

Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligo- élément essentiel, facteur de crois- sance et risque potentiel pour l'Homme et l'environnement

La quantité de cuivre apportée au porc par son alimentation est souvent excessive par rapport à ses besoins. Cette pratique génère des lisiers riches en cuivre dont l'épandage pourrait entraîner des phénomènes de phytotoxicité dans certaines régions d'élevage. Réduire les apports alimentaires de cuivre constitue une voie de choix pour en limiter les rejets. Cette approche nécessite cependant une connaissance approfondie des fonctions physiologiques du cuivre ainsi que des facteurs de variation de sa biodisponibilité.

Résumé

Le Cu est un oligo-élément essentiel qui participe à de nombreuses fonctions physiologiques dont le métabolisme du Fe, la fonction immunitaire et la protection contre les stress oxydants. Le foie joue un rôle central dans le métabolisme et l'homéostasie du Cu : selon les apports et le statut de l'animal, le Cu est stocké, excrété via la bile ou distribué vers les organes. Les besoins nutritionnels en Cu du porc en croissance sont inférieurs à 10 mg/kg d'aliment et peuvent théoriquement être couverts par les seules matières premières, sans supplémentation. Cependant, utilisé pour ses propriétés de facteur de croissance, le Cu est introduit à 150 à 250 ppm dans l'aliment du porcelet en post-sevrage et permet d'en améliorer la vitesse de croissance. Cette pratique est sans incidence sur la qualité des produits consommés par l'Homme, si elle est limitée à la seule période de post-sevrage. Elle a cependant pour conséquence d'augmenter les quantités de Cu appliquées lors de l'épandage des lisiers de porc et conduit à une accumulation de cet élément dans les sols.

L'une des solutions pour réduire les rejets de Cu est d'en limiter les apports alimentaires au niveau du besoin. Cette approche nécessite de bien connaître et de hiérarchiser les composants alimentaires susceptibles d'influer significativement sur la disponibilité du Cu. Certains agents complexants, comme les phytates, les fibres ou les matières grasses ainsi que certains éléments minéraux, comme le Zn et le Ca sont en effet des facteurs de variation possibles de la disponibilité du Cu. Leur impact sur les besoins reste cependant à évaluer, de même que les critères d'évaluation du statut en Cu restent à préciser.

Le cuivre (Cu) est un composant corporel mineur du porc qui en contient moins de 200 mg à 100 kg de poids vif (Kirchgessner *et al* 1994, Mahan et Newton 1995, Mahan et Shields 1998), répartis dans le squelette (40 à 46%), dans le muscle (23 à 26%), dans le foie (8 à 10%), dans le cerveau (9%), dans le sang (6%) et dans les autres organes internes (3%) (Linder 1991, cité par Cromwell 1997, Buckley 2000). Le Cu est cependant un oligo-élément essentiel qui participe à de nombreuses fonctions physiologiques dont l'intégrité ne peut être maintenue qu'en assurant un apport alimentaire suffisant de Cu. Les matières premières couramment utilisées dans l'alimentation du porc permettent théoriquement de couvrir ses besoins (Underwood et Suttle 1999) qui n'excèdent pas 5-6 mg/kg d'aliment selon le NRC (1998). Pourtant, dans la pratique, les aliments pour les porcs sont supplémentés en Cu. Dans certains cas, cette supplémentation correspond à une marge de sécurité destinée à pallier notre connaissance imparfaite d'une part des

besoins de l'animal et d'autre part des facteurs alimentaires susceptibles de faire varier la biodisponibilité du Cu apporté dans la ration. Dans d'autres cas, notamment dans l'alimentation du porcelet en post-sevrage, le Cu est utilisé comme facteur de croissance et est incorporé à des niveaux 30 fois supérieurs aux besoins. De telles pratiques conduisent à la production de lisiers riches en Cu dont l'épandage pose des problèmes d'ordre environnemental. En effet, peu lessivable, le Cu s'accumule dans les sols et des phénomènes de phytotoxicité pourraient apparaître à moyen terme dans certaines régions d'élevage intensif (Coppenet *et al* 1993). Une réduction des apports de Cu dans l'alimentation du porc serait un moyen de diminuer ces risques environnementaux. Une telle réduction de l'apport doit cependant s'accompagner de précautions de façon à éviter toute détérioration des performances et/ou de la santé des animaux. Avant de s'engager dans cette voie, une connaissance aussi précise que possible des composantes du besoin en Cu du porc et des facteurs de variation de sa biodisponibilité est indispensable.

L'objectif de cet article est tout d'abord de faire le point sur les fonctions physiologiques et le métabolisme du Cu et de décrire les manifestations de carence ainsi que de toxicité liées à l'apport alimentaire de cet oligo-élément. Nous aborderons ensuite les conditions d'utilisation du Cu comme facteur de croissance dans l'alimentation du porc, son mode d'action comme stimulateur de la croissance et les conséquences de cette pratique sur la qualité des produits. A partir de l'analyse des principaux facteurs de variation alimentaires de la biodisponibilité du Cu, fondée sur l'étude des interactions entre le Cu et d'autres éléments, minéraux ou organiques, de la ration, nous examinerons les conditions alimentaires susceptibles de conduire à des risques de carence en cas d'apport faible en Cu. De même, les possibilités d'amélioration de la disponibilité du Cu par l'usage de sources

organiques seront discutées. Enfin, nous évaluerons les conséquences environnementales de différentes conditions d'apport de Cu dans l'alimentation du porc.

1 / Fonctions physiologiques, métabolisme et homéostasie du cuivre

Le Cu est un oligo-élément essentiel qui entre dans la composition ou est un co-facteur de nombreuses enzymes (Underwood et Suttle 1999). La connaissance de son métabolisme et des fonctions physiologiques dans lesquelles il est impliqué est un préalable indispensable à l'établissement des besoins en cet oligo-élément.

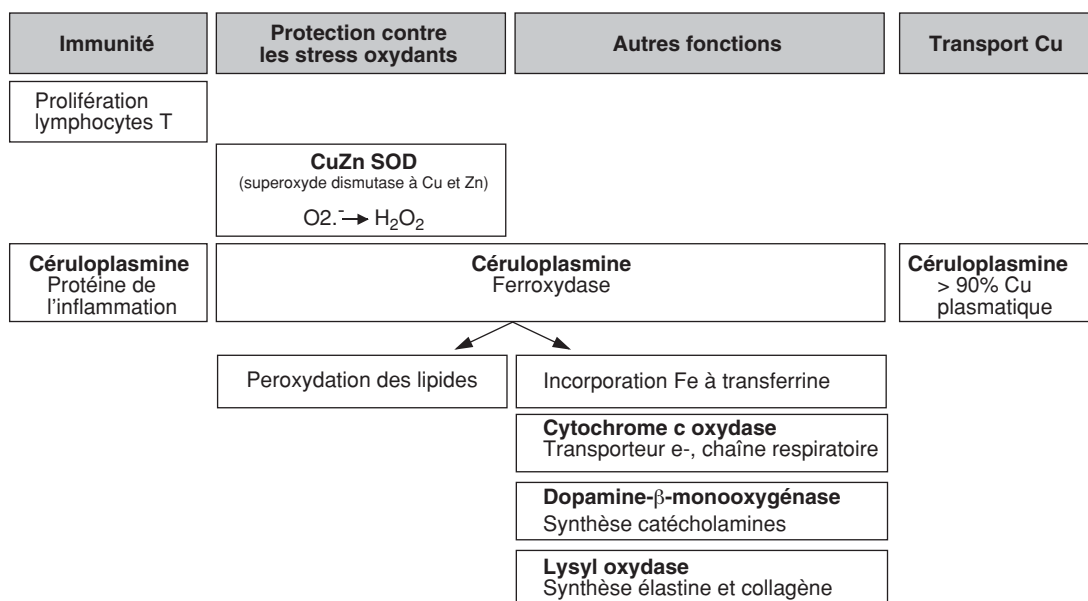
1.1 / État, propriétés et fonctions physiologiques du cuivre

In vitro, le Fe et le Cu à l'état ionique sont capables de catalyser la formation de dérivés réduits de l'oxygène, ion superoxyde (O_2^-), peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et radicaux hydroxyle ($.OH$). Ces dérivés de l'oxygène sont très toxiques pour la cellule, puisqu'ils peuvent provoquer l'induction et la propagation de la peroxydation des lipides, en particulier celle des acides gras polyinsaturés des membranes cellulaires (Strain 1994, Evans et Halliwell 2001). *In vivo*, la forme ionique du Cu est très largement minoritaire et le Cu est majoritairement lié à des cuproprotéines. Sous cette forme, le Cu exprime ses fonctions, dont celle de défense de l'organisme contre les stress oxydants (figure 1 ; Cousins 1985, Prohaska 1990, Underwood et Suttle 1999).

La superoxyde dismutase (SOD), cytoplasmique ou extra cellulaire, est une enzyme contenant à la fois du Cu et du Zn. Elle contribue à la protection des cellules contre l'ion superoxyde en catalysant sa dismutation en

Le cuivre intervient dans de nombreuses réactions de défense de l'organisme : immunité, protection contre les stress oxydants.

Figure 1. Transport et principales fonctions physiologiques du cuivre.



peroxyde d'hydrogène (Prohaska 1990, Underwood et Suttle 1999). De plus, la synthèse de la glutathion peroxydase à sélénium (Se) et celle de la ferrienzyme catalase, autres enzymes du système antioxydant qui détachent le peroxyde d'hydrogène en eau, seraient régulées par le Cu (Strain 1994). La céruloplasmine, globuline contenant 8 atomes de Cu, représente plus de 90% du Cu circulant dans le plasma (Cousins 1985). Synthétisée dans le foie, elle assure le transport du Cu vers les organes via le plasma sanguin et serait impliquée dans le transport du Cu de la mère au fœtus (Richards 1999). La céruloplasmine joue un rôle dans l'érythropoïèse en assurant la catalyse de l'oxydation de Fe^{2+} , tel qu'il est présent dans les hépatocytes, en Fe^{3+} , préalable indispensable à son intégration dans la transferrine (Cousins 1985). Elle favoriserait également l'incorporation de Fe dans une protéine de réserve, la ferritine (Underwood et Suttle 1999). Selon certains auteurs, en limitant la production de composés oxygénés réactifs lors de l'oxydation du Fe ferreux en Fe ferrique, donc en inhibant la peroxydation des lipides induite par les ions métalliques, la céruloplasmine participerait à la protection contre les stress oxydants. Elle serait également un modulateur des inflammations (Cousins 1985, Strain 1994). En cas d'infection, le Cu agirait également directement sur le maintien des fonctions immunitaires tant naturelles qu'acquises (Percival 1998). Même si la plupart des études portent sur le rat et sont difficilement transposables au porc, il semble qu'une carence en Cu induise une diminution du nombre de lymphocytes T. Concernant l'immunité naturelle, la carence en Cu se manifeste non seulement par une diminution du nombre de neutrophiles, mais également par la diminution de leur capacité à produire l'ion superoxyde nécessaire à l'élimination des microorganismes lors du processus de phagocytose. Cependant, il n'a jamais été établi si les besoins en Cu nécessaires à l'optimisation de la fonction immunitaire sont supérieurs à ceux qui permettent celle de la croissance.

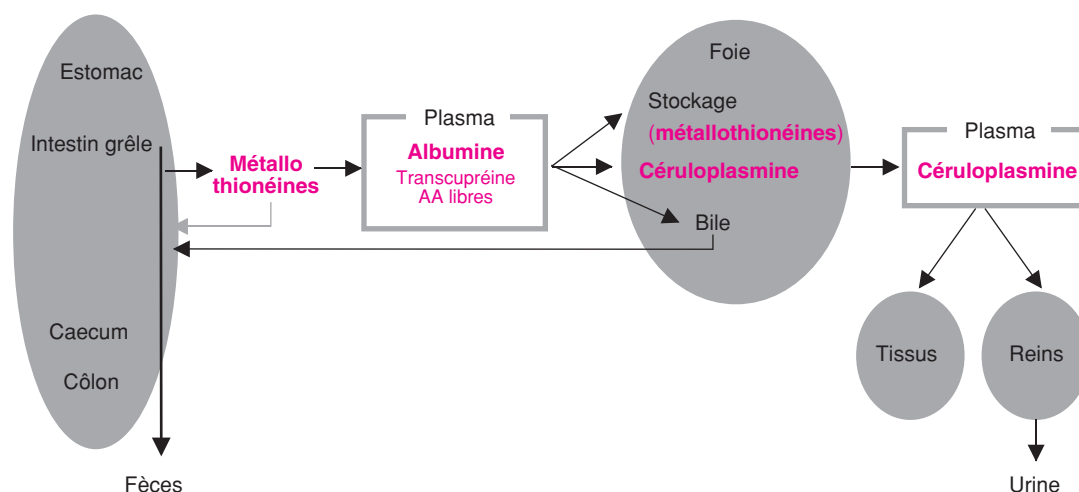
Le Cu est impliqué dans de nombreuses autres fonctions puisqu'il est un constituant,

entre autres, de la cytochrome c oxydase, enzyme terminale de la chaîne respiratoire dans toutes les cellules de mammifères, de la lysyl oxydase, qui permet la réticulation entre les chaînes peptidiques qui forment les molécules d'élastine et de collagène et leur confère leurs qualités d'insolubilité et d'élasticité, de la dopamine- β -monooxygénase, nécessaire à la production de catécholamines (O'Dell 1981, Prohaska 1990, Cromwell 1997, Underwood et Suttle 1999).

