

L'importance de certaines vitamines du complexe B chez le porc

J. Jacques MATTE

*Centre de R & D sur le bovin laitier et le porc,
Agriculture et Agroalimentaire Canada,
Lennoxville, Qc, Canada, J1M 1Z3*

mattej@agr.gc.ca

L'importance de certaines vitamines du complexe B chez le porc

Les vitamines sont des nutriments essentiels à la croissance, l'entretien et la santé de l'animal. Chez le porc, les recommandations actuelles d'apports en vitamines, particulièrement celles du complexe B, sont issues de travaux de recherche menés, pour la plupart, dans les années 1950-60. Le manque d'information dans le domaine des vitamines est à l'origine d'un empirisme qui fait que les niveaux utilisés et les recommandations de différents organismes privés ou publics varient grandement, encore aujourd'hui. Les recommandations d'apports en certaines vitamines du complexe B comme la riboflavine (B₂), la pyridoxine (B₆), la biotine (B₈), l'acide folique (B₉) et la cyanocobalamine (B₁₂) doivent être actualisées afin d'optimiser la productivité des animaux d'aujourd'hui compte tenu des progrès génétiques considérables des dernières décennies en ce qui a trait à la composition corporelle chez le porc d'abattage et à l'évolution de la prolificité chez la truie. L'impact de certaines de ces vitamines, en particulier la B₉ et la B₁₂, sur la physiologie de la reproduction de la truie est une préoccupation relativement nouvelle. Ces recherches ont mis en évidence l'importance d'un autre facteur, la parité, comme déterminant pour l'estimation des besoins pour, à tout le moins, ces deux vitamines.

La détermination des niveaux optimums de vitamines pour la productivité des élevages demeure un défi pour les prochaines années. Ce processus devra tenir compte, non seulement de l'aspect économique direct lié aux performances des animaux mais aussi d'autres facteurs plus indirects de rentabilité comme la santé de l'animal (certaines vitamines pourraient devenir des alternatives aux antibiotiques) et la qualité nutritionnelle de la viande de porc (enrichissement via l'alimentation).

The importance of some B-complex vitamins for pigs

Vitamins are recognized as essential nutrients for animal growth, maintenance and health. In pigs, the actual recommended provision of vitamins, in particular those of the B-complex, are derived from research carried out, for most cases, during 1950-60. The lack of information is an important factor for empiricism in the field of vitamins and has induced large variations in recommendations among private or public institutions. Recommendations of requirements for some B-complex vitamins such as riboflavin (B₂), pyridoxine (B₆), biotin (B₈), folic acid (B₉) and cyanocobalamine (B₁₂) should be actualized in order to optimize the productivity of animals nowadays taking into account the considerable genetic improvements during the last decades both on body composition in pigs and on prolificacy in reproducing sows. The impact of some vitamins, in particular B₉ and B₁₂, on physiology of reproduction in sows has attracted more attention during the recent years. Those research progresses have highlighted the importance of another factor, parity, for a reliable estimation of requirements, at least for those two vitamins.

The determination of optimal dietary requirements of vitamins for pig productivity is still a challenge for the future. This process will need to take into account not only the direct economical aspect related to performance of the animals but also of other more indirect factors such as animal health (some vitamins could be alternatives to antibiotics) and nutritional quality of pork (meat enrichment through feeding).

INTRODUCTION

L'histoire des vitamines se déroule principalement pendant la première moitié du 20^{ème} siècle, c'est-à-dire de l'apparition, en 1915, du terme "vitamine" (amine vitale) pour décrire le facteur extrait de la cuticule de riz qui guérit le bérubéri (la thiamine) jusqu'à la dernière découverte d'une substance vitaminique, la vitamine B₁₂, en 1948. À cette époque, la recherche, tant en nutrition humaine qu'en nutrition animale, utilise une approche qui se concentre sur les symptômes de carence en vitamines et conséquemment, sur les maladies qui y sont associées. Les conséquences de cette approche se font encore sentir aujourd'hui dans la recherche sur les vitamines. En effet, en nutrition animale, l'estimation des besoins en vitamines a été et est, encore aujourd'hui, souvent basée sur les niveaux requis pour prévenir l'apparition des symptômes de carence et non pour optimiser les performances de production. En outre, les recommandations actuelles d'apports en vitamines, particulièrement celles du complexe B, sont issues de travaux de recherche menés, pour la plupart, dans les années 1950-60. À cette époque, on assumait qu'une partie importante de l'apport en vitamines était comblée par la coprophagie (McDowell, 2000 ; ARC, 1981) car plusieurs des vitamines du complexe B sont synthétisées au niveau du tractus digestif par la microflore bactérienne et rejetées dans les fèces. Cependant, on sait aujourd'hui que, dans les conditions actuelles d'élevage, le comportement de coprophagie est relativement négligeable et ne peut assurer un apport fiable en vitamines du complexe B (de Passillé et al., 1989 ; Bilodeau et al., 1989). De plus, l'utilisation généralisée des planchers à caillebotis ne peut que marginaliser davantage l'importance de la coprophagie comme source de vitamines du complexe B chez le porc.

Donc, compte tenu de la sophistication des techniques d'élevage et des progrès génétiques considérables des dernières décennies en ce qui a trait aux performances de croissance et de reproduction des porcs, les recommandations d'apports en certaines vitamines du complexe B sont et/ou devront être actualisées afin d'optimiser la productivité de ces "nouveaux" animaux.

Selon la définition classique, les vitamines sont des substances organiques, sans valeur énergétique propre, essentielles à l'organisme et que l'animal ne peut synthétiser. Elles doivent donc être fournies par l'alimentation. Treize substances sont considérées comme des vitamines. Cependant, certaines de ces substances ne répondent pas complètement à la définition classique des vitamines. Il s'agit de la vitamine C qui peut être synthétisée par la plupart des animaux à l'exception de ceux en bas âge ou soumis à un stress, de la niacine qui peut être synthétisée à partir d'un acide aminé, le tryptophane et enfin, de la vitamine D, issue de la transformation du précurseur 7-dihydrocholestérol, sous l'action des rayons ultraviolets. La vitamine K ainsi que plusieurs vitamines du complexe B sont synthétisées par la microflore bactérienne intestinale, tel que mentionné plus tôt, mais l'importance de cet apport n'a jamais été clairement estimée. La choline est souvent classifiée comme une vitamine du complexe B car elle répond, elle aussi, partiellement à la définition classique des vitamines. On considère généralement que

les quantités de vitamines apportées par les matières premières des aliments sont négligeables en termes de quantités, ou de biodisponibilité, pour l'animal. Les niveaux d'incorporation sont de l'ordre du ppm (parties par million ou milligramme/kilogramme) ou du ppb (parties par billion ou microgrammes/kilogramme)

Il existe deux grands groupes de vitamines. Dans le premier groupe, les vitamines A, D, E et K, sont dites "liposolubles" c'est-à-dire solubles dans les graisses. Elles sont emmagasinées dans les tissus adipeux lorsque l'apport est supérieur aux besoins de l'animal. Dans le deuxième groupe, les vitamines sont dites "hydrosolubles" c.-à-d. solubles dans l'eau. Contrairement aux vitamines liposolubles, elles ne peuvent être emmagasinées en quantité importante même lorsque l'apport alimentaire est supérieur aux besoins. Un apport quotidien régulier correspondant au moins aux besoins de l'animal est donc nécessaire pour une activité métabolique optimale de ces micronutriments. Les vitamines B₁ (thiamine), B₂ (riboflavine), B₆ (pyridoxine), ainsi que la niacine, l'acide pantothénique, la biotine, l'acide folique et la vitamine C font partie de ce groupe. Quant à la vitamine B₁₂ (cobalamine), elle appartient également à ce groupe bien qu'elle puisse être mise en réserve par l'animal pour une période de plusieurs mois. Pour les fins de cet exposé, nous traiterons particulièrement de certaines de ces vitamines du complexe B qui ont été étudiées au cours des dernières années et dont l'impact sur la productivité des porcs soulève de plus en plus de questions. Néanmoins, le manque et/ou la vétusté de l'information sur les vitamines du complexe B sont des facteurs importants contribuant à l'empirisme et aux disparités parfois considérables quant aux recommandations d'apports alimentaires.

