

Modélisation du dépôt de lipides et de la composition en acides gras du tissu adipeux au cours de la croissance du porc

R. LIZARDO (1,2), J. VAN MILGEN (2), J. MOUROT (2), J. NOBLET (2), M. BONNEAU (2)

(1) Fundação Ciência e Tecnologia, Programme PRAXIS XXI - Av. D. Carlos I, 126, Lisbonne, Portugal

(2) INRA, Station de Recherches Porcines - 35590 Saint-Gilles

Modélisation du dépôt de lipides et de la composition en acides gras du tissu adipeux au cours de la croissance du porc

Un modèle de simulation de la croissance lipidique et de la composition en acides gras a été développé pour étudier l'effet de l'alimentation sur la qualité du gras chez le porc. La croissance générale est simulée à partir d'un modèle simple de base et la croissance lipidique se répartit entre les acides gras majeurs apportés par les lipides alimentaires et ceux synthétisés *de novo* à partir des précurseurs non-lipidiques. Pour les acides gras alimentaires, un coefficient de stockage de 90% est utilisé. Les acides gras synthétisés *de novo* sont répartis entre les acides oléique, palmitique et stéarique à raison de 48, 29 et 19 %, respectivement. La composition de la bardière est supposée identique à celle de l'ensemble de l'animal. Après quelques ajustements des paramètres du modèle à l'aide de deux expériences sur animaux, des simulations ont été effectuées et les résultats comparés avec ceux obtenus *in vivo*. Une bonne cohérence entre les valeurs prédites et les mesures de composition en acides gras de la bardière est observée pour tous les régimes testés. Par ailleurs, les simulations mettent en évidence l'insuffisance de certaines connaissances nécessaires à l'amélioration des performances prédites par le modèle. Face à ces résultats, nous pouvons conclure que le modèle répond aux objectifs demandés et qu'il peut constituer un outil de prédiction de l'influence de l'alimentation sur la qualité du tissu adipeux chez le porc.

Modelling lipid deposition and fatty acid composition in the growing-finishing pig

A model of lipid deposition and fatty acid (FA) composition was developed to study the effect of diet on body fat composition in the growing-finishing pig. Growth is described by a model of protein and lipid deposition where the latter results from deposition of major dietary FA and *de novo* synthesised FA. It is assumed that 90% of dietary FA are deposited and the composition of *de novo* FA corresponds to 48% oleic acid, 29% palmitic acid and 19% stearic acid. Furthermore, it is assumed that the FA composition of backfat and whole body lipids is identical. Data from two experiments were used to refine parameterisation of the model. Predictions of backfat composition for the major FA were similar to measurements. Even though most dietary FA may be deposited as-is, the FA composition of the carcass depends to a large extent on the *de novo* FA synthesis. As a result, the hypothesis used in the underlying growth model (i.e., repartitioning of energy between protein and lipid deposition) will have a major impact on the model outcome. Nevertheless, the basic growth model used here results in reasonable predictions of the lipid and FA composition. Using modelling techniques appears to be an excellent tool to study the influence of the diet on the quality of adipose tissue and to identify areas where knowledge is lacking.

