

Influence de la nutrition sur l'excrétion d'azote, de phosphore, de cuivre et de zinc des porcs, et sur les émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et d'odeurs

J.-Y. DOURMAD¹, C. RIGOLOTT^{1,2}, C. JONDREVILLE³

¹ INRA, Agrocampus, UMR1079 Systèmes d'Élevage, Nutrition Animale et Humaine, F-35590 Saint-Gilles, France

² INRA, Agrocampus, UMR1080 Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles, France

³ INRA, USC340 Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux, F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Courriel : jean-yves.dourmad@rennes.inra.fr

Pour une production porcine durable, l'émission de polluants et l'utilisation de ressources non renouvelables doivent être réduites autant que possible. L'azote et le phosphore rejetés par les animaux peuvent être à l'origine de phénomènes d'eutrophisation aussi bien des eaux douces que des eaux marines, conduisant à une dégradation de la ressource en eau pour la consommation humaine et une dégradation des milieux aquatiques et du paysage côtier. De la même manière, l'accumulation excessive de cuivre et de zinc dans les sols peut conduire à moyen ou long termes à des phénomènes de toxicité pour les microorganismes du sol ou pour les plantes. Ces éléments se concentrent également dans les sédiments des rivières et de leurs estuaires. Les émissions d'ammoniac par les effluents sont impliquées dans les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation (Portejoie *et al* 2002) dont les effets néfastes sont reconnus sur les sols, les forêts et la biodiversité. Par ailleurs, les ressources de certains nutriments, comme le phosphore sont limitées et non renouvelables. Ces dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés à la recherche de moyens permettant de réduire l'impact environnemental de l'azote, du phosphore et des éléments traces métalliques contenus dans les effluents porcins. Parmi ces travaux l'approche nutritionnelle a reçu une attention particulière de la part des chercheurs et des décideurs. Une première voie repose sur l'amélioration des connaissances relatives aux besoins des animaux de façon à mieux ajuster les apports et ainsi réduire les excès, le besoin étant généralement défini comme l'apport permettant de maximiser

la rétention. L'amélioration de la disponibilité, ou de la valeur biologique, des nutriments de la ration constitue la seconde voie envisageable. L'objectif de cette présentation est de faire un panorama des possibilités offertes par la nutrition pour réduire l'excrétion de N, P, Cu et Zn par les porcs ainsi que les émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et d'odeurs.

1 / Influence de l'alimentation sur l'excrétion d'azote

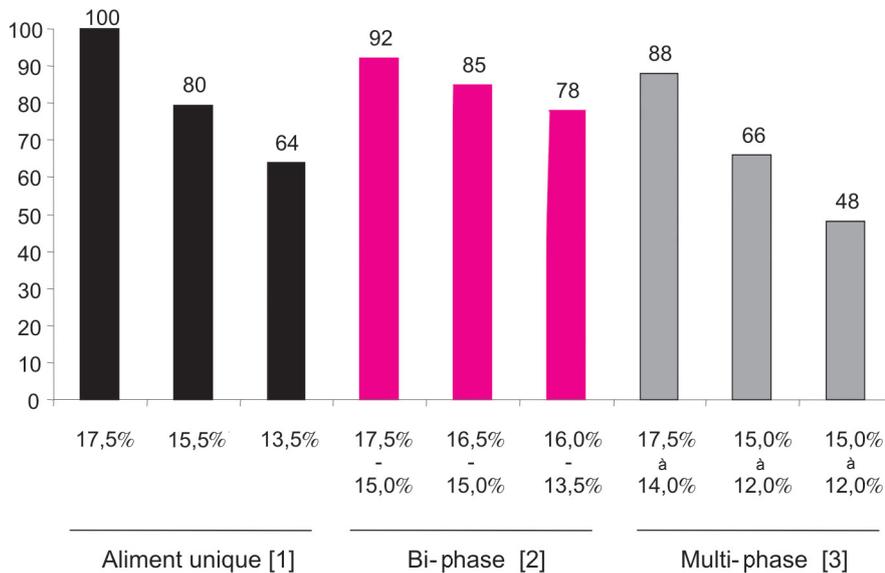
L'efficacité d'utilisation des protéines alimentaires par les porcs dépend de la composition de la ration, du statut physiologique et du stade de croissance des animaux. Un porc en croissance recevant une ration à base de céréales et de tourteau de soja, retient environ 32% de l'azote qu'il ingère (Dourmad *et al* 1999b). Il en excrète en moyenne 17% dans les fèces, cette fraction correspondant aux protéines indigestibles et aux pertes endogènes, principalement des sécrétions digestives et des cellules desquamées de la paroi intestinale. Les protéines digérées sont absorbées sous la forme d'acides aminés qui sont utilisés pour la synthèse des protéines corporelles. Des pertes obligatoires d'acides aminés existent également et sont associées au métabolisme protéique (*turnover*), au renouvellement de la peau et des soies (van Milgen *et al* 2008) et à d'autres fonctions comme par exemple les défenses immunitaires. Les acides aminés en excès, une fois ces pertes et les besoins pour la synthèse protéique couverts, sont catabolisés et excrétés dans l'urine principalement sous la forme d'urée. Avec

les rations conventionnelles, cette dernière fraction est souvent la plus importante. L'efficacité moyenne de rétention de l'azote est la plus faible chez les truies (23%), surtout pendant la gestation, intermédiaire chez les porcs en croissance (34%), et la plus élevée chez les porcelets sevrés (48%) (Dourmad *et al* 1999a).

