



# Les différentes sources de méthionine libre ont une efficacité similaire chez les porcelets en post-sevrage selon une étude par méta-analyse et méta-régression

## L'efficacité de méthionine chez les porcelets en post-sevrage

*Aline REMUS (1), Vinicius CARNEIRO DE SOUZA (2), Dolores BATONON-ALAVO (3), Friedrich ROUFFINEAU (3), Yves MERCIER (3), Candido POMAR (1) et Ermias KEBREAB (2)*

*(1) Centre de Recherche et Développement de Sherbrooke, AAC, Sherbrooke, QC J1M 0C8, Canada*

*(2) Department of Animal Science, University of California, Davis, Californie 95616, États-Unis*

*(3) Adisseo France SAS, Malicorne F-03600, France*

[aline.remus@agr.qc.ca](mailto:aline.remus@agr.qc.ca)

### Les différentes sources de méthionine libre ont une efficacité similaire chez les porcelets en post-sevrage selon une étude par méta-analyse et méta-régression

La méthionine (Met) est un acide aminé essentiel qui peut être apporté via l'aliment sous différentes formes : DL-Méthionine, L-Méthionine et OH-Méthionine. Cette étude vise à comparer l'efficacité d'utilisation de différentes sources de Met chez les porcs sevrés par l'approche de méta-analyse et de méta-régression. Une base de données comprenant 208 traitements issus de 24 articles publiés entre 1990 et 2021 a été constituée. Des modèles non-linéaires mixtes ont été appliqués, en considérant l'étude comme effet aléatoire, afin de déterminer l'apport optimal en Met ( $Met_i$ , g/j). Un apport de 2,09 g/j de  $Met_i$  digestible iléal standardisé a été identifié comme étant l'apport optimal pour répondre aux besoins des porcs de 5 à 25 kg de poids vif. Afin de focaliser sur la zone de réponse à la supplémentation en Met, seules les données en dessous de l'apport optimal en  $Met_i$ , et avec la lysine comme deuxième acide aminé limitant, ont été utilisées pour l'analyse. Des modèles linéaires mixtes ont été appliqués pour comparer les pentes des différentes sources de Met. La comparaison de pentes n'a montré aucune différence entre les sources de Met ( $P > 0,10$ ). Par ailleurs, la rétention de Met de chacune des sources a été modélisée sur en considérant que le gain de poids est constitué de 16 % de protéines et que 2 % de ce dépôt l'est sous forme de Met. L'efficacité d'utilisation de Met était similaire entre le régime de référence (77%) et chacune des trois sources de Met (75% en moyenne) utilisées. En conclusion, l'efficacité de l'utilisation de Met est équivalente pour la DL-Méthionine, la L-Méthionine et l'OH-Méthionine chez les porcelets en post-sevrage.

### Different sources of free methionine have similar efficiencies in post-weaning piglets according to a meta-analysis and meta-regression study

Methionine (Met) is an essential amino acid that can be provided in different forms: DL-Methionine, L-Methionine and OH-Methionine. This study aimed to compare the efficiency of using different Met sources in weaned pigs through meta-analysis and meta-regression approaches. A database containing 208 treatments from 24 articles published between 1990 and 2021 was compiled. Non-linear mixed models were applied, considering the study as a random effect, to determine the breakpoint in standardized ileal digestible Met intake ( $Met_i$ , g/d). The average  $Met_i$  of 5-25 kg BW pigs was estimated to be 2.09 g/d. Only data below the Met breakpoint were retained for further analysis to focus on the zone of increasing response to Met supplementation, only data below the optimal intake of  $Met_i$ , and with lysine as the second limiting amino acid, were used for analysis. Linear mixed models were applied to compare the slopes of different Met sources. Comparison of slopes showed no difference between Met sources ( $P > 0.10$ ). Furthermore, the retention of Met from each Met source was modelled assuming that 16% of the weight gain is made up of protein and that 2% of this deposit is in the form of Met. Met use efficiency was similar between the reference diet (77%) and each of the three sources of Met (75%, on average). In conclusion, the efficiency of Met use is equivalent for DL-Methionine, L-Methionine and OH-Methionine in post-weaning piglets.