1.2 / Métabolisme et homéostasie

La solubilisation du Cu, comme celle des autres oligo-éléments (Mn, Fe, Zn) est favorisée par l'acidité gastrique. Dans l'intestin grêle, la présence de ligands solubles, d'origine alimentaire ou endogène, permet d'éviter la formation de précipités indisponibles d'hydroxydes due à l'augmentation du pH (Powell *et al* 1999). En particulier, les mucines, glycoprotéines sécrétées tout au long du tube digestif, jouent un rôle prédominant dans l'absorption des oligo-éléments qui s'y lient et sont ainsi convoyés jusqu'à la muqueuse où ils sont libérés puis absorbés par les entérocytes. Le Cu est absorbé par voie active et saturable, au moyen de transporteurs membranaires (Underwood et Suttle 1999) et le site principal d'absorption est l'intestin grêle (Bowland *et al* 1961). Dans le cytosol des entérocytes, le Cu se lie à des métallothionéines. Ces protéines ubiquistes peuvent lier jusqu'à 7 atomes de Zn et 12 atomes de Cu (Bremner 1987). De plus, leur synthèse et leur turn-over seraient sous l'influence de ces deux oligo-éléments, principalement celle du Zn (Powell *et al* 1999). Dans l'intestin, les métallothionéines joueraient un rôle non seulement dans le transport mais également dans la séquestration du Cu en cas de surcharge alimentaire (figure 2 ; Bremner 1987, Powell *et al* 1999). Une fois absorbé, le Cu est transporté vers le foie, majoritairement par les albumines, mais également par la transcupréine et les acides aminés libres, notamment l'histidine. Dans le foie, le Cu est, selon le statut de l'animal, lié aux métallothionéines pour être stocké, incorporé à la céruloplasmine

Figure 2. Métabolisme du cuivre chez les mammifères (d'après Cousins 1985 et Bremner 1987).



puis transporté vers d'autres organes, ou sécrété dans l'intestin grêle via la bile (Bremner 1987, Buckley 2000).

En cas d'augmentation des apports alimentaires de Cu, la diminution de l'absorption constitue l'une des voies de maintien de l'homéostasie. Cependant, l'excrétion endogène et l'accumulation hépatique de Cu en sont les deux voies majoritaires. Chez le porc, comme chez les autres monogastriques, l'homéostasie du Cu est en grande partie maintenue par une augmentation des pertes endogènes de Cu qui évite une accumulation excessive dans le foie (Underwood et Suttle 1999, Buckley 2000). L'excrétion biliaire en représente la majorité, les pertes via les urines, la peau ou les phanères (Buckley 2000) ou via les desquamations cellulaires dans l'intestin (Powell *et al* 1999) étant minoritaires. Dans la bile, le Cu est lié à un nombre important de composés comme des protéines, des sels biliaires, des peptides et des acides aminés. La faible réabsorption de cette fraction (Buckley 2000) contribue à l'efficacité du maintien de l'homéostasie via la sécrétion biliaire.

1.3 / Carence et toxicité

a / Carence

Les cas de carence en Cu chez le porc sont très rarement décrits. Néanmoins, chez le porcelet nourri à base de lait de vache, carencé en Cu, Lee *et al* (1968) ont observé le développement d'une anémie de type ferriprive. De même, un aliment contenant environ 100 ppm de Fe, 130 ppm de Zn et 2 ppm de Cu aboutit à des signes d'anémie et des retards de croissance au bout de 5 semaines chez le porcelet sevré (Gipp *et al* 1973b). Hypochrome et microcytaire, cette anémie est liée à une diminution du nombre de globules rouges, de leur volume et de leur teneur en hémoglobine et se manifeste par une diminution des teneurs en hémoglobine et en Fe du sang ainsi que de l'hématocrite. Elle serait due à une moindre absorption intestinale de Fe, à une moindre activité de la céruloplasmine ou encore à une modification du métabolisme intracellulaire du Fe dans le foie (Underwood et Suttle 1999). Bien que plus rarement évaluée chez le porc, la détérioration de l'activité de la superoxyde dismutase à Cu et Zn dans les érythrocytes ou dans les cellules hépatiques apparaît avant les signes d'anémie (Delves 1985).

Okonkwo *et al* (1979) indiquent que, distribué pendant 8 semaines consécutives, un aliment semi-synthétique contenant 5,6 ppm de Cu, dans lequel sont ajoutés 87 ppm de Zn et 125 ppm de Fe, permet de maintenir la vitesse de croissance, le bilan en Cu, ainsi que l'activité de la céruloplasmine plasmatique et de la superoxyde dismutase à Cu et Zn érythrocytaire de porcelets sevrés à une semaine. Selon le NRC (1998), dont les recommandations reposent en grande partie sur cette étude, des aliments contenant 6 ppm et 3,5 ppm de Cu sous forme de sulfate suffisent à couvrir les besoins respectivement du porcelet en post-sevrage et du porc en engraisse-

ment de plus de 50 kg. Avec la plupart des matières premières utilisées dans l'alimentation du porc, cet apport peut théoriquement être satisfait sans supplémentation. Toutefois, chez des porcelets sevrés ayant reçu pendant 9 semaines des aliments à base de maïs et de tourteau de soja contenant 100 ppm de Fe, Hedges et Kornegay (1973) ont observé de moindres teneurs hépatique et rénale en Fe lorsque l'aliment contenait 7 ppm de Cu comparé à 25. De plus, chez le porc abattu à 100 kg, le taux d'oxydation des lipides dans un muscle oxydatif (*Psoas major*) serait réduit par l'addition de 35 ppm de Cu dans un aliment de base en contenant 14 (Lauridsen *et al* 1999b). Ainsi, dans l'hypothèse d'une réduction réglementaire des concentrations de Cu dans l'alimentation du porc, l'absence d'anémie et le maintien du statut anti-oxydant de l'animal mériteraient d'être vérifiés, en relation avec le niveau d'apport des autres oligo-éléments et/ou la nature des matières premières utilisées.

b / Toxicité

Lorsque la capacité d'excrétion du Cu via la bile est dépassée, le Cu alimentaire en excès est stocké dans le foie (Underwood et Suttle 1999). Aucun signe clinique n'est alors détecté. Lorsque les capacités de stockage du foie sont dépassées, le Cu est relargué dans la circulation, conduisant à une phase dite hémolytique qui apparaît soudainement et se manifeste par des retards de croissance, une hémoglobinurie et se termine par une jaunisse précédant la mort (Suttle et Underwood 1999). Chez les ruminants, en particulier les ovins, le maintien de l'homéostasie via la sécrétion biliaire de Cu est beaucoup moins efficace que chez les monogastriques et la teneur en Cu du foie augmente très rapidement avec l'apport alimentaire de Cu (Underwood et Suttle 1999, Buckley 2000). Ainsi, chez les ovins, des apports alimentaires relativement faibles, de l'ordre de 15 mg/kg d'aliment, conduisent à la mort précédée de la phase hémolytique qui apparaît lorsque la teneur en Cu du foie excède 350 à 1000 ppm MS (Bremner 1998, Underwood et Suttle 1999). Mais les cas d'empoisonnement fatals sont extrêmement rares chez le porc. Ainsi, équilibré à 100 ppm de Zn, un aliment contenant 500 ppm de Cu distribué pendant 5 à 6 semaines à des porcelets sevrés (Roof et Mahan 1982, Cromwell *et al* 1989) ou pendant toute la période d'engraissement (Kline *et al* 1972) ne conduit à aucun phénomène de morbidité ou de mortalité, en dépit d'une vitesse de croissance légèrement détériorée et des teneurs hépatiques en Cu pouvant atteindre 1000 à 1500 ppm par rapport à la MS.

La tolérance du porc à des apports excessifs de Cu est liée à sa forme de stockage hépatique. Majoritairement lié aux métallothionéines, le Cu ne catalyse pas la formation de radicaux libres, responsables de l'endommagement des membranes cellulaires. Cependant, une carence en Zn, en limitant la synthèse de métallothionéines, et donc leur liaison au Cu, conduirait à l'expression de phénomènes de cytotoxicité (Bremner 1998).

La tolérance du porc à des apports importants de Cu est donc intimement liée à l'apport de Zn. Ainsi, nécrose du foie, ulcères gastriques et lésions rénales sont décrits par DeGoey *et al* (1971) chez des porcs en engraissement recevant un aliment contenant 500 ppm de Cu non supplémenté en Zn. Ces signes disparaissent avec l'apport de 100 ppm de Zn dans l'aliment, sans modification de la teneur en Cu du foie. De même, la distribution d'un aliment contenant 750 ppm de Cu non supplémenté en Zn conduit à des phénomènes de toxicité qui disparaissent avec l'apport de 500 ppm de Zn, en dépit d'une teneur en Cu du foie atteignant 3000 ppm MS (Suttle et Mills 1966a).

Toutefois, de tels niveaux d'apport excèdent largement ceux qui sont appliqués lorsque le Cu est utilisé comme facteur de croissance. Dans le cas d'un aliment contenant 250 ppm de Cu, la simple couverture des besoins en Zn, soit moins de 100 ppm, permet de prévenir tout phénomène de toxicité (DeGoey *et al* 1971, Suttle et Mills 1966b).

2 / Le cuivre : facteur de croissance

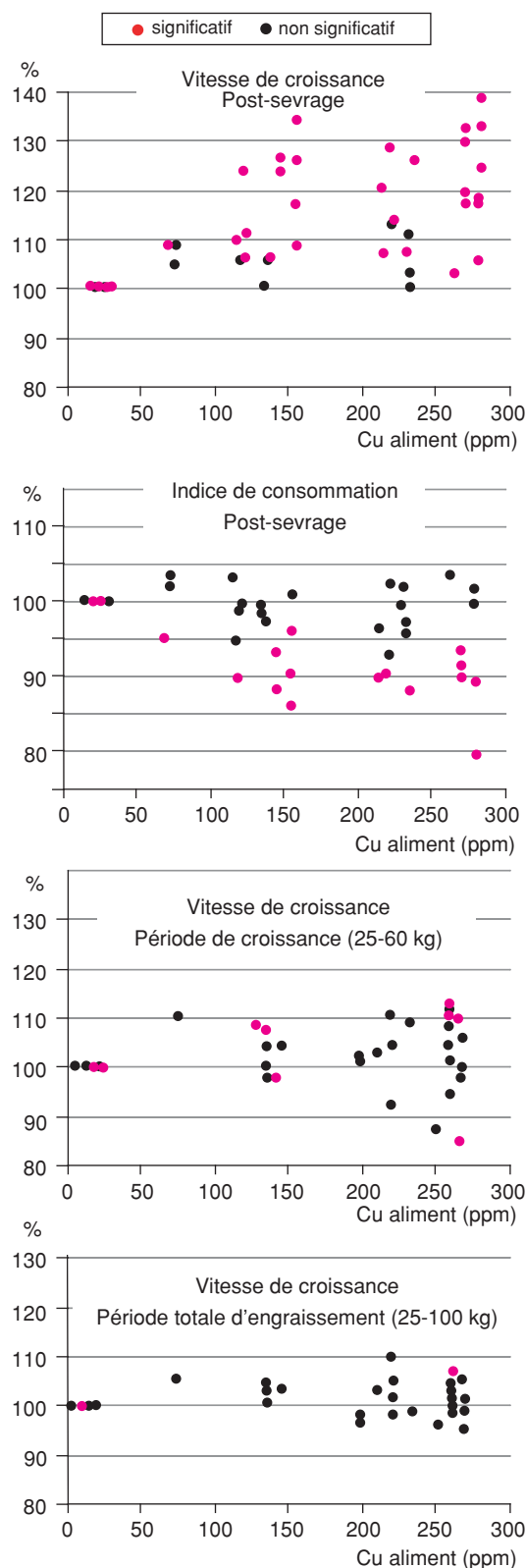
En raison de ses propriétés stimulantes sur la croissance, l'introduction de 150 à 250 ppm de Cu dans l'alimentation du porc est pratiquée depuis les années 1950 (Braude 1980). L'effet stimulant de l'addition de Cu est surtout constaté chez le porcelet en post-sevrage, il s'amenuise pour les animaux en croissance (Ward *et al* 1991) et est pratiquement inexistant en période de finition (Bradley *et al* 1983).

De façon générale, l'introduction de Cu dans l'aliment stimule l'appétit des animaux. L'amplitude d'amélioration de l'indice de consommation est généralement inférieure à celle de la vitesse de croissance (figure 3). De plus, l'addition de 150 ppm de Cu sous forme de sulfate est aussi efficace chez le porcelet en post-sevrage que l'addition de 250 ppm. Enfin, si l'amélioration de la vitesse de croissance du porcelet en post-sevrage est supérieure à 30% dans certaines études, elle est parfois non significative. Ni le mode d'action du Cu comme facteur de croissance, ni l'origine de ces différences ne sont clairement identifiés.

2.1 / Modes d'action possibles du cuivre comme facteur de croissance

Zhou *et al* (1994a) ont mis en évidence la contribution importante de la stimulation de l'appétit dans l'effet facteur de croissance du Cu. Selon ces auteurs, le Cu favoriserait la sécrétion du neuropeptide Y, stimulant de l'appétit. Toutefois, ce mécanisme ne constitue pas la seule composante de l'effet facteur de croissance du Cu qui s'exprime également chez des animaux rationnés (Castell et Bowland 1968, Zhou *et al* 1994a, Mathé *et al* 2001). L'implication d'autres phénomènes tels que l'amélioration du statut immunitaire des animaux, le rôle antimicrobien du Cu, l'amé-

Figure 3. Effet de l'addition de 60 à 250 ppm de cuivre sous forme de sulfate sur la vitesse de croissance et l'indice de consommation de porcs non rationnés (en pourcentage des performances obtenues avec une supplémentation faible (0 à 18 ppm) de Cu). Les références ayant servi à l'élaboration de cette figure sont disponibles auprès des auteurs.



Le cuivre est couramment utilisé comme facteur de croissance dans l'alimentation du porcelet en post-sevrage.

lioration de l'utilisation digestive de certains composants de la ration ou encore une action systémique du Cu sur la croissance a été étudiée.

