

Le zinc dans l'alimentation du porc : oligo- élément essentiel et risque potentiel pour l'environnement

Le risque de pollution des sols cultivés, engendré par la concentration élevée de zinc dans les effluents porcins, existe dans certaines régions à forte densité d'élevage. En effet, l'apport de zinc souvent excessif dans l'aliment, couplé à une absorption faible, sont à l'origine de rejets importants par le porc. La réduction de l'apport alimentaire est envisageable, mais nécessite une connaissance précise des besoins et des facteurs de variation de la disponibilité du zinc chez le porc.

L'accumulation d'éléments traces métalliques dans les sols cultivés suscite actuellement un vif intérêt dans les zones à forte densité d'élevage. Selon certains auteurs (Coppenet *et al* 1993, Poulsen 1998, Jondreville *et al* 2002), cette accumulation, consécutive à l'épandage du lisier, constitue un risque majeur de pollution de l'environnement. En raison de sa faible absorption,

moins de 20 % de la quantité ingérée par le porc (Poulsen et Larsen 1995), le zinc est l'un des oligo-éléments concernés par ce risque. L'apport de zinc par les matières premières seules ne permet pas de couvrir les besoins du porc dans la mesure où la disponibilité du zinc chez les animaux monogastriques, notamment le porc, est affectée par certains composants de la ration (Oberleas *et al* 1962). L'addition de zinc dans les compléments alimentaires est donc nécessaire, mais elle est souvent pratiquée de façon excessive, jusqu'à 250 mg/kg quel que soit l'âge des animaux, afin de respecter une marge de sécurité couvrant les variations de disponibilité du zinc des matières premières et garantissant ainsi la couverture des besoins de l'animal.

Résumé

Le zinc est un oligo-élément essentiel qui intervient dans la plupart des fonctions biologiques de l'animal. La perte d'appétit, la diarrhée, le retard de croissance ou la parakératose sont les principaux symptômes d'une carence en zinc qui peuvent apparaître chez le porc recevant une alimentation non supplémentée en zinc. La méconnaissance des besoins en zinc du porc et des facteurs de variation de sa disponibilité conduit à l'incorporer de manière excessive dans les aliments. Cette pratique génère des rejets importants et augmente le risque de pollution des sols cultivés. L'ajustement des apports de zinc aux besoins de l'animal et l'amélioration de sa disponibilité sont des solutions qui permettent d'en réduire les apports. Une revue des données de la littérature nous permet d'estimer les besoins en zinc du porc en fonction du poids vif. L'utilisation d'additifs, notamment de phytase microbienne, permet d'améliorer la disponibilité du zinc. A partir des résultats de la littérature, nous estimons que l'activité de 1000 unités de phytase microbienne par kg d'aliment est équivalente à une addition de 24 et 19 mg/kg de zinc sous forme de sulfate chez le porcelet de respectivement 15 et 25 kg. Ces estimations sont à valider expérimentalement. D'autres voies d'amélioration de la disponibilité du zinc doivent également être explorées.

Le zinc est un oligo-élément dit essentiel car son retrait provoque dans l'organisme des anomalies structurelles et physiologiques voisines chez plusieurs espèces et son seul apport prévient ou guérit ces troubles (Favier *in* Chappuis 1991). Le rôle essentiel du zinc a été démontré pour la première fois par Raulin (1869) pour la croissance d'*Aspergillus niger*, puis par Bertrand et Bhattacherjee (1935) chez l'animal. Au milieu des années cinquante, Tucker et Salmon (1955) montrent qu'une affection cutanée, appelée parakératose, est

causée par une carence en zinc chez le porc et qu'une addition suffisante de zinc dans l'aliment prévient et guérit cette maladie.

Après le fer, le zinc est l'élément trace le plus abondant dans l'organisme. Un porc de 100 kg contient entre 1,5 et 2,5 g de zinc (Kirchgessner *et al* 1994, Mahan et Newton 1995, Mahan et Shields 1998). Environ 60 % du zinc corporel est contenu dans les tissus musculaires (Swinkels *et al* 1994), 30 % dans le squelette osseux et le reste dans les organes (foie, pancréas, rein, poumon, cœur, cerveau). Les poils (200 mg/kg MS) et le foie présentent les concentrations de zinc les plus élevées. La teneur en zinc du plasma, qui représente 0,1 % du zinc corporel, est de 1 mg/l chez le porc comme chez la plupart des mammifères.

Après avoir rappelé, dans une première partie, les fonctions et le métabolisme du zinc dans l'organisme ainsi que les principaux effets d'une carence en zinc chez le porc, nous nous intéresserons à la biodisponibilité et aux sources d'apport de zinc en mettant l'accent sur les facteurs de variation de sa disponibilité. Puis, à partir des données de la littérature, les besoins en zinc du porc seront estimés et comparés aux différentes recommandations d'apport alimentaire. Ensuite, nous ferons le point sur l'effet de l'utilisation du zinc en excès sur l'incidence des diarrhées de post-sevrage et sur la vitesse de croissance. Enfin nous estimerons, dans une dernière partie, l'impact des rejets de zinc sur l'environnement selon différents scénarios d'apport dans l'alimentation du porc.

1 / Métabolisme et fonctions du zinc

L'ensemble de cette partie a été rédigé en s'appuyant essentiellement sur l'ouvrage de Chappuis (1991) et sur la synthèse de Hill et Spears (2001), auxquels le lecteur pourra se référer.

1.1 / Fonctions du zinc

Le zinc joue un rôle dans l'expression des gènes, la stabilisation de la structure des protéines, la réplication cellulaire, la stabilisation de la membrane et du cytosquelette et dans la structure des hormones. Il intervient dans la plupart des métabolismes biologiques fondamentaux (synthèse et dégradation des glucides, lipides, protéines et acides nucléiques) par l'intermédiaire de plus de 300 enzymes dans les 6 classes : oxydoréductases, transférases, hydrolases, lyases, isomérases et ligases (Vallee et Falchuk 1993). Dans ces métalloenzymes, son rôle peut être structural, catalytique, régulateur ou mixte (structural/catalytique, régulateur/catalytique). Parmi ces enzymes, la phosphatase alcaline, qui hydrolyse les monoesters de phosphates en divers composés incluant ceux impliqués dans le métabolisme osseux, contient 4 atomes de zinc par molécule dont 2 sont nécessaires pour son activité. Dans le sang, 80 % du zinc est conte-

nu dans les érythrocytes sous forme d'anhydrase carbonique principalement (85 %) et de superoxyde dismutase (SOD) à cuivre et zinc (5 %). L'anhydrase carbonique intervient dans l'élimination du dioxyde de carbone. Son rôle est essentiel pour la vie et un changement de statut en zinc est sans effet sur son activité. La SOD, qui nécessite 2 atomes de cuivre et 2 de zinc pour fonctionner, participe à la transformation des ions superoxyde en peroxyde d'hydrogène et en oxygène. Toutefois, l'activité de cette enzyme reflète plutôt le statut en cuivre qu'en zinc.

Le zinc stabilise également la structure tertiaire d'hormones peptidiques (insuline, NGF : facteur de croissance des nerfs, gustine, thyroïdine), leur conférant une forme active ou une plus grande stabilité.

1.2 / Métabolisme du zinc

a / Absorption

L'absorption est définie comme étant la proportion d'un nutriment de l'aliment qui passe de la lumière intestinale, à travers la muqueuse, dans la circulation portale (O'Dell 1984). Le site principal d'absorption du zinc semble être l'intestin grêle, bien que toutes les parties de l'intestin puissent y participer. La captation du zinc par la bordure en brosse de l'intestin s'effectue selon plusieurs processus dont l'implication dépend de la concentration du zinc dans le chyme intestinal (Cousins 1996). Lorsque celle-ci est faible, le zinc est capté par la bordure en brosse selon un processus actif, spécifique et saturable, mettant en jeu un transporteur. A l'inverse, lorsqu'elle est élevée, le zinc traverserait la paroi de l'intestin selon un processus passif, non spécifique et non saturable. La diffusion paracellulaire représente la principale composante non saturable de l'absorption du zinc, car les ions zinc sont hydrophiles et ne peuvent traverser la membrane par diffusion passive (Cousins et McMahon 2000).

La forme sous laquelle le zinc franchit la membrane intestinale est incertaine. Le zinc libéré des composants alimentaires se lierait à un ou plusieurs types de ligands absorbables de faibles poids moléculaires tels que des peptides, acides aminés, nucléotides, phosphates et/ou acides organiques (Swinkels *et al* 1994, Cousins 1996, Cousins et McMahon 2000, Krebs 2000). Le complexe zinc-ligand ainsi formé entrerait intact dans la cellule grâce au système de transport spécifique du ligand ou présenterait le zinc à un récepteur membranaire pour le libérer à l'intérieur de la cellule. Dans l'entérocyte, une partie du zinc est utilisée par des métalloenzymes natives et des protéines membranaires. Une autre partie reste liée dans la cellule aux métallothionéines ou est exportée vers la circulation portale.

b / Transport

La principale fraction du zinc plasmatique (environ 65 %) est faiblement liée à l'albumine

Le zinc joue un rôle dans la plupart des métabolismes fondamentaux par l'intermédiaire de plus de 300 enzymes.

et l'autre fraction (environ 30 %) est fortement liée à l' α_2 -macroglobuline (Cousins 1985). D'autres protéines, telles que la transferrine, la glycoprotéine riche en histidine, et peut-être les métallothionéines ainsi que des acides aminés forment des liaisons avec le zinc dans le plasma (Cousins 1996).

c / Métabolisme

Le foie, qui contient moins de 5 % du zinc total, joue un rôle central dans le transfert et la distribution du zinc (Underwood 1977, Vallee 1983). Selon Rucker *et al* (1994), environ 30 à 40 % du zinc nouvellement absorbé sont captés par le foie dont une fraction significative retourne dans le plasma. Le zinc lié à l'albumine est supposé représenter la source principale de zinc pour les tissus autres que le foie, bien que les mécanismes de captation ne soient pas bien connus (Cousins 1996). La captation du zinc par les tissus semble être liée à leur besoin et aux rôles de stockage des différents organes. Le zinc qui reste dans le foie peut être associé à la membrane des cellules hépatiques, à des métalloenzymes, être stocké au niveau des métallothionéines ou être excrété via la bile.

d / Excrétion

Le zinc est principalement excrété par voie fécale selon deux composantes : le zinc alimentaire non absorbé et le zinc endogène. L'excrétion urinaire constitue une voie mineure d'élimination du zinc, de 1 à 2 % de l'excrétion totale chez le porc (Adeola 1995, Poulsen et Larsen 1995).

Le zinc contenu dans les sécrétions gastriques, pancréatiques, biliaires et intestinales, dans les desquamations des cellules de la muqueuse intestinale et dans la salive représente la composante endogène. Chez le porc, la contribution relative des sécrétions biliaires et pancréatiques dépend de la quantité de zinc ingéré (Sullivan *et al* 1981). Lorsque le zinc ingéré permet de satisfaire le besoin de l'animal, les sécrétions pancréatiques de zinc sont plus abondantes que les sécrétions biliaires, alors que l'inverse est observé chez l'animal déficient.