Deux approches complémentaires peuvent être envisagées pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par le porc et par conséquent en réduire l'excrétion. La première consiste à ajuster l'apport de protéines et d'acides aminés au cours du temps en fonction de l'évolution du potentiel de croissance des animaux ou de leur état physiologique. Ceci nécessite d'adapter conjointement les apports de protéines (et d'acides aminés) et d'énergie en fonction du stade et du potentiel des animaux et de l'objectif de production. Chez la truie, l'excrétion est ainsi réduite de 20 à 25% lorsque des aliments spécifiques sont distribués pendant la gestation et la lactation. Une réduction supplémentaire pourrait être envisagée dans le cas de l'utilisation de plusieurs aliments différents pendant la gestation, les besoins protéiques étant bien plus faibles au début qu'à la fin de la gestation. Chez le porc en croissance, l'excrétion azotée est réduite d'environ 10% lorsque l'on utilise en phase de finition un régime à teneur réduite en protéines, mieux en accord avec les besoins des animaux pour la croissance (figure 1, Latimier et Dourmad 1993).

La seconde approche consiste à améliorer l'équilibre en acides aminés de la ration, ce qui permet de réduire sa

Figure 1. Influence de la teneur en protéines de l'aliment et de la stratégie d'alimentation sur l'excrétion d'azote des porcs à l'engraissement (100 = excrétion avec un régime à 17,5% de protéines). Adapté de [1] Dourmad et al (1993) aliment unique, [2] Latimier et al (1993) alimentation bi-phase et [3] Bourdon et al (1997) alimentation «multi-phase» avec passage progressif de l'aliment initial à l'aliment final.



teneur en protéines tout en apportant chacun des acides aminés indispensables en quantité suffisante. Ceci peut être réalisé grâce à une combinaison judicieuse des matières premières et/ou la substitution de protéines par des acides aminés sous forme synthétique. Chez le porc à l'engrais, Dourmad *et al* (1993) ont ainsi mesuré une réduction de 35% de l'excrétion d'azote à la suite d'une amélioration de l'équilibre en acides aminés du régime (valeur biologique), sans que, ni l'appétit, ni l'efficacité alimentaire ou la composition corporelle des animaux ne soient affectés (tableau 1). La réduction la plus importante des rejets est obtenue avec une alimentation «multi-phase» combinée avec des régimes parfaitement équilibrés en acides aminés (d'une composition proche de celle de la protéine idéale) et à teneur réduite en acides aminés non indispensables. Une telle stratégie a été testée avec succès par Bourdon *et al* (1997). Dans cette étude un régime unique contenant 17% de protéines utilisé sur toute la période d'engraissement est comparé à une

stratégie «multi-phase» qui consiste à mélanger en proportions variables au cours de la croissance deux régimes parfaitement bien équilibrés en acides aminés et correspondant aux besoins des animaux en début (13% protéines) et en fin de croissance (10,7% de protéines). Alors que les performances de croissance et la qualité des carcasses sont identiques pour les deux traitements l'excrétion azotée est réduite de près de 50% pour la stratégie «multi-phase» (1,83 *versus* 3,56 kg N/porc) (figure 1). Ceci peut être considéré comme la réduction maximale qu'il est possible d'atteindre sur le plan technique. Toutefois une stratégie de réduction aussi poussée est difficilement envisageable en pratique compte tenu de l'accroissement du coût de l'aliment qui y est associé (Dourmad *et al* 1995).

Il est important de noter que le développement de telles stratégies de réduction des rejets de N nécessite une très bonne connaissance de la valeur des matières premières, en particulier la digestibilité des acides aminés, et de

l'évolution des besoins des animaux en fonction de la croissance ou du stade physiologique. Ceci est maintenant réalisable grâce au développement de modèles, tel InraPorc® (www.rennes.inra.fr/inraporc/), de prédiction des besoins (Dourmad *et al* 2008, van Milgen *et al* 2008) et de tables de valeur de digestibilité iléale des acides aminés (Sauvant *et al* 2004). De plus, en élevage, des technologies utilisant des systèmes de mélange et de distribution d'aliment pilotés par ordinateur permettent maintenant d'adapter la composition du régime sur une base hebdomadaire ou même journalière (Pomar *et al* 2007).

La diminution de la teneur en protéines de la ration entraîne proportionnellement une réduction plus importante de l'excrétion urinaire que de l'excrétion fécale d'azote, ce qui pourrait affecter la valeur fertilisante azotée des effluents lors de l'épandage (Sorensen et Fernandez 2003). Ainsi dans l'étude de Portejoie *et al* (2004) le ratio N ammoniacal / N total dans les excréta diminue de 0,79 à 0,63 lorsque la teneur en protéines du régime passe de 20 à 12%. Cependant, aussi bien dans l'étude de Gerdmann *et al* (1999) que dans celle de Sorensen et Fernandez (2003), la disponibilité mesurée de l'azote pour les plantes est très élevée et n'est pas influencée par la teneur en protéines du régime, ce qui semble indiquer que les conséquences de la modification de teneur en protéines de l'aliment sur la valeur fertilisante de l'effluent sont très limitées.

2 / Influence de l'alimentation sur les émissions d'ammoniac

En changeant la stratégie d'alimentation il est possible de modifier la teneur en azote ammoniacal de l'effluent et son pH, deux paramètres qui influencent la volatilisation de l'ammoniac (Van de Peet-Schwering *et al* 1999). La distribution de régimes à teneur réduite en protéines diminue la concentration en urée de l'urine et son pH (Canh *et al* 1998, Portejoie *et al* 2004). Lorsque l'abreuvement est à volonté, la diminution de la teneur en protéines entraîne également une réduction de la consommation d'eau et par conséquent de la production d'effluents (Portejoie *et al* 2004). Ces modifications des caractéristiques des déjections s'accompagnent d'une réduction marquée des émissions d'ammoniac dans le bâtiment et au

Tableau 1. Influence de la teneur en protéines de l'aliment, rééquilibré en acides aminés, sur les performances de croissance et l'excrétion azotée de porcs à l'engraissement (30-102 kg) (Dourmad et al 1993).