INTRODUCTION

Le porc charcutier au poids normal d'abattage contient de 20 à 25 % de masse adipeuse dans la carcasse (DESMOULIN et al, 1988), répartie entre les tissus adipeux sous-cutané, intermusculaire et périrénal et, dans une moindre mesure, intramusculaire (KAREGE, 1991, figure 1). La composition lipidique de ces dépôts est influencée par de nombreux facteurs liés à l'animal, tels que son adiposité générale, le site anatomique, l'âge, le poids vif (PV), le sexe ou le génotype (GIRARD et al, 1988; NURNBERG et al, 1998; LEBRET et MOUROT, 1998). Des facteurs externes, comme le niveau d'ingestion ou la composition de l'aliment, la température ambiante ou les facteurs de croissance peuvent aussi avoir une influence très marquée (NURNBERG et al, 1998 ; LEBRET et MOUROT, 1998). La formation du tissu adipeux est morphologiquement caractérisée par la différenciation des précurseurs adipocytaires en adipocytes, suivie de phases d'hyperplasie et hypertrophie (HENRY, 1977). Chimiquement, elle se caractérise par la synthèse et le stockage d'acides gras (LEAT et COX, 1980; MERSMANN, 1986). Le porc étant dépourvu d'activité $\Delta 12$ - et $\Delta 15$ -désaturase, il n'est pas capable de synthétiser les acides gras polyinsaturés (AGPI) essentiels, notamment les acides linoléique (C18:2) et linoléique (C18:3). Les AGPI doivent être fournis par l'aliment et le rendement de leur stockage dans la carcasse est relativement élevé (CHWALIBOG et al, 1992). La qualité du tissu adipeux dépend essentiellement du rapport entre les acides gras saturés et insaturés (LEBRET et MOUROT, 1998). Une teneur minimale en acide stéarique (C18:0) de 12% et une teneur maximale en C18:2 comprise entre 12 et 15% des acides gras totaux sont généralement recommandées (GIRARD et al, 1988). Les conséquences pratiques d'une élévation des teneurs en AGPI sont une susceptibilité accrue du tissu adipeux à l'oxydation et des difficultés d'ordre technologique dues au manque de fermeté des tissus adipeux (LEBRET et MOUROT, 1998). Or, les porcs utilisés actuellement en élevage sont très performants et, de façon générale, présentent un appétit qui peut limiter l'expression

de leur potentiel génétique. La formulation de régimes à forte teneur en énergie avec incorporation de matières grasses est alors devenue une pratique courante, entraînant une teneur accrue d'AGPI dans la carcasse si celles-ci sont d'origine végétale.

Des modèles mathématiques de prédiction de l'effet de certains facteurs sur la croissance et la composition corporelle du porc ont été développés (Van MILGEN, 1999), mais ils ne prennent pas en compte la composition en acides gras et donc la qualité du tissu adipeux. C'est précisément l'objectif du modèle que nous décrivons dans la présente communication. Il s'agit, pour l'instant, d'un modèle de recherche qui sert à tester des stratégies alimentaires et prédire leur influence sur la composition en acides gras des lipides corporels.

1. DESCRIPTIF DU MODÈLE

Le modèle a été développé spécifiquement pour simuler la croissance entre 25 et 100 kg de poids vif (PV) et prédire la composition corporelle à l'abattage ainsi que la composition en acides gras du tissu adipeux de la bardière. Il se base sur les concepts développés par DE LANGE (1995) dans son modèle de croissance et se caractérise comme un modèle dynamique, déterministe et partiellement mécaniste. Les connaissances disponibles n'étant pas suffisantes pour autoriser une approche métabolique, nous avons choisi une approche nutritionnelle utilisant un certain nombre d'informations empiriques. Par ailleurs, un certain nombre d'hypothèses ont été admises durant le développement du modèle.

1.1. Croissance du porc

Dans le modèle de base, nous considérons que la croissance du tissu musculaire, traduite par le dépôt protéique, est prioritaire par rapport à celle du tissu adipeux ou du dépôt lipidique. Par ailleurs, il existe un certain nombre de facteurs liés à l'animal (génotype, sexe) ou à l'aliment (protéine, lysine, énergie) qui peuvent limiter le dépôt de protéines.

