Adiposité et amélioration génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits

Sandrine Schwob, Bénédicte Lebret, Isabelle Louveau

▶ **To cite this version:**

Sandrine Schwob, Bénédicte Lebret, Isabelle Louveau. Adiposité et amélioration génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits. 51. Journées de la Recherche Porcine, Feb 2019, Paris, France. hal-02735686

HAL Id: hal-02735686
https://hal.inrae.fr/hal-02735686

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2019. Journées Recherche Porcine, 51, 327-338.

Adiposité et amélioration génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits

Sandrine SCHWOB (1), Bénédicte LEBRET (2), Isabelle LOUVEAU (2)

(1) IFIP - Institut du Porc, BP 35104, 35651 Le Rheu Cedex, France
(2) PEGASE, INRA, Agrocampus Ouest, 35590 Saint Gilles, France

sandrine.schwob@ifip.asso.fr

Adiposité et amélioration génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits

L'adiposité des carcasses de porcs abattus en France s'est réduite en moyenne de 45% entre 1977 et 2016. Ce constat est le résultat de 40 années de production d'animaux de plus en plus maigres, initiée dans les années 1950-1960 par la mise en place des grilles de classement commercial des carcasses et de paiement différencié en fonction de leur teneur en tissus maigres, au détriment des tissus gras. Cette évolution a conduit à une standardisation de la production, entraînant des difficultés pour répondre à la demande de certains segments de marché. Toutefois, une nouvelle évolution s'opère depuis quelques années au sein de la filière porcine française, se traduisant par un regain d'intérêt pour le gras et la volonté de s'orienter vers une plus grande diversification des carcasses produites et commercialisées. En effet, les tissus adipeux présentent de nombreux atouts, tant pour la transformation en produits de charcuterie et salaison (gras de couverture), que pour les qualités sensorielles et nutritionnelles des produits (lipides intramusculaires).

Cette synthèse fait le point sur les évolutions de l'amélioration génétique du porc en France en lien avec l'adiposité et la qualité des produits. Après un rappel sur l'intérêt des tissus adipeux pour les qualités des viandes et sur les caractéristiques de ces tissus, les facteurs de variation de l'adiposité et les caractères de quantité de gras pris en compte dans les programmes d'amélioration génétique (méthodes de mesure, paramètres génétiques) sont présentés. Un état des lieux de la variabilité génétique qui demeure au sein des populations porcines françaises (races sélectionnées et races locales) en termes de quantité et de répartition des tissus adipeux est dressé. Ce bilan est nécessaire pour définir les futures stratégies de sélection, afin de mieux répondre aux diverses attentes des industriels et des consommateurs.

Adiposity and genetic improvement in pigs: literature review and new challenges for meat product quality

The adiposity of carcasses of pigs slaughtered in France decreased by 45% on average from 1977 to 2016. This is the result of 40 years of production of increasingly lean animals, initiated from 1950-1960 by setting up commercial grading scales for carcasses and differentiated payment according to lean tissue content, to the detriment of fatty tissues. This evolution led to standardization of production, leading to difficulties in meeting the demand of certain market segments. However, changes have occurred in recent years within the French pork industry, resulting in a renewed interest in fat and the desire to move towards greater diversification of produced and marketed carcasses. Indeed, adipose tissues have many advantages, both for the processing of cured meat products and delicatessen products (fat cover), as well as for sensory and nutritional qualities of products (intramuscular lipids).

This review provides an update on pig genetic improvement in France in relation to adiposity and product quality. After a reminder of the importance of adipose tissues for meat quality and the characteristics of these tissues, factors of variation of adiposity and traits related to the amount of fat considered in breeding programs (measurement methods, genetic parameters) are presented. An inventory of the genetic variability that remains within French pig populations (selected breeds and local breeds) in terms of quantity and distribution of adipose tissues is drawn up. This assessment is necessary to define future selection strategies in order to better meet the various expectations of the pork industry and consumers.

INTRODUCTION

Le porc est l'une des viandes les plus consommées à l'échelle mondiale, en particulier en Asie et en Europe, ainsi qu'en France avec 33 kg équivalent carcasse/habitant en 2017, soit 38% de la consommation de viande (IFIP, 2017). En France, le porc est consommé majoritairement sous forme de produits transformés, la viande fraîche représentant un quart de la consommation (IFIP, 2017). Les principaux produits sont : les saucisses et saucissons (31%, dont 1/3 de saucisson sec), le jambon et les viandes cuites (30%), les viandes salées, séchées, fumées (15%), les pâtés et rillettes (10%) et les produits traiteur (14%) (IFIP, 2017). Cette diversité de produits est associée à une diversité de recettes, marques ou « signatures » collectives ou privées, et de productions sous signes officiels de qualité et d'origine (Label Rouge, AOP/AOC, IGP, production biologique) (Dourmad *et al.*, 2018).

Le niveau de consommation individuelle de viande, dont la viande de porc, diminue en France depuis 2000, même si le volume total reste stable compte tenu de l'évolution de la population. Cette diminution de consommation de porc touche la viande fraîche et, dans une moindre mesure, les produits de charcuterie (FranceAgriMer, 2018). Toutefois, les productions de porc et produits sous signe officiel de qualité augmentent, tirés par un marché en croissance, même si elles ne représentent qu'une faible part de la production totale (Label Rouge : 3,9%, porcs biologiques : 0,4% ; IFIP, 2017). La grande diversité de produits induit des attentes qualitatives variées et spécifiques, tant pour les tissus maigres que les tissus gras. Les attentes qualitatives varient aussi selon les acteurs de la filière : producteurs, abatteurs, transformateurs, distributeurs, consommateurs.

La sélection porcine est soucieuse de répondre à ces multiples attentes. Ainsi, depuis le début des années 1980, des paramètres de qualité technologique de la viande (pH, couleur, rétention d'eau) sont pris en compte dans les objectifs de sélection des populations porcines françaises (Bidanel *et al.*, 2018). De plus, deux gènes responsables de défauts majeurs de la qualité technologique de la viande (gènes Halothane et RN) ont été identifiés et sont pris en considération dans les programmes de sélection. Enfin, la composition corporelle est un caractère important dans ces programmes. La quantité de tissus adipeux repose sur la mesure de deux caractères clés : l'épaisseur de lard ou gras de couverture et les lipides intramusculaires.

Alors que le terme de qualité de viande est souvent utilisé de façon restrictive pour évoquer la qualité du tissu maigre, nous avons choisi de mettre l'accent sur les atouts des tissus gras. Cette synthèse fait le point sur les évolutions de l'amélioration génétique du porc en France en lien avec l'adiposité et la qualité des produits. Après un rappel sur l'intérêt des tissus gras pour les qualités des viandes et sur les caractéristiques de ces tissus, les facteurs de variation de l'adiposité et les caractères de quantité de gras pris en compte dans les programmes d'amélioration génétique (méthodes de mesure, paramètres génétiques) sont présentés. Un état des lieux de la variabilité génétique qui demeure au sein des populations porcines françaises (races sélectionnées et races locales) en termes de quantité et de répartition des tissus adipeux est dressé. Ce bilan est nécessaire pour définir les futures stratégies de sélection, afin de mieux répondre aux évolutions des attentes des acteurs de la filière et de la société.

1. ADIPOSITÉ ET INTÉRÊT POUR LES QUALITÉS DES PRODUITS

La notion de qualité de la viande de porc (maigre et gras) est complexe. Outre les dimensions intrinsèques au produit lui-même (qualités sanitaire, sensorielle, nutritionnelle, technologique), elle inclut des dimensions extrinsèques relatives aux conditions de production des animaux et leur perception par les citoyens (Lebret et Picard, 2015 ; Lebret *et al.*, 2015), qui ne seront pas traitées dans cette synthèse. Nous nous limiterons ici aux composantes de qualité des viandes directement influencées par l'adiposité des animaux : sensorielle, nutritionnelle et technologique.

1.1. La qualité sensorielle : le défi d'un gras invisible

Les propriétés sensorielles d'un aliment sont les caractéristiques que le consommateur perçoit. Pour la viande, il s'agit de l'aspect (couleur, présence d'exsudat, quantité de gras externe, intermusculaire et intramusculaire ou persillé), de la texture (tendreté, jutosité) et de la flaveur (odeur, goût). Il est bien établi que ces paramètres déterminent l'appréciation de la viande de porc et influencent l'acte d'achat ou de ré-achat par les consommateurs (Dransfield *et al.*, 2005 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2012 ; Papanagiotou *et al.*, 2013), même si les facteurs marketing (emballage, prix, disponibilité) ou psychologiques (valeurs, aspects socio-culturels) interviennent aussi dans les comportements d'achat (Font-i-Furnols et Guerrero, 2014).

Les qualités sensorielles de la viande dépendent d'interactions complexes entre i) les caractéristiques tissulaires à l'abattage, qui peuvent être modulées par des facteurs génétiques ou d'élevage : diamètre et typologie des fibres musculaires, teneur en glycogène, teneur et nature des lipides intramusculaires (LIM), importance et répartition de la matrice extracellulaire (Lebret *et al.*, 2015), ii) le métabolisme musculaire péri et post-mortem : vitesse et amplitude de chute du pH, température, durée et conditions de maturation de la viande (protéolyse) et iii) les conditions de préparation et de cuisson des viandes (Aberle *et al.*, 2012 ; Lebret et Faure, 2015 ; Listrat *et al.*, 2015). Les caractéristiques sensorielles des viandes peuvent être évaluées par des mesures mécaniques (force de cisaillement, énergie de rupture…), par des jurys entraînés qui évaluent dans des conditions définies (ISO 8589:2007) les différents caractères descriptifs d'aspect, de texture et de flaveur, ou par des consommateurs lors de tests hédoniques visant à mesurer le plaisir éprouvé lors de la dégustation d'un produit (aspect, texture, goût).

L'analyse d'une vingtaine de publications basées sur un jury entraîné montre assez souvent des corrélations significatives positives entre la teneur en LIM et la tendreté (n=13 publications), la jutosité (n=8) et la flaveur (n=7) (Lebret 2009, 2018). Toutefois, quatre de ces études montrent des corrélations faibles et non significatives, voire nulles, entre la teneur en LIM et chacun de ces paramètres sensoriels. L'association entre teneur en LIM et qualité sensorielle du porc est donc généralement positive, mais varie selon les études considérées, en raison de plusieurs facteurs :

- La valeur moyenne et l'étendue des teneurs en LIM considérées : plusieurs études montrent que l'effet favorable des LIM sur la tendreté et la jutosité de la longe s'observe surtout à partir d'une teneur comprise entre 2,5 et 3% (De Vol *et al.*, 1988, Fernandez *et al.*, 1999a, Lebret 2009), conduisant à proposer une

teneur minimale en LIM de 2,5% pour produire des viandes de qualité sensorielle satisfaisante.

