

Etat des lieux et perspectives sur la nutrition du porc

Jean NOBLET, Jean-Yves DOURMAD, Jaap VAN MILGEN

INRA, UMR PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

Agrocampus Ouest, UMR PEGASE, 35000 Rennes, France

jean.noblet@rennes.inra.fr

Etat des lieux et perspectives sur la nutrition du porc

L'alimentation du porc représente une part majeure du coût de production (environ 60-70%) et est un puissant levier pour maîtriser le niveau des performances. L'aliment et ses caractéristiques se retrouvent également dans les piliers sociétal, environnemental et économique du développement durable au travers, par exemple, de la modulation de l'impact sur l'environnement, sur le comportement et la santé des animaux ou sur la qualité des produits et, bien entendu, sur l'efficacité technico-économique du système de production. L'objet de cette synthèse est de faire un état des lieux des connaissances actuelles sur la nutrition du porc et de tirer quelques perspectives sur les recherches futures. Les travaux conduits depuis 25 ans ont permis de produire, d'une part, des concepts et des données nouvelles pour évaluer les aliments tels que les acides aminés digestibles au niveau iléal, la valeur énergétique nette fonction du stade physiologique du porc ou la teneur en phosphore digestible et, d'autre part, les connaissances et les outils pour évaluer les besoins nutritionnels du porc par les méthodes factorielles ou les techniques de modélisation de façon à s'adapter à l'évolution continue des caractéristiques des animaux ou à de nouveaux objectifs, contextes et contraintes de production. Les futurs travaux et outils à développer devront viser la caractérisation rapide et fiable des aliments (méthodes NIR, par exemple), une meilleure utilisation digestive des parois végétales (par les enzymes, par exemple), une nutrition de plus en plus précise adaptée à chaque porc (modèles stochastiques) et, de façon résumée, une amélioration du rendement d'utilisation de toutes les ressources alimentaires disponibles pour leur transformation en protéines animales par le porc.

State of the art and perspectives in pig nutrition

Feed represents up to 60-70% of the total cost of pig production and is a powerful tool for controlling performance. Feed and its characteristics are also involved in the society, environmental and economic pillars of sustainable development including, for instance, control of the impact of animal production on the environment, animal welfare, product quality and the technical and economic efficiency of production systems. The objective of this review is to summarize the available knowledge on pig nutrition and to provide a few areas for future research. Studies conducted over the last 25 years have produced new concepts and data for evaluating feeds, such as the standardized ileal digestible amino acid content, the net energy values dependent on physiological stage or the digestible phosphorus content. They have also produced knowledge and tools for evaluating nutritional requirements according to factorial methods and modelling techniques, in order to follow regular changes in animal characteristics or in the objectives, constraints and contexts of production. Future research and new tools should focus on the rapid characterisation of the nutritional value of feeds (NIR methods, for instance), on improving the digestive utilization of dietary fibre (with enzymes, for instance), with precise nutrition adapted to each pig (stochastic models) and, more globally, on improving the efficient use of all feed resources for the pig to transform them into animal proteins.

INTRODUCTION

L'alimentation du porc représente une part majeure de son coût de production (environ 60-70%) et est un puissant levier pour maîtriser le niveau des performances. L'aliment et ses caractéristiques se retrouvent également dans les piliers sociétal, environnemental et économique du développement durable au travers, par exemple, de la modulation de l'impact sur l'environnement, sur le comportement et la santé des animaux ou sur la qualité des produits et, bien entendu, de l'efficacité technico-économique du système de production. Par ailleurs, les contextes national, européen et international de la production porcine ont évolué avec une concurrence accrue entre zones de production, des fluctuations importantes des coûts de production et, en particulier, du coût, de la nature (non utilisation des "farines animales", arrivée des drèches d'éthanol, etc.) et de la disponibilité des matières premières utilisables par le porc et des évolutions dans les pratiques d'élevage (immuno-castration des mâles ou élevage des truies en groupe, par exemple) et, bien sûr, des caractéristiques génétiques des porcs (moindre adiposité, truies plus prolifiques, etc.). Dans un objectif de moindre développement de résistances aux antibiotiques tant chez l'animal que chez l'Homme, le recours systématique aux antibiotiques facteurs de croissance a été nettement diminué dans de nombreux pays. Parallèlement, le rôle de l'aliment dans le contrôle de la santé du porc s'est accru. Enfin, au moins à une échelle internationale, on a assisté à l'exposition plus fréquente du porc ou, plus précisément, d'une plus grande proportion des porcs, à des températures ambiantes élevées.

Dans un tel contexte fortement évolutif, les connaissances sur les caractéristiques des aliments, les besoins nutritionnels des porcs et leur mise en œuvre au niveau des pratiques alimentaires en production porcine se sont adaptées avec l'apparition de nouveaux concepts et outils. L'objectif principal de cette synthèse est d'établir un état des lieux des connaissances acquises au cours des 25 dernières années et disponibles pour gérer l'alimentation des porcs en fonction des différentes "contraintes" évoquées ci-dessus. Des perspectives sur les futurs éléments à gérer en matière d'alimentation du porc et les projets de recherche à mettre en œuvre seront dégagés dans une dernière partie. Cette synthèse abordera peu ou pas certaines pratiques passant par l'aliment telles que l'utilisation des pré- et probiotiques, des enzymes, des levures, des acides, des acides gras (omega 3), etc. ajoutées dans l'aliment et pouvant avoir des effets sur la santé, le niveau d'ingestion, la qualité de la viande ou, plus globalement, les performances des porcs. Elle sera centrée sur le porc en croissance-finition et la truie en reproduction et abordera donc très peu la situation particulière du porcelet lors des 4-5 semaines qui suivent le sevrage.

1. EVALUATION DES ALIMENTS DU PORC

L'aliment mis à disposition des animaux contribue à la couverture de leurs besoins énergétiques, protéiques, minéraux, vitaminiques, etc. Cet aliment qui devra répondre à des caractéristiques nutritionnelles spécifiques de chaque type de porc dans son environnement (voir partie suivante) est préparé à partir de matières premières qu'il est nécessaire d'évaluer de la manière la plus précise et pertinente possible; la précision de cette évaluation est d'autant plus nécessaire que le nombre et la variabilité de composition de ces matières premières sont élevées.

Par ailleurs, l'apparition de nouvelles matières premières telles que les drèches de blé ou de maïs issues de la production d'éthanol ("DDGS") ou, plus généralement, la disponibilité accrue de coproduits de l'agro-industrie pour l'alimentation des porcs ont clairement accentué l'importance de méthodes d'évaluation des aliments aussi précises que possible. Cette première partie décrit les méthodes et les concepts d'évaluation qui ont été progressivement mis en place pour évaluer les aliments; des détails sur les méthodologies utilisées pour générer les résultats sont donnés dans des articles de synthèse (Stein *et al.*, 2007 pour les protéines ; Noblet et van Milgen, 2004 pour l'énergie ; Jondreville et Dourmad, 2005, pour les minéraux) disponibles par ailleurs.

1.1. Valeur protéique

A la fin des années 1980, la valeur protéique des aliments du porc était appréciée par la teneur en protéines (ou matières azotées totales : MAT ; $N \times 6,25$) et les teneurs en acides aminés (AA) totaux. Mais il est vite apparu que ces indicateurs étaient très insuffisants en ne prenant pas en compte les variations de la digestibilité et de la disponibilité des AA entre matières premières, y compris avec les AA industriels (lysine et méthionine, par exemple) dont l'utilisation se mettait progressivement en place dans les aliments des porcs et des volailles (Sève et Hess, 2000). Pour ce qui concerne la digestibilité des AA, les différents travaux ont montré que la digestibilité fécale est peu indicative de la valeur protéique de l'aliment en raison des remaniements intervenant dans le gros intestin et de l'absorption d'azote dans le gros intestin qui n'est pas sous forme d'AA (Knabe *et al.*, 1989). A l'inverse, la digestibilité mesurée à la fin de l'iléon rend beaucoup mieux compte de la quantité d'AA absorbés et disponibles pour l'animal, le concept de digestibilité iléale standardisée (SID) devenant progressivement la référence au niveau international (Stein *et al.*, 2007). C'est sur cette base qu'ont été réalisés les travaux de l'ITCF (devenu Arvalis ; soutenus par Ajinomoto), d'Avantis (devenu Adisseo) et de l'INRA pour évaluer la SID des AA d'un nombre conséquent de matières premières qui, après leur mise en commun, ont donné lieu à la publication de Amipig (2000) et des Tables INRA-AFZ (2002). Cette base de données demeure la principale source de valeurs de SID des AA chez le porc au niveau international, obtenues sur un grand nombre d'échantillons avec des méthodologies comparables et analysées sur des bases concertées. Les avantages du concept SID ont été présentés dans de nombreux textes (Tables INRA-AFZ, 2002 ; Stein *et al.*, 2007) et font l'objet d'un consensus international mis en œuvre dans la plupart des tables de valeurs nutritionnelles des aliments pour le porc. Les changements de valeur relative des AA exprimés en AA bruts et AA "SID" pour quelques matières premières sont illustrés dans le tableau 1. L'impact du mode d'évaluation est surtout important pour les AA industriels ou les matières premières comme le tourteau de soja très riches en AA essentiels (lysine, en particulier).