## INTRODUCTION

Fournir les nutriments à des niveaux proches du besoin améliore l'efficacité de l'utilisation de l'azote et réduit les impacts environnementaux et les coûts de production. Ainsi, la formulation de régimes alimentaires maximisant l'efficacité de l'utilisation des nutriments est requise pour assurer une production porcine durable (Pomar *et al.*, 2021). L'efficacité d'utilisation d'un acide aminé (AA) est déterminée par le rapport entre la quantité retenue de cet AA dans les protéines déposées (PD) et son apport alimentaire.

La méthionine (Met) est souvent le deuxième ou le troisième AA limitant dans les régimes couramment formulés pour les porcs en croissance (NRC, 2012). Des sources de Met libre telles que la DL-méthionine (DL-Met), l'OH-méthionine (OH-Met) et plus récemment la L-méthionine (L-Met) sont disponibles aujourd'hui pour l'alimentation des animaux monogastriques. Ces sources de Met, en complément des autres acides aminés de synthèse, permettent aux nutritionnistes de réduire la teneur en matières azotées totales (N x 6,25) des aliments, d'augmenter son efficacité de l'utilisation et l'impact environnemental de la production. Cependant, les animaux ne peuvent utiliser pour la synthèse des protéines que l'isomère L-Met et, par conséquent, ils doivent convertir les formes D-Met et OH-Met dans la forme L-Met (Baker, 2006) avant leur utilisation métabolique. En théorie, la conversion des sources D-Met et OH-Met en L-Met entraîne un coût énergétique qui diminue l'efficacité de leur utilisation (Sauer *et al.*, 2008). Cependant, il a été démontré que la conversion de l'OH-Met en L-Met a un coût énergétique inférieur à celui de la conversion de la DL-Met en L-Met (van Milgen *et al.*, 2019). Notre hypothèse est que les différentes sources de Met ont la même efficacité pour le GMQ et la PD lorsqu'elles sont offertes sur une base molaire. Cette étude visait ainsi (i) à déterminer l'efficacité d'utilisation respective de la DL-Met, la L-Met et l'OH-Met à l'aide d'une revue systématique de la littérature et deux approches méta-analytiques, et (ii) à modéliser et comparer l'efficacité d'utilisation de toutes les sources de Met entre elles.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Collecte de données (stratégie de recherche et critères d'inclusion)

Une revue systématique de la littérature a été réalisée en novembre 2021 à l'aide de la méthode PRISMA (Page *et al.*, 2021). Les plateformes Pubmed (126 références), ProQuest (235 références), Scopus (143 références) et Science Direct (1 663 références) ont été utilisées pour identifier les études comportant des traitements en dose-réponse rapportant des résultats pour les différentes sources de Met utilisées chez les porcs du sevrage à l'abattage. La question de recherche a été proposée en utilisant le cadre « PICO » dans lequel un ensemble de mots-clés a été créé, comprenant des éléments désignant la population (p. ex., les porcs), l'intérêt (p. ex., les exigences nutritionnelles atteintes) et le contexte (p. ex., les performances de croissance). Les études ont été analysées selon les critères de sélection suivants : 1) avoir été réalisées sur des porcs ; 2) avoir été publiées entre 1990 et 2021 ; et 3) présenter des données sur les performances de croissance. Sur la base de ces critères, 1 779 références ont été éliminées après l'évaluation des titres, tandis que 74 autres ont été éliminées après la lecture du résumé. Une recherche supplémentaire dans Google Scholar a été effectuée à l'aide des mots-clés en anglais « porcs », « Met » et « croissance », et 24 articles ont été