1. LA RIBOFLAVINE

1.1. Métabolisme et alimentation

La riboflavine a été isolée définitivement en 1933. Les métabolites actifs de la riboflavine, comme le FMN (flavine mononucléotide) et le FAD (flavine adénine dinucléotide) agissent comme intermédiaires dans le transfert d'électrons dans les réactions de la chaîne respiratoire menant à la génération de l'énergie. Ils agissent également comme co-enzymes dans les réactions menant au catabolisme des acides gras et à l'utilisation métabolique (catabolisme et transamination) des acides aminés (Le Grusse et Watier, 1993).

La riboflavine se retrouve dans les aliments sous forme de FAD, FMN et riboflavine. Bien qu'elle soit considérée comme l'une des vitamines les plus stables, elle peut être détruite en grande proportion par les rayons ultraviolets. Dans les prémélanges, la riboflavine résiste bien aux traitements par la chaleur mais cette résistance s'amenuise lorsque le taux d'humidité de l'aliment augmente (McGinnis, 1994). En fait, on a déjà observé une perte d'approximativement 40 % lorsque les aliments pour l'aquaculture se retrouvent dans l'eau pour plus de 20 minutes (cité par McDowell, 2000). À cet égard, on peut s'interroger sur l'ampleur des pertes possibles lorsque l'aliment pour porcs est offert sous forme liquide.

Tableau 1 - Evolution du statut en riboflavine estimé à partir de l'activité glutathion réductase des érythrocytes (EGRAC) en fonction de l'apport supplémentaire de riboflavine dans l'aliment et du stade de gestation de la truie

Addition de riboflavine (mg/j)	EGRAC (3 semaines)	EGRAC (7 semaines)	EGRAC (14 semaines)
1,5 ¹	1,45	1,91	2,82
5,5 ¹	1,37	1,42	1,64
9,5 ¹	1,16	1,21	1,20
10 ²	1,23	1,22	1,17
60 ²	1,20	1,22	1,18
110 ²	1,20	1,21	1,19
160 ²	1,20	1,23	1,18

Adapté de Frank et al. (1984)¹ et de Pettigrew et al. (1996)²

1.2. La croissance

Chez le porc en croissance, les recommandations sont basées sur des travaux faits avant les années 1960. Elles varient entre 2 et 4 mg/kg selon l'âge de l'animal, les besoins étant plus élevés chez les porcs en bas âge. Des travaux récents effectués dans nos laboratoires en utilisant des critères métaboliques et de performance ont montré qu'il n'y avait pas d'avantage à un apport total (naturel + synthétique) supérieur à 18 ppm, ce qui correspond à un apport synthétique de 8 ppm de riboflavine (Matte et al., 2005).

1.3. La reproduction

Avant 1988, on ne soupçonnait pas d'effet de la riboflavine sur le contrôle de la taille de la portée chez le porc. On avait montré au début des années 80 que l'utérus de la truie sécrète de grandes quantités de riboflavine environ une semaine après la saillie (Moffat et al., 1980). Un supplément alimentaire élevé (100 mg par jour) donné sur une très courte période en début de gestation (jour 4 au jour 10) avait augmenté la taille de la portée à la parturition suite à une diminution de la mortalité embryonnaire (Bazer et Zavy, 1988). Par contre, les résultats de cette expérience n'ont jamais pu être reproduits dans des études ultérieures (Luce et al., 1990 ; Tilton et al., 1991 ; Wiseman et al., 1991). Il semble que le traitement de Bazer et Zavy (1988) ait fonctionné chez des animaux ayant une capacité de reproduction faible (< 10 porcelets nés vivants par portée). Il faudra mieux cerner les facteurs expliquant ces résultats divergents avant de statuer plus définitivement sur les besoins en riboflavine des truies reproductrices. Au-delà des critères classiques de performances de reproduction, des critères métaboliques sensibles au niveau alimentaire de riboflavine ont été utilisés afin de tenter de déterminer un niveau optimum de riboflavine alimentaire. C'est le cas de la teneur du sang en riboflavine totale (FAD, FMN et riboflavine) ou de l'activité d'une enzyme des érythrocytes (globules rouges), la glutathion réductase (GRE). Cette dernière technique qui a été développée pour la nutrition humaine a été utilisée abondamment en nutrition porcine. Le résultat est exprimé sous forme d'un coefficient dont la valeur varie entre 1,0 et 1,2 pour un apport adéquat en riboflavine, entre 1,2 et 1,3 pour un apport marginal et

> 1,3 pour un niveau inadéquat en riboflavine (Le Grusse et Watier, 1993). Le Tableau 1 montre l'effet du niveau alimentaire de riboflavine alimentaire dans deux expériences (Frank et al., 1984 ; Pettigrew et al., 1996) sur l'évolution de l'activité GRE selon le stade de gestation. Les deux expériences sont comparables puisqu'elles utilisent un niveau commun de supplément de riboflavine qui donne des valeurs équivalentes de GRE. Un apport quotidien de 10 mg de riboflavine apparaît suffisant pour stabiliser et minimiser la valeur de GRE. Néanmoins, bien que la GRE apparaisse comme un critère fiable pour identifier une carence en riboflavine, certains doutes ont été récemment soulevés quant à sa validité comme indice du besoin puisque la valeur de GRE n'est pas corrélée avec la concentration en riboflavine totale dans le sang ou le foie (Giguère et al., 2002). Les recommandations actuelles quant au niveau de riboflavine alimentaire pour la truie varient entre 3 et 4 mg de riboflavine par kilogramme d'aliment (ARC, 1981 ; INRA, 1984 ; NRC, 1998).

2. LA BIOTINE

2.1. Métabolisme et alimentation

Ce n'est que dans les années 1970 que les fonctions métaboliques spécifiques de la biotine ont été mises en évidence en dépit du fait que la vitamine ait été isolée en 1931. La biotine est le coenzyme des carboxylases qui catalysent l'incorporation du CO₂ dans différents substrats, un processus particulièrement important dans le métabolisme des gras (Le Grusse et Watier, 1993).

La biotine se retrouve dans les aliments sous forme libre ou liée. Cette caractéristique est importante puisqu'elle détermine en bonne partie la biodisponibilité de la vitamine pour l'animal. Les quantités de biotine fournies par les aliments utilisés couramment en nutrition porcine sont faibles et peu disponibles (< 50 %), à l'exception du maïs (disponibilité de près de 100 %) (Misir et Blair, 1988 ; Kopinski et al., 1989a ; Mosenthin et al., 1989). La quantité de biotine synthétisée par la microflore intestinale du gros intestin est plus importante que celle fournie par l'aliment (Mosenthin et al., 1989 ; McDowell, 2000) mais à ce niveau l'absorption de la biotine est pratiquement négligeable (Kopinski et al.,

1989b) ; elle est donc excrétée en grande quantité dans les fèces (Bilodeau et al., 1989).

La biotine est relativement stable dans les aliments et les pré-mélanges. Cependant, des pertes de l'ordre de 10 à 15 % peuvent survenir lors des traitements par la chaleur et/ou la vapeur pour la préparation de l'aliment complet.