Même si le concept SID fait l'objet d'un large consensus, des méthodes plus élaborées telles que la digestibilité iléale vraie (ou réelle) ont fait l'objet de travaux et des résultats ont été publiés pour quelques matières premières. Mais ces résultats ne permettent pas de construire des tables de valeur protéique basées sur ce concept. Toutefois, le problème essentiel du concept SID est le manque de relation directe entre les acides aminés SID et les AA disponibles (ou "available") pour l'animal dans certaines situations comme un traitement thermique excessif ou encore en présence de facteurs antinutritionnels.

Ce problème, soulevé de longue date par l'équipe de Batterham en Australie (Batterham *et al.*, 1990 ; van Barneveld *et al.*, 1994) a été remis en avant lors de mesures réalisées sur les DDGS dont en particulier la lysine et l'arginine peuvent devenir peu digestibles lorsque le séchage est inadéquat ou excessif (Pahm *et al.*, 2009 ; Cozannet *et al.*, 2010) avec de surcroît une surestimation des teneurs en lysine réellement utilisable (ou lysine réactive) pour la synthèse protéique. Ce problème non résolu risque de s'accroître avec l'utilisation plus marquée dans l'alimentation des porcs de (co)produits ayant subi un traitement thermique. Enfin, à notre connaissance, il n'y a pas lieu d'utiliser des valeurs SID différentes en fonction du stade physiologique du porc.

En conclusion, le concept de digestibilité iléale standardisée des AA représente une avancée très notable et largement acceptée pour estimer la valeur protéique des aliments du porc, même si des progrès sont attendus pour quantifier les AA digestibles qui ne sont pas disponibles en tant que tel pour l'animal. Ce problème est d'autant plus important qu'il concerne essentiellement la lysine, l'acide aminé essentiel le plus limitant dans la plupart des situations pratiques. Des méthodes rapides et précises pour caractériser la disponibilité des AA (proche infra-rouge ou NIR, par exemple) sont attendues.

1.2. Valeur énergétique

Jusque la fin des années 1980, la valeur énergétique des aliments pour le porc était estimée sur la base de leurs teneurs en énergie digestible (ED) ou en énergie métabolisable (EM), à

l'exception de quelques pays (Danemark, Pays-Bas et Allemagne de l'Est) qui utilisaient un système énergie nette (EN) élaboré avec des porcs déposant une très large part de leur énergie sous forme de lipides. Les travaux conduits à l'INRA dans les années 1985-1995 ont permis de proposer un nouveau système EN basé sur un fractionnement plus complet de la matière organique et des mesures réalisées avec des porcs maigres à croissance rapide (Noblet *et al.*, 1994a). Les résultats ont confirmé et précisé les différences de rendement d'utilisation de l'EM des différents nutriments en EN chez le porc (Tableau 2). Ces travaux ont également mis en évidence que le nouveau système EN pouvait être appliqué à des porcs de différents poids vifs, voire de différents génotypes, et surtout à des truies en reproduction (Noblet *et al.*, 1993a ; 1994b). Les mêmes équations de prédiction de la teneur en EN peuvent donc être utilisées à tous les stades de production et quel que soit le potentiel génétique des porcs : ceci représente une simplification majeure dans le calcul de la valeur EN chez le porc. Par ailleurs, les travaux ont mis en évidence que, même si ce système EN avait été mis au point avec des aliments complets, il s'appliquait également aux matières premières (Noblet *et al.*, 1993b). Enfin, ce système EN a donné lieu à de nombreuses validations à partir de nouvelles mesures en chambres respiratoires (van Milgen *et al.*, 2001) et surtout d'essais zootechniques qui ont mis en évidence la supériorité d'un système EN sur les systèmes ED ou EM pour prédire les performances du porc (Noblet *et al.*, 1994c ; Noblet et van Milgen, 2013).

Tableau 1 – Valeurs nutritionnelles relatives de quelques matières premières pour le porc¹

Matière première	Lysine		Thréonine		Valeurs énergétiques			Phosphore	
	Totale	SID	Totale	SID	ED	EM	EN	Total	Digestible
Blé	35	33	49	48	101	102	105	80	96
Maïs	28	25	46	45	103	105	111	65	48
Tourteau de soja	329	347	279	292	107	102	81	154	132
Tourteau de colza	205	177	220	194	84	80	63	283	242
Pois	171	162	119	107	101	100	97	99	125
Son de blé	66	52	71	55	68	67	63	246	329
Huile végétale	-	-	-	-	243	251	298	-	-
Mélange acides aminés ²	4441	5100	3805	4497	147	141	145	-	-

¹ A partir des données des Tables INRA-AFZ (2002) ; données exprimées en % du contenu d'un régime contenant 31,5% de blé, 31,5% de maïs, 2,8% d'huile, 5% de son de blé, 15% de tourteau de soja, 5% de tourteau de colza, 5% de pois, 0,20% d'un mélange d'AA et 4% de complément oligo-vitamines ; SID : digestible iléal standardisé ; ED, EM, EN : respectivement énergie digestible, métabolisable et nette ; pour le phosphore (P), teneur en P digestible avec phytase native.

² Le mélange d'AA est constitué de 0,10% de Lysine-HCl, 0,05% de DL-méthionine et 0,05% de L-thréonine.

Tableau 2 - Rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable (EM) chez le Porc

Stade	Production	EM ou composante de EM	Rendement, %	Référence ¹
Adulte	Entretien	EM	77	A
Croissance/gestation	Gain de protéines	EM	60	B, C
	Gain de lipides	EM	80	B, C
	Gain de poids vif	EM	74	D
Gestation	Croissance utérine	EM	50	C
Lactation	Lait	EM	72	E
Croissance	Gain de poids vif et entretien	Lipides	90	D
		Amidon	82	D
		Protéines	58	D
		Parois végétales	58	D

¹ A : Noblet et al. (1993a), B : Noblet et al. (1999), C : Noblet et Etienne (1987a), D : Noblet et al. (1994a), E : Noblet et Etienne (1987b).

Comme pour les AA, les valeurs ED, EM et EN classent différemment les matières premières (Tableau 1) avec des conséquences sur les résultats de la formulation au moindre coût. Compte tenu des différences de rendements d'utilisation de l'EM entre nutriments (Tableau 2), le système EN conduit à des aliments ayant des teneurs plus faibles en MAT, et donc plus supplémentés en AA industriels, et plus élevées en matières grasses.

Des travaux menés en parallèle de ceux sur la mise au point d'un système EN ont confirmé que le facteur de variation majeur de la digestibilité de l'énergie (dE) d'un aliment est sa teneur en parois végétales du fait que l'énergie brute de celles-ci est moins digestible (40-50%) que celle des autres nutriments comme l'amidon, les lipides et les protéines (85-100%). Mais ils ont également montré que dE s'accroît avec l'augmentation du poids vif du porc, ce qui génère des écarts particulièrement importants entre le porc en croissance et la truie adulte en reproduction (Noblet et Shi, 1993 ; Le Goff et Noblet, 2001). Ce résultat a conduit à proposer deux valeurs ED, EM et EN pour le porc dans les Tables INRA-AFZ (2002). Des systèmes plus élaborés avec trois à quatre valeurs énergétiques selon le stade physiologique du porc sont utilisés dans certains pays ou par certaines structures mais à titre non officiel (i.e. pas de tables). D'autres travaux ont montré que dE dépend aussi de la technologie de préparation des aliments avec des effets positifs de la granulation (ou de l'extrusion) ou de la finesse des particules (Skiba *et al.*, 2002 ; Le Gall *et al.*, 2009a). Toutefois, les données de la littérature sont insuffisantes et non exhaustives pour proposer des tables de valeurs alimentaires prenant en compte les effets de la technologie, d'autant que ceux-ci deviennent multiples avec l'ajout de suppléments (enzymes, acides, etc.) et que ces effets ne sont pas additifs et varient avec la nature de la matière première. Enfin, des travaux très récents mettent en évidence une composante génétique dans la variabilité phénotypique de la dE d'un aliment entre animaux, sans qu'une analyse des gènes impliqués n'ait été abordée (Noblet *et al.*, 2013).

En conclusion, les travaux menés notamment par l'INRA ont permis de faire évoluer les systèmes d'évaluation de l'énergie des aliments du porc au niveau international. En 2016, une mise à jour des tables de valeurs énergétiques est nécessaire pour les matières premières nouvelles, notamment dans les pays tropicaux où la production porcine se développe rapidement. La proposition de plus de deux valeurs énergétiques, voire de valeurs énergétiques liées de façon continue au poids vif et/ou au stade physiologique du porc sera également à envisager. Cette dernière évolution serait cohérente avec des modèles de prédiction des besoins nutritionnels et des performances qui soient plus performants et en phase avec la mise en place d'une nutrition de précision.

1.3. Valeur minérale

Jusqu'à la fin des années 1990, la valeur minérale des aliments était encore exprimée sur la base du phosphore (P) et du calcium (Ca) total alors que les travaux de Pointillart (1994) indiquaient déjà qu'il existait une très grande variabilité dans la digestibilité du phosphore des différentes matières premières et aussi entre les différentes sources minérales de phosphates.