sélectionnés en fonction des trois critères énoncés précédemment. À cette étape, la base de données comprenait 45 références retenues pour une analyse du texte intégral. Pour être sélectionnées, ces références devaient : 1) présenter des traitements avec différentes sources de Met libre telles que L-Met, DL-Met et/ou OH-Met ; 2) les sources de Met libre devaient avoir été fournies à au moins deux niveaux d'inclusion ; 3) la Met devait être le premier AA limitant ; et 4) les articles devaient présenter la composition en ingrédients des régimes expérimentaux. Trente-trois études ont ainsi été retenues pour la méta-analyse. En raison du petit nombre d'études sur la phase de croissance et de finition, seule la phase de post-sevrage a été incluse dans l'analyse (24 articles). La composition en ingrédients de chaque régime a été enregistrée dans des feuilles de calcul et utilisée pour recalculer la composition nutritionnelle en termes d'énergie nette, AA digestibles sur une base iléale standardisée (DIS) et minéraux à l'aide du logiciel EvaPig® (version 1.3.1.4, INRAE, Saint-Gilles, France). Toutes les données ont été analysées avec la version 4.4.1 de R (R Core Team, 2021). Toutes les valeurs des AA sont présentées dans ce document sur une base DIS.

### 1.2. Estimation des besoins en méthionine

Des modèles non linéaires mixtes (linéaire-plateau, quadratique-plateau et par morceaux (piece-wise ou 2-slopes en anglais) ont été utilisés pour déterminer le besoin en Met ingérée (Met<sub>i</sub>, g/j) à l'aide du package nlme de R en considérant chaque essai dose-réponse comme effet aléatoire et l'effet de la source Met a été testé sur les différents paramètres des modèles non linéaires. Le critère d'information bayésien (BIC) considérant au moins 10 points de différence a été utilisé pour choisir le meilleur modèle. De plus, deux analyses de sensibilité ont été effectuées pour évaluer si le choix du besoin en Met<sub>i</sub> affecterait les résultats de la méta-régression et de l'analyse de la taille d'effet. Le premier a consisté à faire varier l'apport optimal de Met<sub>i</sub> par  $\pm 1$  écart type. Une deuxième approche d'analyse de sensibilité a été utilisée pour évaluer l'effet de varier la valeur limite de 10% selon le recommandé par le NRC (2012) pour les porcs en pouponnière (11,9  $\pm$  4,3 kg de poids vif (PV)). À la suite de ces analyses, seules les observations en dessous du besoin en Met<sub>i</sub> ont été retenues de manière à étudier la réponse d'une supplémentation en Met dans des conditions de carence.

### 1.3. Approche 1: Méta-régression

Les différentes ordonnées à l'origine et pentes de la source en Met, ainsi que leurs combinaisons ont été comparées. Une analyse ultérieure sur les sous-ensembles de modèles dérivés au moyen d'une seule ordonnée à l'origine utilisant la fonction "lmer" dans le package lme4 de R a été effectuée. La fonction "relevel" a ensuite servi à changer la source de Met utilisée comme référence pour l'ordonnée à l'origine. Un test t a été effectué pour comparer les pentes des modèles. Les modèles de méta-régression ont été pondérés par la racine carrée du nombre d'observations pour chaque traitement dans chaque étude pour minimiser le biais par rapport aux estimations de l'erreur type de la moyenne (SEM) (Hanigan *et al.*, 2021). Des modèles linéaires ont été utilisés pour étudier la relation entre la supplémentation des différentes formes de Met libre (Met alimentaire totale moins la Met du régime de base) et GMQ supplémentaire (GMQ observé chez les porcs supplémentés moins le GMQ observé chez les porcs nourris avec le régime de base sans Met libre).