Selon Kornegay *et al* (1989), l'addition de 200 ppm de Cu dans l'alimentation de porcelets sevrés n'a pas d'incidence sur leur statut immunitaire. Cependant, cette piste n'a été que peu explorée. Les propriétés fongicides et bactéricides du Cu sont fréquemment citées comme étant à l'origine de son effet facteur de croissance chez le porc (Poulsen 1998). L'addition de Cu à des cultures cellulaires de bactéries responsables de dysenterie chez le porc inhibe leur activité hémolytique (Dupont *et al* 1994), l'introduction de Cu dans la ration de porcelets sevrés modifie le profil de la flore fécale (Bunch *et al* 1961), enfin, l'effet du Cu comme facteur de croissance est plus prononcé chez des porcelets conventionnels que chez des porcelets axéniques (Shurson *et al* 1990). A cet égard, Stansbury *et al* (1990) suggèrent que l'effet facteur de croissance du Cu s'exprimerait d'autant mieux que le milieu d'élevage serait de qualité sanitaire médiocre. Cet effet sur la flore intestinale permettrait de diminuer la concentration des métabolites bactériens toxiques, notamment l'ammoniac, dans l'intestin (Varel *et al* 1987, Menten *et al* 1988), le taux de renouvellement des cellules épithéliales (Radecki *et al* 1992), l'absorption portale d'ammoniac (Menten *et al* 1988, Yen et Pond 1993) et conduirait à une diminution de la masse relative du foie et des reins (Pond *et al* 1988). La moindre demande énergétique des viscères permettrait alors une épargne favorisant la croissance de l'animal. Dans ce cas, le mode d'action du Cu s'apparenterait à celui des antibiotiques utilisés à doses subthérapeutiques (Yen et Nienaber 1993, Yen et Pond 1993). Toutefois, la masse relative de l'intestin grêle n'est pas réduite chez des porcelets recevant 283 ppm de Cu pendant 3 semaines (Shurson *et al* 1990) ou 250 ppm de Cu pendant 8 semaines (Yen et Pond 1993). De plus, la demande énergétique des organes drainés par la veine porte (tube digestif, foie, rate) relativement à celle du corps entier n'est pas modifiée par l'introduction de 250 ppm de Cu dans l'aliment de porcs en croissance (Yen et Nienaber 1993).

L'effet facteur de croissance du Cu pourrait également avoir pour origine l'amélioration de la digestibilité ou de l'utilisation métabolique de certains composants de la ration. *In vitro*, Kirchgessner *et al* (1976) ont en effet constaté un effet stimulant du Cu sur l'activité de la pepsine. Toutefois, *in vivo*, le Cu alimentaire est sans incidence sur l'activité de la trypsine et de la chymotrypsine pancréatiques et intestinales du porcelet sevré (Luo et Dove 1992) ainsi que sur la digestibilité fécale apparente de l'azote chez le porcelet sevré (Luo et Dove 1992, Roof et Mahan 1982) ou chez le porc en croissance (Castell *et al* 1968, Omole et Bowland 1974a et b). Cependant, Omole et Bowland (1974b) ont observé une augmentation de la digestibilité de l'énergie consécutive à l'introduction de 135 à 210 ppm de Cu dans la ration de porcs en croissance. Plus précisément, 250 ppm de Cu dans la ration de porcelets en post-sevrage permettent une augmentation de la digestibilité fécale de la matière grasse pouvant atteindre 7 à 12 points, qui serait liée à une stimulation de l'activité de la lipase et de la phospholipase A dans l'intestin grêle (Dove

1995, Luo et Dove 1996). Selon ces auteurs, l'effet facteur de croissance du Cu ne s'exprimerait qu'en cas de teneur énergétique suffisante de l'aliment.

Enfin, Zhou *et al* (1994b) ont montré l'effet stimulant du Cu sur la croissance du porcelet sevré par l'injection intraveineuse d'histidinate de Cu, suggérant un mode d'action systémique, différent de l'effet antimicrobien dans le tube digestif. Selon ces auteurs, le Cu agirait directement sur le système de régulation de la croissance. Cette hypothèse est corroborée par l'amélioration du coefficient de rétention de l'azote, sans modification de son coefficient de digestibilité observée par Luo et Dove (1996).

En définitive, le mode d'action du Cu comme facteur de croissance est vraisemblablement multifactoriel et différent de celui des antibiotiques ajoutés à doses subthérapeutiques. Même si de nombreuses pistes ont déjà été explorées, certaines d'entre elles, en particulier celles qui concernent le statut immunitaire des animaux et l'action systémique sur la croissance, mériteraient d'être approfondies. En effet, une meilleure connaissance de ce mode d'action constituerait un progrès dans le cadre de la mise au point de stratégies alternatives à l'usage des antibiotiques dans l'alimentation du porc.

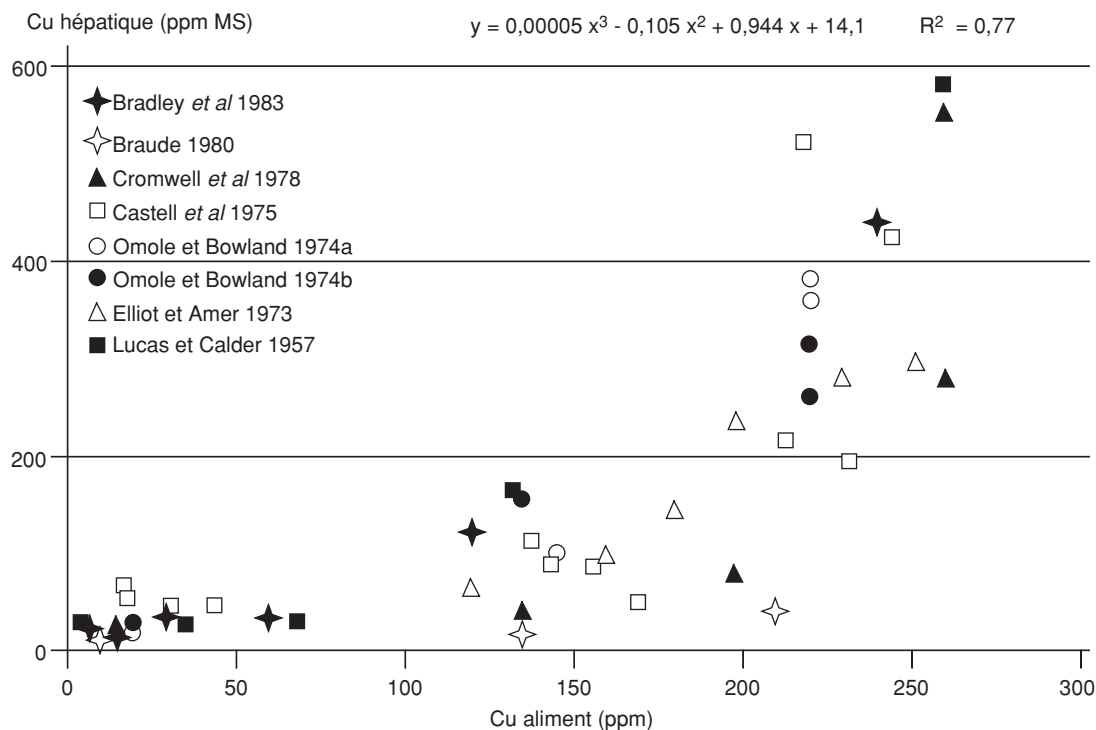
2.2 / Conséquences de l'utilisation du cuivre comme facteur de croissance

a / Accumulation de cuivre dans les produits animaux

L'usage de Cu comme facteur de croissance comporte quelques désavantages, avec en premier lieu son accumulation dans le foie. Cette accumulation dépend de la concentration dans l'aliment et de la durée d'exposition (Elliot et Amer 1973). Pour des animaux en engraissement, l'exposition pendant une durée de 100 à 150 jours entraîne une augmentation significative de la teneur en Cu dans le foie lorsque l'aliment en contient plus de 125 ppm (jusqu'à 600 ppm MS, figure 4). Le Cu s'accumule également dans le rein, mais dans une moindre mesure (jusqu'à 105 ppm MS). Sa concentration dans le tissu adipeux (1,1 à 3,0 ppm MS), le muscle (1,5 à 5,5 ppm MS) et l'os (2,4 à 2,7 mg/kg) est faible et indépendante de l'apport alimentaire (e.g. Kline *et al* 1972, Omole et Bowland 1974 a et b, Castell *et al* 1975, Bradley *et al* 1983).

Lorsque l'apport alimentaire de Cu est diminué, la teneur en Cu du foie diminue rapidement et peut être considérablement abaissée lorsque l'aliment distribué en fin d'engraissement contient moins de 20 ppm de Cu. Pour des animaux abattus entre 90 et 100 kg, l'abaissement de l'apport doit intervenir au plus tard aux alentours de 50 kg lorsque l'aliment contient 250-260 ppm de Cu (Bunch *et al* 1963, Elliot et Amer 1973) et aux alentours de 65 kg lorsque l'aliment en contient 135 ppm (Castell *et al* 1975). Le délai de retrait de la supplémentation à respecter varie donc

Figure 4. Effet de la teneur en cuivre de l'aliment distribué pendant 100 à 150 jours sur la teneur en cuivre du foie.



considérablement selon la teneur en Cu de l'aliment distribué en début d'engraissement. Sur la base de ces données, on peut estimer que l'apport de 175 ppm de Cu jusqu'à la fin de la période de croissance (60 kg), suivi d'un apport de 20 ppm jusqu'à l'abattage conduit probablement à des teneurs en Cu hépatique proches de celles qu'on obtiendrait en limitant les apports à 20 ppm pendant toute la durée d'engraissement.

Ces données nous permettent d'estimer l'impact de l'apport de Cu dans l'alimentation du porc sur l'apport quotidien de Cu par les produits animaux (muscle, foie, rein et gras) dans l'alimentation de l'Homme (tableau 1). Nous avons envisagé trois scénarios d'apport alimentaire de Cu au porc correspondant aux réglementations européennes en vigueur (directive 70/524/EEC) (B) ou envisagée (A). Le scénario C nous permet de simuler l'effet du maintien du Cu comme facteur de croissance en post-sevrage, comme l'autorise la législation actuelle, suivi de l'abaissement de la teneur en Cu des aliments d'engraissement à 35 ppm, comme le prévoit le projet de nouvelle législation. Suivant les apports alimentaires, seules les teneurs en Cu du foie et des reins varient, les teneurs en Cu du gras et des muscles en étant indépendantes. L'usage du Cu comme facteur de croissance pendant le post-sevrage est sans incidence sur la teneur en Cu des produits si la teneur en Cu de l'aliment du porc est abaissée pendant la période d'engraissement. Si les apports sont maintenus à 100 ppm jusqu'à l'abattage, l'estimation de la consommation quotidienne de Cu par l'Homme est supérieure à celle de ses besoins (3,6 vs 2 à 3 mg/j). Cette estimation est toutefois à nuancer puisque le Cu présent dans le foie de porc, probablement en raison de sa

liaison aux métallothionéines, est très peu disponible chez le poulet (Aoyagi et al 1995) et probablement chez l'Homme.

b / Conséquences sur le métabolisme du fer

Le porc recevant 250 ppm de Cu alimentaire peut présenter des signes d'anémie (Gipp et al 1973, Hedges et Kornegay 1973, Dove et Haydon 1991) de même type que dans le cas de la carence en Cu. Cependant, son origine est différente puisqu'elle est due à l'interaction négative qu'exerce le Cu sur le Fe alimentaire en limitant son absorption (Gipp et al 1973).

L'apparition de signes d'anémie est indépendante de l'efficacité du Cu sur les performances de croissance des animaux et s'accompagne d'une diminution des réserves hépatiques et rénales en Fe (Gipp et al 1973, Hedges et Kornegay 1973, Dove et Haydon 1991). Un apport supplémentaire de Fe par rapport aux 100 ppm habituellement recommandés pour un animal en post-sevrage (INRA 1989, NRC 1998) permet de prévenir l'anémie. Pour un aliment contenant 250 ppm de Cu, un apport en Fe de l'ordre de 200 à 300 ppm semble adéquat (Hedges et Kornegay 1973, Dove et Haydon 1991).

c / Conséquences sur la qualité du tissu adipeux

L'introduction de 125 à 250 ppm de Cu dans l'aliment tout au long de la période d'engraissement conduit à la production de gras mous (Amer et Elliot 1973a, Astrup et Matre 1987), indépendamment de l'effet sur la croissance (Amer et Elliot 1973b, Astrup et Matre 1987). Cet effet, observé uniquement dans les dépôts

Lorsqu'elle est prolongée pendant l'engraissement, la supplémentation en cuivre conduit à une accumulation dans le foie et a des conséquences sur la qualité du gras de couverture.

Tableau 1. Estimation des apports de cuivre dans l'alimentation de l'Homme suivant l'apport de cuivre dans l'alimentation du porc. A : projet de réglementation, B : réglementation actuelle, dans le cas d'un aliment unique en engraissement, C : réglementation actuelle en post-sevrage puis projet de réglementation en engraissement, dans le cas d'un aliment unique.

	A	B	C
Teneur en Cu de l'aliment du porc (ppm)			
Pendant le post-sevrage	35	175	175
En croissance (de 25 à 60 kg)	35	175	35
En finition (de 60 à 110 kg)	35	100	35
Teneur en Cu des produits (ppm MS)			
Muscle	1,5 à 5,5	1,5 à 5,5	1,5 à 5,5
Foie ⁽¹⁾	36	80	36
Rein ⁽¹⁾	30	55	30
Gras	1,1 à 3,0	1,1 à 3,0	1,1 à 3,0
Apport journalier de Cu par les produits ⁽²⁾ (mg/j)	1,9	3,6	1,9
Besoins du sujet adulte (mg/j) (Favier 1991)	2 à 3		

⁽¹⁾ Teneur en Cu du foie (ppm MS) = $0,00005 x^3 - 0,105 x^2 + 0,944 x + 14,1$ ($R^2=0,77$) – Teneur en Cu du rein (ppm MS) = $0,2429 x + 20,478$ ($R^2=0,53$), où x = teneur en Cu de l'aliment de finition (ppm).