Teneur en protéines, %	17,8	15,5	13,6	
Vitesse de croissance (g/j)	846	867	852	ns
Indice de consommation (kg/kg)	2,75	2,74	2,76	ns
Taux de viande maigre, %	51,3	52,3	51,6	ns
N excrété, kg/porc ⁽¹⁾	3,90 _a	3,10 _b	2,50 _c	***

(1) Les moyennes affectées d'indices différents diffèrent significativement (P < 0,05)

cours du stockage et de l'épandage des effluents (Canh *et al* 1998, Hayes *et al* 2004, Portejoie *et al* 2004). Ainsi, dans l'étude de Portejoie *et al* (2004) l'émission d'ammoniac depuis l'excrétion jusque l'épandage était réduite de 63% lorsque la teneur en protéines du régime passait de 20 à 12% (tableau 2). Toutefois ces résultats ont été obtenus en conditions de laboratoire ou sur des durées limitées et il conviendrait de vérifier que les mêmes effets se retrouvent en pratique.

Le bilan électrolytique (BE) calculé comme $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ est souvent utilisé par les nutritionnistes pour évaluer le pouvoir acidogène des régimes, une réduction de ce bilan conduisant à la production d'urines plus acides. Lorsque la teneur en protéines du régime est réduite, le BE diminue, compte tenu de la forte teneur en K de la plupart des sources de protéines (tourteaux). Ceci explique en partie la réduction du pH des effluents lorsque la teneur en protéines du régime diminue. Toutefois, comme le montrent Canh *et al* (1998), une réduction plus poussée du pH urinaire peut être obtenue en remplaçant le carbonate de calcium ($CaCO_3$) par d'autres sels de calcium ($CaSO_4$ ou $CaCl_2$) plus acidogènes. L'addition de benzoate de Ca (Canh *et al* 1998) ou d'acide benzoïque (Daumer *et al* 2007) dans l'aliment réduit également le pH de l'effluent et la volatilisation d'ammoniac, ces produits étant transformés en acide hippurique qui est excrété dans l'urine. Ainsi dans l'étude de Daumer *et al* (2007) l'addition de 1% d'acide benzoïque dans l'aliment s'accompagnait d'une diminution d'environ 40% des émissions d'ammoniac, plus marquée dans le régime à faible teneur en protéines. Des effets similaires (25% de réduction) ont aussi été observés avec l'acide adipique (van Kempen 2001), qui est partiellement excrété dans l'urine.

L'excrétion d'azote urinaire peut également être réduite par l'ajout de fibres fermentescibles dans le régime. En effet, l'augmentation des fermentations dans le gros intestin suite à l'addition de fibres favorise l'utilisation d'ammoniac par les bactéries et la synthèse de protéines microbiennes excrétées dans les fèces, aux dépens de l'excrétion urinaire (Canh *et al* 1998, Kreuzer *et al* 1998, Sorensen et Fernandez 2003) alors que l'excrétion totale n'est pas influencée. Ces phénomènes favorisent l'excrétion de l'azote sous forme protéique, limitant ainsi par la suite la volatilisation d'ammoniac mesurée en condition de

Tableau 2. Influence de la teneur en protéines de l'aliment sur les caractéristiques de l'effluent et la volatilisation d'ammoniac (Portejoie *et al* 2004).

Teneur en protéines, %	20 %	16 %	12 %
Composition de l'effluent			
Quantité (kg/porc/j)	5,7	5,1	3,6
MS (%)	4,4	4,6	5,9
N total (g N/kg)	5,48	4,30	3,05
N ammoniacal (g N/kg)	4,32	3,13	1,92
pH	8,92	8,61	7,57
Bilan N (g N /porc/j)			
Rétention	23,2	23,5	21,9
Excrétion	40,7	27,6	15,0
Volatilisation ammoniac	17,4	13,8	6,4
N disponible pour les plantes	23,3	13,8	8,6

laboratoire. Par ailleurs l'ajout de fibres favorise la production d'acides gras volatils dans l'intestin et l'effluent ce qui réduit également le pH. Canh *et al* (1998) ont ainsi mesuré une relation linéaire entre la quantité de fibres dans le régime d'une part et le pH de l'effluent et la volatilisation d'ammoniac d'autre part ; pour un accroissement de 100 g/j de la quantité de fibres ingérée le pH de l'effluent diminue de 0,12 point et la volatilisation d'ammoniac de 5,4%.

L'utilisation de l'azote de l'effluent par les plantes pourrait aussi être influencée par l'incorporation de fibres, une plus grande partie de l'azote étant excrétée sous forme organique dans les fèces. La disponibilité de l'azote de l'effluent est ainsi réduite lorsque la proportion de fibres non fermentescibles (lignine) est augmentée (Sorensen et Fernandez 2003) alors qu'elle n'est pas affectée avec l'ajout de fibre fermentescibles (Gerdmann *et al* 1999, Sorensen et Fernandez 2003) bien que la proportion de N excrété dans les fèces soit accrue dans tous les cas. La proportion d'azote urinaire et la teneur en fibres des fèces permettent de prédire de façon satisfaisante la disponibilité pour les plantes de l'azote des effluents (Sorensen et Fernandez 2003).

3 / Influence de l'alimentation sur les émissions de gaz à effet de serre

La digestion et l'utilisation métabolique des nutriments sont à l'origine de la production de deux gaz à effets de serre : le méthane (CH_4) émis lors des fermentations entériques (gros intestin dans le cas du porc) et le gaz carbonique (CO_2) émis par la respiration. Ces mêmes gaz sont également émis lors des fermentations micro-

biennes qui ont lieu pendant le stockage des effluents. Toutefois, dans l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre associés à l'élevage on ne comptabilise pas le CO_2 émis par les animaux ou les effluents puisque ce dernier fait partie d'un cycle court et correspond en fait à du CO_2 atmosphérique fixé par les plantes dans les mois ou l'année qui précèdent. Un troisième gaz à effet de serre, l'oxyde nitreux (N_2O) peut également être émis par les effluents au cours de leur stockage et lors de l'épandage.