En 2002, les Tables INRA-AFZ introduisent la notion de digestibilité fécale apparente déjà utilisée dans les Tables CVB. Les valeurs regroupées dans ces nouvelles tables sont issues de mesures de digestibilité fécale et s'appuient sur les informations présentes dans la bibliographie, en particulier sur

les travaux menés par Arvalis-Institut du Végétal (Skiba *et al.*, 2004) et à l'INRA (Pointillart, 1994). Afin de tenir compte de l'effet des phytases végétales contenues dans certaines matières premières et de la forte sensibilité de ces phytases à la chaleur, deux valeurs de digestibilité apparente du phosphore sont proposées : l'une (dP) correspondant à une matière première dont la phytase intrinsèque est dénaturée et l'autre (dPphy) correspondant à la matière première native. Schématiquement, la première valeur peut être utilisée pour les aliments granulés et la seconde pour les aliments en farine. Pour les matières premières à activité phytasique significative, comme les céréales à paille et leurs coproduits, dPphy est supérieure à dP (respectivement 45 et 30% pour le blé tendre, par exemple) (Tableau 1). La valeur en phosphore des matières premières est aussi parfois évaluée en termes de biodisponibilité (NRC, 2012). La valeur en phosphore est alors déterminée relativement (en %) à une source de référence, généralement le phosphate monosodique, sur la base de la comparaison des pentes de la relation dose-réponse de la référence et de la source à tester.

L'arrivée des phytases microbiennes à la fin des années 1990 constitue sûrement l'élément le plus marquant de l'évolution de la nutrition minérale des animaux monogastriques. Leur ajout dans les aliments permet d'améliorer la digestibilité du phosphore phytique et, par conséquent, de réduire l'incorporation de phosphore minéral. Toutefois, l'évolution de la teneur en phosphore digestible à des niveaux croissants de phytase est curvilinéaire et la dégradation du phosphore phytique avant les sites d'absorption n'excède jamais 60-70 %, même à des niveaux élevés de phytase ajoutée. Des équations d'équivalence entre phytase microbienne et phosphore digestible apparent ont été établies à partir des données de la littérature. En pratique, il est donc important de prendre en compte cette décroissance de la réponse marginale aux apports de phytase microbienne et aussi les interactions possibles avec les phytases naturelles qui peuvent déjà être présentes dans les aliments en farine (Jondreville et Dourmad, 2005). Des outils tels que EvaPig® (www.evapig.com) le permettent.

Pour le calcium, les valeurs restent exprimées en calcium total. Pour cet élément, la notion de digestibilité présente d'ailleurs des limites dans la mesure où l'absorption est largement régulée par le besoin. Pour le cuivre et le zinc, les apports et les besoins restent également généralement exprimés en cuivre et zinc total. Des valeurs de biodisponibilité sont toutefois disponibles dans la bibliographie, le plus souvent relativement à la forme sulfate qui est prise comme référence.

1.4. Conclusion sur la valeur des aliments

En conclusion générale de cette première partie, on peut estimer que les concepts et les mesures concernant la valeur nutritionnelle des aliments du porc ont été bien documentés au cours des 25 dernières années, en particulier par des travaux réalisés en France. Toutefois, les matières premières utilisées évoluent constamment dans le temps et l'espace, voire subissent des traitements technologiques ayant tant des impacts positifs que négatifs, et il est bien sûr impossible de les évaluer sur animaux sur une base exhaustive. Des outils tels qu'EvaPig® ou des équations de prédiction permettent de prendre en compte partiellement cette variabilité continue. Une avancée majeure dans l'estimation précise de la valeur nutritionnelle des aliments du porc sera apportée par la mise à disposition de méthodes rapides et fiables d'évaluation de la valeur nutritionnelle.

Les méthodes *in vitro* sont une première étape. Les méthodes NIR sont certainement plus prometteuses mais également complexes dès que l'on envisage la prise en compte des nombreux facteurs impliqués dans la définition de la valeur nutritionnelle d'un aliment. On peut également penser que des critères comme la valeur bien-être, la valeur santé ou encore l'impact environnemental devront progressivement prendre une place dans les contraintes de formulation d'un aliment. Enfin, on peut remarquer que les travaux sur la valeur des aliments des porcs ont été conduits essentiellement en Europe jusqu'en 2000. Leur développement important depuis cette date aux USA ou en Chine devrait permettre d'assurer une continuité et de nouveaux développements tels que ceux listés ci-dessus.

2. BESOINS NUTRITIONNELS DU PORC

Jusqu'aux années 1980, les besoins nutritionnels du porc étaient établis de façon empirique avec des recommandations moyennes d'apports de protéines (et AA), d'énergie, de minéraux et de vitamines censées s'appliquer à la moyenne des porcs présents en Europe et en Amérique du Nord. Mais il est vite apparu que 1/ les caractéristiques des animaux telles que l'adiposité des porcs en croissance ou la productivité des truies évoluaient considérablement, 2/ l'environnement (climatique, sanitaire, etc.) des animaux pouvait être variable ou 3/ tout simplement, l'optimisation des caractéristiques des aliments pour limiter les rejets et améliorer l'efficacité du système de production devenait une nécessité. Ces évolutions majeures remettaient en cause le concept de recommandation nutritionnelle moyenne et amenaient à définir des besoins nutritionnels propres à chaque catégorie de porcs qui soient fonction de leur stade physiologique et leur poids vif, de leur potentiel génétique et de l'environnement dans lequel ils sont élevés. La démarche factorielle dans laquelle toutes les composantes du besoin en protéines et AA, en énergie ou en minéraux (phosphore, notamment) sont prises en compte, est alors devenue la méthode de référence pour définir les besoins nutritionnels des porcs qui sont susceptibles d'évoluer régulièrement dans le temps et dans l'espace, voire même brutalement lors de ruptures technologiques comme l'abandon de la castration des porcs mâles. Les données de base de cette méthode factorielle ont également été utilisées dans la construction des modèles de prédiction des besoins nutritionnels et des performances des porcs. Dans cette partie, nous présenterons les principaux éléments de la démarche factorielle d'établissement des besoins en nutriments et en énergie du porc.

2.1. Besoins protéiques

La connaissance de la réponse de l'animal aux apports en AA est essentielle pour la formulation des aliments. Un apport déficitaire en AA résulte en une baisse de performances alors qu'un apport excédentaire est coûteux et conduit à une utilisation diminuée de l'azote. Les AA Lys, Met, Thr, Trp, Val, Ile, Leu, Phe, et His sont considérés comme indispensables (ou essentiels) et doivent être apportés par l'aliment car l'animal n'est pas capable de les synthétiser ou de les synthétiser à partir des précurseurs. Les chaînes carbonées de Ser, Gly, Arg, Pro, Glu, Gln, Asp, et Asn peuvent être synthétisées *de novo* par le porc et ces AA sont donc considérés comme non-essentiels (ou non essentiels), même si la capacité de synthèse peut être insuffisante à certains stades de la vie du porc.

Finalement, Tyr et Cys sont considérées comme semi-essentiels (ou semi-essentiels) car la Tyr peut être synthétisée à partir de Phe et la Cys à partir de Met et Ser. Le concept de la protéine idéale pour exprimer le besoin en AA a été développé par Mitchell (1964) puis documenté par Fuller (Fuller *et al.*, 1989) en Grande-Bretagne ou Baker (Chung et Baker, 1992) aux USA pour le porc. D'autres travaux plus récents (van Milgen et Dourmad, 2015) ont précisé et réajusté certaines valeurs. La protéine idéale a une composition en AA indispensables qui correspond exactement au besoin de l'animal. Parce que Lys est généralement le premier acide aminé limitant, la composition en AA de la protéine idéale est souvent exprimée par rapport à Lys. Bien que la composition de la protéine idéale soit souvent supposée constante pour un stade donné, des variations (faibles) peuvent exister au cours d'un stade de production en relation avec des modifications des contributions relatives des différentes composantes du besoin (entretien, production). Les recommandations de composition de la protéine idéale chez le porc aux différents stades physiologiques sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 - Composition de la protéine idéale chez le porc¹

Acide aminé	Porc en croissance	Truie en gestation	Truie en lactation
Méthionine (Met)	30	28	30
Met+Cystine (Cys)	60	65	60
Thréonine (Thr)	65	72	66
Tryptophane (Trp)	18	20	19
Valine (Val)	70	75	85
Isoleucine (Ile)	55	65	60
Leucine (Leu)	100	100	115
Phénylalanine (Phe)	50	60	60
Phe+Tyrosine (Tyr)	95	100	115
Histidine (His)	32	30	42
Arginine (Arg)	42	-	-

¹ Valeurs SID en % de la lysine SID utilisées dans InraPorc (www.rennes.inra.fr/inraporc).

Les besoins en AA peuvent être quantifiés en utilisant une approche factorielle où les différents composants et étapes dans l'utilisation de l'acide aminé sont considérées. Les bases de ces calculs sont détaillées par van Milgen *et al.* (2008) pour le porc en croissance et par Dourmad *et al.* (2008) pour la truie. Des exemples de calculs sont rapportés au tableau 4 pour le porc en croissance et la truie en reproduction.

La cinétique du dépôt de protéines par rapport à celle de l'ingestion détermine donc le besoin en Lys exprimé en g Lys SID/kg aliment. Chez le porc en croissance, ce besoin diminue lorsque le poids des animaux s'accroît. A l'inverse, chez la truie en gestation, le dépôt protéique s'accroît avec l'avancée de la gestation. Il en résulte un accroissement marqué des besoins en AA SID exprimés en g/kg aliment au cours de la gestation, et ce même si le niveau d'alimentation est accru en fin de gestation. Ces exemples montrent que la synthèse de protéines (corporelles, fœtales ou dans le lait) ainsi que le rendement maximal de l'utilisation de Lys sont les principaux déterminants du besoin, alors que le besoin relativement à l'aliment est fortement dépendant du besoin en énergie ou, tout simplement, de la consommation d'aliment. Les données indiquent que les contributions de l'entretien et de l'endogène basal sont modestes pour Lys (Tableau 4) alors qu'elles sont (un peu) plus importantes pour Thr et Val qui sont abondantes dans les sécrétions endogènes du tube digestif.