- La répartition des LIM, à teneur équivalente : d'après Faucitano *et al.* (2005), mieux le persillé est réparti dans le muscle, plus la force de cisaillement de la viande est faible, donc plus la viande est tendre.
- Les leviers (génétiques, nutritionnels…) mis en œuvre pour moduler la teneur en LIM : ils peuvent modifier d'autres composantes musculaires ou affecter la cinétique de transformation du muscle en viande (Lebret *et al.*, 2015).
- Le niveau des autres indicateurs majeurs de qualité : Lonergan *et al.* (2007) ont montré que les relations entre LIM et qualité sensorielle dépendent du pH ultime. Elles sont plus fortes dans une gamme de pH considérée comme satisfaisante (de 5,65 à 5,80).
- Le mode et la température de cuisson des viandes, ainsi que les différences culturelles et d'habitudes culinaires entre jurys (Ngapo et Gariépy, 2008).

Mais qu'en est-il de l'influence de la teneur en LIM sur l'appréciation des viandes par les consommateurs ? Avant consommation, les préférences des consommateurs (appréciation globale, intention de consommation ou d'achat) se portent majoritairement vers les viandes (longe) contenant le moins de LIM, alors que les préférences s'inversent souvent après consommation, les viandes les plus persillées étant jugées plus juteuses, tendres et goûteuses (Fernandez *et al.*, 1999b, France ; Brewer *et al.*, 2001, Etats-Unis ; Font-i-Furnols *et al.*, 2012, Espagne). Ces études confirment l'optimum de 2,5% à 3,5% de LIM pour favoriser l'acceptabilité globale des viandes par les consommateurs lors de l'achat. Néanmoins, cette association est à nuancer selon leurs habitudes et culture alimentaires (Dransfield *et al.*, 2005), et selon leur âge : si l'augmentation des LIM améliore l'appréciation sensorielle (tendreté, jutosité) du jambon sec par les consommateurs quel que soit leur âge, elle s'accompagne d'une augmentation de l'acceptabilité globale chez les consommateurs de plus de 25 ans, mais a l'effet inverse chez les plus jeunes (Ventanas *et al.*, 2007). Il reste toutefois à déterminer s'il s'agit d'un effet d'âge ou de génération. De plus, l'influence des LIM sur la qualité perçue dépend du produit considéré : si l'appréciation hédonique du jambon sec s'améliore avec la teneur en LIM (Ventanas *et al.*, 2007), l'effet opposé est observé pour le jambon cuit (Fernandez *et al.*, 2000 ; Chevillon, 2018). Enfin, à l'inverse de la teneur en LIM, l'importance du gras de couverture a presque systématiquement un effet négatif sur l'appréciation des viandes ou jambons secs (Dransfield *et al.*, 2005 ; Ventanas *et al.*, 2007).

1.2. La qualité nutritionnelle : la recherche d'un gras sain

La qualité nutritionnelle de la viande correspond à sa capacité à satisfaire les besoins nutritionnels de l'homme : apports en protéines (dont acides aminés indispensables), lipides, vitamines (dont A, E, B1) et minéraux (fer, zinc, sélénium) (Lebret et Picard, 2015). Les « transferts nutritionnels négatifs » (polluants organiques, résidus médicamenteux…) ne sont pas traités ici.

En matière d'alimentation humaine, les dernières recommandations nutritionnelles sont une augmentation des apports énergétiques sous forme de lipides (35 à 40%, ANSES 2016), une augmentation des apports en acides gras (AG) oméga 3 : 1% des apports énergétiques sous forme ALA (acide alpha linolénique), 250 mg/j de EPA (acide éicosapentaénoïque) et de DHA (acide docosahexaénoique), et un rapport LA/ALA inférieur à 5 (ANSES, 2011). Concernant la teneur totale en lipides, la viande de porc s'avère maigre lorsque le gras visible est écarté : 3 à 4% de lipides dans le rôti cuit, environ 15% pour une côte grillée. Sa teneur en protéines ainsi que sa composition en acides aminés, équilibrée par rapport aux besoins de l'homme, sont relativement stables. En revanche, pour ce qui concerne les produits transformés, leur teneur en gras est très variable : moins de 4% dans le jambon cuit supérieur, 12% dans le jambon de Bayonne, 20% dans les chipolatas crues, environ 30% pour le saucisson sec et 35 à 40% pour les rillettes (Ciqual, 2017).

En termes de composition en AG (cf. partie 2.1), l'acide oléique (mono-insaturé) est majoritaire dans les muscles et tissus adipeux du porc (35 à 40%). La proportion d'AG polyinsaturés (AGPI) n-3 est généralement faible relativement aux n-6 (0,8 à 1,5% contre 12 à 18% des AG totaux), conduisant à un rapport n-6/n-3 d'environ 15 (Mourot, 2010). Le profil en AGPI de la viande de porc peut être facilement modifié par l'alimentation apportée aux animaux. La relation physiologique forte entre la nature des lipides ingérés et celle des lipides déposés dans les tissus gras et maigres constitue un levier majeur pour augmenter les teneurs dans les viandes en AG jugés bons pour la santé humaine (Mourot, 2010 ; Lebret *et al.*, 2015).

Ainsi, les teneurs et composition en lipides des tissus gras et maigres sont des déterminants importants des qualités nutritionnelles et sensorielles des viandes et produits du porc. Un autre phénomène important influençant ces qualités est la peroxydation lipidique, phénomène auxquels sont particulièrement sensibles les AGPI. Il s'agit de réactions radicalaires conduisant à la formation de plusieurs produits terminaux dont des composés volatils. Lorsque l'intensité de peroxydation est modérée, les composés formés ont un effet bénéfique sur la flaveur de la viande et des produits de porc (flaveur douce, ex. jambon type Parme) (Martin, 2018). Toutefois, une peroxydation élevée conduit à la production de composés toxiques qui altèrent la qualité nutritionnelle, mais aussi la couleur (gras jaune-orangé) et parfois la flaveur (même si une oxydation élevée peut être recherchée dans certains produits comme les jambons de type ibérique) (Lebret et Picard, 2015). Il est donc primordial de maîtriser les phénomènes d'oxydation dans les viandes pour contrôler les qualités sensorielles et nutritionnelles. La nature et les proportions des composés formés dépendent de plusieurs facteurs : nature des AG, teneur en fer, présence d'oxygène, pH… Dans les produits transformés, les traitements mécaniques (hachage, broyage…) ou thermiques, l'apport de sel, et la durée de conservation, favorisent la peroxydation (IFIP, 2018). La lipo-peroxydation des viandes et produits peut être limitée par la présence dans les tissus gras et maigres d'antioxydants, apportés notamment via l'alimentation des animaux : vitamine E, extraits végétaux riches en polyphénols, sélénium… dont certains agissent en synergie (Mourot, 2010 ; Lebret *et al.*, 2015).

1.3. La qualité technologique : à chaque produit son gras

La qualité technologique des tissus adipeux correspond à leur aptitude à la transformation et à la conservation, c'est à dire leur consistance, leur cohésion et leur sensibilité à l'oxydation.

La fermeté est fonction de la composition chimique : teneurs en lipides et en eau, importance de l'armature collagénique de soutien et composition en AG. Une faible teneur en lipides et corrélativement une teneur élevée en eau entraînent un

manque de consistance du tissu adipeux, alors qu'une assise protéique importante assure une certaine fermeté à température ambiante (Lebret et Mourot, 1998). La nature des AG joue un grand rôle dans la consistance des tissus adipeux, le point de fusion des AG étant d'autant plus bas qu'ils sont insaturés (< 0°C pour les AGPI). Plusieurs études ont montré le rôle prépondérant de la proportion d'AG saturés (surtout C16:0 et C18:0) par rapport aux AG insaturés (AGI) sur la fermeté des tissus adipeux déterminée par résistance mécanique ou par le taux de solide de la matière grasse (Lebret et Mourot, 1998 ; Hugo et Roodt, 2007). La durée de conservation des tissus adipeux est limitée par le développement des réactions de peroxydation lipidique, favorisées par des teneurs en eau et AGI élevées associées à l'absence d'agents antioxydants (cf. ci-dessus), ces réactions pouvant aussi se produire à l'état congelé.

La qualité technologique (fermeté) et sensorielle (couleur blanche, contrôle de l'oxydation) est essentielle pour la fabrication des produits transformés (Hugo et Roodt, 2007). Dans les jambons cuits (avec couenne) et secs, un tissu gras peu oxydé (ou oxydable) et de couleur blanche est recherché ; pour le jambon sec, une épaisseur minimale de gras permet d'éviter un séchage trop rapide et trop important qui altèrerait la texture du produit fini (Martin, 2018). Pour la fabrication de saucisson sec, un gras de couleur blanche et à point de fusion élevé, peu fondant et peu sensible au rancissement est recherché pour optimiser la transformation, ainsi que la flaveur et la texture du produit fini. De même, des gras fermes donc riches en AGS sont nécessaires pour la production de saucisses à pâte fine et de rillettes, des gras riches en AGPI à bas point de fusion (alimentation enrichie en AGPI n-3 par exemple) altérant la liaison du gras au maigre et l'homogénéisation du mélange (Martin, 2018).

Ainsi, les qualités technologiques des tissus adipeux du porc impliquent une proportion d'AGS et une teneur en lipides élevées (faible teneur en eau). Des exigences relatives à l'alimentation (< 1,9% d'acide linoléique dans la ration pour les animaux de plus de 12 semaines) et la qualité des gras (« gras de bardière blanc et ferme ») figurent dans l'arrêté fixant les conditions de production en Label Rouge « porc » (Bulletin officiel n° 31, 2017) ainsi que d'autres productions sous signe officiel de qualité. Ces propriétés sont aussi favorables aux qualités organoleptiques (limitation de l'oxydation) mais vont à l'encontre de la qualité nutritionnelle. Il semble donc que la gestion de ces compromis consisterait à orienter les tissus gras vers différentes utilisations selon leurs caractéristiques physiques et biochimiques.

2. LOCALISATION, CARACTÉRISTIQUES, RÔLES ET DÉVELOPPEMENT DES TISSUS ADIPEUX

2.1. Localisation anatomique et caractéristiques cellulaires et moléculaires

Au sein de l'organisme, il existe plusieurs sites de dépôts adipeux de taille très variable. Chez le porc, les dépôts les plus importants sont sous-cutanés (avec la bardière comme principal dépôt) et intermusculaires, les autres dépôts adipeux (périrénal ou panne, intramusculaire) ne représentant qu'une fraction faible de la masse grasse (Henry, 1977). Chez un animal de 110 kg de poids vif (stade commercial d'abattage), les dépôts adipeux sous-cutanés et inter-musculaires représentent respectivement 67-75% et 25-33% du tissu adipeux total (Kouba *et al.*, 1999 ; Monziols *et al.*, 2005).