2.2. La croissance

L'effet le plus spectaculaire de l'addition de biotine dans l'aliment pour le porc a trait surtout au maintien de l'intégrité des onglons et à leur résistance accrue aux lésions. Les recommandations du NRC (1998) et de l'INRA (1984) sur les besoins en biotine font état de niveaux variant entre d'environ 50 et 100 µg/kg. Cependant, Kopinsky et Liebholz (1989), dans une démarche élégante pour établir les besoins chez le porc d'abattage, suggèrent des niveaux plus élevés (50 à 100 µg/kg) pour assurer une prévention efficace des lésions au niveau de onglons. En fait, un niveau de 100 µg/kg permet d'optimiser le contenu en biotine de différents organes (Figure 1), ce qui peut constituer un critère intéressant pour déterminer le besoin en biotine de ces animaux. Dans une autre étude, Partridge et McDonald (1990) montrent une tendance à une amélioration de la conversion alimentaire chez des porcs recevant un supplément de 500 µg/kg entre 15 et 88 kg de poids corporel. Selon ces auteurs, l'effet serait possiblement dû à une utilisation métabolique plus efficace des acides gras polyinsaturés chez les animaux recevant le supplément de biotine. Le processus d'élongation des acides gras exige la participation de molécules à deux carbones, comme l'acétate et le malonate, le malonate étant 20 à 30 fois plus efficace pour l'élongation des acides gras à longue chaîne que l'acétate (Roland et Edwards, 1971). La synthèse du malonate requiert la présence de la biotine (Watkins et Kratzer, 1987 ; Watkins, 1989). Des suppléments alimentaires de biotine modifient les profils d'acides gras chez la volaille (Watkins et Kratzer, 1987 ; Watkins, 1989 ; Roland et Edwards, 1971) et le rat (Liu et al., 1994) de même que chez le porc (Martelli et al., 2005), dans ce dernier cas, particulièrement en faveur des

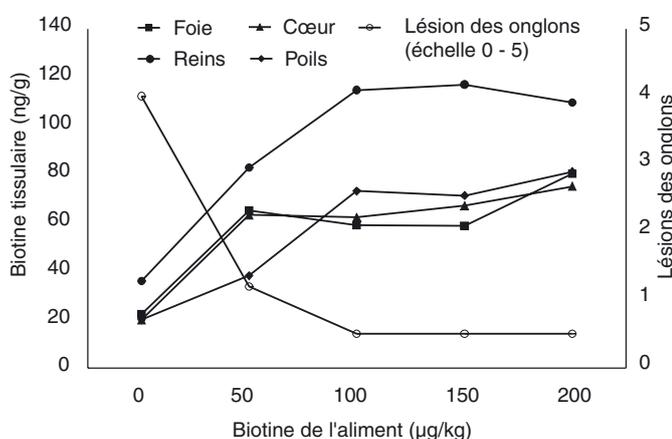


Figure 1 - Évolution des concentrations tissulaires de biotine dans différents organes et fréquence des lésions des onglons selon le niveau de supplément de biotine dans l'aliment (adapté de Kopinski et Liebholz, 1989)

acides gras saturés. Il semble donc que la quantité et/ ou le type d'acides gras déposés dans la carcasse soit relié avec le statut en biotine de l'animal.

2.3. La reproduction

Les effets de la biotine sur la santé et les performances de reproduction ne sont pas aussi clairement démontrés que ses effets sur les onglons (Greer et al., 1991). En effet, plusieurs travaux ont démontré des effets bénéfiques de cette vitamine sur les performances de reproduction alors que d'autres études, moins nombreuses, n'ont pu mettre en évidence aucun effet (voir les revues de Brooks, 1986 et Kornegay, 1986). En général, les expériences ont été faites soit avec un nombre restreint d'animaux ne pouvant permettre de dégager clairement des différences significatives, soit avec des animaux ayant une capacité reproductrice faible. On devra éventuellement vérifier les effets de la biotine dans des expériences menées avec un nombre suffisant d'animaux ayant une capacité reproductrice élevée. On pourra alors, le cas échéant, mieux interpréter l'importance de cette vitamine pour la reproduction chez le porc. Les recommandations du NRC (1998) et de l'INRA (1984) sont de 200 et 100 µg/kg, respectivement. On considère, dans les revues de la littérature les plus récentes, que des concentrations de l'ordre de 250 à 300 µg/kg seraient nécessaires afin de maximiser le potentiel reproducteur de l'animal.

3. LA PYRIDOXINE

3.1. Métabolisme et alimentation

La pyridoxine ou vitamine B₆ a été isolée en 1938. Le terme pyridoxine regroupe en fait plusieurs substances dont les formes alcool (pyridoxol et pyridoxine), aldéhyde (pyridoxal) et amine (pyridoxamine). Ces métabolites peuvent être phosphorylés et l'un d'entre eux, le pyridoxal phosphate joue un rôle important comme coenzyme actif. L'excrétion urinaire de la vitamine se fait sous sa forme oxydée, l'acide 4-pyridoxique, métaboliquement inactif. La vitamine B₆ intervient dans de nombreuses réactions chimiques du métabolisme des acides aminés. Elle est également impliquée dans le métabolisme énergétique, entre autres, la néoglucogénèse et la glycogénolyse (Le Grusse et Watier, 1993 ; McDowell, 2000).

Dans les aliments, la vitamine B₆ se retrouve sous les trois formes précédemment mentionnées. La vitamine B₆ est considérée comme une vitamine modérément stable (McGinnis, 1994), les pertes variant entre 10 et 20 % après un stockage de trois mois à la température ambiante (cité par McDowell, 2000). La forme synthétique utilisée en nutrition animale et humaine est la pyridoxine.HCl, une des structures chimiques la plus stable de cette vitamine (Le Grusse and Watier, 1993 ; McDowell, 2000).

La forme aldéhyde de la vitamine peut se combiner à la lysine, sous l'effet de la chaleur, pour donner un complexe métaboliquement inactif chez l'enfant et le rat (cité par Bender, 1999). L'importance de ce phénomène reste à déterminer chez le porc.

3.2. La croissance

En ce qui concerne le porcelet, le statut en pyridoxine, comme c'est le cas pour d'autres vitamines hydrosolubles, est très bas au moment du sevrage (Matte et al., 1997 ; 2001), probablement une conséquence du fait que le lait de truie est relativement pauvre en vitamine B₆ (environ 0,40 µg/mL selon Benedikt et al., 1996). Cet apport au porcelet correspond approximativement à la moitié du besoin quotidien qu'exige sa croissance (Coburn, 1994). De plus, en post-sevrage, le déficit est exacerbé par le fait que l'interconversion et l'oxydation *in vivo* des acides aminés augmentent fortement car les protéines de l'aliment sont plus abondantes et moins bien équilibrées que celle du lait de truie. Le pyridoxal-5-P (un des métabolites actifs de la pyridoxine) est un cofacteur enzymatique essentiel de ces réactions du métabolisme protéique (Le Grusse et Watier, 1993). L'utilisation métabolique du pyridoxal-5-P est également dépendante de la vitesse de croissance du jeune porcelet (Matte et al., 1997 ; 2001).

En utilisant des critères comme les performances de croissance et/ou la rétention azotée, on a longtemps considéré que des niveaux alimentaires de B₆ de 2 à 5 ppm étaient requis pour couvrir les besoins du porcelet en post-sevrage (5-30 kg de poids) (Adams et al., 1967 ; Kosters et Kirchgessner, 1976 ; ARC, 1981 ; Bretzinger, 1991 ; NRC 1998). Cependant, on a récemment suggéré que des apports de 2 à 10 fois plus élevés sont probablement nécessaires selon que les critères utilisés sont d'ordre métabolique (Matte et al., 2001, 2005) ou de performances (Woodworth et al., 2000 ; Matte et al., 2005). En fait, bien que des concentrations alimentaires de l'ordre de 50 ppm de B₆ soient nécessaires pour optimiser certains indicateurs métaboliques du statut en vitamine B₆, il semble qu'il n'y ait pas d'avantage zootechnique à accroître l'apport total de B₆ au-delà de 8 ppm (Woodworth et al., 2000 ; Matte et al., 2005) pour le porcelet. Cette valeur est 5 fois supérieure à la recommandation du NRC (1998) ; elle correspond au niveau moyen de supplémentation utilisé par l'industrie en Amérique du Nord (BASF survey, 1993) mais est environ 30 % plus élevé que celui utilisé en Europe (DSM, Vitamin market monitoring. DSM Nutritional Products, 2004. Communications personnelles / données non publiées).

