n = 12 par lignée et par régime). Les régimes expérimentaux sont distribués à volonté après une période d'acclimatation de 6 jours. Le régime LF est formulé principalement à base de blé (36%), d'orge (36%) et de tourteau de soja (20%). Le régime HF se caractérise par des quantités importantes de paille broyée (11,5%) incorporées en substitution partielle des céréales, et d'huiles (colza et soja, 7,5%). Les régimes LF et HF sont formulés pour apporter une même quantité de protéines et d'EM (Tableau 1). Pour chacun d'entre eux, la formule croissance a été distribuée aux animaux pendant les 7 premières semaines, puis la formule finition a été distribuée jusqu'à l'abattage des porcs à l'âge de $132,5 \pm 0,5$ jours. Les teneurs en acides aminés permettaient de couvrir les besoins théoriques des porcs (Met > 30% ; Met+Cys > 60% ; Thr > 65% ; Trp > 22% ; Val > 70% et Ile > 60% ; tous exprimés par rapport à la lysine digestible).

Les porcs ont été pesés à l'entrée en expérimentation, puis toutes les 2 semaines pendant toute la période expérimentale, et le matin de l'abattage. Les quantités d'aliments distribuées et les refus éventuels ont été pesés chaque semaine. L'épaisseur de lard dorsal (site P2) a été mesurée *in vivo* pour chaque porc, à l'entrée en engraissement puis après 4 et 7 semaines d'alimentation expérimentale, grâce à un échographe.

Tableau 1 – Caractéristiques nutritionnelles des régimes.

Formules Régimes	Croissance		Finition	
	LF	HF	LF	HF
Matière sèche, %	87,4	88,0	86,9	87,2
Composition chimique, %				
Matières organiques	82,4	82,6	82,6	82,6
Matières azotées totales	17,4	17,3	13,4	13,4
Matières grasses	2,1	7,0	2,2	7,4
Amidon	42,6	30,8	48,5	36,2
Cellulose brute	1,0	2,2	0,9	2,2
NDF	12,8	17,7	11,5	18,3
ADF	3,8	8,5	3,5	7,9
Valeurs nutritionnelles, %¹				
Energie métabolisable, MJ/kg	12,9	12,9	12,9	12,9
Energie nette, MJ/kg	9,6	9,8	9,9	10,0
Lysine digestible, g/kg	0,95	0,95	0,70	0,70

¹ Calculées à partir des valeurs nutritionnelles théoriques des matières premières.

1.2. Abattage et prélèvements

Les porcs ont été abattus à l'abattoir expérimental de Saint-Gilles (UMR PEGASE) 2 heures après le dernier repas. L'abattage a donc été effectué sans mise à jeun préalable, pour refléter un état physiologique postprandial des animaux. Des échantillons de sang ont été prélevés lors de la saignée, placés sur EDTA ou sur héparine, et les plasmas ont été immédiatement préparés par centrifugation. Un échantillon de tissu adipeux sous-cutané dorsal (TASC, bardière au niveau de la dernière côte) a été prélevé avant échaudage. Après échaudage et fente de la carcasse, des échantillons de foie et de muscle long dorsal (LD ; dernière côte) ont été prélevés et conditionnés. Le tube digestif a été pesé plein puis vide. L'épaisseur de lard dorsal (site G2) a été mesurée sur la

carcasse grâce à un capteur gras-maigre. La carcasse a été pesée. Après 36 heures de ressuyage à +4°C, la carcasse a été pesée, et les pièces principales (bardière, jambon, épaule, poitrine et longe) ont été isolées de la carcasse puis pesées.

1.3. Analyses de laboratoire

Les teneurs en matière sèche, matières azotées (NF V18-100) et énergie brute (ISO 9831) ont été mesurées pour chaque régime et chaque formule. Les lipides des aliments et des tissus ont été extraits à partir des échantillons en utilisant le pouvoir solvant du CO₂ à l'état supercritique (Leco TFE2000; St-Joseph, MI, USA), puis ils ont été quantifiés (en triplicats) relativement au poids de tissu ou d'aliment sec puis frais. Les activités d'enzymes clés pour la lipogénèse ont été mesurées dans le TASC (en duplicats) par spectrophotométrie. Les métabolites sanguins ont été mesurés en duplicats à l'aide de kits (BioMérieux, Craponne, France) et d'un analyseur automatique (Konelab 20i, Thermo Fisher, Courtaboeuf, France). En outre, une analyse métabolomique a été réalisée par spectroscopie RMN à l'aide d'un spectromètre Bruker Avance 500 équipé d'une cryo-sonde (plateforme CEISAM, Nantes, France). Les spectres RMN-¹H 1D ont été acquis sur le plasma des 48 porcs. L'attribution des signaux sur les spectres a été réalisée en fonction des données actuelles de la littérature.