Le zinc sécrété dans l'intestin, dont la quantité est aussi importante que celle ingérée (Buckley 2000), est susceptible d'être réabsorbé de la même manière que le zinc exogène après mélange avec les résidus digestifs de l'aliment. L'efficacité de réabsorption dépendrait alors de la composition du régime.

e / Régulation homéostatique

Lors d'une déficience en zinc, l'absorption augmente, grâce à l'accroissement du nombre de récepteurs ou de ligands auxquels le zinc s'associe (Swinkels *et al* 1994). Les pertes endogènes diminuent et/ou la réabsorption du zinc endogène sécrété dans la lumière intestinale augmente (Aggett 1991). Poulsen et Larsen (1995) suggèrent que le porc est capable de s'adapter à une déficience en zinc car la digestibilité apparente, mesurée entre

35 et 45 kg, augmente de 19,2 à 28,5 % lorsque le régime n'est pas supplémenté en zinc. Dans cet essai, l'excrétion urinaire de zinc varie peu avec l'apport de zinc, alors que Kalinowski et Chavez (1986) montrent qu'elle diminue chez les animaux déficients. Dans les tissus, on observe une diminution du turnover (Windisch et Kirchgessner 1994) et une redistribution du zinc permettant de maintenir la concentration de zinc dans certains tissus au détriment d'autres (King 1990, Buckley 2000). La teneur en zinc des muscles ou de la peau est ainsi maintenue alors que celle de l'os, du foie et du plasma chute. L'os, le foie et le plasma représentent un pool de zinc rapidement échangeable utilisé lorsque la quantité de zinc ingéré ne permet plus de maintenir l'homéostasie. Selon King (1990), la mesure du zinc plasmatique constitue un indicateur valide de la taille du pool de zinc échangeable, car une réduction du zinc plasmatique reflète une perte de zinc de l'os et du foie et une augmentation du risque de développement de signes métaboliques et cliniques d'une déficience en zinc.

A l'inverse, lorsque le zinc est en excès dans l'aliment, l'absorption diminue et le stockage dans les entérocytes au niveau des métallothionéines augmente (Chesters 1992). De plus, le turnover dans les tissus (Windisch et Kirchgessner 1994) et les sécrétions endogènes de zinc augmentent.

1.3 / Effets d'une carence en zinc chez le porc

Les symptômes d'une carence en zinc sont identiques chez tous les mammifères et leur apparition n'est pas la conséquence d'un dysfonctionnement particulier, mais plutôt de la détérioration d'un ensemble de fonctions. Ces symptômes, rapidement réversibles par une supplémentation en zinc, surviennent plutôt lorsque le besoin en zinc est élevé, comme chez les jeunes animaux à croissance rapide ou pendant la gestation et la lactation (Kirchgessner *et al* 1993).

Chez le porc, les principaux signes cliniques d'une carence en zinc sont la perte d'appétit, la diarrhée, le retard de croissance et la parakérose (Scott 1972). Ces différents symptômes semblent se manifester presque simultanément, bien que la diminution de l'appétit et le retard de croissance surviennent avant le développement de la parakérose (Stevenson et Earle 1956, Smith *et al* 1961). Les cas extrêmes de carence en zinc peuvent éventuellement conduire à la mort de l'animal (Smith *et al* 1961).

a / Perte d'appétit et diarrhée

L'anorexie est souvent l'un des premiers signes apparents d'une carence en zinc, mais les mécanismes restent encore mal connus. Néanmoins, le zinc est un composant de la gustine, protéine impliquée dans l'acuité gustative. Parallèlement à la perte d'appétit, des diarrhées peuvent être observées (Stevenson et Earle 1956), qui s'expliquent par une dimi-

nution du renouvellement des entérocytes et de la taille des villosités (Chappuis et Favier 1995).

b / Retard de croissance

La détérioration de l'utilisation des nutriments (Miller *et al* 1968), qui peut être causée par l'apparition de diarrhées (Swinkels *et al* 1996), ainsi que la diminution de l'appétit n'expliquent pas totalement le retard de croissance observé lors d'une carence en zinc (Underwood 1977). En effet, ce retard est également dû à une diminution de l'activité des ARN et ADN polymérase et de la thymidine kinase. Ces variations d'activité enzymatique provoquent des modifications de la réplication et de la transcription de l'ADN pendant la division cellulaire, une diminution de la synthèse des protéines et une augmentation de leur catabolisme, à l'origine du retard de croissance.

c / Parakératose

La parakératose se manifeste par l'apparition de plaques rougeâtres tout d'abord sur les parties inférieures des membres, puis, en devenant suintantes et confluentes et en se couvrant de croûtes noirâtres, se répandent sur la majorité du corps lors d'une carence sévère en zinc (Mornet *et al* 1982).

Le zinc est nécessaire au fonctionnement cutané. Une carence a un effet global sur la synthèse des protéines et plus particulièrement celle du collagène (protéine extracellulaire agissant comme renfort et intervenant dans le processus de cicatrisation) et un effet sur la prolifération des fibroblastes (cellules allongées du tissu conjonctif intervenant dans la synthèse du collagène).

1.4 / Reproduction et descendance

Chez le rat, tous les stades de la reproduction peuvent être affectés par une carence en zinc et des malformations congénitales du squelette, du système nerveux et des poumons peuvent être observées sur la progéniture (Underwood 1977, Hurley 1981).

Chez la truie, une carence en zinc conduit à une parturition plus longue et plus difficile (Kalinowski et Chavez 1986), un moindre nombre de porcelets nés totaux (Hoekstra *et al* 1967) et vivants (Hoekstra *et al* 1967, Kalinowski et Chavez 1986) par portée, un moindre poids de portée à la naissance (Kalinowski et Chavez 1986) et des malformations congénitales de la progéniture (Hill *et al* 1983a). Hoekstra *et al* (1967) ont montré que la teneur en zinc du foie et l'activité de la phosphatase alcaline sérique des porcelets à la naissance étaient très affectées par la déficience en zinc des mères. Selon Hedges *et al* (1976), la descendance n'a pas de réserves suffisantes en zinc pour permettre une croissance optimale.

La concentration du zinc diminue de 14,4 mg/l dans le colostrum à 6,8 mg/l dans le lait puis reste constante de la première à la troisième

semaine de lactation (Hill *et al* 1983b). La teneur en zinc du colostrum est élevée quelle que soit la quantité de zinc ingérée par les mères (voir par exemple Hill *et al* 1983b). La teneur en zinc du lait, en revanche, augmente ou non avec la supplémentation en zinc de l'aliment de la truie, selon les études (Hill *et al* 1983b, Kalinowski et Chavez 1986). Par ailleurs, Kalinowski et Chavez (1986) montrent que les teneurs en fer, cuivre et manganèse du colostrum et la teneur en cuivre du lait des truies carencées en zinc sont plus élevées que chez les animaux supplémentés.

2 / Biodisponibilité et sources d'apport

La biodisponibilité, selon O'Dell (1984), est la proportion d'un nutriment de l'aliment qui est absorbé et utilisé. L'utilisation inclut le processus de transport, d'assimilation cellulaire et de conversion sous une forme biologiquement active. L'utilisation biologique d'un nutriment peut être parfois difficile à évaluer. Ainsi, la mesure de l'activité d'une enzyme qui nécessite la présence de zinc pour fonctionner reflète l'utilisation du zinc par l'organisme. La biodisponibilité est souvent estimée par la mesure de la teneur en zinc de certains tissus, comme l'os ou le plasma. Dans ce cas, elle représente non seulement le zinc utilisé, mais également le zinc stocké par l'organisme. Le terme biodisponibilité est alors défini moins strictement et correspond au degré avec lequel un nutriment ingéré est absorbé sous une forme potentiellement utilisable par le métabolisme de l'animal (Ammerman *et al* 1998).

2.1 / Facteurs de variation de la biodisponibilité

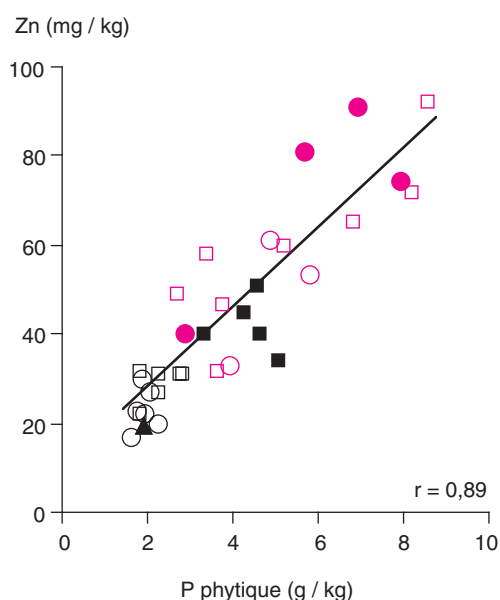
Certains facteurs de variation, tels que le statut en zinc, le stade physiologique ou l'état de stress de l'animal, sont susceptibles d'affecter la disponibilité du zinc (Krebs 2000). D'autres sont d'origine alimentaire. Ainsi, la présence de protéines animales facilite l'absorption du zinc, alors que celle de phytates et d'autres minéraux l'inhibe (Krebs 2000). En effet, dans le tube digestif, les interactions entre les divers composants de la ration affectent la biodisponibilité du zinc avec une intensité qui dépend de la quantité de zinc présente dans la lumière intestinale (Krebs 2000). La présence d'acide phytique dans les matières premières d'origine végétale rend le zinc très peu disponible chez les animaux monogastriques (O'Dell et Savage 1960, Oberleas *et al* 1962 et 1966). L'acide phytique est la principale forme de stockage du phosphore dans les grains. Ces molécules ont la capacité de se lier à des cations di- et trivalents pour former des complexes et présentent une forte affinité pour le zinc dans les conditions physico-chimiques du tube digestif (Davies et Olpin 1979). La solubilité du complexe zinc-phytate dépend du pH, du rapport molaire phytate/zinc et de la présence d'autres minéraux, notamment le calcium. En effet, O'Dell et Savage (1960) et Oberleas *et al* (1962) ont montré que l'addition de calcium augmente l'effet antagoniste des

phytates sur la disponibilité du zinc par précipitation du zinc dans le tube digestif sous forme de complexes phytate-calcium-zinc (Davies et Nightingale 1975). Comme chez le rat (Morris et Ellis 1980, Fordyce *et al* 1987), les rapports molaires phytate/zinc ou phytate x calcium/zinc pourraient être utilisés chez le porc pour prédire la biodisponibilité du zinc (Wedekind *et al* 1994).

2.2 / Matières premières

La teneur en zinc des céréales et des protéagineux couramment utilisés dans l'alimentation des porcs est relativement faible, entre 20 et 30 mg/kg (INRA-AFZ 2002 ; figure 1). La distribution du zinc à l'intérieur d'un grain de céréale n'est pas homogène. Les couches externes en sont plus riches (Underwood et Suttle 1999), ce qui conduit à une concentration de zinc plus élevée dans les coproduits de céréales (remoulages et sons de blé : entre 70 et 90 mg/kg). Les graines d'oléoprotéagineux et les tourteaux d'oléagineux présentent des teneurs en zinc plus élevées et plus variables que les grains de céréales et les protéagineux : entre 30 et 90 mg/kg. Les coproduits laitiers sont assez bien pourvus en zinc : entre 20 et 65 mg/kg pour le lactosérum et la poudre de lait. Les sources de protéines animales, telles que les farines de poisson, sont riches en zinc (90 mg/kg) alors que les huiles végétales, les graisses animales et les sucres en sont quasiment dépourvus.

Figure 1. Teneur en zinc des matières premières en fonction de leur teneur en phosphore phytique, d'après les valeurs des tables INRA-AFZ (2002).



- Céréales à paille
- ▲ Maïs - Sorgho
- Coproduits de meunerie
- Coproduits d'amidonnerie
- Protéagineux
- Graines d'oléoprotéagineux
- Tourteaux d'oléagineux

Il existe une corrélation positive ($r = 0,89$) entre la teneur en zinc des matières premières d'origine végétale et leur teneur en phosphore phytique (cf figure 1).