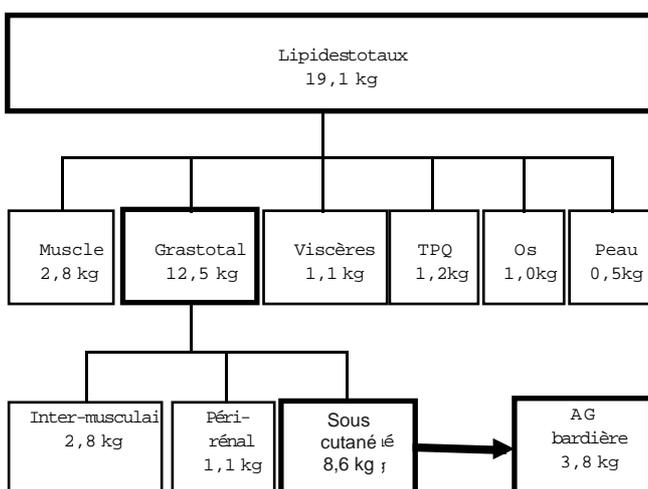
1.1.1. État initial de l'animal

La composition chimique corporelle du porcelet initial (≈ 25 kg PV) se caractérise dans le modèle par un poids connu de protéines et de lipides. L'eau et les minéraux sont calculés à partir des protéines (ARC, 1981). On admet que les acides gras représentent 80% des lipides et que leur composition correspond à celle observée par CAMARA et al (1994) dans le tissu adipeux de la bardière du porc âgé de 80 jours.

1.1.2. Conduite de l'alimentation

Un seul aliment pour toute la période d'engraissement ou un aliment de croissance, puis un autre de finition peuvent être utilisés dans le modèle. Ceux-ci doivent être caractérisés par leurs teneurs en énergie digestible (ED) ou métabolisable (EM), en protéines et lysine, et en lipides et leur composition en acides gras. La quantité d'aliment ingérée peut être, soit fournie au modèle, soit estimée à partir du PV et de la

Figure 1 – Composition en lipides totaux des divers compartiments corporels chez le porc Large White abattu à 100 kg PV (KARÉGE, 1991)



concentration énergétique (ARC, 1981; Van MILGEN et NOBLET, 1999). Une contrainte de restriction alimentaire en finition peut également être utilisée.

1.1.3. Utilisation des nutriments

Dans le modèle, les nutriments ingérés servent d'abord à l'entretien et ensuite à la croissance. Dans le cas des nutriments azotés, une protéine équilibrée doit contenir 7% de lysine et une disponibilité de 0,85 est prise en compte au préalable (DE LANGE, 1995). Le besoin d'entretien protéique (Pm) est calculé en fonction du PV métabolique ($PV^{0,75}$) (NRC, 1998). Par différence entre les protéines disponibles et le Pm, nous pouvons estimer la quantité de protéines disponibles pour la croissance (Pg) et qui simultanément doivent être équilibrées en lysine (bpLYSg). L'équilibre avec les autres acides aminés n'a pas été pris en compte, mais ceci peut-être envisagé à l'avenir. En outre, la croissance musculaire est variable selon le type génétique ou le sexe et chaque type de porc se caractérise par un dépôt maximum de protéines (PDmax). Tout en assurant un rapport minimum de 1 entre les dépôts de protéines et de lipides (Ld), le dépôt de protéines (Pd) est alors déterminé, soit par le PDmax, soit par Pg ou par bpLYSg. En ce qui concerne l'énergie, le besoin d'entretien (EMm) est estimé à partir du PV métabolique ($PV^{0,60}$) et ceux de la croissance protéique (EMpd) et lipidique (EMld) sont respectivement estimés avec des rendements de 0,64 et 0,83 (NOBLET et al, 1999). Le coût en EM est alors estimé à 36,96 kJ/g pour les protéines et 47,65 kJ/g pour les lipides. Considérant que l'EMm et l'EMpd sont prioritaires, l'EMld est calculée par différence avec l'EM ingérée. Finalement, Ld est estimée à partir de EMld alors que Pd est estimée à partir de PDmax, Pg, bpLYSg et EMpd.

1.1.4. Performances zootechniques

La connaissance du dépôt protéique permet de calculer le dépôt en eau et en minéraux (ARC, 1981) et en ajoutant celui des lipides, le gain de poids peut être calculé. Si la consommation journalière d'aliment est prise en compte, nous pouvons aussi calculer l'indice de consommation. Il en est de même pour les performances cumulées sur l'ensemble de la période étudiée.