1.4. Analyses statistiques

Toutes les données sont analysées par ANOVA (procédure GLM de SAS, Inst. Inc. Cary, NC) en considérant les effets de la lignée (L), du régime (R), de l'interaction LxR, et de la répétition. Les interactions entre la répétition d'une part et la lignée ou le régime d'autre part ne sont pas significatives et ne sont pas retenues dans le modèle final. Les données sont également analysées en considérant le poids vif ou la consommation moyenne journalière (CMJ) en covariable, afin de discuter certains effets. Pour les données métabolomiques, les spectres RMN-¹H sont soumis à une analyse uni-variée (test de Welch, diagramme en boîtes) puis à des analyses multi-variées. Outre l'ANOVA, une analyse discriminante par régression des moindres carrés partiels (PLS-DA en anglais) a été utilisée. Cette analyse prend en compte la connaissance préalable des groupes étudiés afin d'en optimiser la séparation (effet intra-groupe minimisé). Elle permet ainsi de mettre en évidence les métabolites les plus discriminants.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Performances de croissance et composition corporelle

Comme attendu, l'indice de consommation (IC) en engraissement est réduit (-0,27 kg/kg ; $P < 0,001$) dans la lignée CMJR⁻ comparativement à la lignée CMJR⁺. Ceci est lié à un GMQ plus élevé (+11% ; $P < 0,001$) dans la lignée à faible CMJR, pour un ingéré alimentaire quotidien globalement similaire aux porcs CMJR⁺ (Tableau 2). Corrigée par le poids initial et le poids final, la vitesse de croissance en engraissement n'est pas différente ($P = 0,16$) entre lignées (838 g/j en moyenne), conformément à l'attendu (Gilbert et Dekkers, 2013). L'absence de différence de CMJ entre lignées est surprenante, car les données disponibles sur les générations de sélection précédentes montraient une consommation quotidienne inférieure pour les porcs à faible CMJR (Gilbert et Dekkers, 2013). Ceci pourrait être lié à la

comparaison des porcs à un même âge mais à des poids vifs différents dans notre étude. On calcule en effet une légère différence de CMJ entre lignées (-56 g/j pour les porcs à faible CMJR ; $P = 0,10$) lorsque les données de consommation sont corrigées par le poids à l'abattage. Enfin, le rendement en carcasse des porcs CMJR⁻ est supérieur de 2 % à celui des porcs CMJR⁺ ($P = 0,001$), notamment du fait d'un plus faible contenu digestif (-9,3% ; $P = 0,03$) pour la lignée CMJR⁻.

Tableau 2 – Performances de croissance et composition de carcasse.

Lignées Régimes	CMJR ⁺		CMJR ⁻		ETR	Stat. ¹
	LF	HF	LF	HF		
n	12	12	12	12		
Performances						
Poids vif, kg						
Initial	27,1	26,6	26,5	25,7	4,3	
Final	77,6	69,0	82,7	72,9	5,5	L ^{**} R ^{***}
Age final, j	132	131	134	133	4	
GMQ, g/j	860	731	956	809	73	L ^{***} R ^{***}
CMJ, kg/j	2,41	2,12	2,45	2,13	0,17	R ^{***}
IC	2,78	2,94	2,56	2,63	0,20	L ^{***}
Epaisseur lard dorsal, mm						
Initial	4,9	4,9	5,3	4,9	0,9	
+4 semaines	7,1	6,4	7,3	6,2	1,0	R ^{**}
+7 semaines	9,4	7,9	9,3	8,1	1,3	R ^{***}
Final	16,1	12,2	15,5	11,7	2,5	R ^{***}
Digesta, kg	6,0	7,0	5,5	6,2	0,9	L [*] R ^{***}
Rendement carcasse, %	74,4	72,7	76,4	74,1	1,7	L ^{***} R ^{***}
Composition, % du poids de carcasse froide						
Bardière	8,5	6,2	8,0	5,7	1,0	L ^t R ^{***}
Jambon	22,2	23,3	22,4	23,5	0,7	R ^{***}
Epaule	24,5	25,8	25,6	25,7	2,0	
Poitrine	14,4	12,6	12,4	12,3	2,1	L ^t R ^{***}
Longe	27,1	28,5	28,4	29,1	0,7	L ^{***} R ^{***}