3.3. La reproduction

L'effet de la pyridoxine sur le contrôle de la taille de la portée n'est pas bien documenté. La plupart des travaux ont été menés avant les années soixante. Les organismes américains et anglais qui font des recommandations ne font que des suggestions quant aux besoins. Quant à l'INRA (1984), il ne faisait mention d'aucun besoin particulier en pyridoxine quel que soit le stade physiologique du porc. Deux études américaines datant du début des années quatre-vingt suggèrent qu'une concentration dans l'aliment entre 2,0 et 3,0 mg/kg est nécessaire pour combler les besoins tissulaires et augmenter les performances de reproduction (Easter et al., 1983 ; Russell et al., 1985). D'autres travaux sont de toute évidence essentiels afin de confirmer ces résultats observés chez des animaux à faible potentiel reproducteur.

4. L'ACIDE FOLIQUE

4.1. Métabolisme et alimentation

Les rôles métaboliques de l'acide folique sont étroitement liés à ceux de la vitamine B₁₂. Il est impliqué, via les mêmes mécanismes, dans la multiplication cellulaire. En plus de son rôle fondamental dans la synthèse des bases puriques et pyrimidiques, celui qu'il joue dans le transfert d'unités monocarbonées permet l'interconversion de certains acides aminés tels, la glycine en sérine, l'histidine en acide glutamique ainsi que la synthèse de la méthionine à partir de l'homocystéine. Cette vitamine est donc probablement déterminante, chez une espèce comme le porc, pour le dépôt protéique et la synthèse de nouveaux tissus. Son dernier rôle explique probablement les effets observés sur le contrôle de la taille de la portée. Le 5-méthyl-tétrahydrofolate est le principal métabolite circulant de l'acide folique chez la plupart des espèces alors que, chez le porc, une autre forme a également été identifiée, le tétrahydrofolate (Natsuhori et al., 1991). Dans l'aliment, l'acide folique se retrouve surtout sous forme de pteroylpolyglutamates qui sont scindés en pteroylmonoglutamates lors de l'absorption intestinale (Mason, 1990). Les mesures de concentrations de folates dans les aliments font l'objet de divergences importantes selon les sources d'information (Matte et Girard, 1994).

L'acide folique est reconnu comme une vitamine sensible à la lumière et à la chaleur. Les pertes lors du stockage des prémélanges et/ou des aliments sont de plus de 10 % par mois (McGinnis, 1994) en plus de celles (environ 20 %) occasionnées par les procédés (mise en comprimés ou en granules) utilisés lors de la préparation des aliments (McDowell, 2000).

L'acide folique suscite présentement beaucoup d'intérêt en nutrition humaine. On lui attribue des effets protecteurs contre les maladies cardiovasculaires et les malformations congénitales. Ce rôle bénéfique de l'acide folique serait lié au contrôle exercé par cette vitamine sur l'homocystéine, une substance dérivée du métabolisme normal de la méthionine. L'homocystéine est un oxydant puissant qui devient, à niveaux élevés, néfaste à l'intégrité des vaisseaux sanguins et au développement normal de l'embryon (Piertzik et Brønstrup, 1997) ; l'organisme doit donc maintenir un niveau d'homocystéine le plus bas possible. Un déficit en l'une des deux vitamines, acide folique et/ou vitamine B₁₂, entraîne une accumulation locale ou systémique d'homocystéine (Bässler, 1997), augmentant ainsi considérablement les risques de maladies cardiovasculaires, d'avortement ou de malformations congénitales.

4.2. La croissance

Chez le porc d'abattage en période de début, croissance et finition, l'administration d'acide folique par voie parentérale ou orale a, dans certains cas, entraîné des effets positifs (Lindemann et Kornegay, 1986 ; Matte et al., 1990, 1993) sur les performances de croissance ou été sans effet (Gannon et Liebholz, 1990 ; Letendre et al., 1991). Récemment, l'impact des interactions entre l'acide folique, la

Tableau 2 - Proliféricité à la parturition, mortalité embryonnaire et composition du liquide allantoïque de truies nullipares et multipares à 30 jours de gestation en fonction du supplément en acide folique de l'aliment de gestation

Truies Supplément d'acide folique	Nullipares		Multipares	
	-	+	-	+
Porcelets nés vivants / portée ¹	9,1	9,3	11,5	13,5
Mortalité embryonnaire (%)	14,4 ²	12,8 ²	39,2 ³	32,6 ³
PGE ₂ totale (ng) ⁴	1574,1	1749,5	1890,0	2317,6
TGFβ ₂ total (ng) ⁴	81,1	66,0	66,7	138,1

¹ Adapté de Lindemann et Kornegay (1989)

² Adapté de Giguère et al., (2000)

³ Adapté de Tremblay et al. (1989)

⁴ Adapté de Guay et al. (2004b)

vitamine B₁₂ et la méthionine sur les performances zootechniques et la qualité de la viande a été évalué chez le porc d'abattage (Giguère et al., 2005). On a alors observé un accroissement du gain moyen quotidien, conséquence d'un ingéré alimentaire accru en période de finition. Cette réponse tardive à l'acide folique était similaire à celle observée par Matte et al. (1993). Les porcs qui recevaient les suppléments combinés de méthionine (0,2 %) et d'acide folique (10 ppm) ont atteint le poids d'abattage 5 jours plus tôt que les porcs ne recevant aucun de ces suppléments pendant toute la période de croissance-finition (12 à 20 semaines d'âge). En outre, bien que les traitements alimentaires aient eu peu d'impact sur la qualité de la viande et sa stabilité oxydative, les suppléments alimentaires de B₉ et de B₁₂ ont permis d'enrichir la viande en ces deux vitamines et d'en diminuer le contenu en homocystéine, un impact dont l'importance pour la nutrition et la santé humaine reste à déterminer (Giguère et al., 2005).

4.3. La reproduction

Il est maintenant reconnu qu'un supplément d'acide folique offert aux truies en gestation accroît la proliféricité des truies d'environ 10 % (Matte et al., 1984; Kovcin et al., 1988; Lindemann et Kornegay, 1989; Thaler et al., 1989; Frienship et Wilson, 1991; Lindemann, 1993; Hsu et al., 1994; Fuchs et al., 1996); elle aurait également un impact tout aussi important sur la croissance postnatale (pré-sevrage) du porcelet (Matte et al., 1992). L'effet de cette vitamine sur la proliféricité serait dû à une diminution de la mortalité embryonnaire durant le premier mois de la gestation (Tremblay et al., 1989). L'acide folique agirait à deux niveaux : d'une part, directement, sur le développement embryonnaire (ADN, protéine, et sécrétion d'oestrogènes) (Matte et al., 1996; Guay et al., 2002a) et d'autre part, indirectement, en stimulant la sécrétion utérine de promoteurs de croissance telle la cytokine Transforming Growth Factor β₂ (TGFβ₂) et de facteurs bénéfiques à l'acceptation des embryons par l'utérus telles les prostanoïdes comme la prostaglandine E₂ (PGE₂) (Matte et al., 1996; Giguère et al., 2000; Guay et al., 2004a; 2004b) (Tableau 2).

Cependant, il apparaît de plus en plus probable que ces effets embryonnaires et utérins de l'acide folique sont aussi dépendants de la parité de l'animal. En effet, la réponse à l'acide folique alimentaire, tant sur la proliféricité (Lindemann et Kornegay, 1989) que sur la sécrétion utérine de PGE₂

(Duquette et al., 1997) et de TGFβ₂ (Guay et al., 2004b) est beaucoup plus marquée chez les truies multipares que chez les truies nullipares (Tableau 2). Plusieurs hypothèses ont été envisagées pour expliquer cette différence de réponse selon la parité. On croit maintenant que l'effet mitigé de l'acide folique chez la cochette serait lié à une autre vitamine mentionnée plus tôt, la B₁₂, ces deux vitamines étant essentielles à la synthèse de protéine, d'ADN ainsi qu'à la méthylation et à l'expression des gènes (Bässler, 1997; Pietrzik et Brønstrup, 1997). La voie métabolique concernée serait celle de la reméthylation de la méthionine à partir de l'homocystéine, un métabolite aux propriétés embryotoxiques, tel que mentionné plus tôt. En effet, le statut nutritionnel en vitamine B₁₂ apparaît particulièrement faible chez la cochette en début de gestation; la quantité de vitamine B₁₂ en circulation est, en fait, deux à trois fois moins élevée que chez les truies multipares (Guay et al., 2002b). Ce phénomène est probablement lié au fait que, comme pour les autres micronutriments, les besoins nutritionnels de la cochette pour la fonction reproductrice sont en compétition directe avec les besoins en nutriments nécessaires pour la croissance et l'entretien de l'animal. Une fois la maturité atteinte, la fonction reproductrice peut profiter pleinement de tous les nutriments disponibles lorsque les besoins d'entretien sont couverts. Dans le cas de la vitamine B₁₂, le besoin pour la fonction reproductrice apparaît particulièrement important car le transfert de cette vitamine vers les sécrétions utérines est considérable en début de gestation; il y a, en effet, de deux à trois fois plus de vitamine B₁₂ dans l'utérus en début de gestation que dans la circulation sanguine totale (Guay et al., 2002b).