Un aliment complet pour porc, formulé à partir de matières premières d'origine végétale et sans addition de zinc, contient entre 35 et 45 mg/kg de zinc (INRA-AFZ 2002). Cet apport, qui présente une disponibilité variable en fonction des teneurs en phytates et en calcium de l'aliment, n'est pas qualitativement suffisant pour couvrir les besoins en zinc des animaux. Par conséquent, il est nécessaire d'ajouter du zinc à l'aliment et/ou d'envisager des voies d'amélioration de la disponibilité du zinc des matières premières.

2.3 / Sources minérales de supplémentation

L'oxyde de zinc (ZnO) est la source la plus utilisée en alimentation animale car les sels d'oxyde sont moins réactifs et sont deux fois plus riches en zinc que les sels de sulfate (ZnSO₄). Néanmoins, les différents processus physico-chimiques de transformation employés dans l'industrie conduisent à des variations importantes de la qualité de l'oxyde de zinc en termes de couleur, de concentration, d'éléments contaminants, de masse volumique et de disponibilité. Au contraire, les sources de sels de sulfate sont d'apparence homogène et présentent une teneur en zinc et une biodisponibilité moins variables (Edwards et Baker 1999).

Le sulfate de zinc est considéré comme étant la source de supplémentation la plus disponible et est souvent utilisé comme standard lors des comparaisons de sources. Chez le porc (tableau 1), la biodisponibilité relative de l'oxyde par rapport au sulfate de zinc est comprise entre 39 et 88 % selon le critère d'évaluation considéré (Hahn et Baker 1993, Wedekind *et al* 1994, Schell et Kornegay 1996). L'addition de 10 à 20 mg/kg de zinc sous forme ZnSO₄ dans un aliment pour porc charcutier permet de maximiser la teneur en zinc du plasma (Wedekind *et al* 1994), alors que cette supplémentation n'est pas suffisante lorsque l'on utilise du ZnO (Liptrap *et al* 1970). Des variations importantes de biodisponibilité relative ont également été évaluées chez le poulet, entre 22 et 94 % (Wedekind *et al* 1992, Edwards et Baker 1999).

2.4 / Voies d'amélioration de la disponibilité du zinc

a / Addition de phytase microbienne

L'addition de phytase microbienne, courante dans l'alimentation du porc, est utilisée afin d'améliorer l'utilisation du phosphore d'origine végétale, en hydrolysant les molécules de phytates (Pointillart 1994). De la même façon, l'addition de phytase microbienne améliore la disponibilité du zinc chez le porcelet sevré recevant des régimes composés de matières premières contenant ou pas de phytase végétale (Pallauf *et al* 1992, 1994a et 1994b, Lei *et*

L'addition de zinc est nécessaire pour satisfaire les besoins du porc : l'apport par les matières premières est compris entre 35 et 45 mg/kg, ce qui est insuffisant compte tenu de sa faible disponibilité.

Tableau 1. Biodisponibilité relative des sources d'apport en zinc chez le porc.

Source	Poids (kg)	Régime ¹	Zn régime de base (mg/kg)	Zn ajouté (mg/kg)	Biodisponibilité relative ²		
					Zn os	Zn plasma / sérum	Zn foie
ZnO							
Wedekind <i>et al</i> (1994)	20 à 97	1	32 / 27 ³	0 - 7,5 - 15	67 / 70 (<) ⁴	87 (=)	
Hahn et Baker (1993)	8 à 18	1	125	0 - 3000 - 5000		55 (<)	
Schell et Kornegay (1996)	5 à 9	1	105	0 - 2000	83 (<)	72 (<)	39 (<)
	5 à 9	1	105	0 - 3000	84 / 88 (=) ⁵	69 / 75 (<) ⁵	61 / 76 (<) ⁵
Chélate zinc-acides aminés							
Swinkels <i>et al</i> (1996)	5 à 11	2	17	0 - 45		=	=
Complexe zinc-méthionine							
Hahn et Baker (1993)	8 à 18	1	125	0 - 3000		120 (>)	
Hill <i>et al</i> (1986)	8 à 96	1	27 / 23 ⁶	0 - 15	=	=	
Schell et Kornegay (1996)	7 à 9	1	105	0 - 2000	93 (=)	99 (=)	80 (=)
	7 à 9	1	105	0 - 3000	93 (=)	77 (<)	59 (<)
Wedekind <i>et al</i> (1994)	20 à 97	1	32 / 27 ³	0 - 7,5 - 15	60 (<) / 84 (=) ⁴	95 (=)	
Complexe zinc-lysine							
Cheng <i>et al</i> (1998)	7 à 16	1	30,5 / 33,5 ⁷	0 - 100	=	=	=
Hahn et Baker (1993)	8 à 18	1	125	0 - 1500 - 2500		110 (=)	
Schell et Kornegay (1996)	7 à 9	1	105	0 - 2000	99 (=)	88 (=)	94 (=)
	7 à 9	1	105	0 - 3000	84 (<)	88 (<)	69 (<)
Wedekind <i>et al</i> (1994)	20 à 97	1	32 / 27 ³	0 - 7,5 - 15	24 (<) / 38 (<) ⁴	79 (=)	

¹ 1 : maïs-tourteau de soja, 2 : isolat de soja.

² Estimée par rapport au sulfate de zinc (100%). < ou > : strictement inférieur ou supérieur à 100 % (P < 0,05), = : non significativement différent de 100 % (P > 0,05).

³ Teneurs en zinc des régimes respectivement croissance et finition.

⁴ Valeurs pour l'os du métacarpe et la vertèbre coccygienne.

⁵ Résultats de deux essais.

⁶ Teneurs en zinc des régimes respectivement porcelet et croissance / finition.

⁷ Teneurs en zinc des régimes des deux essais.

al 1993, Adeola *et al* 1995, Ashida *et al* 1999). Cette amélioration a été observée à partir de régimes carencés (sans supplémentation) et subcarencés en zinc (addition de 30 ppm).

A partir des données de teneur en zinc plasmatique de la littérature, ajustées par un modèle linéaire avec plateau, nous estimons que l'activité de 1000 unités (U) de phytase microbienne par kg d'aliment est équivalente à une addition de 24,0 (\pm 7,71) et 19,1 (\pm 3,89) mg/kg de zinc sous forme de sulfate pour des porcelets de respectivement 15 kg et 25 kg de poids vif (figures 2 et 3). Ces estimations, qui supposent que la quantité de zinc libérée est proportionnelle à l'activité phytasique ajoutée dans l'aliment, sont en accord avec les résultats obtenus par Lei *et al* (1993) qui montrent que 1350 U/kg correspondent à une addition de 30 mg/kg de zinc sous forme de sulfate. Ces valeurs sont largement supérieures à celles évaluées chez le poulet : 3,8 et 5,5 mg/kg de zinc sous forme de sulfate pour une addition de phytase respectivement de 600 et 1200 U/kg selon Biehl *et al* (1995), et 9,2 mg/kg de zinc pour 1200 U/kg à partir des données de Mohanna et Nys (1999).

Cependant, les valeurs d'équivalence entre la phytase et le zinc chez le porc nécessitent d'être validées expérimentalement. De plus, l'efficacité de la phytase microbienne est susceptible de varier en fonction de la teneur en

calcium de l'aliment (Lantzsich *et al* 1995), il conviendrait donc d'évaluer cet effet sur la disponibilité du zinc.

b / Utilisation de sources organiques de zinc

Selon Kratzer et Vohra (1986), la meilleure disponibilité du zinc sous forme organique s'expliquerait par la protection de l'atome de zinc par le ligand contre la formation de complexes insolubles avec les phytates. Le complexe zinc-ligand serait absorbé intact dans le tube digestif de l'animal et le zinc serait libéré du complexe au niveau du site d'absorption. Chez le poulet, Wedekind *et al* (1992) ont montré que la disponibilité d'un complexe zinc-méthionine par rapport au sulfate diffère selon la nature du régime. Dans un régime composé de maïs et de tourteau de soja, la biodisponibilité relative du zinc est de 206 %, elle est de 177 % dans un régime à base d'isolat de soja et de 117 % dans un régime semi-synthétique à base d'acides aminés et d'amidon de maïs. Les auteurs attribuent ces différences de disponibilité à la présence de phytates et de fibres dans les régimes complexes par rapport au régime semi-synthétique. Récemment, Swiatkiewicz *et al* (2001) ont confirmé cette hypothèse en introduisant de la phytase microbienne dans un régime riche en phytates.

Figure 2. Teneur en zinc du plasma chez le porcelet (moins de 15 kg de poids vif) supplémenté en zinc sous forme $ZnSO_4$ avec ou sans addition de phytase microbienne. Les références ayant servi à l'élaboration de cette figure sont disponibles auprès des auteurs.

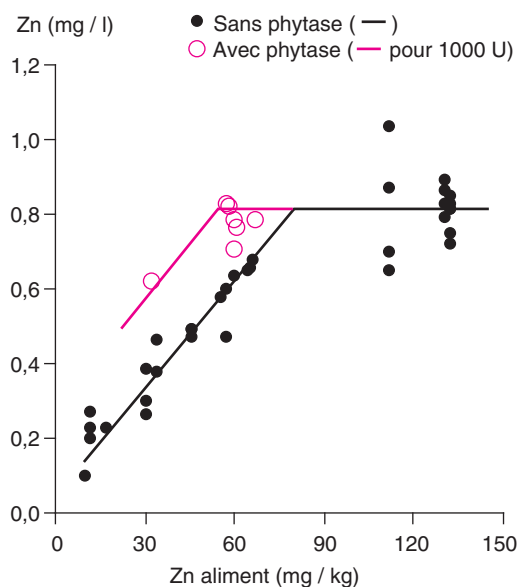
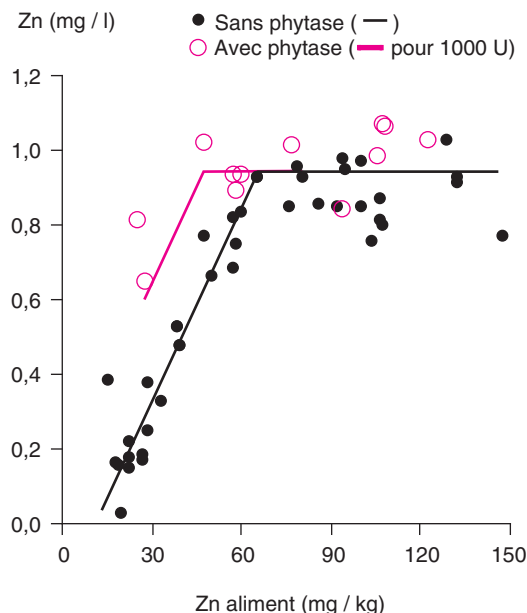


Figure 3. Teneur en zinc du plasma chez le porcelet (moins de 25 kg de poids vif) supplémenté en zinc sous forme $ZnSO_4$ avec ou sans addition de phytase microbienne. Les références ayant servi à l'élaboration de cette figure sont disponibles auprès des auteurs.



Chez le porc, aucune étude ne mentionne d'amélioration de la disponibilité des sources organiques de zinc par rapport au sulfate (Hill *et al* 1986, Wedekind *et al* 1994, Swinkels *et al* 1996 ; tableau 1). Selon Wedekind *et al* (1994), les différences de résultats entre les études sur poulet et sur porc s'expliqueraient plus par une différence de teneurs en phytates et en calcium des aliments que par une différence entre les deux espèces. En effet, dans les études citées précédemment, les aliments distribués aux poulets contenaient entre 0,59 et 1,24 % de phytates et entre 0,92 et 1,10 % de calcium, alors que les aliments utilisés dans les essais sur les porcs contenaient moins de phytates et de calcium : respectivement entre 0,29 et 0,37 % et entre 0,58 et 0,84 %.