1.2. Croissance et composition lipidique

Les acides gras stockés dans le tissu adipeux proviennent directement de l'alimentation ou ont été synthétisés *de novo* à partir des précurseurs non lipidiques (HENRY, 1977). Dans tous les cas, ils sont tributaires du mélange d'acides gras disponibles dans l'adipocyte au moment de leur estérification en triglycérides (WISEMAN et AGUNBIADI, 1998). L'acide oléique (C18:1=40-50%), le palmitique (C16:0=20-30%), le stéarique (C18:0=10-15%), le linoléique (C18:2=5-20%), le linoléique (C18:3=1-5%), le palmitoléique (C16:1=1-3%) et le myristique (C14:0=0-2%) sont majoritaires dans le tissu adipeux du porc à 100 kg PV. En conditions d'alimentation standard, ces sept acides gras peuvent représenter 99% des acides gras détectés par chromatographie en phase gazeuse sur des échantillons du tissu adipeux de la bardière.

1.2.1. Acides gras alimentaires

Un coefficient de digestibilité iléale individuel a été appliqué aux acides gras d'origine alimentaire (JORGENSEN et al, 1993), et on admet qu'ils sont absorbés et stockés sans aucun changement de leur structure moléculaire (LEAT et COX, 1980). Les résultats disponibles sur le rendement de stockage des acides gras alimentaires varient de 50% (FLANZY et al, 1970) à 100% (CHWALIBOG et al, 1992). Cette variabilité des résultats nous a amenés à faire certaines hypothèses, suite à des simulations effectuées avec le modèle. Après avoir réfuté la valeur de 100%, sur la base des données de SOLOMON et al (1992), nous avons estimé le rendement de stockage des acides gras alimentaires à 90%, sur la base des données de l'ITP (1992). Les 10% d'acides gras restants sont dirigés vers la synthèse *de novo* en tant que source de chaînes carbonées.

1.2.2. Acides gras synthétisés *de novo*

Dans le modèle, seuls les acides gras majeurs sont pris en compte et l'hypothèse est faite qu'ils correspondent à 80% du dépôt de lipides. Les 20% restants correspondent à des acides gras non identifiés, au glycérol et à la fraction insaponifiable. La quantité d'acides gras alimentaires stockés étant connue (cf. § 1.2.1), la quantité d'acides gras synthétisés *de novo* peut être calculée par différence avec le dépôt total de lipides (Ld, cf. § 1.1.3). La question qui se pose alors est de savoir comment répartir cette quantité totale entre les différents acides gras. La synthèse *de novo* s'arrête au C16:0 mais, l'acide oléique étant majoritaire, il faut admettre que des phénomènes importants d'élongation (C18:0) et de désaturation (C18:1) doivent intervenir, bien que l'activité $\Delta 9$ -désaturase soit faible chez le porc (KOUBA et al., 1998). Des bilans établis avec un aliment lipidoprive (FLANZY et al, 1970) ont permis d'observer que la composition en acides gras du gain de poids vif devrait être proche de 30, 20 et 50 % respectivement pour le C16:0, le C18:0 et le C18:1. On a donc fait l'hypothèse d'une composition de 29, 19 et 48 % pour ces mêmes acides gras et de 1,5 et 2,5 % pour le C14:0 et le C16:1 synthétisés *de novo*.

1.2.3. Composition en acides gras du tissu adipeux

Connaissant les quantités de lipides déposés et d'acides gras alimentaires et synthétisés *de novo* puis stockés (figure 2, p. 308), les pourcentages respectifs des acides gras individuels ou par classes, tels que les saturés, les insaturés, les mono ou polyinsaturés peuvent alors être calculés. Cependant cette composition correspond à celle de l'animal entier, alors que l'un des objectifs est de prédire la composition dans les tissus, notamment de la bardière, même si celle-ci représente moins de 20% des lipides totaux du porc à 100 kg PV (KARÉGÉ, 1991). Il existe des différences de composition en acides gras des tissus sous-cutané, périrénal, inter et intramusculaire (BOUT et al, 1988). Cependant, par manque d'informations précises sur la répartition et la composition des lipides entre les dépôts tissulaires, l'hypothèse d'une composition des lipides de la bardière similaire à celle des lipides de l'animal entier est faite.