Du point de vue structural, le tissu adipeux est essentiellement constitué d'adipocytes, cellules spécialisées dans le stockage des lipides (Louveau *et al.*, 2016). Ces cellules sphériques, dont le diamètre peut atteindre plus de 100 µm, se caractérisent par la présence d'une unique vacuole lipidique occupant jusqu'à 95% du volume de la cellule. Elles sont enfermées dans un treillis de fibres conjonctives qui supportent également les vaisseaux sanguins et lymphatiques et les terminaisons nerveuses. En plus des adipocytes, le tissu adipeux contient des cellules précurseurs (cellules souches adultes, préadipocytes), des cellules endothéliales, des fibroblastes et des cellules immunitaires. Contrairement à de nombreux mammifères chez lesquels coexistent ou se succèdent au cours de la croissance deux types d'adipocytes (blancs et bruns), le porc se caractérise par la présence exclusive d'adipocytes blancs dans ses tissus adipeux (Trayhurn *et al.*, 1989).

Du point de vue chimique, les tissus adipeux sous-cutanés du porc contiennent en moyenne 69 à 77% de lipides et 14 à 22% d'eau, les tissus adipeux internes (panne) étant plus riches en lipides (Wood *et al.*, 2004 ; Gondret *et al.*, 2014). Les lipides du muscle sont essentiellement des triglycérides, qui constituent les lipides de réserve et dont la teneur varie de 0,5 à plus de 5% selon le muscle, des phospholipides (lipides de structure, entre 0,5 et 1% du muscle) et du cholestérol (0,05 à 0,1%) (Lebret et Picard, 2015). Les triglycérides sont stockés pour l'essentiel dans la vacuole lipidique des adipocytes qui se développent le long des faisceaux de fibres (80% des lipides du muscle, selon Essen-Gustavsson *et al.*, 1994) et, pour une part mineure (5-20%), dans le cytoplasme des fibres musculaires sous forme de gouttelettes lipidiques (lipides intramyocellulaires). La teneur en phospholipides, présents dans les membranes cellulaires, varie assez peu alors que la teneur en triglycérides est très variable (Wood *et al.*, 2004). La teneur en LIM au sein d'un muscle (Gondret et Lebret 2002) ou entre muscles (Damon *et al.*, 2006) dépend fortement de la taille et du nombre d'adipocytes intramusculaires.

Les lipides tissulaires sont constitués d'acides gras qui se répartissent en trois classes : les acides gras saturés (AGS) représentant en moyenne 38% (muscle) à 40% (bardière) des AG et dont les principaux sont le C16:0 (palmitique) et le C18:0 (stéarique) ; les mono-insaturés (AGMI) qui représentent environ 45% des AG (muscle et bardière) et comprennent essentiellement le C18:1 (oléique), et les polyinsaturés (AGPI) qui représentent 15 à 20% des AG (Mourot, 2009). Au sein des AGPI, on distingue deux classes : les AGPI n-6 ou oméga 6, majoritaires, incluant essentiellement le C18:2 (linoléique ou LA) et les AGPI n-3 ou oméga 3, qui incluent le C18:3 (linolénique ou ALA), le C20:5 (éicosapentaénoïque ou EPA) et le C22:6 (docosohexaénoïque ou DHA). Parmi ces AG, les C18:2 et C18:3 sont indispensables : non synthétisés par l'animal, leurs teneurs ainsi que celles de leurs dérivés EPA et DHA dépendent directement des apports alimentaires.

2.2. Rôles du tissu adipeux dans l'organisme

Les premiers rôles attribués au tissu adipeux étaient ceux de soutien des organes et d'isolateur thermique. Le tissu adipeux est aussi reconnu pour son rôle essentiel dans le stockage de l'énergie. Il est en effet capable de stocker de grandes quantités d'AG sous forme de triglycérides dans les adipocytes, permettant ainsi d'assurer le maintien de l'homéostasie énergétique. Cette capacité de stockage est le résultat d'un équilibre entre le prélèvement des AG exogènes, la synthèse de novo des AG ou lipogenèse, leur estérification en triglycérides,

l'hydrolyse des triglycérides et la ré-estérification des produits de la lipolyse. Chez le porc, le tissu adipeux constitue le site majeur de la lipogenèse (80% des AG y étant synthétisés chez le porc en croissance ; Henry, 1977).

En plus de ses différents rôles, le tissu adipeux exerce une fonction sécrétoire. Depuis la découverte de la leptine en 1994, de nombreuses études ont permis d'identifier une multitude de produits sécrétés par les adipocytes et d'autres cellules du tissu adipeux (Komolka *et al.*, 2014). Les produits de nature peptidiques sont regroupés sous le terme d'adipokines ou d'adipocytokines. Ces produits, dont la liste continue à être enrichie, sont impliqués dans différentes fonctions biologiques comme la prise alimentaire, la croissance, l'inflammation ou l'immunité. Par cette capacité sécrétoire, le tissu adipeux peut interagir avec son environnement proche mais aussi avec l'ensemble de l'organisme.

2.3. Mise en place et développement des tissus adipeux lors des différentes phases de croissance du porc

La chronologie d'apparition des dépôts adipeux varie selon leur localisation anatomique. Chez le porc comme dans la plupart des espèces, les premiers groupes d'adipocytes apparaissent durant la période fœtale. Ils sont ainsi observés au niveau sous-cutané entre 50 et 75 jours post-conception (environ 43% à 65% de la gestation). Ils se développent dans les régions péricardique, épididymaire et périrénale à environ 70 jours post-conception (61% de la gestation ; Desnoyers *et al.*, 1974 ; Hausman et Thomas, 1986). Les premiers adipocytes intramusculaires ne se développent qu'au cours du premier mois de vie post-natale chez le porc (Hauser *et al.*, 1997). Le développement des tissus adipeux dépend de processus biologiques complexes et continus qui résultent au cours de l'embryogénèse de l'engagement de cellules souches embryonnaires vers des voies de différenciation adipocytaire puis d'une augmentation du nombre (hyperplasie) et du volume (hypertrophie) des cellules constitutives de ces tissus lors des phases de croissance post-embryonnaires (Bonnet *et al.*, 2015). Même si les connaissances sur l'origine embryonnaire des adipocytes restent imprécises à ce jour, il est admis qu'elle est diverse et dépendrait du type d'adipocytes et de leur localisation anatomique.

L'augmentation de la masse grasse se produit essentiellement après la naissance et peut se poursuivre tout au long de la vie de l'individu. Elle passe de 1-2% à la naissance (Canario *et al.*, 2007) à 13% du poids vif à 21 jours (Frondas-Chauty *et al.*, 2012) pour atteindre 15-20% du poids vif à environ 100 kg (Karège, 1991). La croissance du tissu adipeux implique l'hypertrophie des adipocytes. Le diamètre moyen des adipocytes passe d'environ 38 à 62 µm dans le tissu adipeux sous-cutané et de 23 à 33 µm dans le muscle, chez le porc entre 30 et 110 kg (Gardan *et al.*, 2006). La contribution de l'hyperplasie dans l'augmentation de la masse adipeuse est considérée comme limitée. On ignore cependant si l'augmentation post-natale du nombre d'adipocytes résulte d'une hyperplasie réelle comme durant la période fœtale ou de la simple différenciation de cellules souches adultes qui sont présentes dans les tissus adipeux et le muscle durant toute la phase de croissance (Perruchot *et al.*, 2013).

3. FACTEURS DE VARIATION DES DÉPÔTS ADIPEUX SOUS-CUTANÉS ET INTRAMUSCULAIRES

Les caractéristiques quantitatives et qualitatives des dépôts adipeux sous-cutanés et intramusculaires ainsi que la nature des AG constitutifs des triglycérides sont influencés par le type génétique, le sexe, le poids à l'abattage, mais également par les conditions d'élevage comme décrit par Lebret *et al.* (2015).

Dans ce paragraphe, l'accent sera mis sur la variation quantitative des dépôts adipeux selon le type génétique, le type sexuel et la localisation anatomique, plus que sur la variation qualitative de ces dépôts, fortement influencée par l'alimentation (Wood *et al.*, 1999). Deux caractères quantitatifs des dépôts adipeux retiendront principalement notre attention, l'épaisseur de lard dorsal (ELD), un bon indicateur de l'adiposité globale de la carcasse et particulièrement de la quantité de gras sous-cutané qui joue un rôle important pour la transformation, et la teneur en LIM du muscle *Longissimus* qui joue un rôle majeur pour la qualité sensorielle des produits.

3.1. Variation selon le type génétique

La sélection réalisée depuis le début des années 1970 dans les populations porcines françaises, orientée vers la production d'animaux de plus en plus maigres, a conduit à la réduction de l'ELD de près de 3 écart-types phénotypiques (ETP), soit -6,3% d'ETP par an en moyenne dans les populations de races pures (Bidanel *et al.*, 2018). Ce constat s'observe également à l'étage de la production sur les porcs charcutiers, comme en témoignent les résultats des tests des terminaux : -10 mm d'épaisseur de lard entre 1977 et 1997, soit -40% en 20 ans (Monin *et al.*, 1998).

Depuis la fin des années 1990, la diminution de l'ELD s'est ralentie dans toutes les populations porcines françaises sélectionnées, comparé aux deux décades précédentes, en raison d'un moindre effort de sélection sur ce caractère et des niveaux déjà très bas atteints. Sans surprise, la lignée Piétrain (Pi) présente le moins de gras de couverture : entre 7 et 7,5 mm d'ELD ajustée à 100 kg selon le sexe en 2017 (Figure 1).

Le Duroc (Du) s'apparente plutôt à une lignée femelle, telles que le Large White (LWF) et le Landrace Français (LR), avec une ELD moyenne ajustée à 100 kg comprise entre 10,5 et 11,5 mm. La lignée Large White mâle (LWM), présente une ELD intermédiaire comprise entre 9,5 et 10,5 mm en moyenne selon le sexe. Même si les animaux de race pure ont atteint des niveaux d'ELD très bas sous l'effet de la sélection, il existe toujours de la variabilité entre types génétiques sur ce caractère.