La détermination des besoins par l'approche factorielle est cependant réductrice car elle ne considère ce besoin qu'à travers les rôles des AA comme composants structuraux de protéines. Or, certains AA ont d'autres rôles (Le Floch *et al.*, 2012); à titre d'exemples, l'Arg est précurseur de NO, la Leu est stimulateur de la synthèse protéique, le Trp est impliqué dans la réponse inflammatoire, et la Cys dans le système antioxydant (via le glutathion). Néanmoins, la traduction de ces rôles en besoins quantitatifs et leur intégration dans les systèmes nutritionnels restent à réaliser. En particulier, il est difficile de traduire ces effets dans un profil de la protéine idéale adapté à chaque situation. A notre connaissance, seuls les niveaux de Try et Thr devraient être accrus en situation de challenge immunitaire (Le Floch *et al.*, 2012). Les besoins en AA peuvent aussi être déterminés expérimentalement par des études dose-réponse. La méthodologie de l'étude, le critère de réponse et le modèle statistique affectent l'estimation des besoins.

Bien que des travaux expérimentaux considérables aient été effectués pour déterminer les besoins en Lys, Met, Thr et Trp chez le porc en croissance (et dans une moindre mesure chez la truie) et, par conséquent, le rapport entre ces AA et Lys, la situation est différente pour d'autres AA essentiels. De plus, ces autres AA peuvent devenir limitants en cas d'utilisation de régimes à basse teneur en protéines. C'est pour cette raison qu'un programme de recherche pour déterminer les réponses du porc en croissance aux apports en Val, Ile, Leu, Phe, Tyr et His a été conduit à l'INRA (Gloaguen *et al.*, 2013; Tableau 3). Ces travaux ont montré qu'il demeure un potentiel pour réduire la teneur en protéines de l'aliment. Mais, avec cette réduction de la teneur en protéines dans l'aliment, les marges de sécurité diminuent et, dans ce cas, il faut également considérer les interactions potentielles entre AA comme, par exemple, entre les AA ramifiés (Leu, Ile et Val ; Gloaguen *et al.*, 2013).

Tableau 4 – Exemples de calcul factoriel des besoins en lysine digestible iléale standardisée pour le porc en croissance et la truie

	Porc en croissance	Truie en gestation ¹	Truie allaitante
Poids vif, kg	50	180	200
Ingestion d'aliment, kg matière sèche (MS) /j	2,3	2,8	5,5
Dépôt (ou sécrétion) de protéines, g/j	150	120	500
Teneur en lysine (Lys) des protéines, %	6,96	6,50	7,50
Rendement d'utilisation maximal de la Lys,%	72	65	80
Besoin en Lys pour l'entretien, g/(kg PV) ^{0,75} /j ²	0,028	0,036	0,036
Pertes endogènes basales en Lys, g/kg MS ingérée	0,313	-	-
Besoin en Lys pour le dépôt de protéines, g/j	14,5	12,0	46,9
Besoin en Lys pour l'entretien, g/j	0,5	1,8	1,9
Pertes endogènes basales en Lys, g/j	0,6	-	-
Besoin en Lys digestible, g/j	15,7	13,8	48,8
Besoin en Lys digestible, g/kg MS ingérée	6,8	4,9	8,9

¹ Truie en seconde portée dans le dernier mois de gestation. ² Pour les truies, le besoin d'entretien couvre également les pertes endogènes.

2.2. Besoins énergétiques

Il est usuel de fractionner les besoins énergétiques entre les besoins énergétiques d'entretien auxquels peuvent s'ajouter des besoins de thermorégulation (au froid) ou des dépenses d'activité physique additionnelles, et les besoins énergétiques de production représentés par un dépôt d'énergie : sous forme de gain de poids vif chez le porc en croissance ou la truie en gestation, de croissance utérine chez la truie en gestation, d'exportation d'énergie dans le lait chez la truie en lactation. La quantification de ces différents besoins énergétiques a été généralement faite sur une base EM et avec des régimes céréales-tourteau de soja. Or, le rendement d'utilisation de l'EM en EN de tels aliments est voisin de 74%, tant chez le porc en croissance que chez la truie en reproduction. Même si les rendements partiels d'utilisation de l'EM pour le dépôt d'énergie sous forme de lipides ou de protéines diffèrent de cette valeur moyenne (Tableau 2), les besoins énergétiques exprimés en EM peuvent être exprimés sur une base EN en les multipliant par 0,74 pour tous les stades de production. A l'inverse, le besoin en EM à partir du niveau des productions (gain de poids, lait, etc.) peut être calculé en divisant l'énergie produite par le rendement correspondant (Tableau 2). Les besoins énergétiques d'entretien sont proportionnels au poids métabolique du porc, celui-ci étant estimé comme le poids vif à la puissance 0,60 chez le porc en croissance et le poids vif à la puissance 0,75 chez la truie en reproduction.

Chez le porc en croissance, ce besoin d'entretien peut varier avec la race ou le sexe du porc (Noblet *et al.*, 1999) ainsi qu'avec le niveau alimentaire (de Lange *et al.*, 2006) mais ces effets ont, en pratique, un impact limité sur le besoin total en énergie du porc. Toutefois, un effort de sélection prolongé pour une consommation résiduelle négative chez le porc en croissance réduit significativement le besoin énergétique total pour un niveau de performances donné via une diminution significative du besoin énergétique d'entretien et de la dépense d'activité physique (Barea *et al.*, 2010). Chez la truie en gestation et dans certaines conditions d'élevage, le comportement et l'activité physique peuvent être très variables avec des conséquences majeures sur le besoin énergétique total de la truie (Dourmad *et al.*, 2008). Dans ce cas, il est justifié d'adapter les apports énergétiques au comportement individuel de chaque truie. Cette adaptation chez la truie en gestation peut être également nécessaire dans certaines conditions d'élevage comme le plein-air. Enfin, le porc est un animal homéotherme qui accroît sa production de chaleur lorsque la température ambiante est inférieure à sa température critique (Noblet *et al.*, 2001). Les conséquences chez le porc en croissance sont décrites par Quiniou *et al.* (2001). L'impact du froid est toutefois le plus marqué et le plus fréquent chez la truie gravide logée individuellement compte tenu de son faible niveau alimentaire et de la température critique associée qui est relativement élevée (> 20°C) ; cet effet du froid peut être renforcé par une hyperactivité (stéréotypie) des truies.

Cependant, les évolutions récentes du mode de logement et de l'alimentation des truies gravides (en groupe, aliment fibreux ou animaux sur paille, etc.) atténuent fortement les problèmes posés par le froid dans la plupart des conditions de production rencontrées dans les différentes zones de production du porc. Les dépenses énergétiques d'entretien aux différents stades de production du porc sont rassemblées dans le tableau 5. Les besoins énergétiques de production sont directement dépendants de la nature et du niveau des productions (Tableau 5). L'écart le plus contrasté est observé chez la truie en reproduction où les besoins énergétiques de production pour la reconstitution des réserves corporelles et la croissance utérine représentent moins de 50% des besoins d'entretien lors de la gestation alors que ceux pour la production de lait équivalent à 3 à 4 fois les besoins d'entretien. Ceci signifie aussi que la truie gravide est alimentée de façon restreinte ; l'utilisation d'aliments riches en parois végétales est alors particulièrement appropriée compte tenu de leur utilisation digestive élevée à ce stade physiologique (voir 1.2) et de la réduction du niveau d'activité physique des truies et de l'amélioration de leur bien-être avec de tels aliments (Le Gall *et al.*, 2009b).

A l'inverse, la truie en lactation devrait être alimentée *ad libitum* en mettant en œuvre tous les moyens pour maximiser le niveau

d'ingestion d'énergie; cette situation est la plus critique lorsque la truie souffre de la chaleur et réduit spontanément son niveau d'ingestion (Quiniou *et al.*, 2000). Outre des adaptations des techniques d'alimentation telles que l'augmentation de la fréquence des repas ou l'alimentation pendant les heures les plus fraîches du nyctémère (nuit), l'enrichissement de l'aliment en lipides ou la diminution de sa teneur en matières azotées sont des alternatives pour accroître la consommation d'énergie de la truie ou, en d'autres termes, atténuer les effets de la chaleur (ou d'autres facteurs d'élevage) sur la consommation d'aliment en lactation (Renaudeau et Noblet, 2001).

De façon plus générale, on peut dire que la truie allaitante ingère moins d'énergie que le niveau de ses besoins dans la plupart des situations actuelles de production; elle mobilise alors une partie de ses réserves corporelles pendant la phase de lactation. Dans le cas de la croissance, le besoin énergétique de production est lié à l'importance des dépôts musculaires et adipeux dont le coût énergétique varie du simple au triple (Tableau 5). L'abaissement de l'adiposité des porcs par la sélection génétique, la non castration des mâles, une restriction alimentaire, etc. est alors une voie très efficace pour réduire le coût énergétique de la croissance.