La production d'origine entérique de méthane dépend principalement de la quantité de matière organique fermentée dans le gros intestin, qualifiée dans les travaux de Noblet *et al* (2002) de «Résidu Digestible» (Résidu digestible = Matière organique digestible - Matières azotées digestibles - Matières grasses digestibles - Amidon - Sucres - Lactose). Ce résidu digestible correspond, pour l'essentiel, à la fraction de fibres alimentaires digestibles. Les teneurs des aliments en résidu digestible, qui diffèrent pour les animaux adultes (troues et verrats) et les porcs en croissance, sont indiquées dans les tables INRA-AFZ (Sauvant *et al* 2004). La quantité de méthane (kg/j) liée aux fermentations dans le gros intestin peut alors être calculée en multipliant la quantité de résidu digestible par respectivement 0,024 et 0,012 pour les troues et les porcs en croissance (Noblet *et al* 2002). La quantité de méthane produite sera donc directement influencée à la fois par la composition du régime et la quantité d'aliment consommée (tableau 3). L'amélioration de l'efficacité alimentaire et la réduction de la teneur en fibres digestibles du régime constituent donc des voies à explorer pour réduire la production entérique de méthane. La production de méthane se poursuivant pendant le stockage des effluents il est vraisemblable qu'elle soit également influencée par la com-

position des excréta et en particulier leur teneur en matière organique et la composition de cette matière organique. Toutefois, il n'existe pas à notre connaissance d'études ayant évalué ces effets. Un potentiel de méthanisation élevé des effluents constituera un atout dans le cas de la mise en place d'un traitement anaérobie pour la production d'énergie, alors qu'il sera plutôt néfaste si les effluents ne sont pas traités, puisque dans ce cas la production non contrôlée de méthane sera accrue.

L'émission de N₂O a lieu lors des processus de nitrification et de dénitrification et nécessite une phase aérobie. On considère en général que cette émission est très faible pour les effluents liquides (anaérobiose) alors qu'elle peut être importante lorsque les effluents sont gérés sous la forme de litières. A notre connaissance, il n'existe pas d'étude relative à l'influence de la composition de l'aliment sur l'importance des émissions de N₂O. Toutefois, dans la mesure où dans les évaluations environnementales les émissions de N₂O sont généralement calculées en fonction du flux d'azote excrété (utilisation de facteurs d'émissions, IPCC 2006), toute réduction de ce dernier entraîne une réduction proportionnelle du flux de N₂O.

4 / Influence de l'alimentation sur les émissions d'odeurs

Les odeurs de porcherie sont principalement générées par des composés volatils excrétés par les porcs ou émis par les effluents lors du stockage et de l'épandage (de Lange *et al* 1999). Ces composés sont principalement générés par la conversion microbienne des aliments dans le gros intestin ou dans les

fosses de stockage. En se basant sur une synthèse bibliographique, Le (2006) a suggéré que les teneurs en protéines (surtout indigestibles) et en fibres fermentescibles joueraient un rôle majeur dans la production d'odeur. Peu d'études ont été consacrées à l'évaluation de l'influence de la composition de l'aliment sur la production d'odeurs, principalement en raison de la difficulté à les mesurer. Comme cela a été indiqué précédemment, la teneur en protéines de l'aliment influence la volatilisation de l'ammoniac, mais cette dernière n'est pas bien corrélée à l'émission d'odeur (Le 2006). En utilisant des techniques d'olfactométrie, Hayes *et al* (2004) ont montré une réduction des émissions à la fois d'odeur et d'ammoniac lorsque la teneur en protéines était réduite, mais cela n'est pas observé dans toutes les études. En utilisant des techniques analytiques Hobbs *et al* (1996) rapportent une réduction de la concentration dans l'air de neuf composés odorants, sur dix mesurés, chez les porcs recevant une quantité moindre de protéines. Le *et al* (2007) observent également une réduction de la quantité d'odeur produite mesurée par olfactométrie lorsque la teneur en protéines de l'aliment passe de 18 à 12%. Toutefois ces mêmes auteurs (Le *et al* 2007) indiquent qu'il existe une interaction entre la teneur en protéines et en fibres de l'aliment, suggérant que la production d'odeur dépendrait aussi de l'équilibre entre ces composants de la ration. La manipulation des fermentations intestinales apparaît aussi une voie efficace pour réduire la production de certains composés malodorants spécifiques comme le *skatol* (de Lange *et al* 1999) qui est responsable des odeurs de «verrat». En utilisant une toute autre méthodologie basée sur des scores permettant de qualifier les odeurs sur différentes échelles (\pm agréable, \pm irritante, \pm intense), Moeser *et al* (2003) ont pu discriminer significativement les

odeurs associées à différents régimes expérimentaux. Les régimes produisant les odeurs les plus nauséabondes étaient ceux les plus riches en soufre (riches en ail ou en farine de plumes). A l'inverse les régimes très digestibles, à base d'amidon et de caséines présentaient les scores les plus faibles (odeur plus agréable). Ce résultat est en accord avec l'étude de Le (2006) qui mesurait une augmentation très significative de la production d'odeur ($\times 7$) avec des régimes très fortement supplémentés en acides aminés soufrés (méthionine). L'influence des caractéristiques de l'aliment sur la production d'odeur semble donc confirmée dans plusieurs études. Toutefois les effets ne sont pas systématiques et l'on se heurte souvent, dans ce type d'études, aux difficultés méthodologiques de quantification des odeurs et à la méconnaissance des mécanismes impliqués dans leur production.