Par conséquent des études complémentaires sont nécessaires avant d'exclure totalement l'hypothèse d'une différence entre espèces pour expliquer ces résultats hétérogènes. L'utilisation de régimes enrichis ou pas en phytates et/ou en calcium permettrait de vérifier l'hypothèse de l'interaction entre la source de zinc et la teneur en phytates chez le porc.

c / Addition d'acides organiques

L'addition d'acides organiques a été proposée chez le porcelet afin de pallier les conséquences négatives du sevrage. Dans certaines conditions, l'addition d'acides organiques peut conduire à une amélioration des performances de croissance des animaux (Ravindran et Kornegay 1993). Plusieurs hypothèses, basées sur la baisse du pH gastrique, ont été formulées pour tenter d'expliquer les mécanismes d'action.

Certains auteurs (Kirchgessner et Roth 1982, Höhler et Pallauf 1993 et 1994, Roth *et al* 1998) ont montré, chez le porcelet, que des acides

organiques tels que l'acide fumarique, l'acide citrique et un complexe d'acide formique et de formate de potassium, tendaient à augmenter légèrement la digestibilité du zinc. Selon Ravindran et Kornegay (1993), les acides organiques pourraient jouer le rôle d'agent chélatant en formant des complexes avec les cations, augmentant ainsi leur absorption.

Chez le porc en croissance, Jongbloed *et al* (2000) observent une amélioration des performances de croissance et de la digestibilité de la matière sèche, de la matière organique, des cendres, du calcium et du phosphore avec l'addition d'acides organiques (acide lactique et acide formique). De plus, l'addition simultanée d'acide formique et de phytase microbienne a un effet synergique sur la digestibilité des cendres, du phosphore et du magnésium. La diminution du pH gastrique consécutive à l'addition d'acides organiques augmenterait l'activité de la phytase microbienne dont les pics d'activité se situent à pH 2,5 et 5,5.

Il conviendrait donc, chez le porcelet sevré, de confirmer l'amélioration de la disponibilité du zinc avec l'addition d'acides organiques et de tester l'effet de l'addition simultanée d'acides organiques et de phytase microbienne sur la disponibilité du zinc.

d / Vitamine D

La vitamine D est impliquée principalement dans la régulation du métabolisme phosphocalcique et améliore l'absorption du calcium et du phosphore. De plus, la vitamine D augmenterait l'absorption du zinc (Underwood 1977). Il a été suggéré, chez le rat, que cette amélioration n'est pas un effet direct de la vitamine D, mais le résultat d'une réponse

Les phytates sont le principal antagoniste du zinc dans les aliments. L'addition de phytase microbienne permet donc d'augmenter la disponibilité du zinc.

homéostatique à l'augmentation du besoin en zinc qui accompagne la stimulation de la calcification osseuse et de la croissance (Underwood 1977).

Chez le poulet, l'addition de vitamine D₃ améliore la disponibilité du zinc (Roberson et Edwards 1994, Biehl *et al* 1995). Cet effet est additif à celui induit par l'addition de phytase microbienne. Selon Biehl *et al* (1995), l'addition de 10 µg/kg de vitamine D₃ équivaut à une addition de 5 mg/kg de zinc sous forme de sulfate et l'addition de 10 µg/kg de vitamine D₃ et de 1200 U/kg de phytase équivaut à une addition de 14,6 mg/kg de zinc.

Si l'on se réfère aux recommandations de l'INRA (1989), la vitamine D₃ est très largement supplémentée dans les aliments pour porc : 2000 et 1000 UI/kg d'aliment, respectivement chez le porcelet et le porc en croissance, alors que le NRC (1998) recommande des valeurs bien inférieures, qui diminuent avec l'âge de l'animal : de 220 à 150 UI/kg. Ces valeurs très différentes n'ont sans doute pas le même effet sur la disponibilité du zinc. Par ailleurs, ni l'effet de la vitamine D₃ ni celui de l'interaction entre la vitamine D₃ et la phytase microbienne sur la disponibilité du zinc n'ont, à notre connaissance, été testés chez le porc.

3 / Besoins et recommandations d'apport

3.1 / Estimation des besoins

Le besoin d'un animal est défini comme étant la quantité optimale d'un nutriment nécessaire à l'ensemble de ses fonctions biologiques.

Le besoin en zinc est souvent estimé à l'aide d'une courbe dose-réponse (Pallauf 1996). Les animaux reçoivent un aliment complet apportant des doses croissantes de zinc. A la fin de la période d'essai, des critères de statut appropriés sont mesurés afin d'évaluer la réponse qui varie généralement selon un modèle linéaire avec plateau (Mertz 1977) ou rupture de pente. Selon Buckley (2000), il existe une régulation homéostatique permettant de maintenir la teneur en zinc des tissus, pour une certaine quantité de zinc ingérée au-delà du besoin nutritionnel (Windisch et Kirchgessner 1993). Selon Wedekind *et al* (1994), le point d'inflexion déterminé à partir des teneurs en zinc de l'os et du plasma est une mesure appropriée du besoin en zinc du

porc. En effet, ces auteurs suggèrent que si la teneur en zinc de l'os, qui est le site majeur de stockage du zinc dans le corps, est maximisée, alors les fonctions reproductives et immunitaires le sont également.

a / Besoins du porc en croissance

A partir des données de la littérature, les besoins en zinc du porcelet sevré ont été estimés en ajustant les valeurs de différents critères de statut en zinc à l'aide d'un modèle linéaire-plateau (tableau 2 ; figures 2 à 5). Les données provenant d'études dans lesquelles l'aliment était supplémenté avec une autre source que le sulfate de zinc ont été écartées. Les résultats de l'analyse statistique nous permettent d'estimer, à partir de la teneur en zinc du plasma, que le besoin en zinc du porcelet de 15 kg est de 80 ± 7,8 mg/kg. A 25 kg de poids vif, le besoin en zinc diminue et est estimé à, respectivement, 65 ± 4,6, 50 ± 3,1 et 61 ± 5,9 mg/kg selon que l'on utilise la teneur en zinc du plasma ou de l'os, ou l'activité de la phosphatase alcaline plasmatique. Par un modèle linéaire avec rupture de pente, Wedekind *et al* (1994) estiment les besoins en zinc du porc de 50 et 100 kg de poids vif à 50 mg/kg. L'ensemble de ces estimations est en accord avec les recommandations en zinc du NRC (1998).

b / Besoins des reproducteurs

Durant la croissance et le développement de la jeune truie (de 30 à 130 kg de poids vif), une addition de 50 mg/kg de zinc dans un régime maïs-tourteau de soja (contenant 35 mg/kg de zinc) permet de maximiser l'activité de la phosphatase alcaline et la teneur en zinc du sérum (Hill et Miller 1983). Chez la truie gestante, une addition de 100 mg/kg de zinc dans un aliment maïs-tourteau de soja (32 mg/kg de zinc) permet d'augmenter le nombre de porcelets nés totaux et vifs par portée (Hoekstra *et al* 1967). En revanche, Hedges *et al* (1976) montrent que l'addition de 50 mg/kg de zinc dans un aliment à base de maïs et de tourteau de soja (33 mg/kg de zinc) n'améliore pas les performances reproductives des truies, mais permet d'augmenter les réserves de zinc des porcelets à la naissance.

Après trois cycles de reproduction, Mahan et Newton (1995) montrent que la teneur en zinc corporel est réduite de 15 % chez des truies recevant des régimes contenant respectivement 153 et 165 mg/kg de zinc pendant la gestation et la lactation. De plus, dans cet essai, les truies les plus productives, avec un

Tableau 2. Besoins en zinc (mg/kg) chez le porc, selon le critère d'estimation du statut en zinc d'après la littérature et comparaison aux recommandations du NRC (1998).

Poids vif (kg)	Plasma ¹	Os ¹	APA ¹	NRC (1998)
≤ 15 ²	80 (± 7,8)	-	-	80 - 100
≤ 25 ²	65 (± 4,6)	50 (± 3,1)	61 (± 5,9)	60 - 80
25 - 50	50 ³	-	-	60
50 - 100	-	50 ³	-	50

¹ Zinc total (apporté par les matières premières et le sulfate).

² A partir du sevrage.

³ D'après Wedekind *et al* (1994).

Figure 4. Teneur en zinc de l'os chez le porcelet (15-25 kg de poids vif) supplémenté en zinc sous forme $ZnSO_4$. Les références ayant servi à l'élaboration de cette figure sont disponibles auprès des auteurs.

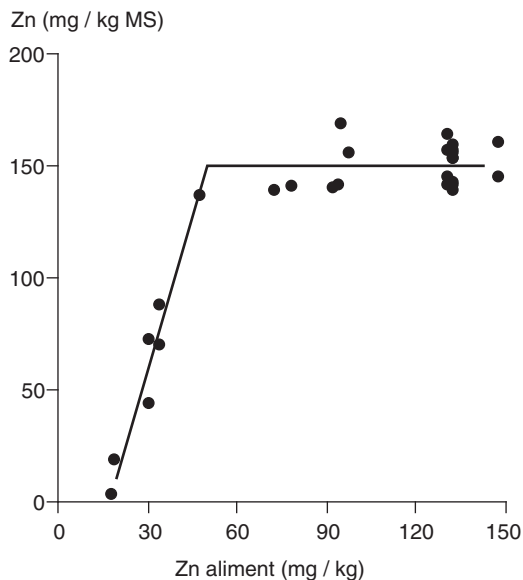
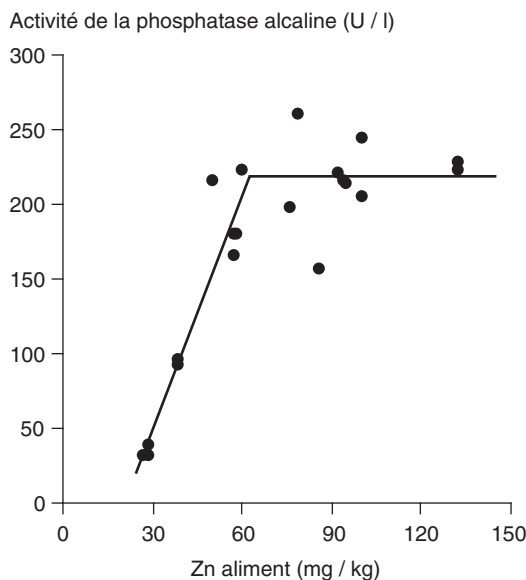


Figure 5. Activité de la phosphatase alcaline plasmatique chez le porcelet (15-25 kg de poids vif) supplémenté en zinc sous forme $ZnSO_4$. Les références ayant servi à l'élaboration de cette figure sont disponibles auprès des auteurs.



poids de portée au sevrage (à 21 jours) supérieur à 60 kg, contenaient 12 % de zinc en moins (et de Ca et de P) que les truies avec un poids de portée inférieur à 55 kg. Les truies hyperprolififiques pourraient donc avoir des besoins en zinc plus élevés que les truies moins productives. Dans un essai conduit par Kirchgessner *et al* (1980) avec un aliment largement supplémenté en zinc, l'absorption apparente de zinc était bien supérieure chez les truies en gestation par rapport aux truies non gravides, qui présentaient une absorption apparente négative. Ces auteurs ont d'ailleurs employé le terme de *super-retention* de zinc (et de Cu et de Mn) chez la truie gestante.