En dépit de nombreux travaux récents, il est encore difficile d'établir de façon précise le niveau d'acide folique qui correspond aux besoins de l'animal car des effets de l'acide folique sur la proliféricité sont observés dans un intervalle de concentrations qui varie entre 1,0 et 15,0 mg par kg d'aliment. Dans les études où les truies étaient les plus prolifiques, un niveau supérieur à 5 mg/kg a été nécessaire pour faire apparaître un effet de traitement. L'INRA (1984) et le NRC (1988) estiment le besoin à 0,3 et 0,6 mg/kg pour tous les types d'aliment offerts aux porcs quels que soient leur âge et leur stade physiologique. Au cours des 30 dernières années, les recommandations du NRC quant au niveau suggéré d'acide folique pour les truies en gestation a varié considérablement passant de 0,6 mg/kg (NRC, 1978) à 0,3 mg/kg (NRC 1988) pour ensuite être révisé à la hausse

à 1,0 mg/kg (NRC, 1998). La concentration moyenne dans les ingrédients varie de 0,5 à 1,0 mg/kg (Cerna et Kas, 1983; Matte et Girard, 1994). Dans une étude effectuée sur plusieurs sites universitaires américains, Harper et al. (1994) n'ont pu mettre en évidence aucun effet de suppléments (0 à 4 ppm) d'acide folique sur les performances de reproduction de truies hybrides dont la prolificité à la parturition variait entre 9,8 et 10,2. Utilisant une approche de bilan avec des niveaux de suppléments variant entre 0 et 20 ppm, Matte et Girard (1999) ont montré que l'utilisation métabolique de l'acide folique chez la truie gravide serait optimale à environ 10 mg/kg chez des truies dont la prolificité varie de 12 à 13,1 porcelets nés vivants par portée. Ce niveau constitue l'estimation la plus fiable du besoin métabolique (anabolisme, catabolisme et réserves) en acide folique des truies présentant un niveau de prolificité plus proche de celui observé en pratique.

5. LA VITAMINE B₁₂

5.1. Métabolisme et alimentation

Comme il en a été fait mention plus tôt, la vitamine B₁₂ est la dernière des vitamines à avoir été isolée ; sa structure chimique n'a été déterminée qu'en 1955 et sa synthèse chimique n'a été possible qu'en 1973. Les formes métaboliquement actives sont la méthylcobalamine, la principale forme circulante, qui est habituellement liée à une protéine de transport et l'adénosylcobalamine. Les cobalamines interviennent principalement dans deux voies métaboliques d'importance. La première, celle de la reméthylation (mentionnée plus tôt) qui régénère, avec la vitamine B₉ (acide folique), la méthionine (source de groupements méthyles et synthèse protéique) à partir de l'homocystéine. La deuxième, celle du méthylmalonyl-CoA qui permet l'entrée des acides gras à nombre impair de carbone, de certains acides aminés et du propionate dans le cycle de Krebs. La vitamine B₁₂ est essentielle pour un fonctionnement optimal de la synthèse des protéines, du renouvellement et de la prolifération des globules rouges, de l'épithélium intestinal et des tissus liés à la reproduction (Le Grusse et Watier, 1993 ; McDowell, 2000).

En nutrition porcine, la vitamine B₁₂ se retrouve presque exclusivement sous forme de cyanocobalamine ajoutée à l'aliment par le prémélange vitaminique. En effet, elle est absente des aliments d'origine végétale qui constituent l'essentiel du régime du porc. Peu de résultats d'études scientifiques sur les besoins du porc en vitamine B₁₂ sont disponibles. Il n'existe, en fait, pas plus d'une vingtaine de publications (résumés et articles scientifiques) sur le sujet. La stabilité de la vitamine B₁₂ dans les suppléments vitaminiques ne devrait pas présenter de problèmes particuliers car la molécule est peu sensible à la lumière, la chaleur, l'humidité ou l'oxydation (cité par McDowell, 2000). On rapporte cependant des pertes de l'ordre de 20 % après extrusion sèche (McGinnis, 1994).

5.2. La croissance

Les besoins en vitamine B₁₂ chez le porc d'abattage sont basés sur des travaux faits avant 1966. En fait, on sait que le besoin en vitamine B₁₂ s'accroît avec le potentiel de l'ani-

mal pour le dépôt protéique et avec le taux de protéine dans l'aliment. Des suppléments de cyanocobalamine peuvent compenser lors de déséquilibres de l'apport en acides aminés comme la méthionine et la lysine (cité par ARC, 1981). Chez des porcelets sevrés à l'âge de 26 jours, une injection intramusculaire de vitamine B₁₂ correspondant à une quantité 100 fois supérieure à celle (20 µg/kg) recommandée par le NRC (1998) se traduit par un accroissement du gain de poids de près de 14 % et de la prise alimentaire d'environ 12 % dans les 4 semaines qui suivent le sevrage (Wilson et al., 1991). Plus récemment, en utilisant des critères de performances et des critères métaboliques notamment l'homocystéine, House et Fletcher (2003) ont montré qu'un supplément de 35 µg de cyanocobalamine cristalline par kg d'un aliment exempt de cobalamine naturelle était nécessaire pour des porcelets sevrés de 5 à 10 kg. Dans l'étude récente mentionnée plus tôt utilisant des porcs en croissance-finition (Giguère et al., 2005), un supplément de vitamine B₁₂ au-delà de 25 ppb n'a pas entraîné d'effets sur les performances de croissance, les critères de qualité de la viande ou sur les critères métaboliques reliés à la reméthylation de la méthionine, en particulier le statut en l'homocystéine. Cependant, le supplément le plus élevé de vitamine B₁₂, à 150 ppb, a entraîné un enrichissement en B₁₂ de la viande de porc d'environ 55 %.

5.3. La reproduction

Le rôle de la vitamine B₁₂ dans les processus de reproduction est mal connu. Les études disponibles sont relativement anciennes et ont été souvent obtenues dans le cadre de modèles expérimentaux de carence. L'étude des besoins en B₁₂ est particulière pour une vitamine hydrosoluble puisque le retrait du supplément vitaminique ou l'absence d'ingrédients d'origine animale dans l'aliment doivent être prolongés (au moins un an) pour induire des symptômes de carence comme, par exemple, l'avortement peu avant la mise bas (Cunha et al, 1944 ; Ensminger et al, 1951 ; Frederick et Brisson, 1961). De plus, ces travaux ont été réalisés avec un nombre restreint de truies. On avait même alors démontré une augmentation des performances de reproduction après l'ajout dans l'aliment de quantités de vitamine B₁₂ dix fois supérieures aux niveaux actuellement recommandés (Frederick et Brisson, 1961 ; Teague et Grifo, 1966). Ces observations ont été rapportées par le ARC (1981) mais n'ont pas été prises en compte par d'autres organismes impliqués dans les recommandations en nutriments pour les porcs. Tel que mentionné plus tôt, les travaux de Guay et al. (2002b) suggéraient que le besoin métabolique en vitamine B₁₂ de la truie est particulièrement élevé en début de gestation compte tenu du fait que l'utérus draine alors d'importantes quantités de B₁₂ représentant un contenu total deux fois plus élevé que celui du pool sanguin. Chez la cochette, ce phénomène est exacerbé par le fait que leur statut en vitamine B₁₂ est de 2 à 3 fois plus faible que celui des multipares (Guay et al., 2002b).