5 / Influence de l'alimentation sur l'excrétion de phosphore

Chez le porc à l'engraissement recevant une ration à base de céréales et de tourteau de soja, environ 45% du phosphore ingéré est absorbé au niveau intestinal, dont respectivement 30 et 15% sont retenus et excrétés dans l'urine (Poulsen *et al* 1999). Au total environ 70% du phosphore ingéré est donc rejeté avec ce type de rations. Pour réduire l'excrétion de P il convient, comme pour l'azote, de mieux ajuster les apports aux besoins des animaux et d'améliorer la digestibilité du P des rations, qui est particulièrement faible chez les animaux monogastriques (Poulsen 2000, Knowlton *et al* 2004). Ceci nécessite de bien connaître les facteurs de variation de la digestibilité du P dans les aliments ainsi que l'évolution des besoins des animaux.

Une première approche pour améliorer la digestibilité du P de la ration consiste à utiliser des sources de phosphate minéral plus digestibles. Ainsi le phosphate monocalcique, plus digestible, peut être utilisé au lieu du phosphate bicalcique (Sauvant *et al* 2004). Toutefois la démarche la plus efficace pour réduire l'excrétion consiste à améliorer la digestibilité du phosphore phytique (phytates) de la ration (Jongbloed et Lenis 1992). Les animaux monogastriques ne produisant pas (ou très peu) de phytase, l'enzyme nécessaire à l'hydrolyse des phytates, cette forme de phosphore, majoritaire

Tableau 3. Évaluation des émissions annuelles de CH₄ entérique par les différentes catégories de porcs.

Catégorie	Résidu digestible (g/kg) ⁽¹⁾	CH ₄ (kg/animal)	CH ₄ (g/j)	CH ₄ (kg/an) ⁽²⁾
Truie reproductrice				
gestation	95	-	6,26	1,86
lactation	110	-	17,04	1,16
total	-	-	8,27	3,02
Porcelet post-sevrage	91	0,041	0,87	0,316
Porc à l'engraissement	92	0,268	2,40	0,876

(1) Calculé pour des régimes habituels à base principalement de céréales et de tourteau de soja.

(2) Pour les porcelets et les porcs à l'engrais : rejet par place en supposant un taux d'occupation de 100%.

dans les céréales et les tourteaux, est en effet très mal digérée chez ces animaux. Une première approche consiste à valoriser les phytases contenues dans certaines céréales et leurs coproduits. Des valeurs de P digestible prenant en compte cet effet sont proposées dans les tables INRA-AFZ (Sauvant *et al* 2004) mais elles ne doivent être utilisées que pour des régimes distribués en farine compte tenu de la grande sensibilité des phytases végétales aux températures élevées de granulation. L'autre voie consiste à incorporer des phytases d'origine microbiennes, ce qui constitue aujourd'hui une pratique courante dans de nombreux pays. Cela permet de réduire l'apport de P minéral diminuant ainsi l'excrétion jusqu'à 40 à 50% (Jongbloed et Lenis 1992, Latimier *et al* 1994, tableau 4). Toutefois, la réponse à des apports croissants de phytase étant curvilinéaire, la digestibilité du P dépasse rarement 60-70% même pour des niveaux très élevés de supplémentation. Des équations d'équivalence entre phytase microbienne et P digestible ont été calculées à partir de la bibliographie et peuvent être utilisées pour la formulation des aliments (Kornegay 2001, Johansen et Poulsen 2003, Jondreville et Dourmad 2005).

La seconde approche pour réduire l'excrétion de P consiste à mieux ajuster les apports au cours du temps en fonction du potentiel de croissance ou du stade physiologique des animaux. Ceci nécessite d'évaluer précisément les besoins des animaux et la disponibilité du P des aliments. C'est maintenant possible grâce d'une part au développement d'un système d'évaluation de la valeur du phosphore basé sur sa digestibilité apparente (Sauvant *et al* 2004) et d'autre part du calcul factoriel des besoins (Jongbloed *et al* 1999a, Jondreville et Dourmad 2005). Au final, ceci permet de réduire les marges de sécurité longtemps utilisées, compte tenu de l'impré-

cision des connaissances, pour la formulation des aliments, et par conséquent de réduire l'excrétion de P.

6 / Influence de l'alimentation sur l'excrétion de cuivre et de zinc

Le cuivre et le zinc sont impliqués dans de nombreuses fonctions métaboliques et physiologiques ; leur apport en quantité suffisante est donc nécessaire pour assurer de bonnes performances et une bonne santé des animaux (Jondreville *et al* 2002, Revy *et al* 2003). Toutefois ces éléments sont souvent incorporés en quantités bien supérieures aux stricts besoins des animaux, compte tenu de leurs effets comme facteurs de croissance ou encore en raison de l'utilisation de marges de sécurité importantes. En conséquence, ils se retrouvent en forte concentration dans les effluents ce qui peut à terme entraîner une toxicité pour les plantes ou les microorganismes du sol (Jondreville *et al* 2003). De plus, lorsque les effluents sont traités, ils se retrouvent dans la fraction solide à des concentrations qui ne permettent pas, pour des raisons réglementaires, de commercialiser ces produits comme amendements organiques. La seule façon de réduire la teneur des effluents en éléments traces métalliques est d'en réduire l'incorporation dans les aliments.