Cependant, du fait du nombre d'études relativement limité et des performances reproductives accrues des truies, leurs besoins en zinc mériteraient d'être précisés.

3.2 / Recommandations

Des recommandations d'apport en zinc, établies par des organismes scientifiques, sont fournies par plusieurs pays : Grande-Bretagne (ARC 1981, AFRC 1990), Allemagne (GfE 1987), France (INRA 1989), Etats-Unis (NRC 1998). La plupart de ces recommandations

(tableau 3) présentent l'inconvénient de ne pas tenir compte des facteurs de variation associés à la nature du régime ou à la source de supplémentation en zinc utilisée. Par exemple, Smith *et al* (1962) montrent qu'un régime à base de protéines de soja contenant 16 mg/kg de zinc doit être supplémenté en zinc pour maximiser les performances de croissance des animaux, alors qu'un régime à base de poudre de lait contenant la même quantité de zinc ne nécessite pas de supplémentation en zinc pour produire les mêmes résultats que le témoin.

Par ailleurs, les recommandations sont très différentes d'un organisme scientifique à l'autre car elles ne découlent pas des mêmes hypothèses et tiennent compte ou pas d'une certaine marge de sécurité par rapport aux besoins stricts de l'animal. Par exemple, les recommandations de l'ARC (1981) sont basées, à partir de la littérature, sur la quantité de zinc requise pour prévenir l'apparition de la parakérotose. Ce critère d'estimation ne nous semble pas être approprié dans la mesure où une déficience en zinc peut affecter les performances de croissance sans que des symptômes de parakérotose ne soient observés chez l'animal (Stevenson et Earle 1956, Smith *et al* 1961). Par ailleurs, la parakérotose

La présence de facteurs alimentaires limitant la disponibilité du zinc nécessite de prendre une marge de sécurité pour établir les apports recommandés.

Tableau 3. Recommandations d'apport en zinc (mg/kg) chez le porc, selon différents organismes scientifiques (pour un aliment à 90 % de matière sèche).

Poids vif (kg)	3 - 10	10 - 20	20 - 50	50 - 80	80 - 120	Reproducteurs
NRC (1998)	100	80	60	50	50	50 ¹
INRA (1989)	100	100	100	100	100	100
GfE (1987)	90	72	54	45	45	45
ARC (1981) - AFRC (1990) ²	45	45	45	45	45	90 ³

¹ Truies en gestation et lactation uniquement.

² Jusqu'à 90 kg.

³ Reproducteurs mâles uniquement.

se et la dégradation des performances de croissance sont la conséquence de la détérioration de certaines fonctions biologiques (Chappuis 1991) que les réserves en zinc, par leur épuisement, ne peuvent maintenir.

Certaines recommandations diminuent avec l'âge de l'animal (GfE 1987, NRC 1998) alors que d'autres sont les mêmes quel que soit l'âge (ARC 1981, INRA 1989). Par exemple, chez le porcelet entre 9 et 16 kg de poids vif, 30 mg/kg de zinc supplémentaire ($ZnSO_4$) dans un aliment à base de céréales et de tourteau de soja ne sont pas suffisants pour maximiser la teneur en zinc du plasma, alors que cette addition est suffisante pour des animaux de 20-25 kg (Pallauf *et al* 1992).

Pour les reproducteurs, les besoins en zinc sont mal connus, compte tenu du faible nombre et de l'ancienneté des études disponibles. Néanmoins, le NRC (1998) suggère que les besoins en zinc des reproducteurs seraient plus élevés que ceux des animaux en croissance, tout en les fixant à 50 mg/kg, ce qui correspond à la valeur la plus faible recommandée, quel que soit le stade de l'animal.

4 / Effets du zinc en excès

A la fin des années 80, Holm (1988) et Poulsen (1989) proposent de supplémenter l'aliment des porcelets avec des quantités élevées de zinc (2500 mg/kg) sous forme d'oxyde de zinc, afin de réduire la sévérité et la fréquence d'apparition des diarrhées après le sevrage et d'améliorer la vitesse de croissance des porcelets, sans que des phénomènes de toxicité n'apparaissent. De plus, la stimulation de la croissance par le zinc s'ajoute à celle provoquée par l'addition d'antibiotiques (Mavromichalis *et al* 2000, Hill *et al* 2001).

4.1 / Prévention des diarrhées post-sevrage

En élevage, les diarrhées consécutives au sevrage sont fréquentes et doivent être rapidement traitées par des antibiotiques pour parer à la déshydratation des porcelets et à la réduction de la vitesse de croissance. Ces diarrhées n'émanent pas d'une carence en zinc, puisque les aliments sont très largement supplémentés (entre 100 et 250 mg/kg), mais plutôt du stress dû au sevrage et des conditions sanitaires de l'environnement dans lequel l'animal est élevé. Or, il s'avère que des concentrations élevées de zinc (2500 mg/kg) sous forme ZnO préviendraient leur apparition et diminueraient leur sévérité (Poulsen 1989 et 1995, Kavanagh 1992). La stabilité de la microflore intestinale, maintenue par la diversité des coliformes, plutôt que la diminution du nombre d'*Escherichia coli* expliquerait l'effet du ZnO sur la réduction des diarrhées (Katouli *et al* 1999).

4.2 / Facteur de croissance

Suite aux résultats de Poulsen (1989), de nombreux travaux récents ont confirmé l'ef-

fet positif du ZnO sur la vitesse de croissance des porcelets en post-sevrage (voir par exemple Hill *et al* 2001), y compris en l'absence de diarrhées. L'addition de zinc doit être réalisée immédiatement après le sevrage et pendant deux semaines afin d'optimiser son efficacité en considérant les paramètres cliniques et écologiques (Jensen-Waern *et al* 1998, Carlson *et al* 1999, Katouli *et al* 1999). L'amélioration de la vitesse de croissance est comprise entre 10 et 30 % lorsque l'aliment est supplémenté avec 1500 à 3000 mg/kg. La réponse semble atteindre un plateau avec une addition de 1500 à 2000 mg/kg de zinc dans l'aliment (Hill *et al* 2001). Selon Hahn et Baker (1993), l'augmentation du gain moyen quotidien (GMQ) est consécutive à une stimulation de la consommation d'aliment seule, alors que Mavromichalis *et al* (2000) et Hill *et al* (2000) observent à la fois une stimulation de la consommation d'aliment et une amélioration de l'indice de consommation (IC). Les mécanismes d'action du zinc sur la vitesse de croissance restent obscurs, même si Jensen-Waern *et al* (1998) suggèrent que la stabilité de la microflore intestinale en présence de ZnO favoriserait une digestion plus efficace des aliments.

En revanche, dans une étude réalisée par Fryer *et al* (1992), l'addition de 3000 mg/kg de zinc (ZnO) dans le régime de base tend à augmenter le GMQ et la consommation d'aliment chez des porcelets, mais de façon non significative. L'absence d'écart significatif entre traitements peut s'expliquer par la variabilité importante des données de cet essai. Schell et Kornegay (1996) n'observent pas non plus de différence de vitesse de croissance avec une supplémentation en zinc de 1000, 2000 et 3000 mg/kg. L'absence de période d'adaptation aux aliments expérimentaux ainsi que les faibles performances zootechniques des animaux impliqués dans ces essais sont peut-être à l'origine de l'absence d'effet. En moyenne, le GMQ et la consommation d'aliment pendant les deux semaines d'essai sont respectivement de 140 g/j et 260 g/j pour des porcelets de 7 kg, sevrés à 26 jours.

L'oxyde de zinc est la source la plus étudiée en tant que facteur de croissance, mais n'est peut-être pas la seule qui stimule la croissance. En effet, Hahn et Baker (1993), dans l'un des trois essais mis en œuvre, observent une augmentation de la vitesse de croissance identique avec l'addition dans l'aliment de 3000 mg/kg de zinc sous forme de sulfate ou d'oxyde. Par conséquent, l'utilisation du sulfate, ou peut-être de sources organiques de zinc présentant une meilleure disponibilité que l'oxyde, comme facteur de croissance pourrait présenter un intérêt si l'effet sur les performances est observé à des doses bien inférieures à celles pratiquées avec l'oxyde de zinc.

4.3 / Zinc en excès et toxicité

Le zinc est très peu toxique chez la plupart des mammifères (Underwood 1977), qui tolèrent des apports élevés. Selon Underwood et Suttle (1999), la susceptibilité de l'animal

dépend principalement des teneurs en calcium, fer, cuivre et cadmium de l'aliment. Des symptômes apparents, tels que l'anorexie, le retard de croissance ou même la mort ont été mis en évidence chez le rat avec 5000 mg/kg de zinc (Underwood 1977). Au-delà de 1000 mg/kg, le zinc peut induire une déficience en fer et en cuivre et conduire à une anémie (Underwood 1977, Chesters 1997). Dans ce cas, il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une toxicité du zinc (Vallee et Falchuk 1993).

Chez le porc, Poulsen (1995) n'observe pas de détérioration des performances de croissance lorsque les animaux reçoivent un aliment supplémenté avec 4000 mg/kg de zinc (ZnO) pendant deux ou trois semaines. De même, Cox et Hale (1977) ne montrent pas de différence de vitesse de croissance ni de consommation d'aliment quand 2000 et 4000 mg/kg de zinc (ZnO) sont ajoutés dans l'aliment pendant dix semaines, mais la teneur en fer du foie diminue de 65 % avec l'addition de 4000 mg/kg, sans perte concomitante de cuivre ni signe d'anémie. A l'inverse, des cochettes recevant un aliment supplémenté avec 5000 mg/kg (ZnO) pendant 20 semaines tendent à peser moins lourd et présentent une teneur en cuivre du sérum plus faible que les cochettes supplémentées avec 0, 50 et 500 mg/kg (Hill et Miller 1983). Après la mise bas de la seconde portée, les truies nourries avec l'aliment additionné de 5000 mg/kg de zinc ont un poids significativement plus faible que les autres et présentent une diminution de la teneur en cuivre du foie et de l'aorte et une augmentation de la teneur en cuivre des reins (Hill *et al* 1983a). Le nombre et le poids des porcelets sevrés par ces truies ainsi que les teneurs en cuivre du colostrum et du lait sont également inférieurs (Hill *et al* 1983a, b). A la naissance, les porcelets dont les mères ont été supplémentées avec 5000 mg/kg de zinc dans un régime à faible teneur en cuivre (15 mg/kg) ont des teneurs en cuivre du foie, du cœur, du pancréas, de l'œsophage, de l'aorte et des testicules pour les mâles, plus faibles et une teneur en cuivre des reins plus élevée (Hill *et al* 1983c).

Une élévation de la teneur en calcium de l'aliment réduit l'accumulation excessive de zinc dans certains tissus (Hsu *et al* 1975).

5 / Zinc et environnement

Compte tenu de la faible valeur du coefficient de rétention du zinc, la réglementation actuelle (directive 70/524/EEC), qui autorise un apport alimentaire de zinc supérieur aux besoins, conduit à la production de lisiers très concentrés en cet élément. Des concentrations de l'ordre de 850 à 1300 mg/kg MS sont mesurées dans des lisiers de porcs en engraissement recevant un aliment contenant 100 à 250 mg/kg de zinc (Priem et Maton 1980, Levasseur et Texier 2001). Ces valeurs restent néanmoins bien inférieures à celles mesurées dans les pays d'Amérique du nord où le zinc est autorisé comme facteur de croissance, en particulier pendant la phase de post-sevrage.