⁽²⁾ Consommation journalière de 100 g de foie, 50 g de rein, 300 g de muscle et 50 g de gras (Directive 2001/79/CE modifiant la directive 87/153/CEE portant sur la fixation de lignes directrices pour l'évaluation des additifs dans l'alimentation des animaux) – teneur en MS (%) : muscle, foie, rein : 30 ; gras : 85

de couverture et non dans le gras intramusculaire (Lauridsen *et al* 1999b), résulte de la diminution de la proportion des deux principaux acides gras saturés (stéarique et palmitique) et de l'augmentation concomitante de celle d'acides gras monoinsaturés, oléique et palmitoléique. Le mode d'action du Cu sur le métabolisme des lipides n'est pas clairement élucidé (Lauridsen *et al* 1999a et b). Seuls Ho et Elliot (1974) émettent l'hypothèse selon laquelle l'activité de désaturation des acides gras dans le foie et le tissu adipeux seraient augmentée par l'addition de Cu dans la ration. Cependant, d'un point de vue pratique, l'effet du Cu utilisé comme facteur de croissance sur le degré d'insaturation des lipides est limité. D'une part, il est moins prononcé que celui de l'addition de sources de lipides riches en acides gras monoinsaturés comme l'huile de colza (Lauridsen *et al* 1999b). D'autre part, l'interruption de l'apport de Cu à doses élevées à 70 kg permet de rétablir une qualité des dépôts adipeux à 92 kg équivalente à celle d'animaux ayant reçu un aliment additionné de 10 ppm de Cu pendant toute la période d'engraissement (Amer et Elliot 1973a et b).

d / Stabilité de l'aliment et statut antioxydant de l'animal

Le Cu à l'état ionique favorise l'induction et la propagation de la peroxydation des lipides (Strain 1994). Par conséquent, l'introduction de doses élevées de Cu sous forme de sulfate dans l'aliment requiert quelques précautions quant à l'apport de vitamine E, agent antiradicalaire extrêmement sensible à l'oxydation. En effet, l'addition de 250 ppm de Cu sous forme de sulfate dans l'aliment conduit à une accélération de la destruction des tocophérols naturellement présents dans les matières premières (Dove et Ewan 1990), ainsi que, bien que dans de moindres proportions, de celle de l'acétate dl- α -tocophérol ajouté (Dove et Ewan 1991).

Au contraire, le Cu présent dans l'organisme, en tant que composant d'enzymes telles que la superoxyde dismutase et la céruloplasmine, agit comme agent antioxydant. Ainsi, l'addition de 175 ppm de Cu sous forme de sulfate pendant toute la période d'engraissement entraîne une légère diminution de la susceptibilité des lipides à l'oxydation dans le plasma, dans un muscle rouge oxydatif (*Psoas major*) et dans le foie de porcs abattus à 100 kg (Lauridsen *et al* 1999a et b). Dans cette étude, une modification de certains composants enzymatiques et non enzymatiques du système de défense contre les radicaux libres dans le muscle a été mise en évidence. Notamment l'activité de la superoxyde dismutase à Cu et Zn et la teneur en vitamine E ont été augmentées.

3 / Biodisponibilité du cuivre : interactions avec les constituants de la ration

Les événements qui modifient l'utilisation des oligo-éléments ou la réponse métabolique à leur carence ou leur toxicité peuvent se produire avant et durant le processus d'absorption ou, de façon systémique, lors de leur utilisation métabolique dans les tissus. Une composante importante des interactions se situe probablement avant l'absorption et consisterait en la formation de composés insolubles, souvent par complexation des ions métalliques avec des composants alimentaires ou endogènes, dans l'aliment ou dans le tube digestif. Ces associations peuvent être modifiées substantiellement durant la digestion, notamment avec le changement de pH de l'estomac à l'intestin, ce qui rend malaisée l'étude de leur impact sur la biodisponibilité. Les interactions négatives n'ont d'importance pratique que si elles entraînent une augmentation significative des besoins. Néanmoins,

une compréhension insuffisante voire l'ignorance de ces interactions obère notre capacité à définir de façon adéquate les besoins de l'animal.

Les valeurs de digestibilité apparente relevées dans la littérature sont extrêmement variables, de -12 % (Larsen *et al* 1999) à 52 % (Adeola *et al* 1995). Une grande part de cette variabilité peut sans doute être imputée aux difficultés méthodologiques liées à l'établissement du bilan métabolique de composants représentant moins de 0,003 % de la ration et, de surcroît, excrétés à près de 80-90 % (Underwood 1977). Dans cette configuration, une erreur de 10 % sur l'estimation de la quantité de Cu excrétée entraîne une variation de la digestibilité apparente d'environ 8 à 9 points. Au-delà de ces problèmes strictement analytiques, le statut en Cu des animaux au début de l'expérimentation ainsi que la durée d'exposition des animaux à un apport donné de Cu alimentaire avant l'établissement du bilan expliquent vraisemblablement une partie de cette variabilité (Newton *et al* 1983). En effet, lors d'un changement alimentaire, l'organisme atteint un nouvel état d'équilibre correspondant à l'égalité des apports et des pertes quotidiens de Cu (Mertz 1987). Or, la stabilisation des réserves corporelles et des pertes endogènes de Cu peut durer plusieurs semaines (Mertz 1987, Buckley 2000) et largement excéder le temps habituellement imparti pour l'établissement d'un bilan métabolique. Toutefois, une part de cette variabilité peut être la conséquence d'interactions alimentaires.

3.1 / Interactions avec les autres minéraux

a / Zinc

Le Zn est connu pour son effet antagoniste sur le Cu. Cet effet s'exercerait par l'induction de la synthèse de métallothionéines qui séquestrent le Cu dans l'entérocyte, empêchant son transfert vers la séreuse (Solomons 1983, O'Dell 1989).

Lorsque le Cu est apporté à plus de 200 ppm dans l'aliment, l'augmentation de la supplémentation en Zn de 50 à 250 ppm (Omole et Bowland 1974b), 0 à 100 ppm (Bekaert *et al* 1967) ou de 100 à 300 ppm (Kline *et al* 1972) n'a que peu ou pas d'effet limitant sur l'accumulation de Cu dans le foie. De plus, utilisé comme facteur de croissance sous forme de ZnO à des taux atteignant 3000 ppm, le Zn n'altère pas l'effet facteur de croissance du Cu (Smith *et al* 1997).

Avec des apports alimentaires de Cu beaucoup plus modestes, on observe une altération de la disponibilité du Cu chez l'Homme lorsque le rapport Zn:Cu excède 10:1 (Solomons 1983). Chez le porcelet sevré à 11 jours, l'apport de 3000 ppm de Zn au lieu de 100 dans un aliment additionné de 10 ppm de Cu sous forme de sulfate conduit, au bout de 28 jours, à une détérioration du statut en Cu qui se manifeste par une diminution de la cuprémie, une concentration accrue des

métallothionéines dans le foie et l'intestin ainsi qu'une diminution de l'activité de la superoxyde dismutase dans les érythrocytes et le foie (Carlson *et al* 1999). De même, Hill *et al* (1983a) ont induit une carence en Cu chez des porcelets issus de truies recevant un aliment contenant 5000 ppm de Zn. Ces animaux, sevrés entre 3 et 5 jours, présentaient, au bout de 5 semaines, des signes d'anémie, une moindre activité de la lysyl oxydase dans l'aorte et de la cytochrome c oxydase dans le cœur et le foie, si leur alimentation contenait seulement 4,9 ppm de Cu.

Mathé *et al* (2001) ont observé des performances de croissance normales et n'ont pas enregistré de signes d'anémie chez des porcs en croissance recevant des aliments contenant 15 ppm de Cu, dont 5 ajoutés sous forme de sulfate, et 77 ppm de Zn, dont 45 ajoutés sous forme d'oxyde. Toutefois, certains résultats suggèrent un effet négatif de l'introduction de Zn à des niveaux proches du besoin dans des aliments contenant de faibles quantités de Cu. A cet égard, Hill *et al* (1983b) notent que les réserves hépatiques en Cu de porcelets issus de truies ayant reçu un aliment sans Cu et sans Zn ajouté sont plus élevées que celles de truies recevant une supplémentation de 50 ppm de Zn sous forme d'oxyde. Cheng *et al* (1998) observent, chez des porcelets sevrés, une diminution de la teneur en Cu du foie mais une augmentation de la teneur en Cu des reins avec l'introduction de 100 ppm de Zn dans un aliment contenant 15 ppm de Cu et 27 ppm de Zn. Chez des animaux de 95 kg ayant reçu pendant 132 jours une alimentation à base de maïs et de tourteau de soja additionnée de 10 ppm de Cu, la cuprémie est diminuée lorsque 15 ppm de Zn sont ajoutés aux 27 ppm que contiennent les matières premières constitutives du régime (Hill *et al* 1986). Enfin, Adeola *et al* (1995) observent une diminution de la digestibilité fécale apparente du Cu (13 vs 21 %) avec l'addition de 100 ppm de Zn sous forme de sulfate dans un aliment contenant 27 ppm de Zn et 14 ppm de Cu, dont 10 ajoutés sous forme de sulfate, mais aucun effet sur la cuprémie. Ces résultats, parfois contradictoires, ne permettent pas de statuer définitivement sur l'effet du Zn sur la disponibilité du Cu à de tels niveaux d'incorporation. En particulier, pour ce qui concerne la mesure de la digestibilité fécale apparente, la probable accumulation de Cu dans la paroi intestinale et la possible diminution des pertes endogènes de Cu via la bile lors d'apports accrus de Zn alimentaire (Yu et Beynen 1994) s'ajoutent aux difficultés d'interprétation évoquées précédemment. Il serait nécessaire, pour bien cerner l'effet du Zn sur des aliments peu pourvus en Cu, de choisir les critères les plus sensibles à la carence en Cu tels que l'activité de la superoxyde dismutase à Cu et Zn dans les érythrocytes ou le foie (Delves 1985).

b / Soufre et calcium

Lorsque la ration de porcs contient 250 ppm de Cu sous forme de sulfure, l'addition de 500 ppm de sulfure de sodium (Cromwell *et al* 1978) ou de sulfure ferreux (Prince *et al* 1979,

Certains éléments présents dans l'aliment, minéraux ou organiques, sont susceptibles de modifier les besoins du porc en cuivre.

Ribeiro de Lima *et al* 1981) conduit à une diminution de l'accumulation de Cu dans le foie. Selon ces auteurs, le soufre présent dans le tube digestif conduirait, en milieu anaérobie, à la formation de CuS, insoluble, donc peu absorbable.

De la même manière, en raison de l'augmentation du pH qu'il occasionne dans le tube digestif, le calcium pourrait entraîner la précipitation du Cu sous la forme indisponible d'hydroxydes insolubles. Toutefois, ce phénomène, observé chez le ruminant, ne semble pas se produire chez le porc (Kirchgeßner et Grassman 1970).

Selon un autre mécanisme, l'augmentation de l'apport alimentaire de Ca pourrait, au contraire, induire une amélioration de la biodisponibilité du Cu en diminuant celle du Zn (Pond *et al* 1975). Cette hypothèse n'a cependant pas été vérifiée de façon probante. Prince *et al* (1984) n'ont obtenu qu'une très légère augmentation de l'accumulation hépatique de Cu chez le porc en croissance en augmentant la teneur en Ca de 0,65 à 1,2 % dans un aliment contenant 250 ppm de Cu. De même, l'augmentation de la teneur en Ca de 0,32 à 1,1 % MS dans un aliment riche en phytates, sans Cu ni Zn ajoutés (la MS contenant 3,5 ppm de Cu et 26 ppm de Zn) n'a pas modifié les bilans de Cu et de Zn chez des porcs de 35 kg (Larsen et Sandström 1993). Dans cette étude, l'absence d'effet du Ca sur le bilan de Zn rend toutefois difficile l'interprétation du bilan de Cu. Des études complémentaires, utilisant de meilleurs indicateurs du statut en Cu et visant à une meilleure quantification de l'effet négatif du Zn sur la disponibilité du Cu en relation avec l'apport de Ca mériteraient d'être entreprises.

3.2 / Interactions avec les composants organiques de la ration

a / Phytates

L'acide phytique représente la forme majeure de stockage du phosphore dans les céréales, les légumineuses et les oléagineux. Son effet antinutritionnel est dû aux six groupes phosphate capables de se lier avec des cations di- et trivalents pour former des complexes stables, appelés phytates. L'effet négatif de la présence de phytates, dans l'aliment ou dans l'intestin, sur la disponibilité du Zn est reconnu. Son effet sur la biodisponibilité du Cu est plus controversé (Kratzer et Vohra 1986, Pallauf et Rimbach 1997). Comparé au Zn, le Cu serait moins sensible à la présence de phytates de Ca dans le tube digestif en raison de sa plus grande affinité pour d'autres chélatants, notamment les acides aminés libres (Wise et Gilburt 1982), capables de préserver sa solubilité (Mills 1985).

Toutefois, certains résultats suggèrent qu'en cas d'apports modérés de Cu (<15 ppm dans l'aliment), les phytates peuvent conduire à une réduction de la biodisponibilité du Cu, d'autant plus prononcée que l'apport en Zn

est faible. Ainsi, chez le porcelet sevré et le porc en croissance, l'addition de 500 à 1500 unités de phytase microbienne dans des aliments modérément supplémentés en Cu (<14 ppm) et en Zn (<60 ppm) conduit à une amélioration de 7 à 31 points de la digestibilité fécale apparente du Cu (Pallauf *et al* 1992, Adeola *et al* 1995, Gebert *et al* 1999). Au contraire, selon Adeola *et al* (1995), lorsque l'aliment contient 126 ppm de Zn, la digestibilité fécale apparente du Cu devient indépendante de l'activité phytasique. Adeola (1995) obtient toutefois une amélioration de 8 points de la digestibilité fécale apparente du Cu par l'addition de 1500 unités de phytase microbienne dans un aliment contenant 5 ppm de Cu et 106 ppm de Zn.