Il apparaît intéressant de souligner que la dernière publication scientifique avant l'étude de Guay et al. (2002b), remontait à plus de 35 ans (Teague et Grifo, 1966). De nouveaux travaux seraient nécessaires afin d'actualiser les

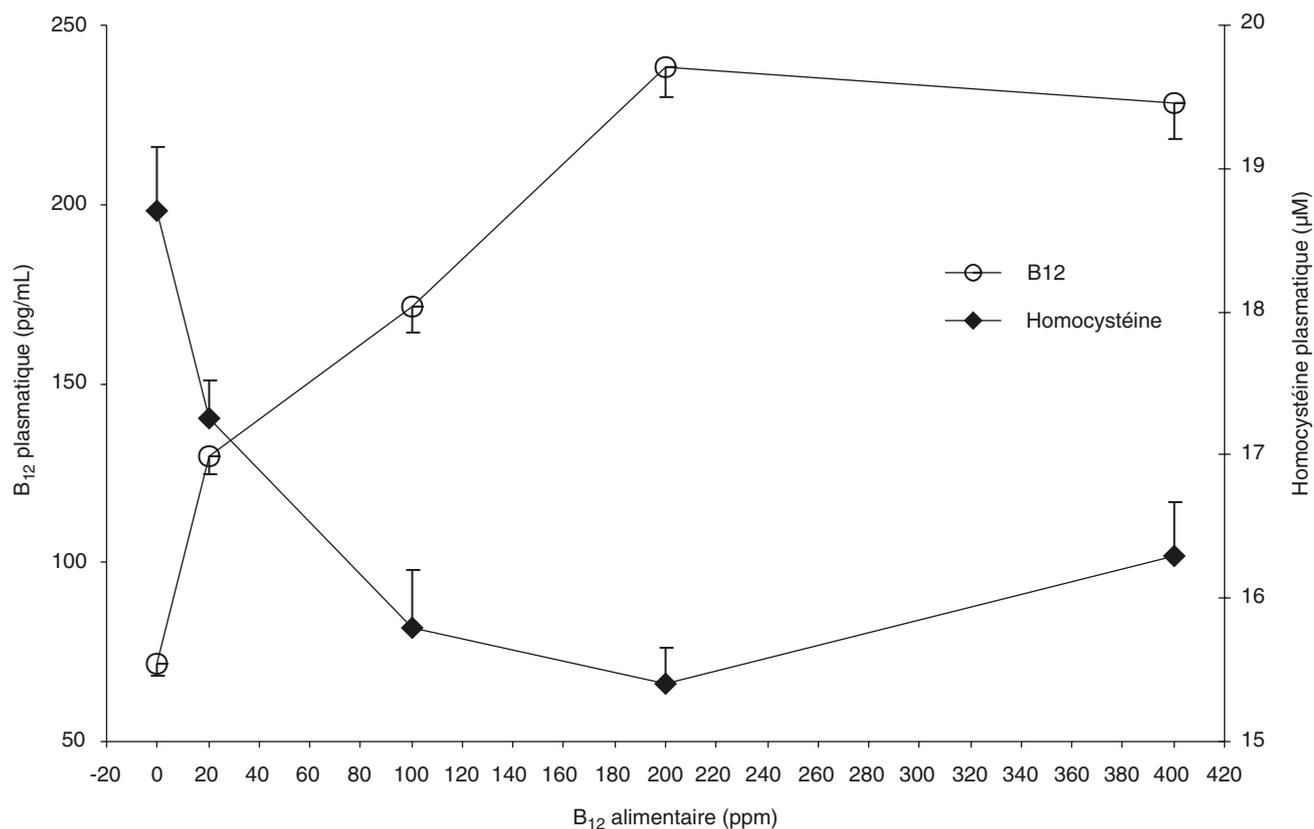


Figure 2 - Valeurs moyennes des concentrations plasmatiques de vitamine B₁₂ et d'homocystéine pendant la gestation, selon le taux d'incorporation de vitamine B₁₂ dans l'aliment des truies en gestation

recommandations. Récemment, nous avons montré, chez les truies en gestation, que des concentrations de vitamine B₁₂ entre 100 et 200 ppb sont nécessaires pour optimiser les concentrations de B₁₂ dans le sang et le foie ainsi que le transfert dans le lait et aux porcelets et pour réduire les concentrations d'homocystéine dans le sérum des truies et des porcelets (Figure 2) (Simard et al., 2002a ; Simard et al., 2002b, 2004).

Les besoins tels que suggérés présentement varient, selon le type de porc, entre 15 et 20 µg/kg d'aliment (ARC, 1981 ; INRA, 1984 ; NRC, 1998).

CONCLUSION

Les vitamines sont des nutriments essentiels à la croissance, l'entretien et la santé de l'animal au même titre que, par exemple, les acides aminés ou les acides gras. Chacune

d'entre elles a des rôles métaboliques bien définis dont l'importance varie en fonction du stade physiologique de l'animal considéré (porcelet en jeune âge, en croissance ou reproducteur). On attribue parfois un rôle thérapeutique voire même, à tort, miraculeux à certaines vitamines. Le manque d'information dans le domaine des vitamines est à l'origine de cet empirisme qui persiste encore aujourd'hui.

Les niveaux utilisés et les recommandations proposées par différents organismes privés ou publics varient grandement. Bien que les risques de carences en vitamines soient aujourd'hui pratiquement nuls, la détermination des niveaux optimaux pour la productivité des élevages demeure le défi principal des prochaines années. Cette optimisation est non seulement importante au niveau économique pour le coût de l'aliment mais aussi pour la santé de l'animal car certaines vitamines sont reconnues pour leur rôle dans la réponse immunitaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams C.R, Richardson C.E., Cunha T.J., 1967. Supplemental biotin and vitamin B₆ for swine. *J. Anim. Sci.* 26, 903.
- ARC 1981. *The Nutrient Requirements of Pigs*. Agricultural Research Council. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough. England.
- Bässler K.H., 1997. Enzymatic effects of folic acid and vitamin B₁₂. *Internat. J. Vit. Nutr. Res.*, 67, 385-388.
- BASF. 1993. Keeping Current, KC 9305. Vitamin supplementation Rates for U. S. Commercial Poultry, Swine and Dairy Cattle.
- Bazer F.W., Zavy M.T., 1988. Supplemental riboflavin and reproductive performance of gilts. *J. Anim. Sci.*, 66(Suppl. 1), 324.
- Bender, D.A., 1999. Non-nutritional uses of vitamin B₆. *Br. J. Nutr.*, 81, 7-20.
- Benedikt J., Roth-Maier D.A., Kirchgessner M., 1996. Influence of dietary vitamin B₆ supply during gravidity and lactation on total vitamin B₆ concentration (Pyridoxine, Pyridoxal and Pyridoxamine) in blood and milk. *Int. J. Vit. Nutr. Res.*, 66, 146-150.
- Bilodeau R., Matte J.J., de Passillé A.-M.B., Girard C.L., Brisson G.J. 1989. Effects of floor type on serum folates, serum vitamin B₁₂, plasma biotin and on growth performances of pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 69, 779-788.