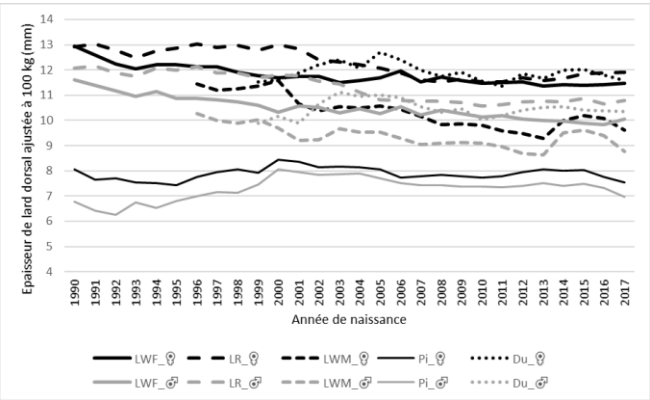

Figure 1 – Evolution de l'épaisseur de lard dorsal ajustée à 100 kg, mesurée par ultrasons sur les candidats à la sélection femelles (♀) et mâles entiers (♂) contrôlés dans les élevages de sélection (base nationale génétique porcine, 2018)

LWF : Large White femelle ; LR : Landrace Français ; LWM : Large White mâle ; Pi : Piétrain ; Du : Duroc

Le lien entre l'ELD et la teneur en LIM chez le porc a fait l'objet de multiples études, aussi bien sur des animaux issus de races pures que sur ceux provenant de croisements, mais une présentation synthétique de leurs résultats n'est pas facile à établir, les conditions expérimentales n'étant pas toujours similaires (différences de conduite alimentaire, de sexe, d'âge et de poids à la mesure, de site et de méthode de mesure…). Dix études comparables et présentant des valeurs moyennes à la fois d'ELD et de teneur en LIM du muscle *Longissimus* mesurées sur des animaux de races pures ont été retenues (Figure 2). Les quatre principales races utilisées en France (Large White, Landrace, Piétrain et Duroc) sont représentées, ainsi que la race Meishan, utilisée dans les croisements sino-européens, et deux races locales françaises : Gascon et Basque. Concernant les races sélectionnées, des références récentes ont été privilégiées afin de limiter le biais lié à l'évolution phénotypique des caractères sous l'effet de la sélection.

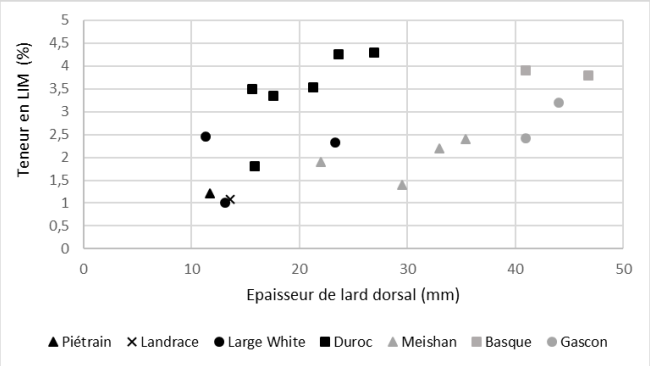

Figure 2 – Valeurs moyennes de sept races pures pour l'épaisseur de lard dorsal et la teneur en LIM du muscle *Longissimus*

Données issues de White et al. (1995) ; Candek-Potokar et al. (1998) ; Labroue et al. (2000) ; Newcom et al. (2005) ; Plastow et al. (2005) ; Renaudeau et al. (2005) ; Suzuki et al. (2009) ; Lebret et al. (2014) ; Ros-Freixedes et al. (2014) ; Lebret et al. (2019)

Parmi les indicateurs d'adiposité, l'ELD semble être un meilleur indicateur que la teneur en LIM pour distinguer les races locales (ne faisant pas l'objet d'un programme de sélection) des races sélectionnées. Cette observation reflète le fait que les races conventionnelles européennes (Large White, Landrace et Piétrain) sont sélectionnées depuis de longues années sur le critère d'ELD, alors que l'intérêt de sélectionner sur la teneur en LIM est plus récent.

Les races conventionnelles européennes (Large White, Landrace ou Piétrain) présentent une adiposité générale faible, aussi bien en termes de gras de couverture que de LIM. Alors que les porcs Duroc ont une ELD limitée et une teneur en LIM qui varient selon les études, les porcs Meishan ont une teneur en LIM modérée et une ELD élevée. Quant aux races locales françaises, elles se caractérisent par une adiposité globale élevée (ELD et teneur en LIM).

Ces études illustrent la grande variabilité de la teneur en LIM qui varie de 1% pour les races les plus maigres (Large White, Landrace, Piétrain) à plus de 4% pour les races les plus grasses. Cette teneur peut même atteindre 10% en moyenne pour certaines races tel que le porc Ibérique (Bressan *et al.*, 2016). Ces résultats confirment la plus grande richesse en LIM de la race Duroc comparée aux autres races commerciales françaises. Dans ces races, les teneurs en LIM sont adaptées pour répondre au marché de la viande fraîche et à la production de jambon cuit. Toutefois, le seuil de 2,5% de LIM considéré comme minimal pour produire des viandes de qualité sensorielle satisfaisante n'est souvent pas atteint en moyenne à l'échelle de ces populations, hormis certaines lignées Duroc.

Chez les porcs charcutiers, l'adiposité dépend des lignées parentales. Dans les lignées sino-européennes, plus il y a de gènes Meishan dans le croisement, plus la teneur en LIM et l'ELD sont élevées (Jiang *et al.*, 2012). Par ailleurs, les comparaisons entre produits de croisements issus de pères Duroc ou de pères Large White ou Piétrain indiquent que la teneur en LIM du muscle *Longissimus* est plus élevée de 0,55 à 0,64 % chez les croisés Duroc (Alonso *et al.*, 2009).

3.2. Variation selon le type sexuel

Dans les populations collectives françaises, on observe de la variabilité intra type génétique, liée au sexe, sur le dépôt de gras sous-cutané (Figure 1). En effet, quel que soit le type génétique, les femelles sont plus grasses que les mâles entiers. Cette différence, bien établie dans la littérature, est aussi associée à une différence de composition du tissu adipeux. Comme l'expliquent Lebret et Mourot (1998), le tissu adipeux des mâles entiers contient plus d'eau et de protéines et moins de lipides que celui des femelles, les mâles entiers étant, à poids vif égal, plus maigres que les femelles. A l'inverse, les tissus adipeux des mâles castrés contiennent plus de lipides et moins d'eau que ceux des mâles entiers et des femelles. Ainsi, la castration des porcs mâles, pratiquée couramment pour éviter les défauts d'odeur sexuelle, augmente l'adiposité des carcasses (Bonneau 1988).

Les porcs immunocastrés, solution alternative à l'arrêt de la castration chirurgicale des porcelets mâles, présentent une adiposité intermédiaire entre celle des mâles entiers et des mâles castrés (méta-analyse de Batorek *et al.*, 2012). Lebret et Mourot (1998) expliquent également que le type sexuel influence l'activité lipogénique des tissus adipeux, qui varie dans le même sens que l'adiposité des animaux : en conséquence, à poids vif équivalent, le degré d'insaturation des lipides est plus élevé chez les mâles entiers que chez les femelles et les mâles castrés.

Les différences de teneurs en LIM entre type sexuels sont parfois plus ténues que celles observées concernant l'adiposité de la carcasse. Toutefois, plusieurs études ainsi qu'une méta-analyse montrent que les mâles castrés présentent une teneur en LIM supérieure à celle des mâles entiers, les femelles présentant une teneur intermédiaire (Bahelka *et al.*, 2007 ; Trefan *et al.*, 2013 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2018).

3.3. Variation selon la localisation anatomique

Les caractéristiques des différents dépôts adipeux (couches interne et externe de la bardière, panne) varient avec leur localisation anatomique. Les différences de composition chimique, et, par conséquence, de composition en acides gras des lipides de ces tissus adipeux sont décrites par Lebret et Mourot (1998). En résumé, retenons que les acides gras insaturés sont localisés préférentiellement dans le tissu adipeux sous-cutané, et les acides gras saturés d'origine endogène dans les tissus adipeux internes.

Des différences d'ELD sont observées le long de la carcasse, selon la zone anatomique. Une étude a permis d'établir des profils d'ELD le long de la carcasse de porc grâce au tomographe RX. Les ELD décroissent de l'épaule au jambon et les zones de transitions anatomiques de l'épaule à la longe puis de la longe au jambon sont marquées par des diminutions nettes d'épaisseur de lard (Mercat *et al.*, 2016).

Les muscles de la carcasse présentent également des différences de teneurs en LIM (Maignel *et al.*, 2013 ; Tyra *et al.*, 2013 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2018) : la longe est moins grasse que le jambon et les muscles du jambon présentent des niveaux de LIM différents entre eux (Lebret, 2009 ; Maignel *et al.*, 2013 ; Lambe *et al.*, 2013 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2018). Par ailleurs, la teneur en LIM peut varier au sein d'un même muscle selon la position anatomique, comme dans le cas du muscle *Longissimus* (Faucitano *et al.*, 2004 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2018 ; Schwob *et al.*, 2018). L'analyse par IRM de l'intégralité de la longe permet d'observer une modulation côte/inter-côte très nette de la teneur en LIM (Figure 3). Pour les longes les plus grasses, il peut y avoir jusqu'à un point (%) de lipides d'écart suivant que la coupe est centrée sur la côte ou entre deux côtes. Les valeurs minimales correspondent aux positionnements des côtes. La teneur en LIM est assez stable le long du muscle *Longissimus*, excepté aux extrémités qui sont plus grasses, notamment l'extrémité caudale (Schwob *et al.*, 2018). Un résultat similaire a été obtenu par Faucitano *et al.* (2004) qui observaient les valeurs les plus élevées de LIM dans la section crânienne de la région thoracique et dans la section caudale centrale de la région lombaire du muscle *Longissimus*.

La corrélation entre la teneur moyenne en LIM du muscle *Longissimus* et celle prédite à chaque position (IRM) de la longe est élevée (R^2 entre 0,76 et 0,88). Les corrélations les plus élevées se situent au voisinage de la 13ème côte. L'échantillon prélevé au niveau de cette côte est donc représentatif de la teneur moyenne en LIM de la longe. Toutefois, l'étude montre qu'il est possible de choisir un site de prélèvement plus proche de l'extrémité antérieure du *Longissimus*, pour limiter la dépréciation de la longe, sans dégrader la corrélation avec la teneur moyenne en LIM de la longe (Schwob *et al.*, 2018).

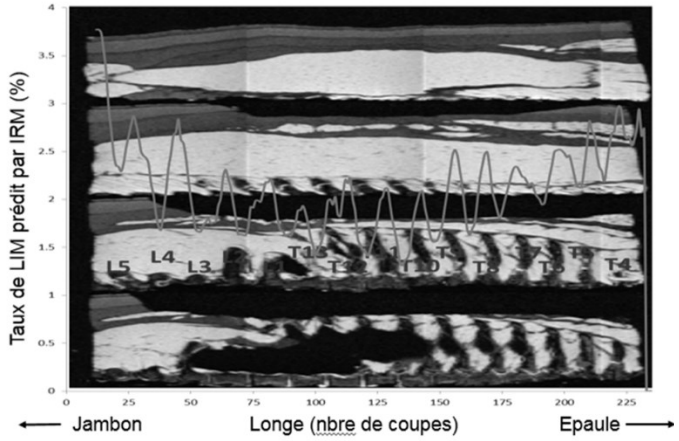

Figure 3 – Evolution de la teneur en LIM le long de la longe mesurée par IRM (moyenne sur 5 coupes, épaisseur 12,5 mm)

T4 à T13 : vertèbres thoraciques (extrémité antérieure), L1 à L5 : vertèbres lombaires (extrémité postérieure)

4. DU PHÉNOTYPAGE À LA SÉLECTION DES CARACTÈRES D'ADIPOSITÉ CHEZ LE PORC

Maîtriser la quantité des tissus adipeux suppose de pouvoir objectiver ces paramètres à partir de mesures fiables, peu coûteuses, précoces, non invasives et réalisables à grande échelle. Pour cela, il est nécessaire de disposer de méthodes rapides, standardisées et automatisées d'indicateurs prédictifs ou de caractères d'adiposité.