Tableau 5 – Eléments de calcul du besoin énergétique chez le Porc¹

Stade	Besoin énergétique, MJ ¹	Référence ²
Croissance	EM entretien = 1,05 x kg PV ^{0,60}	A
	Dépôt d'énergie = 23,0 x Gain protéines, kg + 39,9 x Gain lipides, kg	B
	Contenu en énergie du gain de tissus maigres = 8,5 à 10,5 MJ/kg	B
	Contenu en énergie du gain de tissus gras = 31 à 33 MJ/kg	B
	Thermorégulation : voir Quiniou <i>et al.</i> (2001)	
Gestation	EM entretien = 0,440 x kg PV ^{0,75}	C
	Contenu en énergie du gain de tissus maternels = 9,7 x Gain de PV, kg + 54 x Gain de P2, mm	D, E
	Contenu en énergie de l'utérus plein = 4,9 x Gain de PV des fœtus, kg	D
	EM pour la thermorégulation/°C = 0,010 à 0,020 x kg PV ^{0,75}	D
	EM pour 100 minutes de station debout = 0,030 x kg PV ^{0,75}	D
Lactation	EM entretien = 0,460 x kg PV ^{0,75}	F
	Energie du lait = 20,6 x Gain de PV de portée, kg – 0,376 x Taille de portée	D

¹ PV : poids vif ; P2 : épaisseur de lard dorsal ; le besoin en énergie métabolisable (EM) est déduit de la dépense en la divisant par l'efficacité correspondante (tableau 2). ² A : Noblet *et al.* (1999) ; B : Noblet *et van Milgen* (2013) ; C : Noblet *et Etienne* (1987b) ; D : Dourmad *et al.* (2008) ; E : Dourmad *et al.* (1998) ; F : Noblet *et Etienne* (1987a).

2.3. Besoins en minéraux

Le besoin en phosphore des porcs est estimé selon une approche factorielle qui consiste, pour chaque stade physiologique, à additionner les besoins estimés pour l'entretien et les productions. Les bases de cette démarche ont été formalisées par Jondreville et Dourmad (2005) puis reprises dans InraPorc. Le besoin en phosphore pour la croissance est calculé à partir d'équations de prédiction de la quantité corporelle de phosphore en fonction du poids vif des animaux. L'exportation de phosphore via le lait est estimée à partir de la quantité de protéines produites dans le lait et le besoin pour la croissance des produits de la conception à partir de l'estimation de l'accrétion protéique.

La démarche proposée par Jondreville et Dourmad (2005) permet donc d'ajuster l'apport alimentaire de phosphore digestible au stade physiologique et aux performances des animaux. Elle permet également d'évaluer l'impact des performances sur le besoin en phosphore digestible apparent. Par exemple, la diminution de l'indice de consommation de 0,2 point chez un animal en engraissement nécessite l'augmentation

de la concentration alimentaire de phosphore de 0,2 g/kg. Chez une truie en lactation, la concentration alimentaire de phosphore digestible est d'autant plus forte que le nombre de porcelets allaités est élevé et que l'appétit de l'animal est faible. Afin de tenir compte des variations de la digestibilité du phosphore, les besoins en calcium sont exprimés selon un rapport Ca total / P digestible qui varie selon le stade physiologique (2,7-2,9 pour les animaux en croissance ; 3,2 pour les truies).

3. PREDICTION DES BESOINS NUTRITIONNELS ET DES PERFORMANCES DU PORC ; CONTRIBUTION DE LA MODELISATION

La méthode factorielle exposée dans la section précédente permet de définir les besoins nutritionnels pour un niveau de performances donné et dans un environnement donné (gain de poids et sa composition tissulaire ou chimique, niveau de production laitière, température ambiante, etc.).

Mais ce niveau de performances est lui-même dépendant des caractéristiques du porc (ou de son potentiel génétique), des apports nutritionnels et de l'environnement. De plus, ces différents facteurs interagissent entre eux. A titre d'exemple, le

gain de protéines – et par conséquent le gain de poids vif – est dépendant des apports énergétiques et protéiques mais cette relation dépend du poids vif de l'animal, de son potentiel génétique, de son sexe, de la température ambiante, de l'état sanitaire de l'animal, etc. Il est donc nécessaire d'établir des relations ou lois de réponse entre les apports nutritionnels (énergie, AA) et les performances avec des paramètres de cette loi de réponse qui sont spécifiques de la situation physiologique de l'animal. La seule solution pour intégrer ces lois de réponse est de construire des modèles qui vont prédire les performances des porcs à partir de paramètres d'entrée prenant en compte l'aliment et les nutriments ingérés et les caractéristiques du porc et, accessoirement, des paramètres de son environnement. Mais les lois de réponse incluses dans le modèle peuvent être simples et globales, sur une base "boîte noire", pour un modèle empirique ou, au contraire, très complexes et analytiques pour un modèle mécaniste. De la même façon, le modèle peut travailler à l'échelle d'un individu ou de la moyenne d'un groupe mais un tel modèle, qualifié de déterministe, ne prédira pas la variabilité des réponses en lien avec la variabilité "naturelle" des caractéristiques des porcs ou de leurs lois de réponse. Le modèle peut ainsi prendre en compte tous les animaux d'une population et la variabilité des paramètres qui les caractérisent pour prédire les réponses individuelles de tous les animaux; le modèle est alors stochastique. Le modèle peut aussi prédire une situation à un point donné dans le temps et l'espace (ou modèle statique) ou, au contraire, suivre la dynamique des réponses sur des périodes plus ou moins longues (modèle dynamique). En résumé, les modèles peuvent être très divers dans leurs objectifs et leurs niveaux d'approche ou d'analyse et, par voie de conséquence, sur leur plus ou moins grande aptitude à répondre, soit à des questions "de terrain" et être alors considérés comme des outils d'aide à la décision, soit à des questions de recherche et être essentiellement des outils de recherche. De façon générale, les modèles mécanistes requièrent un grand nombre de paramètres, non quantifiables dans les situations du terrain pour la plupart, et ne permettent pas de répondre de façon fiable et précise à des questions pratiques telles que l'estimation des besoins en nutriments du porc. A l'inverse, les modèles plus empiriques ("boîte noire" ou "boîte grise") et dynamiques requièrent moins de paramètres qui sont souvent plus accessibles et bien caractérisés. De plus, la prise en compte de la variabilité des paramètres inhérente aux populations de porc permet de concevoir un modèle stochastique. Dans un objectif de prédiction des besoins nutritionnels du porc en croissance et de la truie en reproduction par une approche de modélisation, nous privilégierons donc la description des modèles empiriques, dynamiques et éventuellement stochastiques qui sont disponibles pour le porc et peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision.

3.1. Les modèles pour la croissance

Le premier modèle nutritionnel décrivant la croissance du porc a été développé par Whittemore et Fawcett (1974, 1976). Il s'agissait d'un modèle semi-mécaniste focalisé sur la relation entre l'énergie et les protéines alimentaires, d'une part, et les dépôts de protéines et de lipides corporels, d'autre part. Le poids de l'animal a été calculé comme la somme des masses de protéines, de lipides, d'eau, et de minéraux; les deux dernières quantités ont été estimées à partir de relations allométriques avec les masses de protéines. Un concept important proposé par Whittemore et Fawcett (1974; 1976) a été la relation entre l'énergie ingérée et le dépôt de protéines,

représentée par une relation linéaire-plateau, impliquant que le dépôt de protéines est dépendant (pente) ou indépendant (plateau ou PDmax) de l'apport d'énergie. Whittemore et Fawcett (1976) proposaient que PDmax soit constant entre 20 et 100 kg de poids vif alors que la pente dépendait d'un ratio minimal entre les dépôts de lipides et de protéines. Dans des travaux ultérieurs menés par d'autres groupes, on retrouve souvent les concepts initialement proposés par Whittemore et Fawcett (1974, 1976). Les modifications apportées concernent notamment la façon dont PDmax et la pente entre le dépôt de protéines et l'énergie ingérée évoluent au cours la croissance (van Milgen *et al.*, 2008; NRC, 2012).

Les modèles sont généralement capables de représenter et prédire les effets de l'alimentation sur l'évolution du poids de l'animal (à travers des relations entre les protéines et l'eau et les minéraux). Par contre, la représentation et la prédiction de la masse de lipides posent plus de problèmes. Dans la plupart des modèles, les lipides sont considérés comme un "puits d'énergie" où toute l'énergie non utilisée pour l'entretien ou le dépôt de protéines est déposée sous forme de lipides. Or, les dépenses énergétiques d'entretien et le dépôt de lipides sont difficiles à estimer dans les situations pratiques. Une sous-estimation de l'un entraîne donc une surestimation de l'autre (et inversement). Bien évidemment, l'épaisseur du gras dorsal, mesurée *in vivo* par ultrasons ou à l'abattage, est un indicateur de la masse de lipides. Mais le gras dorsal représente moins de 20% des lipides corporels et la relation entre épaisseur de lard et masse de lipides corporels est affectée par le type d'animal (Kloareg *et al.*, 2010).

S'inspirant des concepts proposés par Whittemore et Fawcett (1974, 1976), notre groupe a développé le modèle InraPorc pour le porc en croissance (van Milgen *et al.*, 2008) et un outil d'aide à la décision correspondant est disponible (www.rennes.inra.fr/inraporc/). A notre avis, la mise à disposition d'outils pratiques, opérationnels et conviviaux était un défi majeur à relever pour l'acceptation et l'application des modèles par les professionnels de l'alimentation animale. Comme indiqué précédemment, les modèles mécanistes sont basés sur un grand nombre de paramètres qui ont un impact sur les prédictions. Or, il est souvent difficile ou même impossible d'obtenir ces paramètres dans les conditions pratiques. Le défi dans le développement de l'outil InraPorc était alors de résumer la variation que l'on observe entre porcs à l'aide d'un nombre minimal de paramètres. De plus, les paramètres du modèle (par exemple, ceux qui décrivent le potentiel du dépôt de protéines au cours de la croissance de l'animal) ne sont pas directement observables et doivent pouvoir être déduits, indirectement, à partir d'observations comme la croissance de l'animal.