¹ANOVA pour les effets de la lignée (L) et du régime (R). Il n'y a pas d'interaction significative LxR. ^t 0,05 < $P \leq 0,10$; * $P \leq 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

De manière similaire dans les deux lignées, la vitesse de croissance est réduite avec le régime HF (-15% ; $P < 0,001$), notamment en raison d'une CMJ inférieure pour le régime HF (-12% ; $P < 0,001$) comparativement au régime LF. En conséquence, le poids à l'abattage est plus faible pour les porcs du lot HF. Leur rendement en carcasse est détérioré, du fait d'un contenu digestif plus lourd (+15% en moyenne ; $P = 0,005$) comparativement au régime LF. Chez le porc, la consommation d'un régime très riche en lipides et hyper-énergétique conduit à une augmentation du gain de poids et une meilleure efficacité alimentaire comparativement à un régime pauvre en lipides (Yan *et al.*, 2013), tandis qu'un régime fibreux réduit ou non les performances de croissance (De Lange *et al.*, 2006 ; Yan *et al.*, 2013) et détériore le rendement en carcasse (Millet *et al.*, 2012). Dans notre étude, la combinaison de la présence de fibres peu digestibles (paille de blé) et d'huiles végétales dans le régime HF ne permet donc pas de maintenir les performances. C'est sans doute la conséquence de la réduction majeure de la consommation

induite par le taux important d'incorporation de fibres grossièrement broyées (Kyriazakis et Emmans, 1995) dans le régime HF. En effet, même si la concentration énergétique du régime est importante à considérer, le déterminant principal des performances de croissance chez le porc est l'ingéré d'énergie. Il n'y a aucune interaction ($P > 0,10$) entre la lignée et le régime pour les performances de croissance et la composition corporelle. Il n'y a donc pas de différences d'adaptation des porcs aux régimes fibreux et à haute teneur en lipides quel que soit leur niveau génétique de CMJR. Ceci est contraire à l'observation d'une meilleure réponse des porcs à faible CMJR, faite après une période courte d'alimentation (3 semaines) avec un régime riche en fibres mais avec une teneur plus faible en énergie nette que le régime standard (Montagne *et al.*, 2014).

A l'abattage à 132 jours d'âge, le poids relatif de longe est supérieur pour la lignée CMJR⁻ (Tableau 2) et la proportion de bardière tend ($P = 0,10$) à être réduite comparativement à la lignée CMJR⁺. Des différences d'adiposité plus marquées avaient été rapportées entre lignées comparées au poids vif de 115 kg. Cependant, Faure *et al.* (2013) rapportent que cet engraissement plus important des carcasses n'est constaté chez les animaux à CMJR élevée qu'à partir de 19 semaines d'âge. La différence de proportion de bardière entre lignées est d'ailleurs significative ($P = 0,04$) quand les données de composition corporelle sont ajustées pour une même CMJ.

De manière similaire dans les deux lignées, le régime HF augmente la proportion de longe et réduit la proportion de bardière dans la carcasse ($P < 0,001$) comparativement au régime LF. Les différences d'épaisseur de lard dorsal sont induites ($P < 0,01$) par le régime HF dès 4 semaines après le début de l'alimentation expérimentale. La diminution du gras corporel chez des porcs en croissance nourris avec des régimes fibreux a été précédemment constatée (Yan *et al.*, 2013). Dans notre étude, la différence de composition de carcasse entre régimes reste significative même quand les données sont corrigées par la CMJ ou par le poids d'abattage.

2.2. Teneurs en lipides et activités enzymatiques tissulaires

Les teneurs en lipides tissulaires sont modifiées par le régime reçu en engraissement mais la réponse au régime dépend du tissu considéré et de la lignée génétique (Tableau 3).