4.1. Les nouvelles technologies au service du phénotypage des dépôts adipeux

Contrairement à la majorité des caractères de qualité de viande, difficiles voire impossibles à mesurer sur l'animal vivant et qui nécessitent donc de mettre en place des protocoles de collecte des données sur des collatéraux abattus, les caractères d'adiposité tels que l'ELD et la teneur en LIM peuvent, de nos jours, être directement mesurés sur les candidats à la sélection. Dès le milieu des années 1950, la sélection sur l'ELD a été grandement facilitée par la mise au point de méthodes non invasives, basées sur les ultrasons, permettant de mesurer avec précision l'ELD sur l'animal vivant et ainsi de prédire la teneur en gras de la carcasse (Dumont, 1957). Plus récemment, des outils reposant sur la même technologie ont été développés pour estimer la teneur en LIM sur le porc vivant (Newcom *et al.*, 2002 ; Maignel *et al.*, 2009). L'utilisation des ultrasons pour prédire la teneur en LIM *in vivo* est une alternative intéressante au dosage des LIM sur la viande par méthode chimique, induisant une dépréciation de la carcasse, et onéreux et inenvisageable à grande échelle, ainsi qu'à la notation visuelle du persillé (échelle NPPC ou canadienne) qui présente de multiples contraintes (note subjective, peu discriminante lorsque la teneur moyenne est inférieure à 2%, suivi individuel à l'abattoir…).

Des avancées récentes ont été réalisées concernant les technologies d'imagerie disponibles, permettant désormais d'étudier la composition corporelle et la distribution anatomique des tissus sur des porcs *in vivo*. Carabus *et al.* (2016) ont comparé les avantages et les inconvénients des cinq principales technologies non-invasives : ultrasons (US), visionique (VIA), absorption biphotonique à rayons X (DXA), tomographie à rayons X (CT) et imagerie par résonance magnétique (IRM). Toutes ces méthodes, excepté la visionique, sont utilisées pour analyser la composition interne de l'animal. Toutefois, la précision des images et les prédictions obtenues diffèrent selon la technologie utilisée : CT et IRM présentent la meilleure résolution d'image, suivi de DXA, VIA et US, en accord avec Schloz *et al.* (2015). La technologie CT est adaptée pour prédire l'évolution de la composition de la carcasse et des pièces à partir d'images prises sur l'ensemble de l'animal au cours de sa croissance (Font-i-Furnols *et al.*, 2014 ; Carabus *et al.*, 2015). En revanche, elle n'est pas applicable pour prédire la teneur en LIM *in vivo*, car la qualité d'image est trop faible et l'erreur de prédiction trop élevée (Kongsro et Gjerlaug-Enger, 2013 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2018). La technologie US, quant à elle, est un outil bien adapté au contrôle de performances en élevage, pour mesurer en routine *in vivo* l'ELD et prédire la teneur en LIM du muscle *Longissimus*.

Par ailleurs, l'épaisseur de lard peut être mesurée sur carcasse à l'abattoir grâce aux appareils de classement : au niveau dorsal avec le CGM ou, plus récemment, à la fente à la jonction rein/jambon avec l'Image-Meater (Daumas, 2008). De plus, des outils de traçabilité individuelle des carcasses sur les chaînes d'abattage, par la lecture des puces RFID, sont en cours de développement, et devraient permettre prochainement de faciliter la collecte des différentes mesures réalisées en routine lors du classement commercial des carcasses sur un plus grand nombre d'animaux. Ces évolutions offriront de nouvelles perspectives pour les programmes de sélection en termes de composition de la carcasse.

Afin d'aller vers du plus haut débit, les technologies d'imagerie sont également testées chez le porc pour prédire en phase post-mortem la teneur en LIM sur des échantillons de muscle *Longissimus* à des cadences de mesure élevées. Ainsi, l'IRM offre l'opportunité de prédire la teneur en LIM d'environ 400 à 500 échantillons de longe par jour, avec une bonne précision (Davenel *et al.*, 2012 ; Schwob et Vautier, 2016). L'utilisation de la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) pour prédire la teneur en LIM est maintenant bien établie (Andueza *et al.,* 2015). Vautier *et al.* (2015) confirment que cette technologie permet de prédire la teneur en LIM de la viande en conditions industrielles. D'autres travaux ont aussi montré l'intérêt de mesures par NIRS pour prédire la teneur en acides gras, notamment en oméga-3 sur la chaîne d'abattage, dans les tissus adipeux de porc (Mairesse *et al.*, 2012 ; Prieto *et al.*, 2017). Ainsi, ces méthodes de mesure de la composition du muscle ou du gras sont rapides, fiables, simples à mettre en place et compatibles avec les besoins du phénotypage haut débit, donc avec les attentes des sélectionneurs.

Dans les schémas de sélection porcins présents sur le marché français, l'amélioration génétique des tissus adipeux repose principalement sur la mesure de deux caractères clés (Tableau 1) : l'ELD, mesurée exclusivement *in vivo* par ultrasons, et la teneur en LIM du muscle *Longissimus*, estimé par différentes méthodes soit sur animal vivant, soit sur carcasse, comme décrit précédemment. Même si certains indicateurs d'adiposité sont également enregistrés dans les lignées femelles, l'effort de sélection sur ces critères (ELD et LIM) est plus important dans les lignées mâles.

Tableau 1 – Synthèse des indicateurs d'adiposité mesurés en sélection dans les lignées mâles des différents schémas génétiques porcins présents sur le marché français

Schémas génétiques	ELD	LIM	Autres indicateurs d'adiposité
LGPC (Pi NN, nn)	Ultrasons*		
LGPC (Du)	Ultrasons*	Ultrasons*	
Hypor (Pi NN, Du)	Ultrasons* Autofom	Ultrasons*NIRS Persillé (échelle NPPC) Analyse chimique	Teneur en gras de la carcasse
Topigs Norsvin(Du)	Ultrasons*	NIRS	Composition en acides gras (NIRS)
DanBred (Du)	Ultrasons*		Teneur en gras de la carcasse
PIC (Du)	Ultrasons*	Ultrasons* Persillé	Profil d'acides gras, indice d'iode, tendreté
Genesus (Du)	Ultrasons*	Ultrasons* Persillé (échelle NPPC) Analyse chimique	Epaisseur de gras de la carcasse (réglette), couleur du gras de la longe (colorimètre)
Choice Genetics	Ultrasons*		Teneur en gras de la carcasse* (tomographe RX)

** Mesures réalisées in vivo. Données issues des sites internet www.axiom-genetics.com, www.nucleus-sa.com, www.hypor.com, www.danbred.com, www.topigsnorsvin.com, qb.pic.com, www.genesus.com, choice-genetics.com et complétées par les responsables génétiques des schémas Axiom, Nucléus, Hypor, DanBred, PIC, Genesus et Choice Genetics.*

Les caractères pouvant être mesurés *in vivo* sont privilégiés car ils présentent plusieurs avantages : ils peuvent être enregistrés sur l'ensemble des candidats à la sélection et non pas seulement sur les collatéraux abattus, par des méthodes de mesures non invasives qui n'entrainent pas de dépréciation de la carcasse, et la collecte des données est simplifiée comparée aux mesures réalisées à l'abattoir qui nécessitent la traçabilité individuelle de chaque carcasse ou pièce.

Les axes d'amélioration génétique sont définis par les entreprises de sélection pour produire des animaux adaptés aux besoins des marchés, qui diffèrent selon les pays. En France, la grille de paiement des carcasses s'appuie sur le poids de la carcasse et le taux de muscle des pièces ; 75% de la viande de porc produite est transformée par l'industrie de l'aval, principalement en jambon cuit (IFIP, 2017). Cette spécificité du marché français pousse les sélectionneurs à réduire au maximum l'adiposité des carcasses, aussi bien en termes d'ELD que de LIM, pour produire des porcs charcutiers avec un faible ratio gras/maigre et un niveau de persillé limité. Cependant, les attentes à l'échelle de la filière sont nombreuses et parfois contradictoires, y compris sur la quantité et la qualité du gras (par exemple, l'intérêt de valeurs de LIM plus ou moins élevées selon que l'on considère la production de viande fraîche ou la fabrication d'un jambon cuit ou d'un jambon sec), et les liens génétiques existant entre les différents caractères d'intérêt doivent être pris en considération pour définir les objectifs de sélection.

4.2. Déterminisme génétique des caractères d'adiposité chez le porc

La variabilité génétique additive, c'est-à-dire la part de la variabilité phénotypique du caractère qui dépend des gènes, donc sur laquelle la sélection peut jouer, est forte pour les caractères d'adiposité. Parmi les caractères de composition de la carcasse, l'ELD est le caractère le plus étudié et son héritabilité est élevée : supérieure à 0,43 pour l'ELD mesurée *in vivo* aux ultrasons (Tableau 2). Ce qui explique que l'ELD soit un critère relativement facile à faire évoluer par la sélection. Alors que les caractères de qualité de la viande sont modérément héritables (0,10 à 0,30), la teneur en LIM est une exception avec une héritabilité proche de 0,50 en moyenne. Ainsi, ELD et LIM sont tous deux fortement héritables, ce qui en font des caractères adaptés aux méthodes de sélection classiques.

Tableau 2 – Héritabilités (h^2) et corrélations génétiques (r_g) estimées pour l'épaisseur de lard (ELD) et la teneur en lipides intramusculaires (LIM) dans différentes études ou synthèses

Référence[1]	h^2 ELD	h^2 LIM	r_g ELD-LIM
a	0,43	0,50	0,30
b	0,62 ± 0,05	0,35 ± 0,06	0,27 ± 0,16
c	0,44 ± 0,11	0,69 ± 0,12	0,27 ± 0,18
d	0,72 ± 0,03	0,51 ± 0,03	0,19 ± 0,05
e	0,54 ± 0,02	0,51 ± 0,02	0,24
f	0,48	0,64	0,40
g	0,45 ± 0,07	0,26 ± 0,06	0,34 ± 0,04

[1] a = Sellier (1998), moyennes sur plusieurs races et plusieurs études ; b = Hermesch et al. (2000a ; 2000b), Large White et Landrace ; c = Newcom et al. (2005), Duroc ; d = Suzuki et al. (2009), Duroc ; e = Maignel et al. (2011), Duroc ; f = Ros-Freixedes et al. (2014), Duroc ; g = Miar et al. (2014), Duroc x (Large White x Landrace).