En cas d'apports supérieurs en Cu, de l'ordre de 120 à 150 ppm, une amélioration significative de la digestibilité fécale apparente du Cu par l'addition de 500 à 1500 unités de phytase microbienne a été observée (Kirchgeßner *et al* 1994, Adeola 1995). Elle n'est toutefois pas constatée lorsque 500 unités de phytase microbienne sont ajoutées dans un aliment contenant 60 ppm de Cu (Adeola 1995).

En tout état de cause, l'impact de l'incorporation de phytase microbienne dans l'aliment du porc sur la disponibilité du Cu devrait être vérifié en distinguant son éventuel effet direct sur le Cu de celui, indirect et négatif, qu'elle pourrait exercer en améliorant la disponibilité du Zn.

b / Matière grasse

Chez le porcelet sevré, Dove (1995) observe un bilan de Cu négatif (-1,5 vs 0,8 mg Cu retenu/j) lorsque 5 % de matière grasse animale sont ajoutés à un aliment à base de maïs et de tourteau de soja supplémenté avec 15 ppm de Cu sous forme de sulfate. Selon cet auteur, la présence de matière grasse dans le régime entraînerait la formation de savons dans le tube digestif à l'origine de la diminution de la disponibilité du Cu et d'autres oligo-éléments tels que le Zn et le Fe. Au contraire, Luo et Dove (1996), avec les mêmes types d'aliment et d'animaux, n'ont relevé aucun effet de la présence de graisse animale dans l'aliment sur la cuprémie ou la concentration hépatique de Cu. Enfin, l'addition de 6 % d'huile de colza dans un aliment à base de céréales et de tourteau de soja, contenant 15 ppm de Cu entraîne une augmentation de la teneur en Cu hépatique chez le porc en engraissement abattu à 100 kg (Lauridsen *et al* 1999a). L'effet négatif de la présence de quantités importantes de matières grasses dans l'aliment sur la disponibilité du Cu n'est donc pas établi, de même que l'impact du type de matière grasse n'est pas élucidé.

c / Fibres

Bien que leur effet soit difficile à distinguer de celui des phytates, les fibres pourraient également constituer des chélatants des oligo-éléments, les rendant moins disponibles. Chez l'Homme, les pectines seraient

sans effet sur la rétention de Cu alors que l'addition de cellulose entraînerait une diminution de la digestibilité apparente du Cu (Kies et Umoren 1989). Chez le porc en croissance, des taux élevés de fibres riches en hémicellulose ou en lignocellulose ne modifient pas de façon notable le bilan en oligo-éléments sur le long terme (Moore et Kornegay 1987). En effet, un impact négatif de l'addition de 10 % de son d'avoine (Moore *et al* 1986) ou de 10 % ou 20 % de son de blé (Moore *et al* 1983, Newton *et al* 1983) sur la digestibilité fécale apparente du Cu n'est détecté que pour des durées de bilan inférieures à 15 jours. Pour des durées de bilan supérieures à 20 jours, la rétention de Cu n'est pas modifiée par l'addition de 15 % de son d'avoine, de 15 % de coque de soja ou de 20 % de farine de luzerne dans un aliment pour porcelets sevrés (Moore *et al* 1988) et de 50 % d'avoine (Ravindran *et al* 1984) ou de 10 à 20 % de son de blé (Newton *et al* 1983) dans un aliment pour porcs charcutiers.

D'autres éléments organiques comme certains tanins, ligands potentiels pour le Cu, sont susceptibles d'en modifier la disponibilité (Kies et Umoren 1989).

4 / Sources d'apport de cuivre dans l'alimentation du porc

La teneur en Cu des céréales, de leurs co-produits et des graines d'oléoprotéagineux se situe aux environs de 5 à 15 ppm. Les tourteaux d'oléagineux sont légèrement plus

riches, avec des teneurs atteignant 20 ppm pour les tourteaux de soja. Les farines de viande, désormais interdites, présentent les teneurs les plus élevées, pouvant atteindre 100 ppm, tandis que les produits laitiers en sont quasiment dépourvus (INRA 1989, NRC 1998, CVB 2000). La biodisponibilité du Cu dans les matières premières a été peu étudiée chez le porc. A notre connaissance, seuls Larsen et Sansdröm (1993) indiquent que 29 % du Cu présent dans un tourteau de colza est retenu par le porc en croissance.

Le plus souvent, les aliments pour animaux sont supplémentés en sulfate de Cu. D'autres sources de supplémentation, minérales ou organiques, sont parfois utilisées. Leur intérêt par rapport au sulfate de Cu a été évalué en comparant, souvent à des niveaux d'apport élevés, l'effet sur les performances de croissance (tableaux 2 et 3). Certains auteurs ont par ailleurs estimé leur biodisponibilité en mesurant l'accumulation hépatique de Cu. Plus rarement, le bilan de Cu a été calculé.

4.1 / Sources minérales

L'utilisation du sulfure (CuS) a été abandonnée compte tenu de son insolubilité, de sa faible absorption intestinale et de son inefficacité comme facteur de croissance (Bowland *et al* 1961, Cromwell *et al* 1978). Selon les études, l'oxyde de Cu (CuO) est considéré comme un facteur de croissance aussi efficace que le sulfate de Cu (Bunch *et al* 1961, Bekaert *et al* 1967) ou comme dépourvu d'effet sur la croissance des animaux (Cromwell *et al* 1989). Ces différences

Tableau 2. Propriétés de facteur de croissance et biodisponibilité de différentes sources minérales de cuivre chez le porcelet et le porc en croissance – comparaison au sulfate de cuivre. = valeurs identiques de la source et du sulfate ($P > 0,05$), < valeur de la source inférieure à la valeur du sulfate ($P < 0,05$), > valeur de la source supérieure à la valeur du sulfate ($P < 0,05$).

Référence	Poids des animaux (kg)	Cu ajouté (ppm) ⁽¹⁾		Vitesse de croissance	Indice de consomm.	[Cu] foie	Bilan Cu	Cuprémie
CuS								
Cromwell <i>et al</i> 1978	16 à 94	250 (NS)	250 (NS)	=	=	<		
CuO ⁽²⁾								
Bunch <i>et al</i> 1961	4 à 20	250 (NS) 250 (NS)	250 (NS) 125 (NS)	= =	= =	<		
Buescher <i>et al</i> 1961	> 25	10	10				=	
Bekaert <i>et al</i> 1967	22 à 100	250 (NS)	250 (NS)	=	=	<		
Cromwell <i>et al</i> 1989	8 à 17	250 (S) 125 (S)	250 (NS) 125 (NS)	< <	> >	< =		
CuCO ₃								
Buescher <i>et al</i> 1961	> 25	10	10				=	
Bunch <i>et al</i> 1965	5 à 20	250 (S)	250 (S)	=	>			=
Cu ₂ [OH] ₃ Cl								
Cromwell <i>et al</i> 1998	7 à 18	200 (NS) 100 (NS)	200 (NS) 100 (NS)	= =	= =	= =		
Cromwell <i>et al</i> 1998	9 à 21	200 (S) 200 (S)	200 (S) 100 (S)	= =	= =	=		
Cromwell <i>et al</i> 1998	9 à 26	200 (S) 200 (S)	200 (S) 100 (S)	= =	= =			

⁽¹⁾ Effet comme facteur de croissance non significatif (NS), significatif (S) ($P < 0,05$), par rapport à un aliment témoin.

⁽²⁾ Les différentes sources testées n'ont pas nécessairement la même origine.

Tableau 3. Propriétés de facteur de croissance et biodisponibilité de différentes sources organiques de cuivre chez le porcelet et le porc en croissance – comparaison au sulfate de cuivre. = valeurs identiques de la source et du sulfate ($P>0,05$), < valeur de la source inférieure à la valeur du sulfate ($P<0,05$), > valeur de la source supérieure à la valeur du sulfate ($P<0,05$).

Référence	Poids des animaux (kg)	Cu ajouté (ppm) ⁽¹⁾		Vitesse de croissance	Indice de consomm.	[Cu] foie	Bilan Cu	Cuprémie
		Sulfate	Source					
Citrate de Cu								
Armstrong <i>et al</i> 2000	6 à 21	66 (NS)	66 (NS)	=	=	=		<
		225 (NS)	100 (NS)	=	=	<		<
Armstrong <i>et al</i> 2000	21 à 112	66 (S)	66 (NS)	=	=			=
		225 (NS)	100 (NS)	=	=			=
Cu-EDTA								
Stansbury <i>et al</i> 1990	7 à 19	63	63	=	>			
		125	125	=	<			
		250 (S) ⁽³⁾⁽⁴⁾	250 (S) ⁽³⁾⁽⁴⁾	=	>			
Formate de Cu								
Windish <i>et al</i> 2001	9 à 30	95 (NS)	95 (NS)	=	=			=
		175 (S)	175 (NS)	=	=			=
Cu-Polysaccharides								
Stansbury <i>et al</i> 1990	7 à 19	63	63	=	=			
		125	125	=	=			
		250 ⁽³⁾	250 ⁽³⁾	=	=			
Chélate CuAA ⁽²⁾								
Lee <i>et al</i> 2001	11 à 24	170 ⁽³⁾	170 ⁽³⁾	=	<			>
Windish <i>et al</i> 2001	9 à 30	95 (NS)	95 (NS)	=	=			=
		175 (S)	175 (NS)	=	=			=
Complexe Cu-Lys ⁽²⁾								
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	100 (NS)	100 (NS)	=	=	=		
		200 (NS)	200 (NS)	=	=	=		
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	100 (NS)	100 (NS)	> ⁽⁵⁾	=			
		200 (NS)	200 (NS)	> ⁽⁵⁾	=			
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	100 (NS)	100 (NS)	=	=			
		200 (NS)	200 (NS)	=	=			
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	200 (S)	200 (S)	=	=			
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	100 (S)	100 (S)	> ⁽⁵⁾	=	< ⁽⁵⁾		
		200 (S)	200 (S)	> ⁽⁵⁾	=	< ⁽⁵⁾		
Coffey <i>et al</i> 1994	8 à 17	50	50	=	=			
		100 (S)	100 (S)	=	=			
		200 (S)	200 (S)	=	=	=		
Zhou <i>et al</i> 1994a	7 à 15	15	15	>	=	=		
		200 (S)	200 (S)	>	=	=		
Apgar <i>et al</i> 1995	8 à 20	100 (S)	100 (S)	=	=	=		
		150 (S)	150 (S)	=	=	=		
		200 (S)	200 (S)	=	=	>		
Apgar et Kornegay 1996	71 à 82	200 (NS)	200 (NS)	>			=	
Maribo et Poulsen 1999	7 à 32	35 ⁽³⁾	35 ⁽³⁾	=	=	=		
		90 ⁽³⁾	90 ⁽³⁾	=	=	=		
Lee <i>et al</i> 2001	11 à 24	170 ⁽³⁾	170 ⁽³⁾	=	=			>
Complexe Cu-Met								
Bunch <i>et al</i> 1965	5 à 20	250 (S)	250 (S)	=	=	=		=

⁽¹⁾ ⁽²⁾ Voir tableau 2.

⁽³⁾ Pas d'aliment témoin.

⁽⁴⁾ Effet significatif comme facteur de croissance de 250 vs 125 et 63.

⁽⁵⁾ Effet global pour les deux doses.

sont attribuées au mode d'obtention des oxydes et à leur solubilité (Cromwell *et al* 1989). Cependant, l'usage de CuO n'entraîne jamais d'accumulation de Cu dans le foie, ce qui suggère une faible disponibilité par rapport aux sulfates (Bunch *et al* 1961, Cromwell *et al* 1989). La forme carbonate (CuCO_3) présente des propriétés de facteur de croissance, entraîne une accumulation hépatique de Cu (Bunch *et al* 1965) et induit un bilan de Cu (Buescher *et al* 1961) équivalents à ceux du sulfate de Cu (tableau 2).

4.2 / Sources organiques

D'autres sources d'oligo-éléments, dites protégées, résultent de la complexation d'un métal par une molécule organique. La molécule peut être une protéine partiellement hydrolysée (protéinate de métal), un acide aminé (complexe métal-acide aminé) ou encore des polysaccharides (complexe métal polysaccharides). Un chélate est un complexe particulier pour lequel le métal est attaché au ligand en au moins deux points (Kratzer et Vohra 1986). La chélation ou la complexation permettraient d'améliorer la biodisponibilité du métal en le protégeant contre des agents complexants insolubles ou des antagonistes présents dans le tube digestif (Kirchgessner et Grassman 1970) et/ou en favorisant son absorption ou son utilisation métabolique. Toutefois, aucun de ces mécanismes n'a été clairement mis en évidence expérimentalement (Beutler *et al* 1998).

L'examen des données disponibles dans la littérature ne permet pas de conclure sur les avantages des sources organiques par rapport au sulfate (tableau 3). Selon Coffey *et al* (1994), un complexe Cu-Lys est supérieur au sulfate parce qu'il permet de stimuler la croissance des animaux en évitant l'accumulation de Cu dans le foie, tandis que selon Apgar *et al* (1995), il présente une meilleure biodisponibilité en raison d'une accumulation hépatique plus élevée. Par ailleurs, les niveaux d'incorporation utilisés dans la plupart des études entreprises jusqu'à présent ne correspondent pas au contexte actuel de réduction des apports de Cu. De plus, les critères utilisés, y compris l'accumulation de Cu dans le foie, sont vraisemblablement trop imprécis pour permettre de conclure définitivement sur ce sujet. L'étude plus approfondie de la protection permise par la complexation et l'évaluation de l'intégrité de certaines fonctions physiologiques auxquelles participe le Cu devraient permettre de compléter le travail déjà effectué et de statuer de façon plus sûre sur les avantages que procure l'utilisation de ces produits.