L'incorporation comme facteur de croissance de 150 à 250 ppm de Cu dans les aliments pour les porcs est pratiquée depuis très longtemps. Cette pratique est toujours autorisée dans l'UE mais seulement chez les porcs de moins de 12 semaines et à une teneur maximale de 170 ppm (EU, 1334/2003). Après 12 semaines d'âge, l'utilisation de Cu comme facteur de croissance est interdite et le niveau maximal d'in-

corporation est fixé à 25 ppm. Comparativement aux pratiques antérieures (175 ppm jusque 16 semaines et 100 ppm ensuite (scénario A, tableau 5), la nouvelle réglementation a entraîné une réduction de près de 60% des rejets (scénario B, tableau 5). Malgré tout, ces apports restent bien supérieurs aux besoins stricts des animaux (moins de 10 ppm) et l'efficacité de rétention reste inférieure à 1%.

De même que pour le cuivre, la supplémentation des régimes par 1500 à 3000 ppm de Zn sous forme de ZnO améliore significativement la croissance des porcelets au sevrage (Poulsen 1995). Depuis 2003 (EU, 1334/2003), le taux maximal d'incorporation de Zn dans les aliments pour le porc a été réduit à 150 ppm contre 250 ppm auparavant, soit un niveau bien inférieur à celui requis pour observer un effet facteur de croissance. Ce niveau est aussi beaucoup plus proche des besoins physiologiques qui varient entre 100 et 50 ppm selon le poids des animaux et les auteurs (Revy *et al* 2005). Comparativement à la situation dans laquelle les porcelets reçoivent un aliment contenant 2500 ppm de Zn entre 8 et 15 kg et 250 ppm ensuite (scénario D, tableau 5), la réglementation actuelle (150 ppm Zn) entraîne une réduction de 53% de l'excrétion (scénario F, tableau 5).

Comme pour le phosphore, la voie principale de réduction des rejets de Cu et de Zn consiste à ajuster leurs apports aux besoins et à améliorer leur disponibilité dans l'aliment. Les besoins en Zn du porcelet ont été réévalués récemment à environ 90 mg/kg aliment (Revy *et al* 2005) ce qui est en accord avec les recommandations précédentes mais inférieur aux pratiques habituelles de formulation. Lorsque le régime est supplémenté par des phytases microbiennes les apports de Zn peuvent être réduits en raison de l'amélioration de la digestibilité du Zn lié aux phytates de la ration. Chez le porcelet, l'incorporation de 500 FTU de phytase/kg d'aliment est ainsi équivalente à l'apport de 30 ppm de Zn sous la forme de sulfate (Jondreville *et al* 2005), soit l'équivalent de près de 30% du besoin des porcelets.

Avec les recommandations actuelles les teneurs en Cu et en Zn des effluents (environ respectivement 350 et 1250 mg/kg MS) sont inférieures aux teneurs autorisées en France pour l'épandage des boues de station d'épuration (respectivement 1000 et

Tableau 4. Influence de trois stratégies d'alimentation en phosphore des porcs à l'engraissement (30-102 kg) sur leurs performances et sur l'excrétion de phosphore (adapté de Latimier *et al* 1994).

	Régime sans P minéral	Régime avec P minéral	Régime phytase sans P minéral
Teneur en phosphore (g/kg)	3,9	5,2	3,7
Activité phytasique (UI/kg)	210	205	735
Vitesse de croissance (g/j) ⁽¹⁾	764 ^a	805 ^b	795 ^b
Indice de consommation (kg/kg)	2,73	2,65	2,66
Résistance des os (N.m)	11,9 ^a	13,7 ^b	14,3 ^b
Volume d'effluent (l/porc)	358	337	331
P dans l'effluent (kg/porc)	0,36	0,50	0,26

(1) les moyennes affectées d'indices différents diffèrent significativement (P < 0,05), pas d'analyse statistique sur les caractéristiques des effluents.

Tableau 5. Estimation des bilans de Zn et de Cu pour différentes stratégies d'alimentation⁽¹⁾.

	Cu			Zn			
	A	B	C	D	E	F	G
Concentration de l'aliment (ppm)							
porcelets 1 ^{er} âge	175	170	10	2500	250	150	70
porcelets 2 ^{ème} âge	175	170	10	250	250	150	50
engraissement	120	25	10	250	250	150	30
truies	100	25	10	250	250	150	70
Bilan (0-110 kg PV) (g/porc)							
ingéré	42,6	13,5	3,3	84,1	68,3	41,7	9,0
excrété	42,5	13,4	3,2	81,7	65,9	39,3	6,7
Teneur dans l'effluent (mg/kg MS)	1119	351	84	2542	2128	1269	284
Années pour atteindre un seuil à risques ⁽²⁾	47	160	941	79	95	167	1160

(1) Calculé d'après Jondreville et al (2003) ; scénarios A, D, E : ancienne réglementation de l'UE, scénarios B, F : réglementation actuelle de l'UE, scénarios C, G : perspectives.

(2) 50 mg Cu ou 150 mg Zn /kg MS sol.

3000 mg/kg MS), mais elles dépassent les teneurs autorisées pour les fertilisants organiques (respectivement 300 et 600 mg/kg MS). Avec l'hypothèse que 170 kg d'N d'effluents porcins par hectare sont épandus chaque année, il faudrait environ 150 ans pour que le sol atteigne les teneurs de 50 mg Cu et 150 mg Zn /kg MS auxquelles des effets peuvent être observés sur la microflore du sol. Ce délai est bien plus long que celui estimé avec les pratiques antérieures (25 à 50 ans). Toutefois, bien que la situation ait été significativement améliorée par la nouvelle réglementation, les épandages de Cu et de Zn restent encore supérieurs aux capacités d'exportation des cultures. Des réductions plus poussées des apports de

Cu et de Zn peuvent être envisagées pour l'avenir (scénarios C et G, tableau 5) conduisant à un meilleur équilibre entre les épandages et l'exportation par les plantes.