Entre ELD et LIM, la corrélation génétique, qui induit la réponse indirecte à la sélection, est modérée et défavorable, puisqu'elle varie entre 0,19 et 0,40 (Tableau 2). Ce qui signifie que la sélection pour augmenter la teneur en LIM, correspondant souvent à l'objectif recherché dans la longe, induira une légère augmentation de l'ELD. Il est difficile de combiner une carcasse avec un niveau de gras dorsal faible et un niveau de LIM élevé. Ainsi, les races qui présentent de bonnes qualités de viande ont une moins bonne composition de la carcasse et inversement, les races qui présentent les meilleures performances en termes de composition de la carcasse sont souvent moins performantes sur l'aspect qualité de viande (Sellier, 1998 ; Jiang *et al.*, 2012). Toutefois, il est possible de rompre, au moins partiellement, la liaison génétique défavorable entre la teneur en LIM et la teneur en gras de la carcasse par la sélection (Ros-Freixedes *et al.*, 2013). Tout comme il est envisageable de modifier la composition chimique des dépôts adipeux par la sélection. En effet, les corrélations génétiques élevées entre la composition en acides gras des dépôts adipeux sous-cutanés et l'ELD (0,70, 0,40 et -0,70 respectivement avec les teneurs en lipides, acide stéarique et acide linoléique) indiquent que la sélection pour diminuer l'adiposité de la carcasse se traduit par des tissus adipeux moins riches en lipides et en AGS, plus riches en AGPI, donc moins fermes et plus sensibles aux phénomènes de peroxydation (Sellier, 1998), comme observé par Tribout *et al.* (2004) dans la population Large White.

Une partie de la variabilité génétique des caractères d'ELD et de teneur en LIM est expliquée par certains gènes qui ont des effets plus ou moins forts sur ces caractères. Plusieurs gènes dont le polymorphisme est associé à une variation de l'adiposité des porcs sont connus dans la littérature pour avoir un effet sur l'ELD, tels que HAL, IGF2 et MC4R, ou sur la teneur en LIM, tel que H-FAB P (Guéblez *et al.*, 1995 ; Hanset *et al.*, 1995 ; Gerbens *et al.*, 1999 ; Van Laere *et al.*, 2003 ; Tribout *et al.*, 2005 ; Sanchez *et al.*, 2006 ; Mérour *et al.*, 2009 ; Mercat *et al.*, 2012). Par ailleurs, depuis le début des années 2000, de nombreuses études ont été menées pour identifier des locus à effets quantitatifs (QTL) qui expliquent une part limitée de la variabilité génétique des caractères. En effet, plus de 3 000 QTL liés à des critères d'adiposité (ELD (n=408), teneur en gras de la carcasse ou des pièces, teneur en LIM (n=652), persillage…), et presque le double de QTL impactant la composition en gras (teneur en AGS (n=800), en AGM (n=729), en acide stéarique (n=796) ou en acide oléique (n=762)) sont référencés dans la base de données PigQTLdb (Hu *et al.*, 2005 ; https://www.animalgenome.org/cgi-bin/QTLdb/SS/index). Des QTL dits « significatifs » (niveau de significativité élevé) liés aux critères d'adiposité ont été identifiés sur l'ensemble des chromosomes porcins. Plusieurs exemples sont détaillés par Ciobanu *et al.* (2011). Les outils génomiques sont actuellement disponibles pour identifier de nouvelles régions du génome qui ont un effet important sur les caractères d'intérêts, via des analyses d'association pangénomiques (GWAS), afin d'inclure cette information génomique dans les programmes de sélection et ainsi, gagner en précision d'estimation de la valeur génétique des reproducteurs et candidats à la sélection. La sélection génomique est bénéfique notamment aux caractères polygéniques, contrôlés par un grand nombre de gènes, coûteux à mesurer et nécessitant l'abattage des animaux, tels que les critères de qualité de la viande ou de la carcasse, et de composition des tissus adipeux.

CONCLUSION

Les programmes de sélection porcine ont eu pendant longtemps comme objectif prioritaire la réduction de l'adiposité des carcasses, et les gains génétiques les plus spectaculaires ont été effectivement observés pour ce caractère, qui a l'avantage d'être fortement héritable, de s'exprimer dans les deux sexes et d'être mesurable *in vivo* avec une très bonne précision. Pourtant, l'intérêt du gras pour la filière est évident si l'on considère les qualités sensorielles, nutritionnelles et technologiques des viandes et produits du porc. La grille de paiement des carcasses en production conventionnelle, basée sur le poids et la teneur en maigre des carcasses, ne valorise pas ces dimensions de qualité. Au contraire, l'antagonisme génétique entre épaisseur de gras dorsal et teneur en LIM tendrait à dégrader la qualité sensorielle des viandes. De même, la qualité technologique des gras s'altère avec la réduction d'adiposité des animaux. La rationalisation de la production porcine opérée depuis les années 70 (sélection génétique, nutrition animale, conduite d'élevage) a permis de répondre à la demande croissante pour une viande de qualité sanitaire satisfaisante, maigre et peu chère. Toutefois, ceci a conduit à une standardisation de la production et une altération de la qualité des tissus gras (moins riches en lipides, plus riches en AGPI, moins fermes, plus sensibles à l'oxydation) et maigres (pHu inférieur, pertes en eau accrues, l'effet souvent mentionné sur la réduction du taux de LIM étant moins clair) (Lebret, 2004). L'évolution récente du marché des produits carnés dont le porc, avec une réduction globale de la consommation individuelle mais une croissance des productions sous signe officiel de qualité ou des marques revendiquant une amélioration qualitative intrinsèque relativement aux produits standards, montre les attentes des consommateurs envers ce type de diversification et illustre l'opportunité de créer ainsi de la valeur dans la filière. Le « gras » y trouve toute sa place !

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aberle E.D., Forrest J.C., Gerrard D.E., Edward W.M., 2012. Principles of Meat Science, 5th Edition. Kendall Hunt Publishing Company, IA, USA. 395 p.
- Alonso V., del Mar Campo M., Espagnol S., Roncales P., Beltran J.A., 2009. Effect of crossbreeding and gender on meat quality and fatty acid composition in pork. Meat Sci., 81, 209-217.
- Andueza D., Mourot B.P., Aït-Kaddour A., Prache S., Mourot J., 2015. Utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge et de la spectroscopie de fluorescence pour estimer la qualité et la traçabilité de la viande. INRA Prod. Anim., 28, 197-208.
- ANSES, 2011. Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. 327 p.
- ANSES, 2016. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. 196 p.
- Bahelka I., Hanusová E., Peškovičová D., Demo P., 2007. The effect of sex and slaughter weight on intramuscular fat content and its relationship to carcass traits of pigs. Czech J. Anim. Sci., 52, 122–129.
- Batorek N., Candek-Potokar M., Bonneau M., van Milgen J., 2012. Meta-analysis of the effect of immunocastration on production performance, reproductive organs and boar taint compounds in pigs. Animal, 6, 1330–1338.