Les modèles de croissance comme InraPorc incitent l'utilisateur à considérer les performances comme des phénomènes dynamiques qui ne peuvent être résumés dans des valeurs moyennes. Des technologies nouvelles permettent maintenant de suivre la consommation et le poids des animaux de façon individuelle et à très haute fréquence. Pour valoriser ces données et mettre en place des stratégies de gestion (par exemple, pour l'alimentation de précision; voir partie 4), les modèles semi-mécanistes seront des outils indispensables. Au lieu de simuler un animal moyen et se baser sur les observations obtenues *a posteriori*, la modélisation devra s'orienter vers la simulation en temps réel, basée sur un corpus de données qui s'accroît en temps réel et prendre en compte les éventuelles perturbations au cours de la croissance et la variabilité des performances entre individus. Le challenge est alors très important.

3.2. Les modèles pour la reproduction

Les modèles décrivant l'utilisation des nutriments chez la truie reproductrice sont moins nombreux que dans le cas du porc en croissance. Il s'agit principalement de modèles de calcul des besoins nutritionnels comme ceux développés par le NRC (2012). Le modèle InraPorc développé par l'INRA (Dourmad *et al.*, 2008) est à ce titre original dans la mesure où il permet à la fois de réaliser un calcul factoriel des besoins et de simuler les variations de poids et de compositions corporelles des truies au cours des cycles successifs de reproduction.

Dans le modèle InraPorc, la truie est schématisée sous la forme de différents compartiments qui évoluent au cours du cycle de reproduction (les protéines, les lipides et l'utérus) et les nutriments sous la forme de flux (l'énergie métabolisable, les AA digestibles, le phosphore). Chez la truie gestante, les dépenses d'entretien (y compris l'activité et la thermorégulation) et celles associées au développement de la portée et de la mamelle sont prioritaires sur les dépenses liées à la constitution des réserves corporelles. Lorsque les apports sont insuffisants, la mobilisation de ses propres réserves contribue au développement de la portée. Chez la truie allaitante, la couverture des dépenses d'entretien et de production laitière est assurée en priorité et généralement en partie aux dépens des réserves corporelles.

Le schéma général de construction de l'outil d'aide à la décision InraPorc pour la truie est présenté à la figure 1. L'élevage est décrit par ses performances zootechniques, ses pratiques alimentaires et ses conditions de logement. Ces informations sont utilisées pour calibrer le modèle à l'aide d'une procédure automatique. L'outil est alors opérationnel pour déterminer les besoins des truies par une démarche factorielle ou simuler la réponse dynamique des animaux à différentes hypothèses de plan d'alimentation.

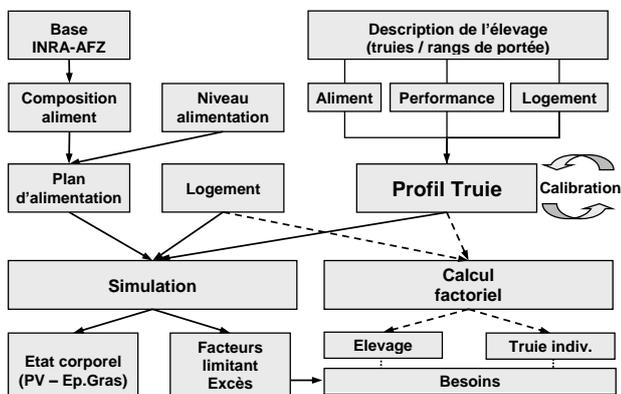


Figure 1 - Description générale de l'outil d'aide à la décision InraPorc pour la truie

4. LES PERSPECTIVES ET LES FUTURES RECHERCHES

La revue des résultats acquis sur la nutrition du porc au cours des 25 dernières années met en évidence que, d'une part, les concepts et les données sur la valeur des aliments ont évolué significativement et que, d'autre part, l'approche des besoins nutritionnels par les méthodes factorielles et la modélisation a permis de s'adapter à l'évolution des caractéristiques des animaux et à la diversité des modes et des contraintes de la production. Notre synthèse a également mis en évidence des connaissances incomplètes à la fois sur la valeur nutritionnelle des aliments et les besoins nutritionnels des animaux. Pour les aliments, on peut citer 1/ les imprécisions sur la digestibilité ou plutôt la disponibilité des AA dans les matières premières ayant

subi des traitements thermiques ou contenant des facteurs antinutritionnels, 2/ le manque d'exhaustivité des données sur l'impact des traitements technologiques (broyage, granulation, etc.) sur la digestibilité de l'énergie et 3/ le manque d'outils accessibles, "démocratiques", précis, rapides et peu coûteux permettant d'évaluer les aliments du porc. Les méthodes NIR semblent les plus prometteuses, même si la tâche semble particulièrement difficile pour les matières premières issues ou ayant subi des traitements technologiques alors que le porc sera l'utilisateur principal de ce type de ressources dans l'avenir. Pour ce qui est des besoins, il nous semble que des progrès dans les connaissances sur les rendements d'utilisation des AA absorbés ainsi que les interactions entre AA afin d'améliorer l'efficacité de leur utilisation (et une diminution des rejets azotés) sont des voies de recherche à privilégier. Un affinement des modèles de prédiction des performances et des besoins sera également à poursuivre pour mieux prendre en compte les effets de l'environnement climatique (chaleur, en particulier) sur la réponse des porcs en croissance et des truies en lactation ou être en mesure d'aller au-delà de la prédiction de 1/ la vitesse de croissance et la composition tissulaire chez le porc en croissance en modélisant la relation entre les caractéristiques de l'aliment et la composition et les propriétés des tissus corporels ou 2/ les variations du poids vif et de l'état corporel chez la truie en reproduction en prédisant plus précisément les effets de l'alimentation sur les performances de reproduction. Les modèles devront aussi devenir stochastiques pour mieux prendre en compte la variabilité entre les animaux et définir des objectifs nutritionnels fonction d'optima économiques (Brossard *et al.*, 2011, 2014). Sur un plan plus pratique, on pourra aussi envisager de traduire les situations simulables par les modèles en tables de besoins nutritionnels moyens par type et catégorie de porc. Pour les minéraux, les modèles devront prendre en compte l'évolution des réserves minérales. Pour cela, il sera nécessaire de représenter des compartiments et de prendre en compte les régulations d'absorption associées à l'état de ces compartiments. Ceci permettra de prendre en compte des stratégies de résorption-absorption, comme il peut en exister chez la truie, ou encore des phénomènes de compensation entre périodes chez le porc en croissance. Les bases pour le développement de ces modèles sont déjà en partie acquises (Létourneau-Montminy *et al.*, 2015).

L'alimentation de précision, qui s'inscrit dans le contexte plus général de l'élevage de précision, offre de nouvelles perspectives d'utilisation des modèles de calcul des besoins nutritionnels et de prédiction des performances. Elle repose sur l'ajustement dynamique le plus précis possible des apports nutritionnels aux besoins des animaux, afin d'améliorer l'efficacité alimentaire tout en réduisant le coût et les rejets notamment en azote et phosphore. Cet ajustement peut être réalisé, soit pour un groupe d'animaux (par exemple une case), soit individuellement. Sa mise en œuvre repose sur la collecte d'informations en temps réel sur les animaux, les aliments ou le milieu d'élevage, à l'aide de capteurs mesurant en continu la consommation d'aliment, le poids vif des porcs, leur comportement, la température ambiante, la densité ou la composition des aliments, par exemple. Les informations issues des capteurs, éventuellement combinées à des informations plus génériques sur la lignée utilisée, l'historique des performances de l'élevage, les objectifs à atteindre, etc., sont alors utilisées pour prédire les performances attendues pour la période à venir (semaine ou jour suivant) et déterminer les apports nutritionnels optimaux pour les atteindre.

Les travaux conduits par Pomar *et al.* (2010) indiquent ainsi que l'ajustement quotidien et individuel de l'alimentation aux besoins nutritionnels des porcs en croissance permet de réduire les coûts alimentaires de 11% et l'excrétion d'azote et de phosphore de plus de 30% par rapport à une stratégie alimentaire à trois phases appliquée à l'ensemble du groupe. De la même manière, des gains importants d'efficacité (réduction du coût et des rejets de 10 à 15%) sont attendus par une alimentation individualisée des truies en gestation (Dourmad *et al.*, 2014). Les bases du calcul factoriel des besoins décrites ci-dessus peuvent être mobilisées dans ces approches pour déterminer en temps réel les besoins en nutriments (énergie, AA, minéraux) et la détermination du mélange optimal d'aliments à faire distribuer par l'automate, pour l'individu ou le groupe concerné. Par contre, l'estimation en temps réel des performances attendues en termes de consommation d'aliment et de production (croissance, production de lait...) pose des questions spécifiques de développement de modèles de prédiction adaptés. Des modèles strictement statistiques ont été utilisés par Hauschild *et al.* (2012) pour prédire la consommation et la croissance individuelle des porcs à partir des observations collectées les jours/semaines précédents. La question reste posée de savoir comment combiner ces approches statistiques avec des approches de modélisation plus mécanistes, telles que celles présentées ci-dessus, afin de mieux prendre en compte des objectifs de production à l'échelle de la bande ou du troupeau (programmation des départs à l'abattoir, etc.). Les matières premières utilisées dans l'alimentation du porc se sont diversifiées au cours des 25 dernières années, certaines d'entre elles comme les farines de viande ou le manioc voyant leur périmètre d'utilisation restreint pour des raisons économiques, réglementaires ou d'image alors que beaucoup d'autres, essentiellement des coproduits, sont beaucoup plus largement utilisées. Parmi ces coproduits, les DDGS et les tourteaux de colza ont joué un rôle particulier en étant un déclencheur, notamment en Amérique du Nord, d'études sur la valeur nutritionnelle des matières premières pour le porc (et les autres espèces) et en favorisant le passage chez le porc de régimes simples céréale-soja à des régimes plus complexes. Par ailleurs, depuis 4-5 ans, on assiste à un intense effort de recherche et de communication sur les insectes comme nouvelle source de protéines pour les volailles, les porcs ou les poissons (Makkar *et al.*, 2014). On peut toutefois s'interroger sur cette production d'insectes qui, pour être efficace techniquement et économiquement, devra se mettre en place avec des substrats non consommables directement par les animaux et disponibles en quantité significative, régulière et gérable à une échelle nationale, voire internationale.