Figure 2 – Lipides totaux et acides gras accumulés par le porc au cours de la croissance (Mâles castrés et femelles, nourris avec un régime à 4% MG et restreints en finition; GERFAULT et al, 2000)

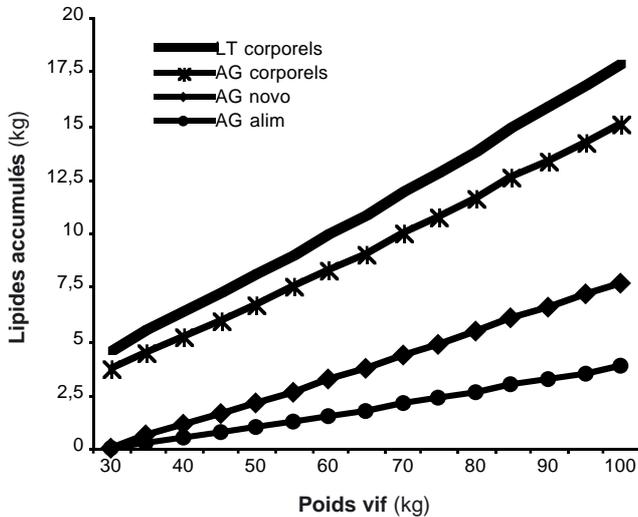
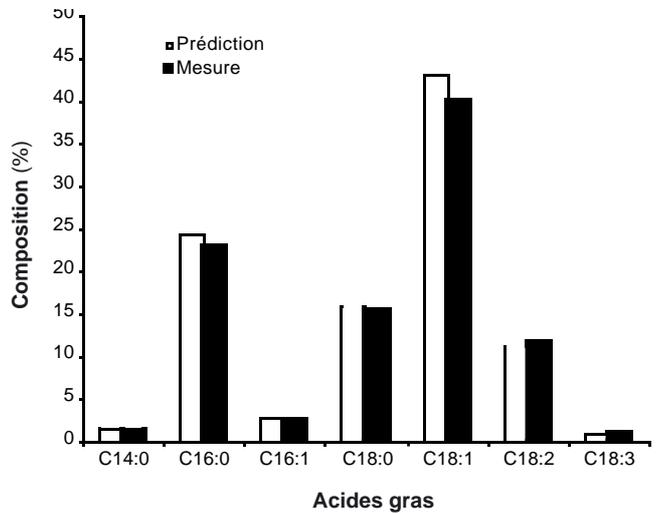


Figure 3 – Comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la composition en acides gras de la bardière, chez le porc abattu à 100 kg PV (Mâles castrés et femelles, nourris avec un régime à 4% MG et restreints en finition; GERFAULT et al, 2000)



2. ÉVALUATION DU MODÈLE

2.1. Expérience 1

Les performances de 64 porcs mâles castrés et femelles [$Pi*(LW*LR)$] entre 25 et 100 kg de poids vif ont été mesurées dans une expérience décrite plus en détail par GERFAULT et al (2000). Les animaux ont été nourris ad libitum jusqu'à 75 kg et au-delà limités à 2,6 kg/j. Un seul aliment qui contenait 13,5 MJ d'ED, 180 g de MAT, 9,5 g de lysine, 40 g de matières grasses et 10 g d'acide linoléique par kg a été utilisé. La composition en acides gras (%) de l'aliment était la suivante : 21,4 de C16:0, 8,5 de C18:0, 28,6 de C18:1, 34,8 de C18:2 et 3,2 de C18:3. Des échantillons de tissu adipeux sous-cutané dorsal (bardière) ont été prélevés à l'abattage et leur composition en acides gras a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse. Les animaux étaient tous issus d'une expérience précédente où 4 aliments contenant des sources de matières grasses différentes avaient été distribués à leurs mères (GERFAULT et al, 1999). De façon à prendre en compte l'éventuel effet de certains acides gras mineurs non prédits par le modèle, la prédiction des acides gras majeurs a été, au préalable, réduite à 95% des acides gras totaux. Par ailleurs, en fonction des performances de croissance observées, un PDmax constant de 170 g/j a été attribué à l'ensemble des animaux.