Dans la bardière et le muscle LD, la teneur en lipides est réduite pour les porcs alimentés avec le régime HF comparativement au régime LF, ceci pour les deux lignées. Dans la bardière, cette réduction est associée à une diminution des activités d'enzymes clés de la lipogenèse, processus permettant la synthèse *de novo* de lipides à partir du glucose. Cette observation est cohérente avec la composition du régime HF, qui est moins riche en amidon que le régime LF. Les régimes riches en lipides (et notamment en acides gras polyinsaturés) sont également connus pour inhiber la lipogenèse adipocytaire du porc (Benmansour *et al.*, 1991). A l'inverse, la teneur en lipides hépatiques est supérieure (+18% ; $P = 0,008$) pour les porcs CMJR⁺ nourris avec le régime HF comparativement au régime LF, alors qu'il n'y a pas de différence entre régimes pour la lignée CMJR⁻.

La réduction de teneur en lipides observée dans les tissus périphériques (bardière et muscle) en réponse au régime HF suggère une séquestration des lipides alimentaires après digestion ou une réorientation de l'utilisation de l'énergie métabolisable dérivée de ces lipides vers d'autres organes comme les viscères (foie et compartiments digestifs).

Tableau 3 – Teneurs en lipides et activités lipogéniques tissulaires.

Lignées Régimes	CMJR ⁺		CMJR ⁻		ETR	Stat. ¹
	LF	HF	LF	HF		
Teneurs en lipides, %						
Bardière	79,2	74,9	78,1	74,2	4,1	R ^{**}
Muscle LD	2,5	2,0	2,2	1,8	0,7	R [*]
Foie	2,7	3,2	2,9	3,0	0,3	R ^{**} LxR [*]
Lipogenèse²						
FASN	91	64	85	56	21	R ^{***}
ME1	1771	854	1571	833	268	R ^{***}

¹ANOVA pour les effets de la lignée (L), du régime (R), et de l'interaction entre la lignée et le régime (LxR). ²0,05 < P ≤ 0,10 ; *P ≤ 0,05 ; **P < 0,01 ; ***P < 0,001.

²Activités spécifiques (nmole/min/mg de protéines) de la synthèse des acides gras (FASN) et de l'enzyme malique (ME1) dans la bardière.

Ceci pourrait être nécessaire au transit des digesta, qui présentent un poids nettement plus élevé pour le régime HF que pour le régime LF. La biomasse microbienne est également vraisemblablement accrue en réponse à la présence de fibres dans les régimes (Anugwa *et al.*, 2007) telle que pour les porcs des lots HF. L'augmentation de la teneur en lipides hépatiques se produit d'ailleurs surtout chez les porcs CMJR⁺, dont les besoins d'entretien sont les plus élevés (Gilbert et Dekkers, 2013). Cependant, De Lange *et al.* (2006) ne constatent aucune conséquence de l'inclusion de paille dans le régime sur les composantes de la production de chaleur des porcs, mais cette mesure a été réalisée après 17 jours d'alimentation expérimentale. Notre hypothèse d'une réorientation de l'énergie alimentaire pour satisfaire des besoins d'entretien et de digestion plus élevés avec le régime HF pour les porcs CMJR⁺ demande à être confirmée.

2.3. Métabolites sanguins

A 132 jours d'âge, les porcs de la lignée CMJR⁻ présentent des concentrations plasmatiques plus élevées en phospholipides et en cholestérol comparativement à la lignée CMJR⁺. Des données complémentaires (non présentées) obtenues au moment du transfert en engraissement (avant alimentation expérimentale) montrent des différences similaires entre lignées pour ces deux paramètres. Cela suggère des différences génétiques dans la composition en lipides sanguins.

Quelle que soit la lignée, les concentrations en phospholipides et cholestérol ne varient pas selon le régime, mais les porcs du lot HF ont des concentrations plasmatiques en triglycérides plus élevées (Tableau 4) que ceux du lot LF. Les différences de triglycéridémie entre régimes pourraient être la conséquence à la fois de la teneur en lipides plus élevée du régime HF, mais aussi d'un effet propre des fibres sur l'augmentation des concentrations en triglycérides sanguins (Ziemer *et al.*, 2012). Les acides gras libres (AGL) sont également présents en plus forte concentration dans le plasma des porcs du lot HF, mais seulement pour la lignée CMJR⁺. L'augmentation de la concentration en AGL plasmatiques en réponse à l'ingestion d'un régime fibreux a été aussi rapportée chez la truie gestante comparativement à un régime riche en amidon à même teneur en énergie nette (Yde *et al.*, 2011). Ces AGL circulants pourraient provenir de l'hydrolyse des lipides alimentaires et/ou d'un catabolisme des lipides de la bardière.