A contrario, il serait illogique de produire à grande échelle des insectes pour la nourriture des animaux à partir de matières premières utilisables directement par les animaux eux-mêmes, le rendement de transformation aliment-insectes-animaux devenant très faible par rapport au rendement aliment-animaux. Si la valeur nutritionnelle, protéique notamment, des insectes pour les volailles et le porc ne pose aucun problème (Veldkamp et Bosch, 2015), des recherches sont nécessaires pour optimiser et rationaliser la nutrition des insectes et surtout bio-sécuriser la production d'insectes en tant qu'aliment des animaux (et des humains). Sur ce même registre des protéines animales, on ne peut que regretter que les farines animales appelées maintenant "protéines animales transformées" (ou "PAT") qui sont des sources nobles de protéines, acides gras et minéraux (phosphore) soient si peu utilisées en Europe pour les porcs, volailles et poissons, ce qui, sous un angle

développement durable et autonomie protéique, est particulièrement problématique. Enfin, on peut envisager que, dans un contexte de demande accrue de ressources pour alimenter les animaux, de nouvelles sources d'énergie ou de protéines seront produites en climat tropical (chaleur et eau), ou sur des milieux tels que l'eau (plantes aquatiques) ou en "bioréacteurs" (micro-algues; énergie solaire) avec des productivités à l'hectare plus élevées qu'avec les méthodes conventionnelles de productions végétales en zones tempérées. Leur évaluation nutritionnelle et l'efficacité du système de production associé devront alors être quantifiées. L'utilisation des céréales, des oléagineux, des protéagineux et leurs coproduits par les animaux de ferme est concurrencée par les autres utilisations comme l'alimentation humaine, les utilisations industrielles et, depuis quelques années, la production de bio-carburants. A moyen terme, on peut donc penser que les animaux de ferme seront nourris de plus en plus avec des coproduits, voire de nouveaux produits, qui pour la plupart sont/seront riches en parois végétales. Si les ruminants sont "naturellement" les plus aptes à digérer et utiliser ces produits, on peut aussi imaginer que le porc en utilisera des quantités significatives. Ceci ne devrait pas poser de problème pour le porc adulte, la truie en gestation en particulier.

En revanche, chez le porc en croissance, les effets négatifs d'un niveau élevé de parois végétales devront être atténués en stimulant leur dégradation, soit avant que l'aliment ne soit distribué, soit pendant que l'aliment est digéré. Si la technologie de préparation des aliments (finesse de broyage, en particulier) peut jouer un rôle positif, les améliorations les plus nettes seront obtenues par l'ajout d'enzymes susceptibles, soit de "pré-digérer" les parois végétales, soit de les digérer dans le tube digestif. De façon plus générale, 1/ les rôles des parois végétales de l'aliment sur la physiologie du porc (santé, capacité d'ingestion, etc.) devront être mieux précisés en lien avec leur origine botanique et/ou leurs caractéristiques physico-chimiques, 2/ la contribution des parois végétales à la couverture des besoins énergétiques du porc devra être accrue et 3/ les travaux sur le rôle et les activités des enzymes exogènes (phytases, xylanases, glucanases, protéases, etc.) devront être renforcés pour améliorer les rendements de transformation de l'aliment en viande, réduire le recours aux antibiotiques et autres substances utilisées pour contrôler la santé du porc et, en définitive, accroître la durabilité et l'efficacité des systèmes de production de porcs dans les différentes régions du monde. Enfin, la meilleure utilisation des parois végétales devra aussi passer par une sélection d'animaux plus aptes à les digérer et/ou en atténuer les effets négatifs (Noblet *et al.*, 2013); l'analyse de leur microbiote sera une voie de progrès et de compréhension particulièrement pertinente et susceptible d'améliorer les connaissances sur la relation aliment-microbiote intestinal-santé et performances du porc (Calenge *et al.*, 2014). Sur un plan plus général et pour compléter l'approche classique des bilans digestifs de nutriments et d'énergie pour étudier les aliments et leur digestion, il sera nécessaire de caractériser les relations entre l'aliment, le microbiote digestif, l'immunité des animaux, leur santé et leurs performances, même si l'approche peut paraître lourde, complexe et relativement peu informative pour le moment. L'objectif prioritaire des systèmes de productions animales est de transformer de la façon la plus efficace possible toutes les ressources disponibles en produits consommables par l'Homme afin de répondre au dilemme de ressources qui sont moins disponibles en face d'une demande de produits animaux qui s'accroît régulièrement avec l'augmentation de la population

mondiale et de sa demande unitaire. Avant d'en arriver à des solutions "radicales" qui consisteraient à privilégier les productions animales les plus efficaces, voire de réduire les productions animales pour favoriser une utilisation directe des ressources végétales par les Humains, les solutions à mettre en place sur le moyen terme devront privilégier toutes les voies qui contribueront à une amélioration de l'efficacité alimentaire intra-espèce animale. Dans le cas du porc, les améliorations apportées par la sélection génétique (animaux maigres, consommation résiduelle, animaux robustes, aptitude à digérer les parois végétales, réduction de la fraction de l'aliment utilisée pour l'entretien des animaux, etc.) devront être poursuivies dans le cadre de collaborations entre généticiens et physiologistes. Une préparation adéquate de l'aliment ou des matières premières qui le composent par le broyage, les traitements thermiques et la supplémentation en enzymes, prébiotiques, probiotiques et autres substances qui soient d'une efficacité reconnue et ciblée contribuera à rendre l'énergie et les nutriments de l'aliment plus disponibles pour l'animal à l'étape de l'ingestion et de la digestion. Enfin, même si ceci est moins important pour l'énergie que pour les protéines, les AA et les minéraux, les efforts pour adapter les apports d'aliment et la composition de l'aliment aux besoins de chaque porc (alimentation de précision) devront être amplifiés et devenir techniquement possibles avec pour conséquence une réduction des rejets dans l'environnement et une amélioration de la rentabilité économique des élevages.