#### 1.4. Approche 2: Meta-analyse par taille d'effet

Les études ont été comparées sur la base de taille d'effet de manière à comparer de façon plus équitablement les réponses entre des études de tailles différentes (Dijkstra *et al.*, 2018). Les packages Metafor et Robumeta de R ont été utilisés pour calculer la différence moyenne brute (DMB) et la différence moyenne standardisée (DMS) ainsi que leurs variances respectives. La différence moyenne du GMQ a été calculée comme la différence entre la moyenne des animaux du traitement ayant reçu une supplémentation en Met et la moyenne du traitement de référence pendant. La DMS est égale la DMB divisée écart-type des données des 2 traitements regroupés (Viechtbauer, 2010). La DMS a été utilisée pour générer des graphiques en forêt de la réponse du GMQ à la supplémentation de chaque source de Met en utilisant la fonction «forest» dans le package Metafor de R (Viechtbauer, 2010). Étant donné que les études retenues contiennent plusieurs traitements qui partagent un même régime de référence, elles ne répondent pas à l'une des hypothèses fondamentales de l'analyse de taille d'effet qui par principe requiert que les tailles d'effet soient indépendantes. Par conséquent, la méthode d'estimation robuste de la variance (RVE) a été utilisée pour effectuer l'analyse de l'effet taille en tenant compte de leur dépendance. Des modèles à effets aléatoires et à effets mixtes ont été dérivés à l'aide de la fonction «robu» du package robumeta de R. La variance de la distribution des tailles d'effet réelles ( $\tau^2$ ) et l'hétérogénéité entre les études ( $I^2$ ), c'est-à-dire le pourcentage de variabilité des tailles d'effet qui n'est pas causée par une erreur d'échantillonnage, ont été aussi estimées. Étant donné que les modèles à effets aléatoires présentaient des niveaux élevés d'hétérogénéité, les variables clés de la Met<sub>i</sub>, c'est-à-dire l'apport et la teneur en cystéine (Cys), l'apport et la teneur en Met + Cys, les jours de supplémentation et PV initial ont été testés comme co-variables dans les modèles. Les valeurs de chaque variable explicative continue ont été centrées sur leurs moyennes avant l'analyse pour interpréter les changements de taille d'effet pour chaque source de Met (Dijkstra *et al.*, 2018).

#### 1.5. Approche 3: Efficacité estimée de la Met pour le dépôt de protéines

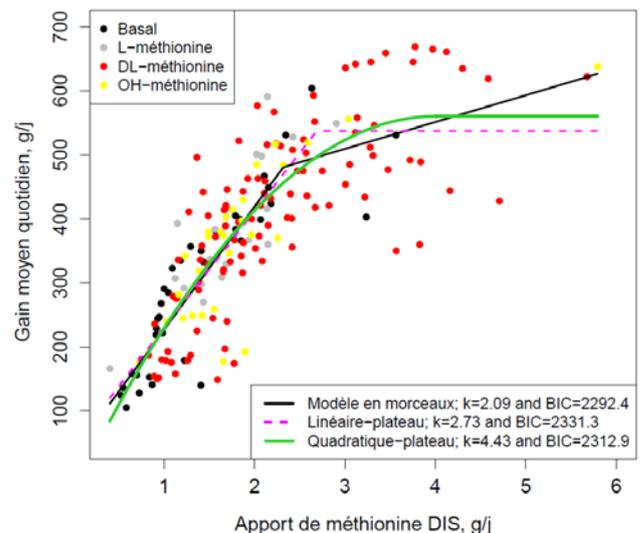
Le dépôt de protéines corporelles a été calculé en supposant une rétention moyenne de 16 g protéines par 100 g de GMQ (de Lange *et al.*, 2003). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) ont été utilisés comme critères de qualité de l'estimation de la PD. Les besoins de Met pour l'entretien (g Met DIS/j) ont été calculés en additionnant les pertes endogènes basales ( $0,087 \text{ g/kg} \times$  apport quotidien en matière sèche), les pertes liées à la desquamation dans le tube digestif ( $0,0010 \text{ g/kg}$  de  $PV^{0,75}$  par jour), et les pertes liées au renouvellement basal des protéines corporelles ( $0,0070 \text{ g/kg}$  de  $PV^{0,75}/j$ ), tel que proposé par van Milgen *et al.* (2008). La rétention de Met a été calculée en supposant que la Met représente 2 % de la PD. L'efficacité d'utilisation de la Met (kMet, %) est le rapport entre la Met retenue et celle disponible pour la croissance (Met ingérée moins l'entretien). Dans cette troisième approche, pour éviter un biais possible dans la Met<sub>i</sub>, déterminé cette étude, des recommandations en Met (NRC, 2012) ont été utilisés pour estimer les besoins en Met de chaque étude. Les traitements dans lesquels les apports de Met<sub>i</sub> était supérieure à 99 % des besoins estimés (9 observations) ont été exclues de l'analyse de kMet. Un modèle mixte a été utilisé pour comparer les sources de Met, et le PV initial moyen et l'ingestion de Cys (Cys, g/j) ont été utilisés comme covariables