Lors des simulations et en dépit d'une légère surestimation du pourcentage du C18:1, on a pu constater que les prédictions de l'ensemble de la composition en acides gras sont en accord avec les résultats obtenus en laboratoire (figure 3). La différence observée pour le C18:1 ($\approx 3\%$) est minimale et peut être attribuée aux arrière effets de l'expérience précédente, notamment à la nature des lipides de l'aliment. D'après ces résultats, le modèle semble valide pour la

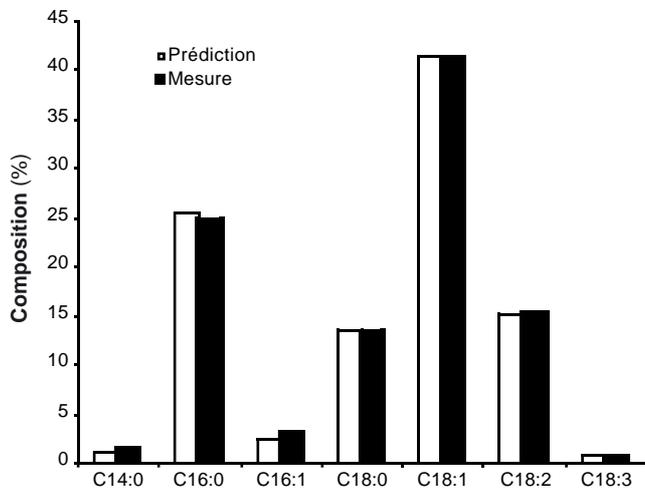
prédiction de la composition en acides gras majeurs du tissu adipeux.

2.2. Expérience 2

Dans cette deuxième expérience, dix-huit porcs mâles castrés [$Pi*(LW*LR)$] ont été élevés à 22°C et nourris ad libitum avec un aliment de croissance, puis de finition. Compte tenu de leur croissance élevée, un PDmax constant de 200 g/j a été considéré. Deux régimes, un témoin conventionnel et un deuxième régime à faible teneur en protéines mais supplémenté en acides aminés de synthèse et en amidon, contenant 27 g de matières grasses et 12 g d'acide linoléique par kg ont été distribués. Leur composition en acides gras (%) était la suivante : 15,5 de C16:0, 2,4 de C18:0, 22,8 de C18:1, 55,1 de C18:2 et 2,9 de C18:3. Dans un troisième régime, également à teneur réduite en protéines, l'amidon a été partiellement remplacé par des lipides. Ce régime contenait 60 g de matières grasses et 22 g d'acide linoléique par kg, et la composition en acides gras (%) était la suivante : 16,5 de C16:0, 8,4 de C18:0, 27,1 de C18:1, 43,8 de C18:2 et 1,4 de C18:3 (LE BELLEGO et al, communication personnelle).

Cette expérience nous a permis d'observer que les prédictions de la composition en acides gras et en lipides totaux étaient tout à fait cohérentes avec les valeurs mesurées, que ce soit pour les régimes plus conventionnels (figure 4) ou pour le régime à teneur élevée en lipides. En outre, l'effet de cet enrichissement du régime en lipides a pu être observé au cours de la croissance, via l'augmentation du C18:2 d'origine alimentaire, et la réduction du C16:0 et du C18:1 plutôt synthétisés. Cette comparaison des résultats montre que le modèle peut prédire de façon satisfaisante la composition en acides gras de la bardière du porc à l'abattage.