CONCLUSION

L'état des lieux dressé dans cette synthèse met en évidence un indéniable progrès des connaissances sur la nutrition du porc au cours des 25 dernières années et leur mise en application dans des recommandations nutritionnelles, des tables de valeurs alimentaires ou des modèles et outils d'aide à la décision. Des connaissances complémentaires sont nécessaires pour continuer d'améliorer les rendements de transformation de toutes les ressources alimentaires possibles (dont des nouvelles) pour leur transformation en viande chez le porc et sans rentrer en conflit avec l'utilisation des ressources (végétales et animales) par les autres espèces animales, par l'Homme pour se nourrir directement et pour ses utilisations industrielles. Les technologies pour améliorer la disponibilité des nutriments (fibres, en particulier) de l'aliment, une caractérisation précise et "en ligne" (méthodes "NIR") de ses valeurs nutritionnelle, santé et bien-être ainsi qu'un ajustement aussi précis que possible des apports alimentaires aux besoins des animaux (nutrition de précision et modèles stochastiques) permettront d'améliorer les rendements d'utilisation des ressources, de minimiser les pertes et les rejets (dans l'environnement, notamment) et d'améliorer la santé des porcs avec des produits de qualité. Tels sont les challenges des recherches à venir sur la nutrition du porc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amipig, 2000. Ileal standardised digestibility of amino acids in feedstuffs for pigs. AFZ, Ajinomoto, Aventis, INRA, ITCF (Eds), www.feedbase.com/downloads/amipeng.pdf, 43 p.
- Barea R., Dubois S., Gilbert H., Sellier P., van Milgen J., Noblet J., 2010. Energy utilization in pigs selected for high and low residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 88, 2062-2072.
- Batterham E.S., Andersen L.M., Braignt D.R., Darnell R.E., Taverner M.R., 1990. A comparison of the availability and ileal digestibility of lysine in cottonseed and soya-bean meals for grower/finisher pigs. *Br. J. Nutr.*, 64, 663-677.
- Brossard L., Quiniou N., Dourmad J.Y., van Milgen J., 2011. A herd modelling approach to determine the economically and environmentally most interesting dietary amino acid level during the fattening period. p. 335-346. In D. Sauvart *et al.* (eds), *Modelling Nutrient digestion and utilization in farm animals.* Wageningen, NLD : Wageningen Academic Publishers.
- Brossard L., Vautier B., van Milgen J., Salaün Y., Quiniou N., 2014. Comparison of in vivo and in silico growth performance and variability in pigs when applying a feeding strategy designed by simulation to control the variability of slaughter weight. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 1883-2131.
- Calenge F., Martin C., Le Floch N., Phocas F., Morgavi D., Rogel-Gaillard C., Quéré P., 2014. Intégrer la caractérisation du microbiote digestif dans le phénotypage de l'animal de rente : vers un nouvel outil de maîtrise de la santé en élevage? *INRA Prod. Anim.*, 27, 209-222.
- Chung T.K., Baker D.H., 1992. Ideal pattern for 10-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.*, 70, 3102-3111.
- Cozannet P., Primot Y., Gady C., Métayer J.P., Callu P., Lessire M., Skiba F., Noblet J., 2010. Ileal digestibility of amino acids in wheat distillers dried grains with solubles for pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 158, 177-186.
- De Lange K., van Milgen J., Noblet J., Dubois S., Birkett S., 2006. Previous feeding level influences plateau heat production following a 24 h fast in growing pigs. *Br. J. Nutr.*, 95, 1082-1087.
- Dourmad J.Y., Noblet J., Père M.C., Etienne M., 1998. Mating, pregnancy and pre-natal growth. In: "A quantitative biology of the pig", I. Kyriazakis (Ed.), CABI Publishing, UK, 129-153
- Dourmad J.Y., Etienne M., Valancogne A., Dubois S., van Milgen J., Noblet J., 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of sows. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 372-386.
- Dourmad J.Y., van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Brossard L., Noblet J., 2014. Modelling nutrient utilization in sows: a way toward the optimization of nutritional supplies. In: N.K. Sakomura, R.M. Gous, I. Kyriazakis, L. Hauschild (Eds), *Nutritional modelling for pigs and poultry*, chapter 4, 50-61, Cabi Publication, Wallingford, UK.
- Fuller M.F., McWilliams R., Wang T.C., Giles L.R., 1989. The optimum dietary amino acid pattern for growing pigs. 2. Requirements for maintenance and for tissue protein accretion. *Br. J. Nutr.*, 62, 255-267.
- Gloaguen M., Le Floch N., van Milgen J., 2013. Couverture des besoins en acides aminés chez le porcelet alimenté avec des régimes à basse teneur en protéines. *INRA Prod. Anim.*, 26, 277-288.
- Hauschild L., Lovatto P.A., Pomar J., Pomar C., 2012. Development of sustainable precision farming systems for swine: estimating real time individual amino acid requirements in growing-finishing pigs, *J. Anim. Sci.*, 90, 2255-2263.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Sauvart D., Pérez J.M., Tran G., Coord., INRA Eds, Paris, 291 p.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Kloareg M., Noblet J., van Milgen J., 2006. Estimation of whole body lipid mass in finishing pigs. *Anim. Sci.*, 82, 241-251.
- Knabe D.A., LaRue D.C., Gregg E.J., Martinez G.M., Tanksley T.D., 1989. Apparent digestibility of nitrogen and amino acids in protein feedstuffs by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 67, 441-458.
- Le Floch N., Gondret F., Matte J.J., Quesnel H., 2012. Towards amino acid recommendations for specific physiological and path-physiological states in pigs. *Proc. Nutr. Soc.*, 71, 425-432.

- Le Gall M., Warpechowski M., Jaguelin-Peyraud Y., Noblet J., 2009a. Influence of dietary fibre level and pelleting on digestibility of energy and nutrients in growing pigs and adult sows. *Animal*, 3, 352-359.
- Le Gall M., Montagne L., Meunier-Salaun M.C., Noblet J., 2009b. Valeurs nutritives des fibres, conséquences sur la santé du porcelet et le bien-être de la truie. *INRA Prod. Anim.*, 22, 17-24.
- Le Goff G., Noblet J., 2001. Comparative digestibility of dietary energy and nutrients in growing pigs and adult sows. *J. Anim. Sci.*, 79, 2418-2427.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Dourmad J.Y., Crenshaw T.D., Pomar C., 2015. Modeling the metabolic fate of dietary phosphorus and calcium and the dynamics of body ash content in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 93, 1200-1217.
- Makkar H.P.S., Tran G., Heuzé V., Ankers P., 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 197, 1-33.
- Mitchell H.H., 1964. Comparative nutrition of man and domestic animals. Academic Press, New York.
- Noblet J., Etienne M., 1987a. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in pregnant sows. *Livest. Prod. Sci.*, 16, 243-257
- Noblet J., Etienne M., 1987b. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in lactating sows. *J. Anim. Sci.*, 64, 774-781
- Noblet J., Shi X.S., 1993. Comparative digestibility of energy and nutrients in growing pigs fed ad libitum and adult sows fed at maintenance. *Livest. Prod. Sci.*, 34, 137-152.
- Noblet J., Shi X.S., Dubois S., 1993a. Metabolic utilization of dietary energy and nutrients for maintenance energy requirements in pigs: basis for a net energy system. *Br. J. Nutr.*, 70, 407-419.
- Noblet J., Fortune H., Dupire C., Dubois S., 1993b. Digestible, metabolizable and net energy values of 13 feedstuffs for growing pigs: effect of energy system. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 42, 131-149.
- Noblet J., Fortune H., Shi X.S., Dubois S., 1994a. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 344-354.
- Noblet J., Shi X.S., Dubois S., 1994b. Effect of body weight on net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 648-657.
- Noblet J., Shi X.S., Fortune H., Dubois S., Lechevestrier Y., Corniaux C., Sauvart D., Henry Y., 1994c. Teneur en énergie nette des aliments chez le porc : mesure, prédiction et validation aux différents stades de sa vie. *Journées Rech. Porcine en France*, 26, 235-250
- Noblet J., Karege C., Dubois S., van Milgen J., 1999. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in growing pigs: effect of sex and genotype. *J. Anim. Sci.*, 77, 1208-1216
- Noblet J., Le Dividich J., van Milgen J., 2001. Thermal environment and swine nutrition. In: A.J. Lewis & L.L. Southern (Eds), *Swine Nutrition* (2nd Edition), 519-544. CRC Press, Boca Raton, USA
- Noblet J., van Milgen J., 2004. Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *J. Anim. Sci.*, 82, Number 13, E. Suppl., E229-E238. (<http://www.asas.org/symposia/04esupp/E229.pdf>).
- Noblet J., van Milgen J., 2013. Chapter 2: Energy and Energy Metabolism in Swine. In: L.I. Chiba (Ed), *Sustainable Swine Nutrition*, 23-57. John Wiley and Sons, Ames, Iowa, USA.
- Noblet J., Gilbert H., Jaguelin-Peyraud Y., Lebrun T., 2013. Evidence of genetic variability for digestive efficiency in the growing pig fed a fibrous diet. *Animal*, 7, 1259-1264.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine. The National Academy Press, Washington, D.C., USA, 400 p.
- Pahm A.A., Pedersen C., Stein H.H., 2009. Standardized ileal digestibility of reactive lysine in distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Agric. Food Chem.*, 57, 535-539
- Pointillart A., 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. *INRA Prod. Anim.*, 7, 29-39
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G., Pomar J., Lovatto P., 2010. Precision feeding can significantly reduce feeding cost and nutrient excretion in growing animals. In: D. Sauvart, J. van Milgen, P. Faverdin, N. Friggens (Eds), *Modelling nutrient digestion and utilisation in farm animals*, 327-334. Wageningen Academic Publishers, the Netherlands.
- Quiniou N., Renaudeau D., Dubois S., Noblet J., 2000. Influence of high ambient temperatures on food intake and feeding behaviour of multiparous lactating sows. *Anim. Sci.*, 70, 471-479.
- Quiniou N., van Milgen J., Dubois S., Noblet J., 2001. Modelling heat production and energy balance in group-housed growing pigs exposed to cold or hot ambient temperatures. *Br. J. Nutr.*, 85, 97-106.
- Renaudeau D., Noblet J., 2001. Effect of exposure to high ambient temperature and dietary protein level on sows milk production and performance of piglets. *J. Anim. Sci.*, 79, 1540-1548.
- Sève B., Hess V., 2000. Amino acid digestibility in formulation of diets for pigs: present interest and limitations, future prospects. In: P.C. Garnsworthy, J. Wiseman (Eds), *Recent Advances in Animal Nutrition*, 167-181. Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Skiba F., Noblet J., Callu P., Evrard J., Melcion J.P., 2002. Influence du type de broyage et de la granulation sur la valeur énergétique de la graine de colza chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 34, 67-74.
- Skiba F., Callu P., Castaing J., Paboeuf F., Chauvel J., Jondreville C., 2004. Variabilité intra matière première de la digestibilité du phosphore des céréales et du pois chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 36, 9-16.
- Stein H.H., Sève B., Fuller M.F., Moughan P.J., de Lange C.F.M., 2007. Invited review: amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. *J. Anim. Sci.*, 85, 172-180.
- Van Barneveld R.J., Batterham E.S., Norton B.W., 1994. The effect of heat on amino acids for growing pigs 2. Utilization of ileal digestible lysine from heat-treated field peas (*Pisum sativum* cultivar Dundale). *Br. J. Nutr.*, 72, 243-256.
- Van Milgen J., Dourmad J.Y., 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 6, 15.
- van Milgen J., Noblet J., Dubois S., 2001. Energetic efficiency of starch, protein, and lipid utilization in growing pigs. *J. Nutr.*, 131, 1309-1318.
- Van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.
- Veldkamp T., Bosch G., 2015. Insects: a protein-rich feed ingredient in pig and poultry diets. *Animal Frontiers*, 5, 45-50.
- Whittemore C.T., Fawcett R.H., 1974. Model responses of the growing pig to the dietary intake of energy and protein. *Anim. Prod.*, 19, 221-231.
- Whittemore C.T., Fawcett R.H., 1976. Theoretical aspects of a flexible model to simulate protein and lipid growth in pigs. *Anim. Prod.*, 22, 87-96.