5.1 / Conséquences environnementales de l'épandage de lisier de porc riche en zinc

Le zinc appliqué lors de l'épandage de lisier s'accumule dans la couche arable (L'Herroux 1997). Ainsi, les sols régulièrement fertilisés au moyen de lisier de porc s'enrichissent progressivement, jusqu'à 0,41 mg/kg par an dans certaines régions du Finistère entre 1973 et 1988 (Coppenet *et al* 1993).

Or, un excès de zinc dans les sols pourrait conduire à des phénomènes de toxicité pour les plantes cultivées et, surtout, pour la microflore du sol. Selon McGrath *et al* (1995), la masse microbienne ainsi que son activité sont affectées négativement dès que la teneur en zinc du sol atteint 100 à 200 mg/kg MS. Ce seuil est inférieur à la teneur maximale autorisée dans les sols susceptibles de recevoir des boues issues de traitement d'eaux usées (300 mg/kg MS : JORF 1998). Même si les phénomènes de toxicité sont d'autant moins importants que le pH du sol est élevé et que ses teneurs en argile et en matière organique sont importantes (McGrath *et al* 1995, Morel 1997), des mesures de précautions doivent être prises afin de limiter l'impact environnemental de l'épandage de lisiers riches en zinc.

5.2 / Impact de la réduction du zinc alimentaire sur les rejets de zinc

Paboeuf *et al* (2001) ont montré expérimentalement que l'abaissement de 150 à 90 mg/kg de la teneur en zinc des aliments pour porcs en engraissement permet de réduire de 40 % les rejets de cet élément, sans modifier les performances des animaux. Réduire les apports de zinc dans l'alimentation des porcs constitue donc une voie de choix pour en limiter les rejets. Pour la tester, quatre scénarios d'apport alimentaire de zinc ont été envisagés (tableau 4). Les deux premiers (A et B) correspondent respectivement aux recommandations du NRC (1998) et à celles de l'INRA (1989). Le scénario B correspond également au projet de nouvelle réglementation européenne concernant les concentrations maximales de zinc autorisées dans les aliments pour les porcs (directive 70/524/EEC, SANCO/367 rev. 2/2000). Le scénario D correspond à la réglementation européenne en vigueur (directive 70/524/EEC). Le scénario C, qui est intermédiaire, permet de simuler l'effet de l'utilisation du zinc comme facteur de croissance dans l'alimentation du porcelet en premier âge, suivi de l'abaissement de la teneur en zinc des aliments d'engraissement à 10 mg/kg, comme le prévoit le projet de nouvelle réglementation.

La quantité de lisier produite par animal ainsi que sa teneur en azote ont été calculées à partir des références fournies par le CORPEN (1996). La teneur en zinc des effluents ainsi que la quantité de zinc appliquée par hectare ont été calculées et comparées aux valeurs maximales autorisées par la législation portant sur l'utilisation, comme fertili-

Une teneur en zinc de l'aliment pour porc de 90 mg/kg au lieu de 150 permet de réduire les rejets de zinc de 40 %.

sant, de boues issues de traitement d'eaux usées (respectivement 3000 mg zinc /kg MS et 45 kg zinc /ha cumulés sur 10 ans : JORF (1998)). Enfin, le temps requis pour atteindre la teneur en zinc de 300 mg/kg MS des sols a été calculé. Au-delà de cette concentration, tout épandage de boue est proscrit (JORF 1998).

Aucun des scénarios ne conduit à un lisier présentant une teneur en zinc supérieure à la limite applicable aux boues issues de traitement d'eaux usées. Cependant, la prise en compte de la seule quantité d'azote épandue par hectare peut conduire à une application excessive de zinc au regard de la limite annuelle de 4,5 kg/ha, dans les conditions légales actuelles d'apport de zinc dans l'aliment des porcelets et des porcs en engraissement (scénario D). La teneur limite de 300 mg/kg MS de zinc dans les sols pourrait être atteinte à échéance de 60 ans, dans le cas d'un

traitement du lisier permettant de diminuer de 70 % sa teneur en azote.

Comparée à la législation actuelle (scénario D), le projet que propose la Commission Européenne (scénario B) permettrait une réduction des rejets de zinc de l'ordre de 62 %. Dans le cas de l'usage du zinc comme facteur de croissance en post-sevrage puis la limitation des apports à 100 mg/kg pendant l'engraissement (scénario C), les rejets seraient réduits d'environ 44 % par rapport à la législation actuelle. Toutefois, l'élimination de 70 % de l'azote contenu dans le lisier conduirait à la production de fertilisants entraînant une application annuelle de zinc supérieure à 4,5 kg/ha. De plus, la teneur en zinc du lisier issu d'élevages spécialisés en post-sevrage resterait supérieure à la limite de 3000 ppm MS applicable aux boues issues du traitement des eaux usées.

Tableau 4. Estimation des teneurs en zinc des produits épandus et du sol selon différentes hypothèses de teneur en zinc des aliments pour porcelets et porcs charcutiers ¹.

A : Recommandations NRC (1998) - **B :** Recommandations INRA (1989) et projet de réglementation européenne, dans le cas d'un aliment unique en engraissement - **C :** Utilisation du zinc comme facteur de croissance dans l'alimentation des porcelets sevrés en premier âge, puis projet de réglementation, dans le cas d'un aliment unique en engraissement - **D :** Réglementation actuelle, dans le cas d'un aliment unique en engraissement.

	A	B	C	D
Aliment (mg Zn/kg)				
Porcelet 1 ^{er} âge	100	100	2000	250
Porcelet 2 ^{ème} âge	80	100	100	250
Porc charcutier	60	100	100	250
Bilan Zn (g Zn/porc)				
Ingéré ¹	16,9	26,8	38,3	66,9
Retenu ²	2,13	2,13	2,13	2,13
Excrété	14,7	24,6	36,2	64,7
Lisier				
mg Zn/l ¹	32,1	53,5	78,6	141
mg Zn/kg MS ¹	458	765	1123	2011
Teneur maximale du produit épandu : 3000 mg Zn/kg MS ⁵				
Application par épandage de l'effluent ³ (kg Zn/ha par an)				
Taux d'épuration de l'N				
- 0% traitement	0,809	1,35	1,98	3,55
- 50% traitement	1,62	2,70	3,97	7,10
- 70% traitement	2,70	4,50	6,61	11,8
Flux maximum de Zn cumulé sur 10 ans : 45kg/ha ⁵				
Enrichissement du sol ⁴ (mg Zn/kg par an)				
- 0 % traitement	0,203	0,383	0,594	1,12
- 50 % traitement	0,473	0,833	1,26	2,30
- 70 % traitement	0,832	1,43	2,14	3,88
Temps requis pour atteindre 300 mg Zn/kg MS sol ⁶ (année)				
- 0 % traitement	1145	606	391	208
- 50 % traitement	492	279	185	101
- 70 % traitement	279	162	109	60
Valeur limite de concentration dans les sols : 300 mg Zn/kg MS ⁵				

¹ Porcelet sevré 1^{er} âge : 8 à 13 kg, IC : 1,4 kg/kg ; porcelet sevré 2^{ème} âge : 13 à 28 kg, IC : 1,9 kg/kg ; porc charcutier : 28 à 108 kg, IC : 2,9 kg/kg ; volume de lisier par porc produit : 460 l après lavage, dont 50 l d'eau ; teneur en MS du lisier estimée à 7 % ; excrétion d'N par porc produit : 3,1 kg.

² Teneur en zinc du porc estimée à 21,8 mg / kg poids vif vide (Dourmad *et al* 2002).

³ Epandage de l'effluent issu des porcelets et des porcs charcutiers, sur la base de 170 kg N/ha en fonction du taux d'épuration de l'azote (0, 50 ou 70 %).

⁴ 3000 t de terre/ha, exportation par les cultures de 200 g/ha par an.

⁵ JORF, Arrêté du 8 janvier 1998 (application du décret n°97-1133 du 8/12/97).

⁶ MS du sol estimée à 83%. Teneur initiale estimée à 20 ppm MS.

Conclusion

L'addition de zinc dans les aliments, et notamment ceux formulés à base de matières premières d'origine végétale, est nécessaire pour satisfaire les besoins en zinc du porc. Toutefois, afin de préserver l'environnement, les marges de sécurité doivent être notablement réduites, en s'appuyant sur notre connaissance des besoins des animaux d'une part et des facteurs de variation de la disponibilité d'autre part.

Les besoins en zinc du porc en croissance ont pu être estimés à partir de la compilation des données de la littérature. Néanmoins, les facteurs de variations susceptibles de limiter la disponibilité du zinc influencent l'estimation des besoins en zinc des animaux. Par conséquent, estimer les besoins en zinc du porc à partir de régimes dans lesquels des facteurs alimentaires limitant la disponibilité du zinc auraient été introduits reviendrait à s'assurer d'une certaine marge de sécurité et pourrait servir de base dans l'établissement des recommandations en zinc. Peu d'études ont été consacrées à l'estimation des besoins

en zinc des animaux reproducteurs, notamment des truies, et il est indispensable de les préciser en utilisant des indicateurs reflétant non seulement les fonctions reproductives des truies, mais également leur santé.

Concernant les facteurs de variation de la disponibilité du zinc chez le porc, les phytates sont identifiés comme étant le principal antagoniste du zinc, mais il est encore impossible, dans l'état actuel des connaissances, de prédire la disponibilité du zinc en fonction de la teneur en phytates du régime. Par ailleurs, l'impact de certaines caractéristiques du régime (teneurs en calcium ou en vitamine D, addition d'acides organiques) sur la disponibilité du zinc n'est pas encore clairement établi. En dépit de ces incertitudes, certaines voies d'amélioration de la disponibilité du zinc dans l'alimentation du porc sont proposées dans la pratique. L'utilisation de phytase microbienne est prometteuse, même si l'épargne de zinc alimentaire permise par l'addition de cette enzyme reste à préciser. De même, l'apport de zinc sous une forme protégée de l'action des phytates est une voie possible de progrès, mais les conditions d'utilisation de tels produits restent à préciser chez le porc.