- Bretzinger J., 1991. Pyridoxine supply of early weaned piglets. Doctorate Thesis in Veterinary Medicine. Ludwig-Maximilians University of Munich.
- Brooks P.H., 1986. The role of biotin in intensive systems of pig production. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Production Disease in Farm Animals. Belfast, Northern Ireland.
- Cerna J., Kas J., 1983. New conception of folacin assay in starch or glycogen containing food samples. *Nahrung*, 27, 957-964.
- Coburn S.P., 1994. In: Litwack, G. Vitamins and Hormones - Advances in Research and Applications, Vol 48. pp. 259-300.
- Cunha T.J., Ross O.B., Phillips P.H., Bohstedt G., 1944. Further observations on the dietary insufficiency of a corn-soybean ration for reproduction of swine. *J. Anim. Sci.*, 3, 415-421.
- De Passillé A.-M.B., Bilodeau R., Girard C.L., Matte J. J., 1989. A study on the occurrence of coprophagy behaviour and its relationship to vitamin-B status of growing-finishing pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 69, 299-306.
- Duquette J., Matte J.J., Farmer C., Girard C.L., Laforest J.P., 1997. Pre- and post-mating dietary supplements of folic acid and uterine secretory activity in gilts. *Can. J. Anim. Sci.*, 77, 415-420.
- Easter R.A., Anderson P.A., Michel E.J., Corley J.R., 1983. Response of gestating gilts and starter, grower and finisher swine to biotin, pyridoxine, folacin and thiamine additions to corn-soybean meal diets. *Nutr. Rep. Internat.*, 28, 945-950.
- Ensminger M.E., Colby R.W., Cunha T.J., 1951. Effect of certain B-complex vitamins on gestation and lactation in swine. *Washington Agric. Exp. Sta., Sta. Circ.*, 134, 1-35.
- Frank G.R., Easter R.A., Bahr J.M., 1984. Riboflavin requirement of gestating swine. *J. Anim. Sci.*, 59, 1567-1572.
- Frederick G.L., Brisson G.J., 1961. Some observations on the relationship between vitamin B12 and reproduction in swine. *Can. J. Anim. Sci.*, 41, 212-219.
- Friendship R.M., Wilson M.R., 1991. Effects of intramuscular injections of folic acid in sows on subsequent litter size. *Can. Vet. J.*, 32, 565-566.
- Fuchs B., Orda J., Wiliczekiewicz A., 1996. Effects of folic acid supplementation in pregnant sows on the fetal mortality. *Medycyna Weterynaryjna* 52, 51-53.
- Gannon N.J., Leibholz J., 1990. Manipulating Pig Production II. Proc. of the Biennial Conf. of the Australasian Pig Sci. Assoc., November 27-29, 1989, p 136, Sydney, Australia.
- Giguère A., Girard C.L., Lambert R., Laforest J.P., Matte J.J., 2000. Reproductive performance and uterine prostaglandin secretion in gilts conditioned with dead semen and receiving dietary supplements of folic acid. *Can. J. Anim. Sci.*, 80, 467-472.
- Giguère A., Girard C.L., Matte J.J., 2002. Erythrocyte glutathione reductase activity and riboflavin nutritional status in early-weaned piglets. *Internat. J. Vit. Nutr. Res.*, 72, 383-387.
- Giguère A., Girard C.L., Matte J.J., 2005. L'interaction entre l'acide folique, la vitamine B12 et la méthionine chez le porc en croissance : impact sur les performances zootechniques et la qualité de la viande. *Journées Rech. Porcine en France*, 37, 275-282.
- Greer E.B., Leibholz J.M., Pickering D.I., Macoun R.E., Bryden W.L., 1991. Effect of Supplementary Biotin on the Reproductive Performance, Body Condition and Foot Health of Sows on 3 Farms. *Aust. J. Agric. Res.*, 42, 1013-1021.
- Guay F., Matte J.J., Girard C.L., Palin M.-F., Giguère A., Laforest J.P., 2002a. Effect of folic acid and glycine supplementation on embryo development and folate metabolism during early pregnancy in pigs. *J. Anim. Sci.*, 80, 2134-2143.
- Guay F., Matte J. J., Girard C. L., Palin, M.-F., Giguère A., Laforest J. P., 2002b. Effect of folic acid and vitamin B12 supplements on folate and homocysteine metabolism in pigs during early pregnancy in pigs. *Brit. J. Nutr.*, 88, 253-263.
- Guay F., Matte J.J., Girard C.L., Palin M.F., Giguère A., Laforest J.P., 2004a. Effects of folic acid supplement on uterine prostaglandin metabolism and interleukin-2 expression on day 15 of gestation in white breed and crossbred Meishan sows. *Can. J. Anim. Sci.*, 84, 63-72.
- Guay F., Matte J.J., Girard C.L., Palin M.F., Giguère A., Laforest J.P., 2004b. Effect of folic acid plus glycine supplement on uterine prostaglandin and endometrial granulocyte-macrophage colony-stimulating factor expression during early pregnancy in pigs. *Theriogenol.*, 61, 485-498.
- Harper A.F., Lindemann M.D., Chiba L.I., Combs G.E., Handlin D.L., Kornegay E.T. and Southern L.L., 1994. An assessment of dietary folic acid levels during gestation and lactation on reproductive and lactational performance of sows: A cooperative study. *J. Anim. Sci.*, 72, 2338-2344.
- House J.D., Fletcher C.M.T., 2003. Response of early weaned piglets to graded levels of dietary cobalamin. *Can. J. Anim. Sci.*, 83, 247-255.
- Hsu A.L., Chen T.C., Lee M.L., Twu H.N., 1994. Effects of dietary zinc and folic acid during gestation on reproductive performance of sows. In: Djajanegara, A. and Sukmawati, A. J. Compilers, Sustainable animal production and the environment. Proceedings of the 7th AAAP Animal Science Congress, Bali, Indonesia, 11-16 July 1994. Vol. 3, poster papers: 111-112.
- INRA. 1984. Alimentation des animaux monogastriques: porcs, lapins, volailles, Institut National de la Recherche Agronomique.
- Kopinski J.S., Leibholz J., 1989. Biotin studies in pigs. II. The biotin requirement of the growing pig. *Br. J. Nutr.*, 62, 761-772.
- Kopinski J.S., Leibholz J., Bryden W.L., 1989a. Biotin studies in pigs. IV. Biotin availability in feedstuffs for pigs and chickens. *Br. J. Nutr.*, 62, 773-780.
- Kopinski J.S., Leibholz J., Love R.J., 1989b. Biotin studies in pigs. V. The post-ileal absorption of biotin. *Br. J. Nutr.*, 62, 781-789.
- Kornegay E.T., 1986. Biotin in swine production: a review. *Livest. Prod. Sci.*, 14, 65-89.
- Kösters W.W., Kirchgessner M., 1976. Change in feed intake of early-weaned piglets in response to different vitamin B6 supply. *Z. Tierphysiologie Tierernährung und Futtermittelkunde*, 37, 247-254.
- Kovcin S., S. Zivkovic M. Beukovic et M. Lalic. 1988. Uticaj folne kiseline na reprodukciju krmaca. "Zbornik radova" br., 17-18. Institut za stocarstvo, Novi Sad.
- Le Grusse J., Watier B., 1993. Les vitamines. Données biochimiques, nutritionnelles et cliniques. Centre d'Études et d'Information sur les Vitamines. Produits Roche, Neuilly sur Seine, France.
- Letendre M., Girard C.L., Matte J.J., Bernier J., 1991. Effects of intramuscular injections of folic acid on folates status and growth performance of weanling pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 71, 1223-1231.
- Lindemann M.D., 1993. Supplemental folic acid: a requirement for optimizing swine reproduction. *J. Anim. Sci.*, 71, 239-246.
- Lindemann M.D., Kornegay E.T., 1986. Effect of folic acid additions to weanling pig diets. In: Kornegay, E.T., Gerken, J., Knight, J. and Notter, D. 1985-86. *Va. Tech. Livestock Res. Rep.* 20-22.
- Lindemann M.D., Kornegay E.T., 1989. Folic acid supplementation to diets of gestating and lactating swine over multiple parities. *J. Anim. Sci.*, 67, 459-464.
- Liu Y.Y., Shigematsu Y., Bykov I., Nakai A., Kikawa, Y., Fukui T., Sudo M., 1994. Abnormal fatty acid composition of lymphocytes of biotin-deficient rats. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 40, 283-288.
- Luce W.G., Geisert R.D., Zavy M.T., Clutter A.C., Bazer F.W., Maxwell C.W., Wiltmann M.D., Blair R.M., Fairchild M., Wiford J., 1990. Effect of riboflavin supplementation on reproductive performance of bred sows. *Animal Science Report (Oklahoma Agricultural Experimental Station)*: 269.