Figure 4 – Comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la composition en acides gras de la bardière, chez le porc abattu à 100 kg PV (Mâles castrés, nourris avec le régime à 2,6% MG et 12 g/kg de C18:2; LE BELLEGO et al, communication personnelle)



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

À la lumière des tests réalisés sur les données des deux expériences, il apparaît que les prédictions de composition en acides gras sont cohérentes avec les résultats observés. Par ailleurs, la construction de ce modèle, nous a permis de mettre en évidence des lacunes de connaissances importantes, comme le rendement de stockage des acides gras alimentaires, la composition des acides gras synthétisés *de novo*, le profil en acides gras des lipides des différents tissus ou des pièces de découpe. Après intégration de cette information, il nous semble que la modélisation de la croissance lipidique peut devenir un outil opérationnel pour prédire les effets des stratégies alimentaires sur la composition de la carcasse et la qualité des tissus gras. Toutefois, notre modèle est basé sur une approche de prédiction des performances et des besoins nutritionnels qui est relativement simplifiée, ce qui limite la précision et la fiabilité des estimations de la qualité du gras. C'est pourquoi l'approche que nous avons développée ici sera associée à moyen terme à un modèle plus complet de prédiction des performances et des besoins.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.R.C., 1981. The nutrient Requirements of Pigs, Commonwealth Agricultural Bureaux, London UK, 307 p.
- BOUT J., GIRARD J.P., SELIER P., RUNAVOT J.P., SALORT D., 1988. Journées Rech. Porcine en France, 20, 279-284.
- CAMARA M., MOUROT J., CHÉROT P., MOUNIER A., 1994. Journées Rech. Porcine en France, 26, 163-168.
- I.T.P., 1992. Action concertée CPCAA, 16 p.
- CHWALIBOG A., JACOKSEN K., HENCKEL S., THORBEG G., 1992. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 68, 123-135.
- DE LANGE, C.F.M.; 1995. In "Modelling Growth in the Pig", P.J. Moughan, M.W.A. Verstegen, M.I. Visser-Reyneveld (Eds), 71-85 Wageningen Pers, Pays-Bas.
- DESMOULIN B., ÉCOLAN P., BONNEAU M., 1988. INRA Prod. Anim.1, 59-64.
- FLANZY J., FRANÇOIS A.C., RÉRAT A., 1970. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 10, 603-620.
- GERFAULT V., MOUROT J., ÉTIENNE M., MOUNIER A., 1999. Journées Rech. Porcine en France 31, 191-197.
- GERFAULT V., ROMÃO M., MOUNIER A., M. ÉTIENNE, J. MOUROT, 2000. Journées Rech. Porcine en France, 32, 291-296.
- GIRARD J.P., BOUT J., SALORT D., 1988. Journées Rech. Porcine en France, 26, 255-278.
- HENRY Y., 1977. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 17, 923-952
- JORGENSEN H., JAKOBSEN K., EGGUM B.O., 1993. Acta Agric. Scand.(Anim. Sci.), 43, 101-106.
- KARÉGÉ C., 1991. Influence de l'âge et du sexe sur l'utilisation de l'énergie et la composition corporelle, chez le porc en croissance. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 254 p.
- KOUBA M., MOUROT P., PEINIAU P., 1998. Comp. Biochem. Physiol., 118B, 509-514.
- LEAT W.M.F., COX R.W., 1980. In "Growth in animals", T.L.J. Lawrence (Ed.), Butterworths, London, UK - 137-174.
- LEBRET B., MOUROT J., 1998. INRA Prod. Anim., 11, 131-143.
- MERSMANN H.J., 1986. J. Anim. Sci., 63, 757-769.
- NOBLET J., KARÉGÉ C., DUBOIS S., VAN MILGEN J., 1999. J. Anim. Sci., 77, 1208-1216.
- N.R.C., 1998. The Nutrient Requirements of Swine. National Academy Press, Washington, 189 p.
- NURNBERG K., WEGNER J., ENDER K., 1998. Livest. Prod. Sci. 56, 145-156.
- SOLOMON M.B., PURSEL V.G., PAROCZAY E.W., BOLT D.J., 1992. J. Anim. Sci., 72, 1242-1246.
- VAN MILGEN, J., 1999. Feed Mix, 7, 22-24.
- VAN MILGEN J., NOBLET J., 1999. Journées Rech. Porcine en France, 31, 249-254.
- WISEMAN J., AGUNBIADÉ J.A., 1998. Livest. Prod. Sci., 54, 215-225.