Références

- Adeola O., 1995. Digestive utilization of minerals by weanling pigs fed copper- and phytase-supplemented diets. *Can. J. Anim. Sci.*, 75, 603-610.
- Adeola O., Lawrence B.V., Sutton A.L., Cline T.R., 1995. Phytase-induced changes in mineral utilization in zinc-supplemented diets for pigs. *J. Anim. Sci.*, 73, 3384-3391.
- AFRC (Agricultural and Food Research Council), 1990. AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients, Report Number 4, Nutrient requirements of sows and boars. *Nutr. Abstr. a. Rev. (Series B)* 60, 383-406.
- Aggett P.J., 1991. The assessment of zinc status: a personal view. *Proc. Nutr. Soc.*, 50, 9-17.
- Ammerman C.B., Henry P.R., Miles R.D., 1998. Supplemental organically-bound mineral compounds in livestock nutrition. In : P.C. Garnsworthy and J. Wiseman (eds), *Recent Advances in Animal Nutrition*, Nottingham University Press.
- ARC (Agricultural Research Council), 1981. *The Nutrient Requirements of Pigs*. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough UK.
- Ashida K.Y., Tamura A., Matsui T., Yano H., Nakajima T., 1999. Effect of dietary microbial phytase on zinc bioavailability in growing pigs. *Anim. Sci. J.*, 70, 306-311.
- Bertrand G., Bhattacharjee R.C., 1935. Recherches sur l'action combinée du zinc et des vitamines dans l'alimentation des animaux. *Ann. Inst. Pasteur*, 55, 265-272.
- Biehl R.R., Baker D.H., DeLuca H.F., 1995. 1 a-hydroxylated cholecalciferol compounds act additively with microbial phytase to improve phosphorus, zinc and manganese utilization in chicks fed soy-based diets. *J. Nutr.*, 125, 2407-2416.
- Buckley W.T., 2000. Trace elements dynamics. In : J.P.F. D'Mello (eds), *Farm Animal Metabolism and Nutrition*, CABI Publishing, Edinburgh, UK, 161-182.
- Carlson M.S., Hill G.M., Link J.E., 1999. Early- and traditionally weaned nursery pigs benefit from phase-feeding pharmacological concentrations of zinc oxide: effect on metallothionein and mineral concentrations. *J. Anim. Sci.*, 77, 1199-1207.
- Chappuis P., 1991. Les oligo-éléments en nutrition et en thérapeutique. Lavoisier, Tec & Doc, 643 pp.
- Chappuis P., Favier A., 1995. Les oligo-éléments en médecine et en biologie. Lavoisier, Tec & Doc, Paris, 474 p.
- Cheng J., Kornegay E.T., Schell T.C., 1998. Influence of dietary lysine on the utilisation of zinc from zinc sulfate and a zinc-lysine complex by young pigs. *J. Anim. Sci.*, 76, 1064-1074.
- Chesters J.K., 1992. Trace element-gene interactions. *Nutr. Rev.*, 50, 217-223.
- Chesters J.K., 1997. Zinc. In : O'Dell B.L. and Sunde R.A. (eds), *Handbook of Nutritionally Essential Mineral Elements*, Marcel Dekker, New York, 185-230.
- Coppenet M., Golven J., Simon J.C., Le Roy M., 1993. Evolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif: exemple du Finistère. *Agronomie*, 13, 77-83.
- CORPEN, 1996. Estimation des rejets d'azote et de phosphore des élevages de porcs. Impact des modifications de conduite alimentaire et des performances techniques. Comité d'Orientation pour la Réduction de la pollution des Eaux par les Nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles. République Française, Ministère de l'Agriculture de la Pêche et de l'Alimentation, Ministère de l'Environnement, 23 p.
- Cousins R.J., 1985. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiol. Rev.*, 65, 238-309.
- Cousins R.J., 1996. Zinc. In : Filer L.J. and Ziegler E.E. (eds), *Present knowledge in nutrition*, 7th edition, Washington, 29, 293-307.
- Cousins R.J., McMahon R.J., 2000. Integrative aspects of zinc transporters. *J. Nutr.*, 130 (Suppl.), 1384S-1387S.
- Cox D.H., Hale O.M., 1977. Liver iron depletion without copper loss in swine fed excess zinc. *J. Nutr.*, 77, 225-228.
- Davies N.T., Nightingale R., 1975. The effects of phytate on intestinal absorption and secretion of zinc, and whole body retention of zinc, copper, iron and manganese in rats. *Br. J. Nutr.*, 34, 243-258.
- Davies N.T., Olpin S.E., 1979. Studies on the phytate:zinc molar contents in diets as a determinant of Zn availability to young rats. *Br. J. Nutr.*, 41, 590-603.
- Dourmad J.Y., Pomar C., Massé D., 2002. Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. *Journées Rech. Porcine en France*, 34, 183-194.
- Edwards H.M.III, Baker D.H., 1999. Bioavailability of zinc in several sources of zinc oxide, zinc sulfate, and zinc metal. *J. Anim. Sci.*, 77, 2730-2735.

- Fordyce E.J., Forbes R.M., Robbins K.R., Erdman J.W., 1987. Phytate \times Calcium/Zinc molar ratios: Are they predictive of zinc bioavailability. *J. Food Sci.*, 52, 440-444.
- Fryer A., Miller E.R., Ku P.K., Ullrey D.E., 1992. Effect of elevated dietary zinc on growth performance of weanling swine. *Michigan State Univ. Rep. of Swine Res.*, 520, 128-132.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie), 1987. Ausschuss für Bedarfsnormen. Energie und Nährstoffbedarf landwirtschaftl. Nutztiere, Nr. 4 Schweine, DLG-Verlag Frankfurt/M.
- Hahn J.D., Baker D.H., 1993. Growth and plasma zinc responses of young pigs fed pharmacologic levels of zinc. *J. Anim. Sci.*, 71, 3020-3024.
- Hedges J.D., Kornegay E.T., Thomas H.R., 1976. Comparison of dietary zinc levels for reproducing sows and the effect of dietary zinc and calcium on the subsequent performance of their progeny. *J. Anim. Sci.*, 43, 453-463.
- Hill G.M., Miller E.R., 1983. Effect of dietary zinc levels on the growth and development of the gilt. *J. Anim. Sci.*, 57, 106-113.
- Hill G.M., Spears J.W., 2001. Trace and ultratrace elements. In : Lewis A.J. and Southern L.L. (eds), *Swine Nutrition (2nd)* chap. 10, CRC Press, Washington, DC, 187-212.
- Hill G.M., Miller E.R., Stowe H.D., 1983a. Effect of dietary zinc levels on health and productivity of gilts and sows through two parities. *J. Anim. Sci.*, 57, 114-122.
- Hill G.M., Miller E.R., Ku P.K., 1983b. Effect of dietary zinc levels on mineral concentration in milk. *J. Anim. Sci.*, 57, 123-129.
- Hill G.M., Miller E.R., Whetter P.A., Ullrey D.E., 1983c. Concentration of minerals in tissues of pigs from dams fed different levels of dietary zinc. *J. Anim. Sci.*, 57, 130-138.
- Hill D.A., Peo E.R.Jr., Lewis A.J., Crenshaw J.D., 1986. Zinc-amino acid complexes for swine. *J. Anim. Sci.*, 63, 121-130.
- Hill G.M., Cromwell G.L., Crenshaw T.D., Dove C.R., Ewan R.C., Knabe D.A., Lewis A.J., Libal G.W., Mahan D.C., Shurson G.C., Southern L.L., Veum T.L., 2000. Growth promotion effects and plasma changes from feeding high dietary concentrations of zinc and copper to weanling pigs (regional study). *J. Anim. Sci.*, 78, 1010-1016.
- Hill G.M., Mahan D.C., Carter S.D., Cromwell G.L., Ewan R.C., Harrold R.L., Lewis A.J., Miller P.S., Shurson G.C., Veum T.L., 2001. Effect of pharmacological concentrations of zinc oxide with or without the inclusion of an antibacterial agent on nursery pig performance. *J. Anim. Sci.*, 79, 934-941.
- Hoekstra W.G., Faltin E.C., Lin C.W., Roberts H.F., Grummer R.H., 1967. Zinc deficiency in reproducing gilts fed a diet high in calcium and its effect on tissue zinc and blood serum alkaline phosphatase. *J. Anim. Sci.*, 26, 1348-1357.
- Höhler D., Pallauf J., 1993. Effect of citric acid added to a maize-soya-diet with or without Zn-supplementation on the availability of minerals. *J. Anim. Physiol. a Anim. Nutr.*, 69, 133-142.
- Höhler D., Pallauf J., 1994. Effects of Zn-supply and addition of citric acid to a maize-soya-diet on the nutritional efficiency and absorption of minerals in piglets. *J. Anim. Physiol. a Anim. Nutr.*, 71, 189-199.
- Holm A., 1988. Escherichia coli associated diarrhea in weaner pigs: Zinc oxide added to the feed as a preventive measure. *Dan. Veterinaertidsskr.*, 72, 1118-1126.
- Hsu F.S., Krook L.P., Pond W.G., Duncan J.R., 1975. Interactions of dietary calcium with toxic levels of lead and zinc in pigs. *J. Nutr.*, 105, 112-118.
- Hurley L.S., 1981. Teratogenic effects of manganese, zinc and copper in nutrition. *Physiol. Rev.*, 61, 249-295.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porcs, lapins, volailles. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 282 p.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D. Sauvart, J.-M. Perez, G. Tran (eds), INRA, Paris, France.
- Jensen-Waern M., Melin L., Lindberg R., Johansson A., Peterson L., Wallgren P., 1998. Dietary zinc oxide in weaned pigs: effects on performance, tissue concentrations, morphology, neutrophil functions and faecal microflora. *Res. Vet. Sci.*, 64, 225-231.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.Y., 2002. Dietary means to better control the environmental impact of copper and zinc in pig feeding. In : *Book of Abstracts of the 53rd Annual Meeting of the European Association for Animal Production*, Cairo, Egypt, 8, 100.
- Jongbloed A.W., Mroz Z., van der Weij-Jongbloed R., Kemme P.A., 2000. The effects of microbial phytase, organic acids and their interaction in diets for growing pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 67, 113-122.
- JORF, 1998. Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application de décret n° 97-1153 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. *Journal Officiel de la République Française*, 31 janvier 1998, 1563-1571.
- Kalinowski J., Chavez E.R., 1986. Low dietary zinc intake during pregnancy and gestation of gilts. I. Effects on the dam. *Can. J. Anim. Sci.*, 66, 201-216.
- Katouli M., Melin L., Jensen-Waern M., Wallgren P., Mollby R., 1999. The effect of zinc oxide supplementation on the stability of the intestinal flora with special reference to composition of coliforms in weaned pigs. *J. App. Microbiol.*, 87, 564-573.
- Kavanagh N.T., 1992. The effect of feed supplemented with zinc oxide on the performance of recently weaned pigs. *Proc. Int. Pig Vet. Meetings*, 616. The Hague, Netherlands.
- King J.C., 1990. Assessment of zinc status. *J. Nutr.*, 120, 1474-1479.
- Kirchgeßner M., Roth F.X., 1982. Fumaric acid as a feed additive in pig nutrition. *Pig News Inf.*, 3, 259-264.
- Kirchgeßner M., Spörl R., Roth-Maier D.A., 1980. Fecal excretion and apparent absorption of copper, zinc, nickel and manganese in nonpregnant and pregnant sows with different supplies of trace elements. *Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelkd.*, 44, 98-101.
- Kirchgeßner M., Paulicks B.R., Roth H.P., 1993. Zinc in animal nutrition: function, deficiency, diagnosis, requirement, supply and absorption. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 20, 182-201.
- Kirchgeßner M., Kreuzer M., Roth F.X., 1994. Alters- und geschlechtsbedingte unterschiede in den Gehalte an Fe, Zn, Cu und Mn verschiedener Körperpartien sowie ihre Retention bei Mastschweinen. *Arch. Anim. Nutr.*, 46, 327-337.
- Kratzer F.H., Vohra P., 1986. Chelates in nutrition. CRC Press, Boca Raton, Florida, 169 p.
- Krebs N.F., 2000. Overview of zinc absorption and excretion in the human gastrointestinal tract. *J. Nutr.*, 130 (Suppl.), 1374S-1377S.
- Lantzsch H.J., Wjst S., Drochner W., 1995. The effect of dietary calcium on the efficacy of microbial phytase in rations for growing pigs. *J. Anim. Physiol. a Anim. Nutr.*, 73, 19-26.
- Le Grusse J., Watier B., 1993. Les vitamines : Données biochimiques, nutritionnelles et cliniques. Centre d'Etude et d'Information sur les Vitamines, Produits Roche, France, 304 pp.
- Lei X.G., Ku P.K., Miller E.R., Ullrey D.E., Yokoyama M.T., 1993. Supplemental microbial phytase improves bioavailability of dietary zinc to weanling pigs. *J. Nutr.*, 123, 1117-1123.
- Levasseur P., Texier C., 2001. Teneurs en éléments trace métalliques des aliments et des lisiers de porcs à l'engrais, de truies et de porcelets. *Journées Rech. Porcine en France*, 33, 57-62.
- L'Herroux L., 1997. Devenir des éléments métalliques provenant des effluents d'élevage apportés aux parcelles agricoles. Etude du modèle expérimental Solepur et cas de l'estuaire de l'Aber Wrach. Thèse doctorat UBO, 211 p.
- Liptrap D.O., Miller E.R., Ullrey D.E., Whitenack D.L., Schoepke B.L., Luecke R.W., 1970. Sex influence on the zinc requirement of developing swine. *J. Anim. Sci.*, 30, 736-741.
- Mahan D.C., Newton E.A., 1995. Effect of initial breeding weight on macro- and micronutrient composition over a three-parity period using a high-producing sow genotype. *J. Anim. Sci.*, 73, 151-158.
- Mahan D.C., Shields R.G.Jr., 1998. Macro- and micronutrient composition of pigs from birth to 145 kilograms of body weight. *J. Anim. Sci.*, 76, 506-512.
- Mavromichalis I., Peter C.M., Parr T.M., Ganessunker D., Baker D.H., 2000. Growth-promoting efficacy in young pigs of two sources of zinc oxide having either a high or a low bioavailability of zinc. *J. Anim. Sci.*, 78, 2896-2902.