- Martelli G., Sardi L., Parishini P., Badiani A., Parazza P., Mordenti A., 2005. The effects of a dietary supplement of biotin on Italian heavy pigs' (160 kg) growth slaughtering parameters, meat quality and the sensory properties of cured hams. *Livest. Prod. Sci.*, 93, 117-124
- Mason J.B., 1990. Intestinal transport of monoglutamyl folates in mammalian systems. *Folic acid metabolism in Health and Disease*, 13, 47-63.
- Matte J.J., Girard C.L., 1994. Pteroylglutamic (folic) acid in different feedstuffs: the pteroylglutamate content and an attempt to measure the bioavailability in pigs. *Br. J. Nutr.*, 72, 911-922.
- Matte J.J., Girard C.L., 1999. An estimation of the requirement for folic acid in gestating sows: the metabolic utilization of folates as a criterion of measurement. *J. Anim. Sci.*, 77, 159-165.
- Matte J.J., Girard C.L., Brisson G.J., 1984. Folic acid and reproductive performances of sows. *J. Anim. Sci.*, 59, 1020-1025.
- Matte J.J., Girard C.L., Brisson G.J., 1992. The role of folic acid in the nutrition of gestating and lactating primiparous sows. *Livest. Prod. Sci.*, 32, 131-148.
- Matte J.J., Girard C.L., Tremblay G.F., 1993. Effect of long-term addition of folic acid on folate status, growth performance, puberty attainment, and reproductive capacity of gilts. *J. Anim. Sci.*, 71, 151-157.
- Matte J.J., Girard C.L., Bilodeau R., Robert S., 1990. Effects of intramuscular injections of folic acid on serum folates, haematological status and growth performance of growing-finishing pigs. *Reprod. Nutr. Develop.*, 30, 103-114.
- Matte J.J., Laforest J.P., Farmer C., Girard C.L., 1994. Le contrôle de la survie embryonnaire chez le porc: L'effet de l'acide folique sur certaines caractéristiques du milieu utérin et sur le développement embryonnaire. *Journées Rech. Porcine en France.*, 26, 293-298.
- Matte J.J., Farmer C., Girard C.L., Laforest J.P., 1996. Dietary folic acid, uterine function and early embryonic development in sows. *Can. J. Anim. Sci.*, 76, 427-433.
- Matte J.J., Ponter A.A., Sève B., 1997. Effects of chronic parenteral pyridoxine and acute enteric tryptophan on pyridoxine status, glycemia and insulinemia stimulated by enteric glucose in weanling piglets. *Can. J. Anim. Sci.*, 77, 663-668.
- Matte J.J., Girard C.L., Sève B., 2001. Effects of long term parenteral administration of vitamin B6 on B6 status and some aspects of the glucose and protein metabolism of early-weaned piglets. *Br. J. Nutr.*, 85, 11-21.
- Matte J.J., Giguère A., Girard C., 2005. Some aspects of the pyridoxine (vitamin B6) requirement in weanling piglets. *Br. J. Nutr.*, 93, 723-730.
- McDowell L.R., 2000. *Vitamins in animal nutrition*. Academic Press Inc. San Diego, California.
- McGinnis C. H. Jr., 1994. Maintaining vitamin stability during extrusion. *Feed Mix* 2, 10-13.
- Misir R., Blair R., 1988. Biotin bioavailability from protein supplements and cereal grains for weanling pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 68, 523-532.
- Moffatt R.J., Murray F.A., Grifo A.P.Jr., Haynes L.W., Kinder J.E., Wilson G.R., 1980. Identification of riboflavin in porcine uterine secretions. *Biol. Reprod.*, 23, 331-335.
- Mosenthin R., Sauer W.G., Volker L., 1989. The digestibility of biotin in soybean meal at different sites along the intestinal tract of the pig and microbial synthesis in the large intestine. *J. Anim. Sci.*, 67 (Suppl. 1), 246.
- Natsuhori M., Shimoda M., Kokue E.-I., Hayana T., Takahashi Y., 1991. Tetrahydrofolic acid as the principal congener of plasma folates in pigs. *J. Physiol.*, 261, R82-R86.
- NRC, 1978. *Nutrient Requirements of Swine* (8th Ed.). Washington, DC: National Academy Press.
- NRC, 1988. *Nutrient Requirements of Swine* (9th Ed.). Washington, DC: National Academy Press.
- NRC, 1998. *Nutrient Requirements of Swine* (10th Ed.). Washington, DC: National Academy Press.
- Partridge I.G., McDonald M.S., 1990. A note on the response of growing pigs to supplemental biotin. *Anim. Prod.*, 50, 195-197.
- Pettigrew J.E., El-Kandelgy S.M., Johnston L.J., Shurson, G.C., 1996. Riboflavin nutrition of sows. *J. Anim. Sci.* 74, 2226-2230.
- Pietrzik K., Brönstrup A., 1997. Folate in preventive medicine: A new role in cardiovascular disease, neural tube defects and cancer. *Ann. Nutr. Metabol.*, 41, 331-343.
- Roland D.A.Sr., Edwards H.M.Jr., 1971. Effect of essential fatty acid deficiency and type of dietary fat supplementation on biotin-deficient chicks. *J. Nutr.*, 101, 811-818.
- Russell L.E., Easter R.A., Bechtel P.J., 1985. Evaluation of the erythrocyte aspartate aminotransferase activity coefficient as an indicator of the vitamin B-6 status of postpubertal gilts. *J. Nutr.*, 115, 1117-1123.
- Simard F., Guay F., Laforest J.P., Giguère A., Girard C.L., Matte J.J., 2002a. The optimal dietary level of vitamin B12 in gestating gilts. *J. Anim. Sci.*, 80(Suppl. 1), 14.
- Simard F., Guay F., Laforest J.P., Giguère A., Girard, C.L., Matte, J. J. 2002b. Dietary vitamin B12 supplements in gestating gilts and B12 transfer to piglets during lactation. *J. Anim. Sci.*, 80(Suppl. 1), 163.
- Simard F., Guay F., Girard C., Giguère A., Laforest J.P., Matte, J.J., 2004. La vitamine B12 chez la truie gravide: faut-il actualiser le besoin? *Journées Rech. Porcine*, 36, 229-234.
- Teague H.S., Grifo A.P., 1966. Vitamin B12 supplementation of sow rations. *J. Anim. Sci.* 25, 895.
- Thaler R.C., Nelssen J.R., Goodband R.D., Allee G.L., 1989. Effect of dietary folic acid supplementation on sow performance through two parities. *J. Anim. Sci.* 67, 3360-3369.
- Tilton S.L., Bates R.O., Moffatt R.J., 1991. Effect of riboflavin supplementation during gestation on reproductive performance of sows. *J. Anim. Sci.* 69 (Suppl. 1):482.
- Tremblay G.F., Matte J.J., Dufour J.J., Brisson G.J., 1989. Survival rate and development of foetuses during the first 30 days of gestation after folic acid addition to a swine diet. *J. Anim. Sci.*, 67, 724-732.
- Watkins B.A., 1989. Influence of biotin deficiency and dietary trans-fatty acids on tissue lipids in chickens. *Br. J. Nutr.*, 61, 99-111.
- Watkins B.A., Kratzer F.H., 1987. Dietary biotin effects on polyunsaturated fatty acids in chick tissue lipids and prostaglandin E2 levels in freeze-clamped hearts. *Poult. Sci.*, 66, 1818-1828.
- Wilson M.E., Pettigrew J.E., Walker R.D., 1991. Provision of additional vitamin B12 improved growth rate of weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 69(Suppl. 1), 359.
- Wiseman S.L., Wenninghoff J.R., Sauer R.D., Danielson D.M., 1991. The effect of supplementary riboflavin fed during the breeding and implantation period on reproductive performance of gilts. *J. Anim. Sci.*, 69 (Suppl. 1), 359.
- Woodworth J.C., Goodband R.D., Nelssen J.L., Tokach M.D., Musser, R.E. 2000. Added dietary pyridoxine, but not thiamin, improves weanling pig growth performance. *J. Anim. Sci.*, 78, 88-93.