5 / Cuivre et environnement

Selon certains auteurs, l'introduction de 250 ppm de Cu dans l'alimentation du porc peut avoir un effet bénéfique sur l'environnement. Ainsi, en influant sur la population microbienne intestinale, elle induirait une modification des fermentations permettant de diminuer l'intensité et d'améliorer la quali-

té de l'odeur de lisier de porc (Armstrong *et al* 2000b). En dépit de cet effet bénéfique, l'impact négatif de l'incorporation massive de Cu dans l'alimentation du porc demeure la principale préoccupation.

Compte tenu de la faible valeur du coefficient de rétention du Cu, la réglementation actuelle (directive 70/524/EEC), qui autorise un apport alimentaire de Cu largement au-dessus des besoins, notamment en engraissement, conduit à la production de lisiers très riches en cet élément. Des teneurs de l'ordre de 700 à 800 ppm MS sont mesurées dans des lisiers de porcs en engraissement recevant un aliment contenant environ 100 ppm de Cu (Priem et Maton 1980, Héduit *et al* 1977, Levasseur et Texier 2001). L'utilisation de tels produits comme fertilisants n'est pas sans conséquence sur l'environnement.

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

Le Cu apporté lors de l'épandage de déjections animales s'accumule dans la couche arable (McGrath 1980, Arzul et Maguer 1990) et seuls 2 à 10 % du Cu apporté sont exportés par les eaux de drainage et les cultures (McGrath 1980). Ainsi, un enrichissement progressif de sols régulièrement fertilisés au moyen de lisier de porc pouvant atteindre 0,37 ppm par an entre 1973 et 1988 a été mis en évidence dans certaines régions du Finistère (Coppenet *et al* 1993). Cette accumulation a des conséquences non négligeables.

a / Transfert vers la plante

Dans un sol, seule la fraction du Cu capable d'échanges avec les ions en solution est phytodisponible. L'intensité de ces échanges dépend du pH du sol, de son potentiel d'oxydoréduction et de sa texture (Morel 1997). Les parties aériennes, donc consommées, des céréales, oléagineux, protéagineux et fourrages ne s'enrichissent pas en Cu lorsque la teneur en Cu du sol sur lequel elles sont cultivées augmente (Hartmans 1978, McGrath 1980). La contamination de la chaîne alimentaire par cette voie est donc un problème secondaire par rapport au risque de phytotoxicité, qui se manifeste par une diminution des rendements par hectare, proportionnelle à l'enrichissement en Cu du sol. Les espèces les plus sensibles sont les légumineuses, suivies des céréales à paille puis des prairies (Hartmans 1978, McGrath 1980). Coppenet *et al* (1993), sur des sols granitiques bretons, estiment que des phytotoxicités irréversibles sont à craindre pour des teneurs atteignant 120 ppm, soit à échéance de 100 ans si la quantité de Cu appliqué dans certaines régions d'élevage intensif n'est pas abaissée.

b / Transfert vers le réseau hydrographique

Alimentés par l'érosion des éléments non solubles, les sédiments prélevés à proximité de parcelles fertilisées au moyen de lisier de

Moins de 10 % du cuivre contenu dans les lisiers épandus est utilisé par les plantes ou drainé. Le sol s'enrichit donc en cuivre, avec des conséquences localement, mais aussi sur les zones d'accumulation des sédiments.

porc s'enrichissent également en Cu. Accumulé dans les sédiments des estuaires, le Cu peut être remobilisé, sous l'effet du changement de conditions physico-chimiques à l'interface sédiment-eau, et prélevé par les organismes marins. Il peut contribuer à la contamination de la chaîne alimentaire. Arzul et Maguer (1990) font une liaison directe entre le nombre de porcs produits par ha à proximité des côtes et la teneur en Cu des sédiments prélevés dans les estuaires bretons. Cependant, sur un petit bassin versant du Finistère, L'Herroux (1997) n'observe aucune pollution des eaux et des sédiments consécutive aux apports métalliques liés aux épandages d'effluents d'élevage. Les transferts d'éléments métalliques vers le réseau hydrographique seraient régulés au niveau des zones humides de fond de vallées (Olivier-Lauquet *et al* 2000).

c / Toxicité envers la microflore du sol

La microflore des sols est très sensible à une augmentation des teneurs en éléments métalliques et ce pour des concentrations dans les sols bien inférieures aux seuils de phytotoxicité. Cependant, de fortes teneurs en matière organique, des teneurs importantes en argile ou un pH élevé réduisent considérablement la toxicité (McGrath *et al* 1995). Le temps de séjour des éléments dans le sol est également important puisque les différentes populations de microorganismes qui s'y trouvent peuvent s'adapter à des concentrations élevées (Yeates *et al* 1994).

d / Cas d'empoisonnement de moutons au pâturage

Des cas d'empoisonnement de moutons ayant pâture des prairies fertilisées avec du lisier de porc riche en Cu ont été relatés (Poulsen 1998). Cette absorption excessive de Cu est davantage attribuée à l'ingestion de particules de sol riches en Cu qu'à celle d'un fourrage contaminé (Hartmans 1978). En fait, le Cu présent dans les déjections de porc, principalement sous forme de CuS, serait peu disponible pour le mouton (34 % par rapport à un sulfate) et donc peu toxique. Cependant, au bout de quelques semaines après l'épandage, le Cu deviendrait plus disponible, donc plus toxique, en raison de l'oxydation des sulfures en sulfates (Hartmans 1978). Compte tenu de la quantité de terre ingérée par les animaux, cet auteur conclut qu'une parcelle située sur un sol contenant plus de 25-30 ppm de Cu ne doit pas être pâturée par des moutons.

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

Paboeuf *et al* (2000 et 2001) ont montré expérimentalement que l'abaissement de la supplémentation en Cu de 80 à 10 ppm dans l'aliment des porcs en engraissement permet de réduire de 75 % les rejets de cet élément, sans modifier les performances des animaux. Réduire les apports de Cu dans l'alimentation des porcs constitue donc une voie de choix

pour limiter les rejets. Cinq scénarios d'apport alimentaire de Cu 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). Les scénarios suivants correspondent aux réglementations européennes en vigueur (directive 70/524/EEC) (E) ou envisagée (C). Le scénario D, qui est intermédiaire, nous permet de simuler l'effet du maintien du Cu comme facteur de croissance en post-sevrage, comme l'autorise la législation actuelle, suivi de l'abaissement de la teneur en Cu des aliments d'engraissement à 35 ppm, comme le prévoit le projet de nouvelle législation.

La quantité de lisier produite par animal ainsi que sa teneur en azote a été calculée à partir des références fournies par le CORPEN (1996). Compte tenu de sa faible influence sur l'indice de consommation, on a supposé que la teneur en Cu des aliments n'avait pas d'effet sur la quantité de lisier produite. La teneur en Cu des effluents a été comparée aux teneurs en Cu maximales autorisées d'une part par la législation portant sur l'utilisation, comme fertilisant, de boues issues de traitement d'eaux usées (1000 mg/kg MS : JORF 1998) et, d'autre part, par le cahier des charges pour l'utilisation des matières organiques fertilisantes dans les zones légumières bretonnes (75 mg/kg MS : CERAFAEL 1999). De plus, la quantité de Cu appliquée par hectare a été comparée aux maxima stipulés dans chacun de ces deux documents. Enfin, le temps requis pour atteindre des teneurs en Cu de 50 et 100 ppm MS des sols a été calculé. Au-delà de cette dernière concentration, tout épandage de boue est pros crit (JORF 1998).

Seul le scénario A, qui correspond à la distribution d'aliments sans supplémentation en Cu, permet de produire des effluents épanchables dans les zones légumières bretonnes. Pour les autres scénarios, y compris pour le scénario B qui correspond aux recommandations de l'INRA (1989), la teneur limite de 75 mg/kg MS est dépassée. En revanche, aucun des scénarios ne conduit à un lisier présentant une teneur en Cu supérieure à la limite applicable aux boues issues de traitement d'eaux usées.

Dans les conditions légales actuelles d'apport de Cu dans l'aliment des porcelets et des porcs en engraissement (scénario E), la prise en compte de la seule quantité d'azote épanchée par hectare peut conduire à une application excessive de Cu au regard de la limite annuelle de 1,5 kg/ha. La teneur limite de 100 ppm MS de Cu dans les sols pourrait être atteinte à échéance de 40 ans dans le cas d'un traitement du lisier permettant de diminuer de 70 % sa teneur en azote.

Comparée à la législation actuelle (scénario E), le projet que propose la Commission Européenne (scénario C) permettrait une réduction des rejets de Cu de l'ordre de 70 %. Le maintien de l'usage du Cu comme facteur de croissance en post-sevrage puis la limitation des apports à 35 ppm en engraissement (scénario D) pourrait constituer un moyen

Tableau 4. Estimation des teneurs en Cu des produits épandus et du sol selon différentes hypothèses de teneur en Cu des aliments pour porcelets et porcs charcutiers⁽¹⁾. A : recommandations NRC 1998, B : recommandations INRA 1989, C : projet de réglementation européenne dans le cas d'un aliment unique en engraissement, D : réglementation actuelle en post-sevrage puis projet de réglementation en engraissement dans le cas d'un aliment unique, E : réglementation actuelle dans le cas d'un aliment unique en engraissement.

	A	B	C	D	E
Aliment (mg/kg)					
Porcelet	6	10	35	175	175
Porc charcutier	4	10	35	35	100
Bilan de Cu (g Cu/porc)					
Ingéré ⁽²⁾	1,14	2,68	9,38	14,42	29,50
Retenu ⁽²⁾	0,133	0,136	0,145	0,145	0,156
Excrété	1,01	2,54	9,24	14,28	29,34
Lisier	Teneur maximale du produit épandu (mg Cu/kg MS) : 1000 ⁽⁶⁾ , 75 ⁽⁷⁾				
mg Cu/l ⁽¹⁾	2,2	5,5	20	31	64
mg Cu/kg MS ⁽³⁾	31	79	287	443	911
Application annuelle par épandage de l'effluent ⁽⁴⁾ (kg Cu/ha)	Flux maximum de Cu (/ha) : 15 kg cumulés sur 10 ans ⁽⁶⁾ ; 1,5 kg par an ⁽⁷⁾				
Taux d'épuration de l'azote : 0%	0,055	0,14	0,51	0,78	1,6
50%	0,11	0,28	1,01	1,6	3,2
70%	0,18	0,46	1,7	2,6	5,4
Enrichissement annuel du sol ⁽⁵⁾ (mg Cu/kg)	Valeur limite de concentration dans les sols (mg Cu/kg MS) : 100 ⁽⁶⁾				
Taux d'épuration de l'azote : 0%	0,002	0,030	0,15	0,24	0,52
50%	0,020	0,076	0,32	0,51	1,1
70%	0,045	0,14	0,55	0,85	1,8
Temps requis (années) pour atteindre 50 mg Cu/kg MS sol ⁽⁸⁾					
Taux d'épuration de l'azote : 0%	38916	2365	191	119	136
50%	3477	924	91	57	67
70%	1570	510	53	34	40
Temps requis (années) pour atteindre 100 mg Cu/kg MS sol ⁽⁸⁾					
Taux d'épuration de l'azote : 0%	16024	974	464	289	56
50%	1432	381	220	140	28
70%	647	210	129	83	16

⁽¹⁾ Porcelet en post-sevrage : 8 à 28 kg, indice de consommation : 1,8 kg/kg, volume de lisier par porcelet : 70 l après lavage (50 l lisier + 20 l eau), excrétion de N par porcelet : 0,4 kg.

Porc charcutier : 28 à 108 kg, indice de consommation : 2,9 kg/kg, volume de lisier par porc charcutier : 390 l après lavage (360 l lisier + 30 l eau), excrétion de N par porc charcutier : 2,7 kg.

⁽²⁾ 10 mg de Cu contenus dans un animal de 8 kg (Mahan et Shields 1998), teneur en Cu de l'animal de 100 kg estimée à partir des équations présentées au tableau 1 pour les teneurs en Cu du foie et des reins (foie de 2 kg, reins de 300 g), teneur en Cu des autres tissus et organes estimée à 1,4 mg/kg, indépendamment de l'apport alimentaire de Cu.

⁽³⁾ Teneur en MS du lisier estimée à 7%.

⁽⁴⁾ 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%).

⁽⁵⁾ 3000 t de terre/ha, exportation par les cultures de 50 g/ha/an.

⁽⁶⁾ JORF, arrêté du 8 janvier 1998 (application du décret n°97-1133 du 8/12/97).

⁽⁷⁾ Cerafel 1999.

⁽⁸⁾ Teneur initiale estimée à 15 ppm MS.

terme intéressant, puisque les rejets seraient réduits d'environ 50 % par rapport à la législation actuelle. Toutefois, l'élimination de 50 % de l'azote contenu dans le lisier conduirait à la production de fertilisants entraînant une application annuelle de Cu supérieure à 1,5 kg/ha. Enfin, cette option ne résoudrait pas les problèmes des élevages spécialisés en post-sevrage puisque la teneur en Cu du lisier resterait supérieure à la limite de 1000 ppm MS applicable aux boues issues du traitement des eaux usées.

Conclusion

Dans l'alimentation du porc, le Cu a surtout été étudié pour ses propriétés de facteur de croissance. De nombreux travaux ont permis d'établir que l'introduction de 150 à 250 ppm de Cu dans l'alimentation du porc, et en particulier du porcelet en post-sevrage, permet d'en stimuler la croissance, à condition de respecter un apport en Fe suffisant pour éviter les risques d'anémie. Cependant, l'innocuité de telles pratiques d'élevage pour l'alimen-

Réduire très nettement les apports de cuivre pendant l'engraissement permettrait de diminuer de moitié les quantités de cuivre excrétées.

tation humaine ne peut être garantie que si elles sont limitées à la période du post-sevrage. De même, leur impact sur l'environnement est d'autant plus faible que les apports de Cu pendant l'engraissement sont significativement abaissés.