Tableau 4 – Paramètres plasmatiques.

Lignées Régimes	CMJR ⁺		CMJR ⁻		ETR	Stat. ¹
	LF	HF	LF	HF		
Triglycérides, mg/L	335	640	398	658	231	R ^{***}
Phospholipides, mg/L	910	870	1070	1080	140	L ^{***}
Cholestérol, mg/L	810	789	998	980	126	L ^{***}
AGL ² , mg/L	10	25	13	19	7	R ^{**} LxR ⁺
Glucose, g/L	1,6	1,3	1,5	1,4	0,4	R ^t
Urée, mg/L	263	191	290	187	68	R ^{***}

¹ANOVA pour les effets de la lignée (L), du régime (R), et de l'interaction entre la lignée et le régime (LxR). ^t0,05 < P ≤ 0,10; * P ≤ 0,05; *** P < 0,001.

²AGL : acides gras libres.

Au final, la diminution de teneur en lipides dans la bardière constatée après distribution du régime HF résulterait donc à la fois d'une lipogenèse tissulaire réduite, d'une redistribution des flux sanguins de triglycérides, voire d'un turn-over plus rapide des lipides relativement au régime LF.

Les porcs du lot HF tendent à présenter une concentration en glucose plus faible que ceux du lot LF, notamment pour la lignée CMJR⁺ (Tableau 4). La différence de glycémie entre régimes est accentuée quand les données sont corrigées des différences de poids vif à l'abattage (1,26 mg/L avec le régime HF contre 1,63 mg/L avec le régime LF ; P = 0,02). La plus faible concentration en glucose plasmatique 2 h après consommation du régime HF pourrait être liée à un ralentissement de la vitesse d'absorption du glucose, tel que constaté chez la truie entre 0 et 4 h après ingestion d'un régime riche en fibres (Serena *et al.*, 2009), sans variation de la glycémie basale. Enfin, la teneur en urée (composant azoté qui provient de la dégradation des acides aminés) est réduite dans le plasma des porcs du lot HF, témoignant probablement d'un moindre catabolisme protéique avec ce régime HF relativement au régime LF.

Les quatre groupes expérimentaux ne sont pas discriminés par leur profil métabolique sanguin global. De même, les deux lignées ne peuvent être discriminées par leur profil métabolique global, même si les porcs de la lignée CMJR⁻ présentent des concentrations plasmatiques plus élevées (de 10% en moyenne) en lipoprotéines de faible densité (LDL), comparativement aux porcs de la lignée CMJR⁺. Les LDL étant les formes majoritaires du transport du cholestérol dans le sang, cette variation est cohérente avec les différences de cholestérolémie sanguine précédemment mentionnées entre lignées. A l'inverse, la PLS-DA réalisée sur les deux régimes montre une discrimination significative des individus (Figure 1). Les variations entre régimes HF et LF concernent notamment la concentration en glucose (donnée non présentée) mais aussi la concentration plasmatique en VLDL, supérieure avec le régime HF (Figure 2). Ces lipoprotéines de très basse densité sont les formes privilégiées du transport des triglycérides de leur lieu de synthèse (le foie) vers les autres tissus. Leur variation est donc cohérente avec la mesure d'une triglycéridémie supérieure en régime HF. L'analyse métabolomique indique aussi que les concentrations en créatine (-23% ; Figure 2) et créatinine (-11%) sont réduites (P < 0,001) avec le régime HF.

La créatine plasmatique a été suggérée comme un bon indicateur du niveau d'échange entre l'utilisation du glucose et son stockage sous forme de glycogène en réponse aux niveaux croissants d'incorporation de fibres dans le régime chez le porc (Yde *et al.*, 2011). Cette donnée suggère donc l'existence de différences de concentration en glycogène dans les tissus des porcs selon le régime reçu.

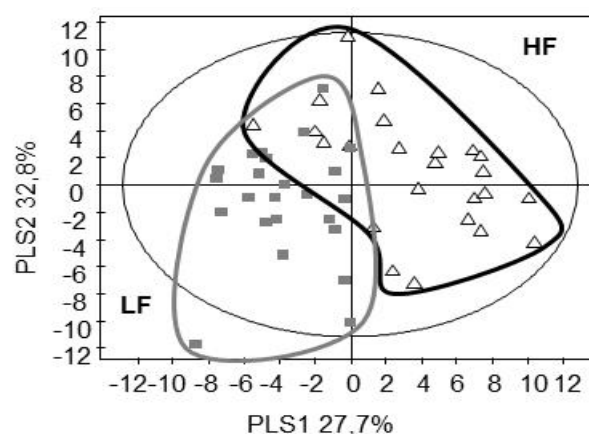


Figure 1 – Représentation de la répartition des individus en fonction du régime reçu en engraissement (score-plot de l'analyse PLS-DA réalisée sur les 48 échantillons plasmatiques des porcs selon le régime).