- Bidanel J.P., Silalahi P., Tribout T., Canario L., Ducos A., Garreau H., Gilbert H., Larzul C., Milan D., Riquet J., Schwob S., Mercat M.J., Hassenfratz C., Bouquet A., Bazin C., Bidanel J., 2018. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives. Journées Rech. Porcine, 50, 61-74.
- Bonneau M., 1988. Intérêt et limites de la production de viandes de porc mâle entier. INRA Prod. Anim., 1, 133-140.
- Bonnet M., Louveau I., Cassar Malek I., Lefaucheur L., Rescan P.-Y., 2015. Comprendre le développement des muscles et des tissus adipeux : un préalable pour maîtriser les qualités des carcasses et des produits des animaux d'élevage. INRA Prod. Anim., 28, 137-149.
- Bressan M.C., Almeida J., Santos Silva J., Bettencourt C., Francisco A., Gama L.T., 2016. Carcass characteristics and fat depots in Iberian and F1 Large White × Landrace pigs intensively finished or raised outdoors in oak-tree forests. J. Anim. Sci. 94, 2592-2602.
- Brewer M.S., Zhu L.G., McKeith F.K., 2001. Marbling effects on quality characteristics of pork loin chops: consumer purchase intent, visual and sensory characteristics. Meat Sci., 59, 153-163.
- Canario L., Père M.C., Tribout T., Thomas F., David C., Gogué J., Herpin P., Bidanel J.P., Le Dividich J., 2007. Estimation of genetic trends from 1977 to 1998 of body composition and physiological state of Large White pigs at birth. Animal 1, 1409-1413.
- Čandek-Potokar M., Žlender B., Bonneau M., 1998. Effects of breed and slaughter weight on longissimus muscle biochemical traits and sensory quality in pigs. Ann. Zootech., 47, 3-16.
- Carabus A., Sainz R.D., Oltjen J.W., Gispert M., Font-i-Furnols M., 2015. Predicting fat, lean and the weights of primal cuts for growing pigs of different genotypes and sexes using computed tomography. J. Anim. Sci., 93, 1388-1397.
- Carabus A., Gispert M., Font-i-Furnols M., 2016. Imaging technologies to study the composition of live pigs: A review. Spanish J. Agric. Res., 14, e06R01.
- Chevillon P., 2018. Quelques exemples de démarches sensorielles sur les produits du porc. Journée technique IFIP/INRA « Comment le tissu gras détermine la qualité sensorielle et nutritionnelle des viandes et des charcuteries-salaisons, Quelles actions mettre en œuvre en élevage », Rennes, 16 Janvier 2018.
- Ciobanu D.C., Lonergan S.M., Huff-Lonergan E.J., 2011. Genetics of meat quality and carcass traits, In: The Genetics of the Pigs, 2nd Edition. Rothschild M.F., Ruvinsky A. (Eds CAB Int.), p. 355–389.
- Ciqual, 2017. Table de composition nutritionnelle des aliments. https://ciqual.anses.fr/ accédé le 13 septembre 2018.
- Damon M., Louveau I., Lefaucheur L., Lebret L., Vincent A., Leroy P., Sanchez M.P., Herpin P., Gondret F., 2006. Number of intramuscular adipocytes and fatty acid binding protein-4 content are significant indicators of intramuscular fat level in crossbred Large White x Duroc pigs. J. Anim. Sci. 84, 1083-1092.
- Daumas G., 2008. La visionique désormais autorisée en France pour le classement des carcasses : avec le CSB Image-Meater. TechniPorc, 31, 29-30.
- Davenel A., Bazin C., Quellec S., Challois S., Gispert M., Mercat M.J., Muller N., 2012. Dosage haut débit des lipides intramusculaires de la viande de porc par imagerie par résonance magnétique. Journées Rech. Porcine, 44, 53-54.
- Desnoyers F., Vodovar N., Delpal S., 1974. Apparition, origine et évolution des tissus adipeux epididymaire et péricardiaque du fœtus de porc. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 14, 769-780.
- DeVol D.L., McKeith F.K., Bechtel P.J., Novakofski F.K., Shanks R.D., Carr T.R., 1988. Variation in composition and palatability traits and relationships between muscle characteristics and palatability in a random sample of pork carcasses. J. Anim. Sci., 66, 385-395.
- Dourmad J.Y., Salaün Y., Lebret B., Riquet J., 2018. Diversité des productions porcines en France. Innovations Agronomiques, 68, 151-170.
- Dransfield E., Ngapo T.M., Nielsen N.A., Bredahl L., Sjöden P.O., Magnusson M., Campo M.M., Nute G.R., 2005. Consumer choice and suggested price for pork as influenced by its appearance, taste and information concerning country of origin and organic pig production. Meat Sci., 69, 61-70.
- Dumont B.L., 1957. New methods of estimation of carcass quality of live pigs. Report of the meeting on Pig Progeny Testing in Europe, Copenhagen, Denmark. EAAP Meeting Report, No. 1957/930. FAO Meeting.
- Essen-Gustavsson B., Karlsson A, Lundstrom K, Enfalt A.-C., 1994. Intramuscular fat and muscle fibre lipid contents in halothane-gene-free pigs fed high or low protein diets and its relation to meat quality. Meat Sci. 38, 269-277.
- Faucitano L., Rivest J., Daigle J.P., Lévesque J., Gariepy C., 2004. Distribution of intramuscular fat content and marbling within the longissimus muscle of pigs. Can. J. Anim. Sci., 84, 57-61.
- Faucitano L., Huff P., Teuscher F., Gariepy C., Wegner J., 2005. Application of computer image analysis to measure pork marbling characteristics. Meat Sci., 69, 537-543.
- Fernandez X., Monin G., Talmant A., Mourot J., Lebret B, 1999a. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat -1. Composition of the lipid fraction and sensory characteristics of m. longissimus lumborum. Meat Sci., 53, 59-65.
- Fernandez X., Monin G., Talmant A., Mourot J., Lebret B, 1999b. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat -2. Consumer acceptability of m. longissimus lumborum. Meat Sci., 53, 67-72.
- Fernandez X., Mourot J., Lebret B., Gilbert S., Monin G, 2000. Influence of intramuscular fat content on lipid composition sensory qualities and consumer acceptability of cured cooked ham. J. Sci. Food Agric., 80, 705-710.
- Font-i-Furnols M., Tous N., Esteve-Garcia E., Gispert M., 2012. Do all the consumers accept marbling in the same way? The relationship between eating and visual acceptability of pork with different intramuscular fat content. Meat Sci., 91, 448-453.
- Font-i-Furnols M., Guerrero L., 2014. Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: An overview. Meat Sci., 98, 361-371.
- Font-i-Furnols M., Brun A., Gispert M., 2018. Intramuscular fat content in different muscles, locations, weights and genotype-sexes and its prediction in live pigs with computed. Animal, 16, 1-9.
- FranceAgriMer, 2018. Fiche Elevage Filière Porc. www.franceagrimer.fr
- Frondas-Chauty A., Louveau I., Le Huërou-Luron I., Rozé J.-C., Darmaun D., 2012. Air-displacement plethysmography for determining body composition in neonates: validation using live piglets. Pediatr. Res. 72, 26-31.
- Gardan D., Gondret F., Louveau I., 2006. Lipid metabolism and secretory function of porcine intramuscular adipocytes compared with subcutaneous and perirenal adipocytes. Am. J. Physiol. 291, E372-E380.
- Gerbens F., Van Erp A.J.M., Harders F.L., Verburg F.J., Meuwissen T.H.E., Veerkamp J.H., Te Pas M.F.W., 1999. Effect of genetic variants of the heart fatty acid-binding protein gene on intramuscular fat and performance traits in pigs. J. Anim. Sci., 77, 846-852.
- Gondret F., Lebret B., 2002. Feeding intensity and dietary protein level affect adipocyte cellularity and lipogenic capacity of muscle homogenates in growing pigs, without modification of the expression of sterol regulatory element binding protein's. J. Anim. Sci., 80, 3184-3193.
- Gondret F., Louveau I., Mourot J., Duclos M.J., Lagarrigue S., Gilbert H., van Milgen J., 2014. Dietary energy sources affect the partition of body lipids and the hierarchy of energy metabolic pathways in growing pigs differing in feed efficiency. J. Anim. Sci., 92, 4865-4877.
- Guéblez R., Paboeuf F., Sellier P., Bouffaud M., Boulard J., Brault D., Le Tiran M.H., Petit G., 1995. Effet du génotype halothane sur les performances d'engraissement, de carcasse et de qualité de la viande du porc charcutier. Journées Rech. Porcine, 27, 155-164.

- Hanset R., Dasnois C., Scalais S., Michaux C., Grobet L., 1995. Génotypes au locus de sensibilité à l'halothane et caractères de croissance et de carcasse dans une F2 Piétrain x Large White. Genet. Sel. Evol., 27, 63-76.
- Hauser N., Mourot J., De Clercq L., Genart C., Remacle C., 1997. The cellularity of developing adipose tissues in Pietrain and Meishan pigs. Reprod. Nutr. Dev., 37, 617-625.
- Hausman G.J., Thomas G.B., 1986. Structural and histochemical aspects of perirenal adipose tissue in fetal pigs: Relationships between stromal-vascular characteristics and fat cell concentration and enzyme activity. J. Morphol., 190, 271-283.
- Henry Y., 1977. Développement morphologique et métabolique du tissu adipeux chez le porc : influence de la sélection, de l'alimentation et du mode d'élevage. Ann. Biol. Bioch. Biophys., 17, 923–952.
- Hermesch S., Luxford B.G., Graser H.U., 2000a. Genetic parameters for lean meat yield, meat quality, reproduction and feed efficiency traits for Australian pigs : 1. Description of traits and heritability estimates. Livest. Prod. Sci., 65, 239-248.
- Hermesch S., Luxford B.G., Graser H.U., 2000b. Genetic parameters for lean meat yield, meat quality, reproduction and feed efficiency traits for Australian pigs : 2. Genetic relationships between production, carcase and meat quality traits. Livest. Prod. Sci., 65, 249-259.
- Hu Z.L., Dracheva S., Jang W., Maglott D., Bastiaansen J., Rothschild M.F., Reecy J.M., 2005. A QTL resource and comparison tool for pigs: PigQTLDB. Mamm. Genome, 15, 792-800. https://www.animalgenome.org/cgi-bin/QTLdb/SS/index, accédé le 27/09/2018
- Hugo A., Roodt E., 2007. Significance of porcine fat quality in meat technology: a review. Food Rev. Int., 23, 175-198.
- IFIP, 2017. Le porc par les chiffres. Edition 2017-2018. IFIP (Ed), Paris, France, 44p.
- IFIP, 2018. Oxydation et qualité des viandes et produits carnés. Mémento viandes et charcuteries, 18 p.
- Jiang Y.Z., Zhu L., Tang G.Q., Li M.Z., Jiang A.A., Cen W.M., Xing S.H., Chen J.N., Wen A.X., He T., Wang Q., Zhu G.X., Xie M., Li X.W., 2012. Carcass and meat quality traits of four commercial pig crossbreeds in China. Genet. Mol. Res., 11, 4447-4455.
- Karège C, 1991. Influence of age and sex on energy utilization and body composition of growing pig. PhD Thesis, University of Montpellier II, France.
- Komolka K., Albrecht E., Wimmers K., Michal J.J., Maak S., 2014. Molecular heterogeneities of adipose depots - potential effects on adipose-muscle cross-talk in humans, mice and farm animals. J. Genom., 2, 31-44.
- Kongsro J., Gjerlaug-Enger E., 2013. In vivo prediction of intramuscular fat in pigs using computed tomography. Open J. Anim. Sci., 3, 321-325.
- Kouba M., Bonneau M., Noblet J., 1999. Relative development of subcutaneous, intermuscular, and kidney fat in growing pigs with different body compositions. J. Anim. Sci. , 77, 622-629.
- Labroue F., Goumy S., Gruand J., Mourot J., Neelz V., Legault C., 2000. Comparaison au Large White de quatre races locales porcines françaises pour les performances de croissance, de carcasse et de qualité de la viande. Journées Rech. Porcine, 32, 403-411.
- Lambe N.R., Wood J.D., McLean K.A., Walling G.A., Whitney H., Jagger S., Fullarton P., Bayntun J., Bünger L., 2013. Effects of low protein diets on pigs with a lean genotype 2. Compositional traits measured with computed tomography (CT). Meat Sci., 95, 129-136.
- Lebret B., Mourot J., 1998. Caractéristiques et qualité des tissus adipeux chez le porc. Facteurs de variation non génétiques. INRA Prod. Anim., 11, 131-143.
- Lebret B., 2004. Conséquences de la rationalisation de la production porcine sur les qualités des viandes. INRA Prod. Anim., 17, 79-91.
- Lebret B., 2009. Stratégies nutritionnelles visant à moduler la croissance et la composition des dépôts tissulaires chez le porc : conséquences sur la qualité de la viande. Thèse de Doctorat (Biologie et Agronomie), Agrocampus Ouest, Rennes. 117 p.
- Lebret B., Dourmad J.Y., Mourot J., Pollet P. Y., Gondret F., 2014. Production performance, carcass composition, and adipose tissue traits of heavy pigs: Influence of breed and production system. J. Anim. Sci., 92, 3543–3556.
- Lebret B., Picard B., 2015. Les principales composantes de la qualité des carcasses et des viandes dans les différentes espèces animales. INRA Prod. Anim., 28, 93-98.
- Lebret B., Faure J., 2015. La viande et les produits du porc : comment satisfaire des attentes qualitatives variées ? INRA Prod. Anim., 28, 111-114.
- Lebret B., Prache S., Berri C., Lefèvre F., Bauchart D., Picard B., Corraze G., Médale F., Faure J., Alami-Durante H., 2015. Qualités des viandes : influences des caractéristiques des animaux et de leurs conditions d'élevage. INRA Prod. Anim., 28, 151-168.
- Lebret B., 2018. Quel est le lien entre gras intramusculaire et qualité sensorielle des viandes fraîches de porc? Journée technique IFIP/INRA « Comment le tissu gras détermine la qualité sensorielle et nutritionnelle des viandes et des charcuteries-salaisons, Quelles actions mettre en œuvre en élevage », Rennes, 16 Janvier 2018.
- Lebret B., Lenoir H., Daré S., Fonseca A., Mercat M.J., 2019. Qualité des produits de porcs gascons élevés en système d'élevage extensif de la filière Noir de Bigorre : effets de la saison et des ressources alimentaires. Journées Rech. Porcine, 51, 217-222.
- Listrat A., Lebret B., Louveau I., Astruc T., Bonnet M., Lefaucheur L., Bugeon J., 2015. Comment la structure et la composition du muscle déterminent la qualité des viandes ou chairs. INRA Prod. Anim., 28, 125-136.
- Lonergan S.M., Stalder K.J., Huff-Lonergan E., Knight T.J., Goodwin R.N., Prusa K.J., Beitz D.C., 2007. Influence of lipid content on pork sensory quality within pH classification. J. Anim. Sci., 85, 1074-1079.
- Louveau I., Perruchot M.-H., Bonnet M., Gondret F., 2016. Pre- and postnatal adipose tissue development in farm animals: from stem cells to adipocyte physiology. Animal, 10, 1839-1847.
- Maignel L., Daigle J.P., Sullivan B., 2009. Utilisation de la technologie ultrasons pour la prédiction in vivo du pourcentage de gras intramusculaire de la longe et perspectives d'utilisation en amélioration génétique porcine. Journées Rech. Porcine, 41, 13-18.
- Maignel L., Daigle J.P., Groves J., Wyss S., Fortin F., Sullivan B., 2011. Use of loin intramuscular fat content predicted with ultrasound technology in the Canadian swine improvement program. In Proceedings of the 62nd EAAP Annual Meeting, Stavanger, Norway.
- Maignel L., Daigle J.P., Fortier M.P., Wyss S., Sullivan B., 2013. Prédiction de la teneur en gras intramusculaire dans le jambon de porcs vivants par la technologie aux ultrasons et relation avec le gras intramusculaire dans la longe. Journées Rech. Porcine, 45, 247-248.
- Mairesse G., Douzenel P., Mourot J., Vautier A., Le Page R., Goujon J.M., Poffo L., Sire O., Chesneau G., 2012. La spectroscopie proche infrarouge : outil d'analyse rapide sur carcasse de la teneur en acides gras polyinsaturés n-3 des gras de bardière du porc charcutier. Journées Rech. Porcine, 44, 211-212.
- Martin J.L., 2018. Qualité du gras : quels besoins pour les technologies charcutières et la qualité sensorielle des produits ? Journée technique IFIP/INRA « Comment le tissu gras détermine la qualité sensorielle et nutritionnelle des viandes et des charcuteries-salaisons, Quelles actions mettre en œuvre en élevage », Rennes, 16 Janvier 2018.
- Mercat M.J., Feve K., Muller N., Schwob S., Le Roy P., Bidanel J.P., Larzul C., Riquet J., 2012. Estimation, dans un dispositif familial issu des populations porcines françaises en sélection, de l'effet quantitatif de mutations dans des gènes majeurs et des gènes candidats. Journées Rech. Porcine, 44, 1-6.
- Mercat M.J., Monziols M., Cordonnier S., Gault E., Le Roy P., Larzul C.., 2016. Effet du type génétique et du génotype halothane sur l'épaisseur de lard mesurée par tomographie RX tout au long de la carcasse. Journées Rech. Porcine, 48, 273-278.
- Mérour I., Hermesch S., Schwob S., Tribout T., 2009. Effect of the halothane genotype on growth performances, carcase and meat quality traits in the piétrain breed of the french national pig breeding program. Proc. Assoc. Advmt. Anim. Breed. Genet., 18,191-194.