Toutefois, même dans le cas de la seule utilisation du Cu comme facteur de croissance en post-sevrage, les conséquences environnementales ne sont pas négligeables et une réduction drastique des apports demeure une solution préventive de choix. Les connaissances actuelles ne permettent cependant pas de l'envisager sans risque sur les performances ou la santé des animaux. Des progrès sont encore à faire dans la connaissance des principaux facteurs de variation de la disponibilité du Cu, en approfondissant l'étude des composants alimentaires interagissant avec le Cu et en hiérarchisant leur impact. A cet égard, l'effet de la présence de phytates dans l'aliment, en relation avec l'apport de Zn, sur la disponibilité du Cu reste à évaluer. De plus, les solutions d'amélioration de la disponibilité du Cu, soit par l'utilisation de sources dites protégées soit par l'utilisation d'additifs susceptibles de modifier l'impact de certains

ligands du Cu restent à évaluer dans des conditions de faibles apports alimentaires de Cu. De façon concomitante, le choix des indicateurs du statut en Cu des animaux doit être précisé. Les nutritionnistes font souvent appel à des méthodes classiques d'évaluation de la disponibilité, tels que le bilan métabolique, qui aboutissent à des résultats parfois difficiles à interpréter dans le cas des oligo-éléments. Les indicateurs de la carence en Cu, tels que ceux du statut antioxydant ou de l'immunité sont sans doute à privilégier. En tout état de cause, les futures études doivent aboutir à une meilleure précision des besoins du porc de façon à émettre les recommandations d'apport en Cu les plus faibles possibles. Elles seront sans doute à moduler en fonction de la nature de la ration et de l'apport en certains antagonistes du Cu.

Remerciements

Les auteurs expriment toute leur gratitude à Louis-Aimé Aumaitre pour les informations qu'il leur a fournies lors de la préparation de ce manuscrit ainsi que pour le soin qu'il a apporté à sa relecture.

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.
- Amer M.A., Elliot J.I., 1973 a. Effects of level of copper supplement and removal of supplemental copper from the diet on the physical and chemical characteristics of porcine depot fat. *Can. J. Anim. Sci.*, 53, 139-145.
- Amer M.A., Elliot J.I., 1973 b. Influence of supplemental dietary copper and vitamin E on the oxidative stability of porcine depot fat. *J. Anim. Sci.*, 37, 87-90.
- Apgar G.A., Kornegay E.T., 1996. Mineral balance of finishing pigs fed copper sulfate or a copper-lysine complex at growth-stimulating levels. *J. Anim. Sci.*, 74, 1594-1600.
- Apgar G.A., Kornegay E.T., Lindemann M.D., Notter D.R., 1995. Evaluation of copper sulfate and a copper lysine complex as growth promoters for weanling swine. *J. Anim. Sci.*, 73, 2640-2646.
- Aoyagi S., Hiney K.M., Baker D.H., 1995. Copper bioavailability in pork liver and in various animal by-products as determined by chick bioassay. *J. Anim. Sci.*, 73, 799-804.
- Armstrong T.A., Spears J.W., van Heugten E., Engle T.E., Wright C.L., 2000a. Effect of copper source (cupric citrate vs cupric sulfate) and level on growth performance and copper metabolism in pigs. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 13, 1154-1161.
- Armstrong T.A., Williams C.M., Spears J.W., Schiffman S.S., 2000b. High dietary copper improves odor characteristics of swine waste. *J. Anim. Sci.*, 78, 859-864.
- Arzul G., Maguer J.F., 1990. Influence of pig farming on the copper content of estuarine sediments in Brittany, France. *Marine Pollution Bull.*, 21, 91-107.
- Astrup H.N., Matre T., 1988. Feed conversion, pork fat softening and liver malondialdehyde reactivity in pigs supplemented with copper. *Norw. J. Agric. Sci.*, 1, 81-86.
- Bekaert H., Eeckhout W., Buysse F., 1967. L'influence de CuSO₄ et de CuO, ainsi que du degré de granulométrie du CuSO₄ et d'un supplément de zinc sur les résultats d'engraissement et la teneur en cuivre du foie chez des porcs à l'engrais. *Rev. Agric. (Bruxelles)*, 11-12, 636-65.
- Beutler K.T., Pankewicz O., Brautigan D.L., 1998. Equivalent uptake of organic and inorganic zinc by monkey kidney fibroblasts, human intestinal cells, or perfused mouse intestine. *Biol. Trace Element Res.*, 19-31.
- Bories G., 1980. The effect on human copper status of the consumption of edible tissues from animal fed Cu-rich diets. In : P. L'Hermite and J. Dehandtschutter (eds), *Copper in animal wastes and sewage sludge*, Proc. EEC Workshop, INRA Publisher, 8-10 October 1980, Bordeaux, France, 311-323.
- Bowland J.P., Braude R., Chamberlain A.G., Glascock R.F., Mitchell K.G., 1961. The absorption, distribution and excretion of labelled copper in young pigs given different quantities, as sulphate or sulphide, orally or intravenously. *Br. J. Nutr.*, 15, 59-72.
- Bradley B.L., Graber G., Condon R.J., Frobish L.T., 1983. Effects of graded levels of dietary copper on copper and iron concentrations in swine tissues. *J. Anim. Sci.*, 56, 625-630.
- Braude R., 1980. Twenty five years of widespread use of copper as an additive to diets of growing pigs. In : P. L'Hermite and J. Dehandtschutter (eds), *Copper in animal wastes and sewage sludge*, Proc. EEC Workshop, INRA Publisher, 8-10 October 1980, Bordeaux, France, 3-15.
- Bremner I., 1987. Involvement of metallothionein in the hepatic metabolism of copper. *J. Nutr.*, 117, 19-29.
- Bremner I., 1998. Manifestations of copper excess. *Am. J. Clin. Nutr.*, 67, 1069S-1073S.
- Buckley W.T., 2000. Trace elements dynamics. In : *Farm Animal Metabolism and Nutrition*. In : J.P.F. D'Mello (eds), CABI Publishing, Edinburgh, UK, 161-182.
- Buescher R.G., Griffin S.A., Bell M.C., 1961. Copper availability to swine from ⁶⁴Cu labelled inorganic compounds. *J. Anim. Sci.*, 20, 529-531.
- Bunch R.J., Speer V.C., Hays V.W., Hawbaker J.H., Catron D.V., 1961. Effects of copper sulfate, copper oxide and chlortetracycline on baby pig performance. *J. Anim. Sci.*, 20, 723-726.
- Bunch R.J., Speer V.C., Hays V.W., McCall J.T., 1963. Effects of high levels of copper and chlortetracycline on performance of pigs. *J. Anim. Sci.*, 22, 56-60.
- Bunch R.J., McCall J.T., Speer V.C., Hays V.W., 1965. Copper supplementation for weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 24, 995-1000.

- 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.
- Castell A.G., Bowland J.P., 1968. Supplemental copper for swine growth, digestibility and carcass measurement. *Can. J. Anim. Sci.*, 48, 403-413.
- Castell A.G., Allen R.D., Beames R.M., Bell J.M., Belzile R., Bowland J.P., Elliot J.I., Ihnat M., Larmond E., Mallard T.M., Spurr D.T., Stothers S.C., Wilton S.B., Young L.G., 1975. Copper supplementation of canadian diets for growing-finishing pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 55, 113-134.
- CERAFEL, 1999. Cahier des charges pour l'utilisation des matières fertilisantes organiques en zones légumières nord Bretagne. Comité Economique Régional Agricole Fruits et Légumes de Bretagne, Chambres d'Agriculture de Bretagne, version 1 du 3 juin 1999, 28 pp.
- 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.
- Coffey R.D., Cromwell G.L., Monegue H.J., 1994. Efficacy of a copper-lysine complex as a growth promotant for weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 2880-2886.
- 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 pp.
- Cousins R.J., 1985. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiol. Rev.*, 65, 238-309.
- Cromwell G.L., 1997. Copper as a nutrient for animals. In : H.W. Richardson (eds), *Handbook of copper compounds and applications*, Marcel Dekker Inc. Publisher, New-York, USA, 177-202.
- Cromwell G.L., Hays V.W., Clark D.D., 1978. Effects of copper sulfate, copper sulfide and sodium sulfide on performance and copper stores of pigs. *J. Anim. Sci.*, 46, 692-698.
- Cromwell G.L., Stahly T.S., Monegue H.J., 1989. Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 67, 2996-3002.
- Cromwell G.L., Lindemann M.D., Monegue H.J., Hall D.D., Orr D.E., Jr., 1998. Tribasic copper chloride and copper sulfate as copper sources for weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 76, 118-123.
- CVB, 2000. Veevoedertabel. Centraal Veevoederbureau, Lelystad, The Netherlands.
- Degoey L.W., Wahlstrom R.C., Emerick R.J., 1971. Studies of high level copper supplementation to rations for growing swine. *J. Anim. Sci.*, 33, 53-57.
- Delves H.T., 1985. Assessment of trace element status. *Clinics in Endocrin. and Metab.*, 14, 725-761.
- Dove C.R., 1995. The effect of copper level on nutrient utilization of weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 73, 166-171.
- Dove C.R., Ewan R.C., 1990. Effect of excess dietary copper, iron or zinc on the tocopherol and selenium status of growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 68, 2407-2413.
- Dove C.R., Ewan R.C., 1991. Effect of trace minerals on the stability of vitamin E in swine grower diets. *J. Anim. Sci.*, 69, 1994-2000.
- Dove C.R., Haydon K.D., 1991. The effect of copper addition to diets with various iron levels on the performance and hematology of weanling swine. *J. Anim. Sci.*, 69, 2013-2019.
- Dupont D.P., Duhamel G.E., Carlson M.P., Mathiesen M.R., 1994. Effect of divalent cations on hemolysin synthesis by *Serpulina* (Treponema) hyodysenteriae: inhibition induced by zinc and copper. *Vet. Microbiol.*, 41, 63-73.
- Elliot J.I., Amer M.A., 1973. Influence of level of copper supplement and removal of supplemental copper from the diet on the performance of growing-finishing pigs and accumulation of copper in the liver. *Can. J. Anim. Sci.*, 53, 133-138.
- Evans P., Halliwell B., 2001. Micronutrients: oxidant/antioxidant status. *Br. J. Nutr.*, 85, S67-S74.
- Favier A., 1991. Les oligo-éléments en nutrition humaine. In P. Chappuis (Eds), *Les oligoéléments en médecine et biologie*, SFERETE Publisher, Paris, France, pp 41-75.
- Gebert S., Bee G., Pfirter H.P., Wenk C., 1999. Phytase and vitamin E in the feed of growing pigs. 1. Influence on growth, mineral digestibility and fatty acids in digesta. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 81, 9-19.
- Gipp W.F., Tasker J.B., van Campen D., Krook L.P., Visek W.J., 1973. Influence of level of dietary copper on weight gain, hematology and liver copper and iron storage of young pigs. *J. Nutr.*, 103, 713-719.
- Hartmans J., 1978. Identifying the priority contaminants toxicological aspects of animal effluents. In : W.R. Kelly (Eds), *Animal and Human Health Hazards associated with the utilization of animal effluents*, EEC Publication, 21-23 Novembre 1978, Dublin, Ireland, pp 35-56.
- Hedges J.D., Kornegay E.T., 1973. Interrelationship of dietary copper and iron as measured by blood parameters, tissue stores and feedlot performance of swine. *J. Anim. Sci.*, 37, 1147-1154.
- Héduit M., Roustan J.L., Aumaître A., Seguin M., 1977. Composition du lisier de porc: influence du mode d'exploitation. *J. Rech. Porcine en France*, 9, 305-310.
- Hill G.M., Ku P.K., Miller E.R., Ullrey D.E., Losty T.A., O'Dell B.L., 1983a. A copper deficiency in neonatal pigs induced by a high zinc maternal diet. *J. Nutr.*, 113, 867-872.
- Hill G.M., Miller E.R., Whetter P.A., Ullrey D.E., 1983b. 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.J., Lewis A.J., Crenshaw J.D., 1986. Zinc-amino acid complexes for swine. *J. Anim. Sci.*, 63, 121-130.
- Ho S.K., Elliot J.I., 1974. Fatty acid composition of porcine depot fat as related to the effect of supplemental dietary copper on the specific activities of fatty acyl desaturase systems. *Can. J. Anim. Sci.*, 54, 23-28.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porcs, lapins, volailles. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 282 pp.
- 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.
- Kies C., Umoren J., 1989. Inhibitors of copper bioutilization: fibre, lead, phytate and tannins. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 258, 81-93.
- Kirchgeßner M., Grassmann E., 1970. The dynamics of copper absorption. In : C.F. Mills (eds), *Trace Elements Metabolism in Animals*, Edinburgh, Livingstone, 277-287.
- Kirchgeßner M., Beyer M.G., Steinhart H., 1976. Activation of pepsin (EC 3.4.4.1) by heavy-metals ions including a contribution to the mode of action of copper sulfate in pig nutrition. *Br. J. Nutr.*, 36, 15-22.
- 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.
- Kirchgeßner M., Windisch W., Roth F.X., 1994. Zum Effekt mikrobieller Phytase auf die scheinbare Verdaulichkeit von Eisen, Kupfer, Zink und Mangan bei abgestufter P-Versorgung von Ferkeln. *Agribiol. Res.*, 47, 156-159.
- Kline R.D., Hays V.W., Cromwell G.L., 1972. Related effects of copper, zinc and iron on performance, haematology and copper stores of pigs. *J. Anim. Sci.*, 34, 393-396.
- Kornegay E.T., Heugten P.H.G., Lindemann M.D., Blodgett D.J., 1989. Effects of biotin and high copper levels on performance and immune response of weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 67, 1471-1477.
- Kratzer F.H., Vohra P., 1986. Chelates in nutrition. CRC Press, 169 pp.
- 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 pp.
- Larsen T., Sandström B., 1993. Effect of dietary calcium level on mineral and trace element utilization from rape-seed (*Brassica napus* L.) diet fed to ileum-fistulated pigs. *Br. J. Nutr.*, 69, 211-224.