LF : régime riche en amidon; HF : régime riche en lipides et en fibres

Enfin, les variations des concentrations en proline, histidine, lysine, tyrosine et phénylalanine sont particulièrement discriminantes entre régimes, avec des valeurs de 10 à 15% inférieures (P < 0,04) dans le plasma des porcs du lot HF comparativement à ceux du régime LF (Figure 2). Les variations entre régimes pour les concentrations plasmatiques en créatine, créatinine, proline et tyrosine sont conservées lorsque les données sont corrigées par la CMJ. L'ensemble de ces résultats suggère une interconnexion entre le métabolisme lipidique (cible de la stratégie expérimentale) et le métabolisme protéique.

CONCLUSION

L'addition de matières grasses dans un régime contenant une quantité importante de fibres peu digestibles (paille broyée) ne permet pas d'éviter la baisse de performances due aux fibres. Une surcompensation en lipides, et donc en énergie, pourrait être nécessaire pour permettre le maintien des performances lorsque la proportion de fibres grossièrement broyées dans les régimes est importante. Les porcs sélectionnés pour une faible CMJR présentent des performances supérieures aux porcs à CMJR élevée même avec un régime fibreux. Il existe aussi une interaction avec la lignée génétique dans la répartition de l'énergie alimentaire. Enfin, notre étude suggère une modification des métabolismes énergétique mais aussi protéique en réponse aux régimes contrastés quant à la source d'énergie alimentaire. Les mécanismes à l'origine des variations de la composition corporelle et du stockage de lipides dans les tissus devront être déterminés plus finement à l'aide des outils de la génomique fonctionnelle.

Cette étude a reçu le soutien financier de l'ANR dans le cadre du programme de recherches FatInteger (ANR-11-BSV57-004 01).