- McGrath S.P., Chaudri A.M., Giller K.E., 1995. Long term effects of metals in sewage sludge on soils, microorganisms and plants. *J. Ind. Microbiol.*, 14, 94-104.
- Mertz W., 1977. Criteria for adequacy and safety of trace elements in animal nutrition. *J. Anim. Sci.*, 44, 469-474.
- Miller E.R., Luecke R.W., Ullrey D.E., Baltzer B.V., Bradley B.L., Hoefler J.A., 1968. Biochemical, skeletal and allometric changes due to zinc deficiency in the baby pig. *J. Nutr.*, 95, 278-286.
- Mohanna C., Nys Y., 1999. Changes in zinc and manganese availability in broiler chicks induced by vegetal and microbial phytases. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 77, 241-253.
- Morel J.L., 1997. Bioavailability of trace elements to terrestrial plants- Chapter 6. In : Tarradellas J., Bitton G., Rossel D. (eds), *Soil Ecotoxicology*, F1, 141-176. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton.
- Mornet P., Tourmut J., Toma B., 1982. *Le porc et ses maladies*. Maloine, Paris, France.
- Morris E.R., Ellis R., 1980. Effect of dietary phytate/zinc molar ratio on growth and bone zinc response of rats fed semipurified diets. *J. Nutr.*, 110, 1037-1045.
- NRC, 1998. *Nutrient Requirements of Swine* (10th Edition). National Academy Press, Washington, DC.
- Oberleas D., Muhrer M.E., O'Dell B.L., 1962. Effects of phytic acid on zinc availability and parakeratosis in swine. *J. Anim. Sci.*, 21, 57-61.
- Oberleas D., Muhrer M.E., O'Dell B.L., 1966. Dietary metal-complexing agents and zinc availability in the rat. *J. Nutr.* 90, 56-62.
- O'Dell B.L., 1984. Bioavailability of trace elements. *Nutr. Rev.*, 42, 301-308.
- O'Dell B.L., Savage J.E., 1960. Effect of phytic acid on zinc availability. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 103, 304-306.
- Paboeuf F., Calvar C., Landrain B., Roy H., 2001. Impact de la réduction des niveaux alimentaires en matières azotées totale, en phosphore, en cuivre et en zinc sur les performances et les rejets des porcs charcutiers. *Journées Rech. Porcine en France*, 33, 49-56.
- Pallauf J., 1996. Requirements of trace elements for pigs. In : *Proc. 47th Annu. Mtg. Eur. Assoc. Anim. Prod.*, Lillehammer, Norway, 1-8.
- Pallauf J., Höhler D., Rimbach G., 1992. Effect of microbial phytase supplementation to a maize-soya-diet on the apparent absorption of Mg, Fe, Cu, Mn and Zn and parameters of Zn-status in piglets. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 68, 1-9.
- Pallauf J., Rimbach G., Pippig S., Schindler B., Most E., 1994a. Effect of phytase supplementation and to a phytate-rich diet based on wheat, barley and soya on the bioavailability of dietary phosphorus, calcium, zinc and protein in piglets. *Agriol. Res.*, 47, 39-48.
- Pallauf J., Rimbach G., Pippig S., Schindler B., Höhler D., Most E., 1994b. Dietary effect of phytogenic phytase and an addition of microbial phytase to a diet based on field beans, wheat, peas and barley on the utilization of phosphorus, calcium, magnesium, zinc and protein in piglets. *Z. Ernährungswiss.*, 33, 128-135.
- Pointillart A., 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. *INRA Prod. Anim.*, 7, 29-39.
- Poulsen H.D., 1989. Zinc oxide for weaned pigs. In : *Proc. 40th Annu. Mtg. Eur. Assoc. Anim. Prod.*, Dublin, Ireland, 8-10.
- Poulsen H.D., 1995. Zinc oxide for weanling piglets. *Acta Agric. Scand.*, 45, 159-167.
- Poulsen H.D., 1998. Zinc and copper as feed additives, growth factors or unwanted environmental factors. *J. Anim. Feed Sci.* 7, 135-142.
- Poulsen H.D., Larsen T., 1995. Zinc excretion and retention in growing pigs fed increasing levels of zinc oxide. *Livest. Prod. Sci.*, 43, 235-242.
- Priem R., Maton A., 1980. The influence of the content of trace elements in the feed on the composition of liquid manure of pig. In : Gasser J.K.R. (ed), *Effluents from livestock*, 9-22. Applied Science Publishers, Basingstoke.
- Raulin J., 1869. *Etudes chimiques sur la végétation*. *Ann. Sci. Natl. Bot. Biol. Végét.*, 11, 93.
- Ravindran V., Kornegay E.T., 1993. Acidification of weaner pig diet: A review. *J. Sci. Food Agric.*, 62, 313-322.
- Roberson K.D., Edwards H.M.Jr., 1994. Effects of 1,25-dihydroxycholecalciferol and phytase on zinc utilization in broiler chicks. *Poult. Sci.*, 73, 1312-1326.
- Roth F.X., Windisch W., Kirchgessner M., 1998. Mineral metabolism (P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu) of piglets supplied with potassium diformate (FormuTM LHS). *Agriol. Res.*, 51, 177-183.
- Rucker R.B., Lönnerdal B., Keen C.L., 1994. Intestinal absorption of nutritionally important trace elements. In : Johnson L.R. (ed), *Physiology of the gastrointestinal tract*, 2183-2202. Raven Press, New York.
- Schell T.C., Kornegay E.T., 1996. Zinc concentration in tissues and performance of weanling pigs fed pharmacological levels of zinc from ZnO, Zn-methionine, Zn-lysine, or ZnSO₄. *J. Anim. Sci.*, 74, 1584-1593.
- Scott M.L., 1972. *Trace Elements in Animal Nutrition*. In : Mortvedt J.J., Giordano P.M. and Lindsay W.L. (eds), *Micronutrients in Agriculture*, Soil Sci. Soc. of Am. Inc. Madison, Wisc., USA, 22, 555-591.
- Smith W.H., Plumlee M.P., Beeson W.M., 1961. Zinc requirement of the growing pig fed isolated soybean protein semi-purified rations. *J. Anim. Sci.*, 20, 128-132.
- Smith W.H., Plumlee M.P., Beeson W.M., 1962. Effect of source of protein on zinc requirement of the growing pig. *J. Anim. Sci.*, 21, 399-405.
- Stevenson J.W., Earle I.P., 1956. Studies on parakeratosis in swine. *J. Anim. Sci.*, 15, 1036-1045.
- Sullivan J.F., Williams R.V., Wisecarver J., Etzel K., Jetton M.M., Magee D.F., 1981. The zinc content of bile and pancreatic juice in zinc-deficient swine. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 166, 39-43.
- Swiatkiewicz S., Koreleski J., Zhong D., 2001. The bioavailability of zinc from inorganic and organic sources in broiler chickens as affected by addition of phytase. *J. Anim. Feed Sci.*, 10, 317-328.
- Swinkels J.W.G.M., Kornegay E.T., Verstegen M.W.A., 1994. Biology of zinc and biological value of dietary organic zinc complexes and chelates. *Nutr. Res. Rev.*, 7, 129-149.
- Swinkels J.W.G.M., Kornegay E.T., Zhou W., Lindemann M.D., Webb K.E.Jr., Verstegen M.W.A., 1996. Effectiveness of a zinc amino acid chelate and zinc sulfate in restoring serum and soft tissue zinc concentrations when fed to zinc-depleted pigs. *J. Anim. Sci.*, 74, 2420-2430.
- Tucker H.F., Salmon W.D., 1955. Parakeratosis or zinc deficiency disease in the pig. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 28, 613-616.
- Underwood E.J., 1977. Zinc. In : *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, Ed. 4, 196-242. Academic Press Inc., London, UK.
- Underwood E.J., Suttle N.F., 1999. Zinc. In : *The Mineral Nutrition of Livestock* (3rd edition), 477-512. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Vallee B.L., 1983. Zinc in biology and biochemistry. In : Spiro T.G. (eds), *Zinc Enzymes*, 1-24. Wiley Interscience publication, John Wiley, New-York.
- Vallee B.L., Falchuk K.H., 1993. The biochemical basis of zinc physiology. *Physiol. Rev.*, 73, 79-118.
- Wedekind K.J., Hortin A.E., Baker, D.H., 1992. Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. *J. Anim. Sci.*, 70, 178-187.
- Wedekind K.J., Lewis A.J., Giesemann M.A., Miller P., 1994. Bioavailability of zinc from inorganic and organic sources for pigs fed corn-soyabean meal diets. *J. Anim. Sci.*, 72, 2681-2689.
- Windisch V.W., Kirchgessner M., 1993. Zinc exchange in adult rat at different zinc supply. In : Anke M., Meissner D. and Mills C.F. (eds), *Trace Elements in Man and Animals - TEMA 8*, 351-355. Verlag Media Touristik, Gersdorf, Germany.
- Windisch V.W., Kirchgessner M., 1994. Distribution and exchange of zinc in different tissue fractions at deficient and excessive zinc supply. 3. Effect of different zinc supply on quantitative zinc exchange in the metabolism of adult rats. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 71, 131-139.

Abstract

Zinc in pig nutrition : the essential trace element and potential adverse effect on environment.

Zinc is an essential trace element which plays a role in many biological functions. Loss of appetite, diarrhoea, growth retardation or parakeratosis are symptoms of zinc deficiency that occur in pigs fed non zinc supplemented diets. Due to a lack of knowledge of both the actual zinc requirements of pigs and the factors that affect its availability in pigs, this element is often oversupplied in pig feeding. Such a practice has a direct adverse effect on the environment, particularly in areas of intensive pig farming. To overcome this problem and avoid any wastage of dietary zinc, the supply should be better adjusted to the requirements and zinc

availability should be improved as much as possible. Relying on a literature review, pig zinc requirements were estimated according to body weight. The addition of phytase improves zinc bioavailability and 1000 units of microbial phytase /kg of diet were estimated to be equivalent to the addition of 24 and 19 mg /kg zinc added as zinc sulphate in the diets of piglets weighing 15 kg and 25 kg, respectively. Such estimates are worth being validated experimentally. Moreover, the actual impact of other dietary components on zinc availability remains to be assessed.

REVY P.S., JONDREVILLE C., DOURMAD J.Y., NYS Y., 2003. Le zinc dans l'alimentation du porc : oligo-élément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. INRA Prod. Anim., 16, 3-18.