- Larsen T., Skoglund E., Sandberg A.S., Engberg R.M., 1999. Soaking and pelleting of pig diets alters the apparent absorption and retention of minerals. *Can. J. Anim. Sci.*, 79, 477-483.
- Lauridsen C., Hojsgaard S., Sorensen M.T., 1999a. Influence of dietary rapeseed oil, vitamin E and copper on the performance and the antioxidative status of pigs. *J. Anim. Sci.*, 77, 906-916.
- Lauridsen C., Nielsen J.H., Henckel P., Sorensen M.T., 1999 b. Antioxidative and oxidative status in muscles of pigs fed rapeseed oil, vitamin E and copper. *J. Anim. Sci.*, 77, 105-115.
- Lee G.R., Nacht S., Lukens J.N., Cartwright G.E., 1968. Iron metabolism in copper deficient swine. *J. Clin. Invest.*, 47, 2058-2069.
- Lee S.H., Choi S.C., Chae B.J., Lee J.K., Acda S.P., 2001. Evaluation of metal-amino acid chelates and complexes at various levels of copper and zinc in weanling pigs and broiler chicks. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 14, 1734-1740.
- 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.
- Lucas I.A.M., Calder A.F.C., 1957. A comparison of five levels of copper sulphate in rations for growing pigs. *Proc. Nutr. Soc.*, 16, i.
- Luo X.G., Dove C.R., 1996. Effect of dietary copper and fat on nutrient utilization, digestive enzyme activities, and tissue mineral levels in weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 74, 1888-1896.
- Mahan D.C., Newton E.A., 1995. Effect of initial breeding weight on macro- and micromineral composition over a three-parity period using a high-producing sow genotype. *J. Anim. Sci.*, 73, 151-156.
- Mahan D.C., Shields R.G.Jr., 1998. Macro- and micromineral composition of pigs from birth to 145 kilograms of body weight. *J. Anim. Sci.*, 76, 506-512.
- Mathé D., Guillou D., Flesselle S., 2001. Conséquences d'apports réduits en cuivre dans l'aliment du porc en croissance finition. *Journées Rech. Porcine en France*, 33, 37-42.
- McGrath M.C., 1981. Implications of applying copper rich pig slurry to grassland; effects on plant and soil. In : P. L'Hermite and J. Dehandtschutter (eds), *Copper in animal wastes and sewage sludge*, Proc. EEC Workshop, INRA Publisher, 8-10 October 1980, Bordeaux, France, pp 144-153.
- 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.
- Menten J.F.M., Ames N.K., Ku P.K., Miller E.R., 1988. Effects of high dietary copper on blood and intestinal variables of stater pigs. *J. Anim. Sci.*, 66, 330 (Abstr.).
- Mertz W., 1987. Use and misuse of balance studies. *J. Nutr.*, 117, 1811-1813.
- Mills C.F., 1985. Dietary interactions involving the trace elements. *Ann. Rev. Nutr.*, 5, 173-193.
- Morel J.L., 1997. Bioavailability of trace elements to terrestrial plants- Chapter 6. Tarradellas J., Bitton G., Rossel (eds). *Soil Ecotoxicology*, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, FL, 141-176.
- Moore R.J., Kornegay E.T., 1987. Effect of dietary mineral level and duration of feeding on fiber digestibility and mineral utilization by growing pigs fed high-fiber diets. *Nutr. Rep. Intern.*, 36, 1237-1249.
- Moore R.J., Kornegay E.T., Lindemann M.D., 1986. Effect of dietary oat hulls or wheat bran on mineral utilization in growing pigs fed diets with or without salinomycin. *Can. J. Anim. Sci.*, 66, 267-276.
- Moore R.J., Kornegay E.T., Grayson R.L., Lindemann M.D., 1988. Growth, nutrient utilization and intestinal morphology of pigs fed high fiber diets. *J. Anim. Sci.*, 66, 1570-1579.
- Newton G.L., Hale O.M., Plank C.O., 1983. Effect of wheat bran in practical diets on mineral absorption by pigs at two ages. *Can. J. Anim. Sci.*, 63, 399-408.
- NRC, 1998. Nutrient requirements of swine (10th Edition). National Academy Press, Washington, DC.
- O'Dell B.L., 1981. Roles for iron and copper in connective tissue biosynthesis. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 294, 91-104.
- O'Dell B.L., 1989. Mineral interactions relevant to nutrient requirements. *J. Nutr.*, 119, 1832-1838.
- Okonkwo A.C., Ku P.K., Miller E.R., Keahey K.K., Ullrey D.E., 1979. Copper requirements of baby pigs fed purified diets. *J. Nutr.*, 109, 939-948.
- Olivé-Lauquet G., Gruau G., Dia A., Riou C., Jaffrézic A., Hénin O., 2000. Release of trace elements in wetlands : role of seasonal variability. *Water Res.*, 35, 943-952.
- Omole T.A., Bowland J.P., 1974a. Copper, iron and manganese supplementation of pig diets containing either soybean meal or low glucosinolate rapeseed meal. *Can. J. Anim. Sci.*, 54, 481-493.
- Omole T.A., Bowland J.P., 1974b. Copper and zinc supplementation of pig diets containing soybean meal or rapeseed meal (*Brassica campestris* vs *Span*). *Can. J. Anim. Sci.*, 54, 363-372.
- Paboeuf F., Nys Y., Corlouër A., 2000. Réduction des rejets en cuivre et en zinc chez le porc charcutier par la diminution de la supplémentation minérale. *Journées Rech. Porcine en France*, 32, 59-66.
- Paboeuf F., Calvar C., Landrain B., Roy H., 2001. Impact de la réduction des niveaux alimentaires en matière azotée 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., Rimbach G., 1997. Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Arch. Anim. Nutr.*, 50, 301-319.
- Pallauf J., Höhler D., Rimbach G., 1992. Effekt einer Zulage an mikrobieller Phytase zu einer Mais-Soja-Diät auf die scheinbare Absorption von Mg, Fe, Cu, Mn und Zn sowie auf Parameter des Zinkstatus beim Ferkel. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 68, 1-9.
- Percival S.S., 1998. Copper and immunity. *Am. J. Clin. Nutr.*, 67, 1064S-1068S.
- Pond W.G., Walker E.F.J., Kirtland D., 1975. Weight gain, feed utilization and bone and liver mineral composition of pigs fed high or normal Ca-P diets from weaning to slaughter weight. *J. Anim. Sci.*, 41, 1053-1056.
- Pond W.G., Yen J.T., Varel V.H., 1988. Response of growing swine to dietary copper and clinoptilolite supplementation. *Nutr. Rep. Intern.*, 37, 795-803.
- Poulsen H.D., 1998. Zinc and copper as feed additives, growth factors or unwanted environmental factors. *J. Anim. Feed Sci.*, 7, 135-142.
- Powell J.J., Jugdaohsingh R.J., Thompson R.P.H., 1999. The regulation of mineral absorption in the gastrointestinal tract. *Proc. Nutr. Soc.*, 58, 147-153.
- 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 : J.K.R Gasser (ed), *Effluents from livestock*, Applied Science Publishers, Basing, pp 9-22.
- Prince T.J., Hays V.W., Cromwell G.L., 1979. Effects of copper sulfate and ferrous sulfide on performance and liver copper and iron stores of pigs. *J. Anim. Sci.*, 49, 507-513.
- Prince T.J., Hays V.W., Cromwell G.L., 1984. Interactive effects of dietary calcium, phosphorus and copper on performance and liver stores of pigs. *J. Anim. Sci.*, 58, 356-361.
- Prohaska J.R., 1990. Biochemical changes in copper deficiency. *J. Nutr. Biochem.*, 1, 452-461.
- Radecki S.V., Ku P.K., Bennink M.R., Yokoyama M.T., Miller E.R., 1992. Effect of dietary copper on intestinal mucosa enzyme activity, morphology, and turnover rates in weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 70, 1431.
- Ravindran V., Kornegay E.T., Webb K.E.J., 1984. Effects of fiber and virginiamycin on nutrient absorption, nutrient retention and rate of passage in growing swine. *J. Anim. Sci.*, 59, 400-408.
- Ribeiro de Lima F., Stahly T.S., Cromwell G.L., 1981. Effects of copper, with or without ferrous sulfide and antibiotics on the performance of pigs. *J. Anim. Sci.*, 52, 241-247.
- Richards M. P., 1999. Zinc, copper and iron metabolism during porcine fetal development. *Biol. Trace Element Res.*, 69, 27-44.
- Roof M.D., Mahan D.C., 1982. Effect of carbadox and various dietary copper levels for weanling swine. *J. Anim. Sci.*, 55, 1109-1117.
- Shurson G.C., Ku P.K., Waxler G.L., Yokoyama M.T., Miller E.R., 1990. Physiological relationships between microbiological status and dietary copper levels in the pig. *J. Anim. Sci.*, 68, 1061-1071.

- Smith J.W., Tokach M.D., Goodband R.D., Nelssen J.L., Richert B.T., 1997. Effects of the interrelationship between zinc oxide and copper sulfate on growth performance of early-weaned pigs. *J. Anim. Sci.*, 75, 1861-1866.
- Solomons N.W., 1983. Competitive mineral-mineral interaction in the intestine. Implications for zinc absorption in humans. In : E.G. Inglett (eds), *Nutritional bioavailability of zinc*, American Chemical Society, Washington, DC, 247-271.
- Stansbury W.F., Tribble L.F., Orr D.E.J., 1990. Effect of chelated copper sources on performance of nursery and growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 68, 1318-1322.
- Strain J.J., 1994. Newer aspects of micronutrients disease: copper. *Proc. Nutr. Soc.*, 53, 583-598.
- Suttle N.F., Mills C.F., 1966a. Studies of the toxicity of copper to pigs. 1. Effects of oral supplements of zinc and iron salts on the development of copper toxicosis. *Br. J. Nutr.*, 20, 135-148.
- Suttle N.F., Mills C.F., 1966b. Studies of the toxicity of copper to pigs. 1. Effect of protein source and other dietary components on the response to high and moderate intakes of copper. *Br. J. Nutr.*, 20, 149-161.
- Underwood E.J., 1977. Copper. In : *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, Ed. 4, Academic Press, Inc, London, UK, 56-108.
- Underwood E.J., Suttle N.F., 1999. Copper. In : *The mineral nutrition of livestock*. Ed. 3, CABI Publishing, Wallingford, UK, 283-342.
- Varel V.H., Robinson I.M., Pond W.G., 1987. Effect of dietary copper sulfate, aureo SP250, or clinoptilolite on ureolytic bacteria found in the pig large intestine. *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 2009.
- Ward T.L., Watkins K.L., Southern L.L., Hoyt P.G., French D.D., 1991. Interactive effects of sodium zeolite-A and copper in growing swine: growth, and bone and tissue mineral concentrations. *J. Anim. Sci.*, 69, 726-733.
- Windisch W.M., Gotterbarm G.G., Roth F.X., 2001. Effect of potassium diformate in combination with different amounts and sources of excessive dietary copper on production performance in weanling piglets. *Arch. Anim. Nutr.*, 54, 87-100.
- Wise A., Gilbert D., 1982. In vitro competition between calcium phytate and the soluble fraction of rat small intestine contents for cadmium, copper and zinc. *Toxicol. Lett.*, 11, 49-54.
- Yeates G.W., Orchard V.A., Speir T.W., Hunt J.L., Hermans M.C., 1994. Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic and timber preservative on soil biological activity. *Biology and Fertility of soils*, 18, 200-208.
- Yen J.T., Nienaber J.A., 1993. Effects of high-copper feeding on portal ammonia absorption and on oxygen consumption by portal vein-drained organs and by the whole animal in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 2157-2163.
- Yen J.T., Pond W.G., 1993. Effects of carbadox, copper, or Yucca schidigera extract on growth performance and visceral weight of young pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 2140-2146.
- Yu B., Beynen A.C., 1994. High zinc reduces biliary copper excretion in rats. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 72, 169-175.
- Zhou W., Kornegay E.T., van Laar H., Swinkels J.W.G.M., Wong E.A., Lindemann M.D., 1994a. The role of feed consumption and feed efficiency in copper-stimulated growth. *J. Anim. Sci.*, 72, 2385-2394.
- Zhou W., Kornegay E.T., Lindemann M.D., Swinkels J.W.G.M., Welten M.K., Wong, E.A., 1994b. Stimulation of growth by intravenous injection of copper in weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 2395-2403.

Abstract

Copper in pig nutrition: essential trace element, growth promoter, and its potential adverse effects on human nutrition and environment.

Copper is essential for many physiological functions including iron metabolism, immunity and protection of tissues from oxidative stress. Liver plays a key role in maintaining copper homeostasis and adjustment to fluctuation of copper supply is mainly achieved by liver storage and biliary secretion. The copper requirements of the growing pig are below 10 mg/kg feed. They are normally covered by the feedstuff copper provision and any supplementation is theoretically superfluous. However, because of the growth promoting effect of copper, 150 to 250 ppm supplements are often added in diets of weaned piglet. When this supply of copper is omitted at the end of the post-weaning period, such a dietary copper supply does not influence the copper content of the meat consumed by humans. However, it

induces an increase of copper content in pig slurry and, consequently, an accumulation of copper in soils.

The reduction of dietary copper supply close to the requirements is the main way to better control this environmental risk. However, to achieve this goal, the dietary factors that may significantly influence the availability of copper should be accurately known and ranked. Some chelating agents, such as phytates, fibres or fat as well as the level of other minerals such as Zn and Ca may interfere on copper availability. However their actual impact remains to be assessed. In addition, relevant indicators of copper status should be chosen to implement these investigations.

JONDREVILLE C., REVY P.S., JAFFREZIC A., DOURMAD J.Y., 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligo-élément essentiel, facteur de croissance et risque potentiel pour l'Homme et l'environnement. *INRA Prod. Anim.*, 15, 247-265.