Conclusion

L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des nutriments par les animaux est une voie efficace pour en réduire l'excrétion. Au niveau de l'exploitation, ceci permet de réduire l'entrée de nutriments, en particulier d'azote, de phosphore et d'éléments traces métalliques, provenant d'exploitations voisines ou importés sur de plus longues

distances. L'alimentation apparaît également une voie efficace pour modifier les caractéristiques des effluents et réduire ainsi les émissions gazeuses en particulier d'ammoniac et dans une certaine mesure de méthane et d'odeurs. Cependant, la prise en compte de contraintes environnementales dans les pratiques d'alimentation ne doit pas se limiter aux impacts directs au niveau de l'animal ou de l'effluent. En effet, les pratiques doivent aussi se raisonner à différentes échelles de temps et d'espace, en intégrant par exemple les émissions et consommations de ressources indirectement associées à l'alimentation, notamment pour la production des cultures nécessaires à la fabrication de l'aliment.

Références

- Bourdon D., Dourmad J.Y., Henry Y., 1997. Reduction of nitrogen output in growing pigs by multiphase feeding with decreased protein level. 48th Ann. Meet. E.A.A.P., 25-28 August, Vienna, 332p.
- Canh T.T., Aarnink A.J.A., Mroz Z., Jongbloed A.W., Schrama J.W., Verstegen M.W.A., 1998. Influence of electrolyte balance and acidifying calcium salts in the diet of growing-finishing pigs on urinary pH, slurry pH and ammonia volatilisation from slurry. *Livest. Prod. Sci.*, 56, 1-13.
- Daumer M.L., Guizou F., Dourmad J.Y., 2007. Influence de la teneur en protéines de l'aliment et de l'addition d'acide benzoïque et de phytase microbienne sur les caractéristiques des effluents chez le porc à l'engraissement. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 39, 13-22.
- de Lange K., Nyachoti M., Birkett S., 1999. Manipulation of diets to minimize the contribution to environmental pollution. *Adv. Pork Prod.*, 19, 173-186.
- Dourmad J.Y., Henry Y., Bourdon D., Quiniou N., Guillou D., 1993. Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs. In: Nitrogen flow in pig production and environmental consequences. Verstegen M.W.A., den Hartog L.A., van Kempen G.J.M., Metz J.H.M. (Eds), Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, Pays-Bas, EAAP Publication, 69, 206-211.
- Dourmad J.Y., Le Mouél C., Rainelli P., 1995. Réduction des rejets azotés des porcs par la voie alimentaire : évaluation économique et influence des changements de la Politique Agricole Commune. *INRA Prod. Anim.*, 8, 135-144.
- Dourmad J.Y., Guingand N., Latimier P., Sève B., 1999a. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production: France. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 199-211.
- Dourmad J.Y., Sève B., Latimier P., Boisen S., Fernandez J., Van de Peet-Schwering C., Jongbloed A.W., 1999b. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livest. Prod. Sci.* 58, 261-264.
- 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.
- Gerdman M.M., Machmüller A., Frossard E., Kreuzer M., 1999. Effect of different pig feeding strategies on the nitrogen fertilizing value of slurry for *Lolium multiflorum*. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 162, 401-408.
- Hayes E.T., Leek A.B.G., Curran T.P., Dodd V.A., Carton O.T., Beattie V.E., O'Doherty J.V., 2004. The influence of diet crude protein level on odour and ammonia emissions from finishing pig houses. *Bioresource Technol.*, 91, 309-315.
- Hobbs P.J., Pain B.F., Kay R.M., Lee P.A., 1996. Reduction of odorous compounds in fresh pig slurry by dietary control of crude protein. *J. Sci. Food Agric.*, 71, 508-514.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds). IGES, Japan.
- Johansen K., Poulsen H.D., 2003. Substitution of inorganic phosphorus in pig diets by microbial phytase supplementation - a review. *Pig News Info.*, 24, 77N-82N.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. Numéro Spécial Phosphore. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.