- Miar Y., Plastow G., Bruce H., Moore S., Manafiazar G., Kemp R., Charagu P., Huisman A., Van Haandel B., Zhang C., McKay R., Wang Z., 2014. Genetic and phenotypic correlations between performance traits with meat quality and carcass characteristics in commercial crossbred pigs. Plos One, 9(10), 12p.
- Monin G., Sellier P., Bonneau M., 1998. Trente ans d'évolution de la notion de qualité de la carcasse et de la viande de porc. Journées Rech. Porcin, 30,13-27.
- Monziols M., Bonneau M., Davenel A., Kouba M., 2005. Tissue distribution in pig carcasses exhibiting large differences in their degree of leanness, with special emphasis on intermuscular fat. Livest. Prod. Sci., 97, 267-274.
- Mourot J., 2009. Optimising the nutritional and sensorial profile of pork. In: Improving the sensory and nutritional quality of fresh meat: new technologies. Kerry J.P., Ledward D.A. (Eds), Woodhead Publishing, Cambridge, England. 342-355.
- Mourot J., 2010. Que peut-on attendre des pratiques d'élevage pour la viande de porcs et autres monogastriques ? OCL, 17, 37-42.
- Newcom D.W., Bass T.J., Lampe J.F., 2002. Prediction of intramuscular fat percentage in live swine using real-time ultrasound. J. Anim. Sci., 80, 3046-3052.
- Newcom D.W., Bass T.J., Schwab C.R., Stalder K.J., 2005. Genetic and phenotypic relationships between individual subcutaneous backfat layers and percentage of longissimus intramuscular fat in Duroc swine. J. Anim. Sci., 83, 316-323.
- Ngapo T.M., Gariepy C., 2008. Factors affecting the eating quality of pork. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 48, 599-633.
- Papanagiotou P., Tzimitra-Kalogianni I., Melfou K., 2013. Consumers' expected quality and intention to purchase high quality pork meat. Meat Sci., 93, 449-454.
- Perruchot M.-H., Lefaucheur L., Barreau C., Casteilla L., Louveau I., 2013. Age-related changes in the features of porcine adult stem cells isolated from adipose tissue and skeletal muscle. Am. J. Physiol., 305, C728-C738.
- Plastow G.S., Carrión D., Gil M., García-Regueiro J.A., Font-i-Furnols M., Gispert M., Oliver M.A., Velarde A., Guàrdia M.D., Hortós M., Rius M.A., Sárraga C., Díaz I., Valero A., Sosnicki A., Klont R., Dornan S., Wilkinson J.M., Evans G., Sargent C., Davey G., Connolly D., Houeix B., Maltin C.M., Hayes H.E., Anandavijayan V., Foury A., Geverink N., Cairns M., Tilley R.E., Mormède P., Blott S.C., 2005. Quality pork genes and meat production. Meat Sci., 70, 409-421.
- Prieto N., Pawluczyk O., Dugan M.E.R., Aalhus J.L., 2017. A review of the principles and applications of Near-Infrared Spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. Appl. Spectrosc. 71, 1403-1426.
- Renaudeau D., Hilaire M., Mourot J., 2005. A comparison of carcass and meat quality characteristics of Creole and Large White pigs slaughtered at 150 days of age. Anim. Res., 54, 43–54.
- Ros-Freixedes R., Reixach J., Bosch L., Tor M., Estany J., 2013. Response to selection for decreased backfat thickness at restrained intramuscular fat content in Duroc pigs. J. Anim. Sci., 91, 3514-3521.
- Ros-Freixedes R., Reixach J., Bosch L., Tor M., Estany J., 2014. Genetic correlations of intramuscular fat content and fatty acid composition among muscles and with subcutaneous fat in Duroc pigs. J. Anim. Sci., 92, 5417–5425.
- Sanchez M.P., Riquet J., Billon Y., Iannuccelli N., Gogué J., Fève K., Bidanel J.P., Milan D., 2006. The IGF2-intron-G3072A substitution is not solely responsible for the growth and fatness QTL on the porcine chromosome 2. In Proceedings of the 8th World Cong. Genet. Appl. Livest. Prod., Belo Horizonte, Brazil.
- Scholz A. M., Bünger L., Kongsro J., Baulain U., Mitchell A. D., 2015. Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. Animal, 9, 1250–1264.
- Schwob S., Vautier A., 2016. Mesurer rapidement et efficacement les lipides intramusculaires. TechPorc, 27, 35-36.
- Schwob S., Vautier A., Lebret B., Blanchet B., Mercat M.J., Faure J., Castellano R., Quellec S., Challois S., Davenel A., 2018. Développement de nouveaux outils haut débit pour l'évaluation précoce de la qualité de la viande de porc (QualiPorc). Innovations Agronomiques, 63, 407-419.
- Sellier P., 1998. Genetics of meat and carcass traits. In M.F. Rothschild and A. Ruvinsky (Eds), The genetics of the pig, 463-510. CAB Int., Wallingford, UK.
- Suzuki K., Inomata K., Katoh K., Kadowaki H., Shibata T., 2009. Genetic correlations among carcass cross-sectional fat area ratios, production traits, intramuscular fat, and serum leptin concentration in Duroc pigs. J. Anim. Sci., 87, 2209-2215.
- Trayhurn P., Temple N.J., Van Aerde J., 1989. Evidence from immunoblotting studies on uncoupling protein that brown adipose tissue is not present in the domestic pig. Can. J. Physiol. Pharmacol., 67, 1480-1485.
- Trefan L., Doeschl-Wilson A., Rooke J.A., Terlouw C, Bünger L., 2013. Meta-analysis of effects of gender in combination with carcass weight and breed on pork quality. J. Anim. Sci., 91, 1480–1492.
- Tribout T., Caritez J.C., Gogué J., Gruand J., Bouffaud M., Billon Y., Péry C., Griffon H., Brenot S., Le Tiran M.H., Bussières 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. Journées Rech. Porcine, 36, 275-282.
- Tribout T., Mercat M.J., Le Roy P., Bouffaud M., Barret J., 2005. Estimation dans des populations porcines françaises de l'effet du génotype MC4R sur les performances de quelques caractères de croissance, de composition de la carcasse et de qualité de la viande. Techniporc, 28-3, 11-16.
- Tyra M., Ropka-Molik K., Terman A., Piorkowska K., Oczkowicz M., Bereta A., 2013. Association between subcutaneous and intramuscular fat content in porcine ham and loin depending on age, breed and FABP3 and LEPR genes transcript abundance. Mol. Biol. Rep., 40, 2301-2308.
- Van Laere A.S., Nguyen M., Braunschweig M., Nezer C., Collette C., Moreau L., Archibald A.L., Haley C.S., Buys N., Tally M., Andersson G., Georges M., Andersson L., 2003. A regulatory mutation in IGF2 causes a major QTL effect on muscle growth in the pig. Nature, 425, 832-836.
- Vautier A., Lhommeau T., Chevillon P., 2015. Nirs prediction of intramuscular fat content of pork loins: effect of the acquisition surface. 61st International Congress of Meat Science and Technology, 23-28th August 2015, Clermont-Ferrand, France.
- Ventanas S., Ruiz J., Garcia C., Ventanas J., 2007. Preference and juiciness of Iberian dry-cured loin as affected by intramuscular fat content, crossbreeding and rearing system. Meat Sci., 77, 324-330.
- White B.R., Lan Y.H., McKeith F.K., Novakofski J., Wheeler M.B., McLaren D.G., 1995. Growth and body composition of Meishan and Yorkshire barrows and gilts. J. Anim. Sci., 73, 738-749.
- Wood J.D., Enser M., Fisher A.V., Nute G.R., Richardson R.I., Sheard, P.R., 1999. Manipulating meat quality and composition. Proceedings of the Nutrition Society, 58, 363-370.
- Wood J.D., Richardson R.I., Nute G.R., Fisher A.V., Campo M.M., Kasapidou E., Sheard P.R., Enser M., 2004. Effects of fatty acids on meat quality: a review. Meat Sci., 66, 21-32.