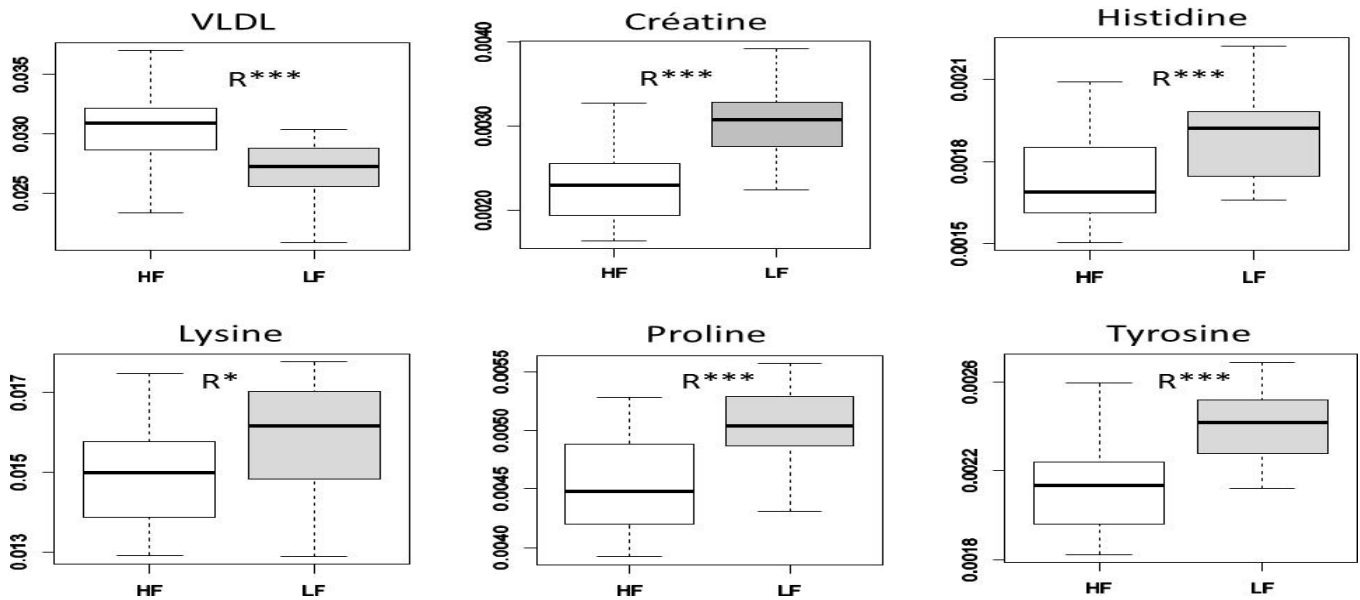


Figure 2- Concentrations plasmatiques des lipoprotéines de très basse densité (VLDL), de la créatine et de quatre acides aminés en fonction des régimes (diagrammes en boîtes issus de l'analyse métabolomique sur plasmas).

LF : régime riche en amidon; HF : régime riche en lipides et en fibres, * P < 0,05 ; *** P < 0,001

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anugwa F.O., Varel V.H., Dickson J.S., Pond W.G., Krook L.P., 1989. Effects of dietary fiber and protein concentration on growth, feed efficiency, visceral organ weights and large intestine microbial populations of swine. *J. Nutr.*, 119, 879-886.
- Benmansour N.M., Demarne Y., Lecourtier M.J., Lhuillery C., 1991. Effects of dietary fat and adipose tissue location on insulin action in young boar adipocytes. *Int. J. Biochem.*, 23, 499-506.
- De Lange C., van Milgen J., Dubois S., Noblet J., 2006. Energy cost of ingesting and excreting indigestible material in growing pigs is minimal. *Anim. Res.*, 55, 551-562.
- Faure J., Lefaucheur L., Bonhomme N., Ecolan P., Meteau K., Coustard S.M., 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.
- Gilbert H., Dekkers J., 2013. Improvement of feed efficiency: lessons from residual feed intake studies in pigs. In: 64th Annual meeting EAAP, Nantes 2013. Session 53. p 589. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.
- 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.
- Hauptli L., Priet A., Gilbert H., Montagne L., 2013. Response to a high level fibers diet in pigs divergently selected for residual feed intake. In: 64th Annual meeting EAAP, Nantes 2013. Session 53. p 589. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, NLD.
- Kyriazakis I., Emmans G.C., 1995. The voluntary feed intake of pigs given feeds based on wheat bran, dried citrus pulp and grass meal, in relation to measurements of feed bulk. *Br. J. Nutr.*, 73, 191-207.
- Lawrence B.V., Adeola O., Cline T.R., 1994. Nitrogen utilization and lean growth performance of 20- to 50-kilogram pigs fed diets balanced for lysine:energy ratio. *J. Anim. Sci.*, 72, 2887-2895.
- 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.
- Millet S., Kumar S., De Boever J., Meyns T., Aluwé M., De Brabander D., Ducatelle R., 2012. Effect of particle size distribution and dietary crude fibre content on growth performance and gastric mucosa integrity of growing-finishing pigs. *Vet. J.*, 192, 316-21.
- 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 on residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, accepté pour publication.
- Patience J.F., 2012. The influence of dietary energy on feed efficiency in grow-finish swine. In: Patience J.F. (Ed), Feed efficiency in swine p 111-129. Wageningen Academic Publishers.
- Serena A., Jorgensen H., Bach Knudsen K.E., 2009. Absorption of carbohydrate-derived nutrients in sows as influenced by types and contents of dietary fiber. *J. Anim. Sci.*, 87, 136-147.
- Yan H., Potu R., Lu H., Vezzoni de Almeida V., Stewart T., Ragland D., Armstrong A., Adeola O., Nakatsu C.H., Ajuwon K.M., 2013. Dietary fat content and fiber type modulate hind gut microbial community and metabolic markers in the pig. *PLoS One*, 8, e59581.
- Yde C.C., Bertram H.C., Theil P.K., Knudsen K.E., 2011. Effects of high dietary fibre diets formulated from by-products from vegetable and agricultural industries on plasma metabolites in gestating sows. *Arch. Anim. Nutr.*, 65, 460-476.
- Ziemer C.J., Kerr B.J., Weber T.E., Arcidiacono S., Morrison M., Ragauskas A., 2011. Effects of feeding fiber-fermenting bacteria to pigs on nutrient digestion, fecal output, and plasma energy metabolism. *J. Anim. Sci.*, 90, 4020-4027.