- Jondreville C., Revy P.S., Jaffrezic A., Dourmad J.Y., 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligoélément essentiel, facteur de croissance et risque potentiel pour l'homme et l'environnement. *INRA Prod. Anim.*, 15, 247-265.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.Y., 2003. Dietary means to better control the environmental impact of copper and zinc by pigs from weaning to slaughter. *Livest. Prod. Sci.*, 84, 147-156.
- Jondreville C., Hayler R., Feuerstein D., 2005. Replacement of zinc sulphate by microbial phytase for piglets fed a maize-soybean meal diet. *Anim. Sci.*, 81, 77-83.
- Jongbloed A.W., Lenis N.P., 1992. Alteration of nutrition as a means to reduce environmental pollution by pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 31, 75-94.
- Jongbloed A.W., Everts H., Kemme P.A., Mroz, Z., 1999a. Quantification of absorbability and requirements of macroelements. In: *Quantitative biology of the pig*. Kyriazakis I. (Ed), CABI, Wallingford, UK, 275-298.
- Knowlton K.F., Radcliffe J.S., Novak C.L., Emmerson D.A., 2004. Animal management to reduce phosphorus losses to the environment. *J. Anim. Sci.*, 82, E173-E195.
- Kornegay E. T., 2001. Digestion of phosphorus and other nutrients: the role of phytases and factors influencing their activity. In: *Enzymes in farm animal nutrition*. Bedford M.R., Partridge G.G. (Eds), CAB International, Wallingford, UK, 237-271.
- Kreuzer M., Machmüller A., Gerdemann M.M., Hanneken H., Wittmann M., 1998. Reduction of gaseous nitrogen loss from pig manure using feeds rich in easily-fermentable non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 73, 1-19.
- Latimier P., Dourmad J.Y., 1993. Effect of three protein feeding strategies, for growing-finishing pigs, on growth performance and nitrogen output in the slurry and in the air. In: *Nitrogen flow in pig production and environmental consequences*. Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, The Netherlands, 242-245.
- Latimier P., Pointillart A., Corlouër A., Lacroix C., 1994. Influence de l'incorporation de phytase microbienne dans les aliments, sur les performances, la résistance osseuse et les rejets phosphorés chez le porc charcutier. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 26, 107-116.
- Le P.D., 2006. Odor from pig production: its relation to the diet, Wageningen University, The Netherlands. Ph.D.Thesis, 2006.
- Le P.D., Aarnink A.J.A., Jongbloed A.W., van der Peet-Schwering C.M.C., Verstegen M.W.A., Ogink N.W.M., 2007. Effects of dietary crude protein level on odor from pig manure, *Animal*, 1, 734-744.
- Moesser A.J., See M.T., van Heugten E., Morrow W.E.M., van Kempen T.A.T.G., 2003. Diet and evaluators affect perception of swine waste odor: An educational demonstration. *J. Anim. Sci.*, 81, 3211-3215.
- Noblet J., Sève B., Jondreville C., 2002. Valeurs nutritives pour les porcs. In : *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons*. Sauvart D., Perez J.M., Tran G. (Eds), INRA Editions, Versailles, France, 25-35.
- Pomar C., Pomar J., Babet D., Dubeau F., 2007. Effet d'une alimentation multiphase quotidienne sur les performances zootechniques, la composition corporelle et les rejets d'azote et de phosphore du porc charcutier. *J. Rech. Porcine Fr.*, 39, 23-30.
- Portejoie S., Martinez J., Landmann G. 2002. L'ammoniac d'origine agricole : impacts sur la santé humaine et animale et sur le milieu naturel. *INRA Prod. Anim.*, 15, 151-160.
- Portejoie S., Dourmad J.Y., Martinez J., Lebreton Y., 2004. Effect of lowering crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 91, 45-55.
- Poulsen H.D., 1995. Zinc oxide for weaning piglets. *Acta Agric. Scand.*, 59, 159-167.
- Poulsen H.D., 2000. Phosphorus utilization and excretion in pig production. *J. Environ. Qual.*, 29, 24-27.
- Poulsen H. D., Jongbloed A.W., Latimier P., Fernandez J.A., 1999. Phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production in France. The Netherlands and Denmark. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 251-259.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J.Y., Nys Y., 2003. Le zinc dans l'alimentation du porc : oligoélément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. *INRA Prod. Anim.*, 16, 3-18.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J.Y., Nys Y., 2005. Assessment of dietary zinc requirement of weaned piglets fed diets with or without microbial phytase. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 90, 50-59.
- Sauvart D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. INRA Editions, Paris, France, 301p.
- Sorensen P., Fernandez J.A., 2003. Dietary effects on the composition of pig slurry and on the plant utilisation of pig slurry nitrogen. *J. Agri. Sci.*, 140, 343-355.
- van de Peet-Schwering C.M.C., Aarnink A.J.A., Rom H.B., Dourmad J.Y., 1999. Ammonia emissions from pig houses in the Netherlands, Denmark and France. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 265-269.
- van Kempen, T.A.T.G., 2001. Dietary adipic acid reduces ammonia emission from swine excreta. *J. Anim. Sci.* 79, 2412-2417.
- 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.

Résumé

De nombreux travaux ont été conduits au cours de ces dernières années afin de réduire l'excrétion d'azote, de phosphore, du cuivre et de zinc par les porcs. Les voies envisagées consistent d'une part à mieux ajuster les apports aux besoins des animaux et d'autre part à améliorer la biodisponibilité de ces nutriments dans les aliments. L'alimentation par phases combinée à une amélioration de l'équilibre en acides aminés du régime permet de réduire de façon substantielle les rejets d'azote. L'utilisation de régimes moins riches en protéines permet également de réduire les émissions d'ammoniac et dans une certaine mesure la production d'odeur. L'alimentation par phase est aussi efficace pour réduire l'excrétion de P. Cependant la faible digestibilité du P reste le principal problème, même si elle peut être significativement améliorée grâce à l'incorporation de phytases d'origine microbienne et l'utilisation de phosphates hautement digestibles. De la même manière la réduction des apports alimentaires de Cu et de Zn est très efficace pour en réduire l'excrétion. Au niveau de l'exploitation ces différentes approches permettent de réduire l'entrée de nutriments, en particulier d'azote de phosphore et d'éléments traces métalliques, et elles contribuent ainsi à réduire l'impact environnemental.

Abstract

Effect of pig nutrition on excretion of nitrogen, phosphorus, copper and zinc in manure and on emissions of ammonia, greenhouse gases and odours

In order to reduce N, P and trace elements in pig manure, research towards a better agreement between supply and requirement was undertaken in recent years, and the ways to improve the biological availability of these elements in feedstuffs were investigated. Substantial reduction in N excreted by pigs can be achieved by phase feeding combined with a better adjustment of dietary amino acid balance. Feeding pigs with low N diets also allows a reduction of ammonia emission and to some extent the production of malodorous

compounds. Phase feeding is also effective in reducing P excretion. However, low digestibility of P in feeds remains the main problem although it is partly alleviated by the supplementation of pig diets with microbial phytase and the use of highly digestible mineral phosphates. In the same way, lowering Cu and Zn dietary supply is obviously an efficient way to reduce pig excretion of Cu and Zn. In a whole farm perspective, improving the efficiency of nutrient utilisation by the animals is an efficient way to reduce the import of nutrients from outside the farm and decrease environmental risks.

DOURMAD J.-Y. RIGOLOTT C., JONDREVILLE C., 2009. Influence de la nutrition sur l'excrétion d'azote, de phosphore, de cuivre et de zinc des porcs, et sur les émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et d'odeurs. *Inra Prod. Anim.*, 22, 41-48.