dans le package *lmerTest* (Kuznetsova *et al.*, 2017) de R. Des comparaisons multiples de moyennes ont été effectuées à l'aide du test de Tukey avec un intervalle de confiance à 95 % dans le package *emmeans* de R. La kMet a été estimée à l'aide d'une régression mixte linéaire, avec l'étude comme effet aléatoire et le PV initial et l'ingestion de Cys comme covariables. Le  $R^2$  conditionnel a été calculé en tenant compte des effets aléatoires avec le package *RSQ* de R (Agresti, 2018). Le package *Performance* de R (Lüdtke *et al.*, 2021) a été utilisé pour évaluer la normalité de la distribution des résidus.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

### 2.1 Détermination du besoin en méthionine

Le modèle par morceaux a présenté le BIC (2292.4) le plus bas parmi les modèles étudiés (respectivement 2331.3 pour le linéaire-plateau et 2312.9 pour le quadratique-plateau). C'est donc ce modèle qui a été retenu pour déterminer le besoin en Met pour les approches 1 et 2. L'analyse de sensibilité sur le point de rupture (Met<sub>i</sub>) n'a montré aucun changement significatif dans les résultats de méta-régression ni dans le BIC des modèles étudiés. L'apport de 2,09 g/j de Met<sub>i</sub> a été ainsi retenu comme étant le besoin chez le porc de 12 kg PV moyen et il a été utilisé comme référence dans la présente étude (Figure 1).



**Figure 1** – Gain moyen quotidien observé et estimé par les modèles linéaire-plateau (----), quadratique-plateau (----) et pièce-wise (-----) en fonction de l'apport de méthionine chez les porcelets sevrés

### 2.2. Évaluation des effets des sources de méthionine

#### 2.2.1 Méta-régression

Notre travail n'a pas montré de différences entre les pentes de chacune des sources de Met ( $GMQ = 311 \times OH\text{-Met} + 7.90 \times DL\text{-Met} + 5.71 \times L\text{-Met}$  vs  $GMQ = 318.9 \times DL\text{-Met} + 2.19 \times L\text{-Met} + -7.90 \times OH\text{-Met}$  vs  $GMQ = \text{Null } \alpha + 19.0 \times DL\text{-Met} + 24.6 \times L\text{-Met} + 311.0 \times OH\text{-Met}$ ;  $P > 0,10$ ). Cela suggère que l'efficacité d'utilisation de la Met pour le dépôt corporel est similaire entre les sources comme suggéré dans d'autres études (Chung et Baker, 1992). Même après avoir tenu compte de la variabilité du PV initial dans les études utilisées dans cette méta-analyse, les résultats globaux n'ont pas changé pour les différents modèles de régression linéaire à effets mixtes, ce qui confirme l'efficacité similaire des différentes sources de Met libre évaluées dans cette méta-régression.

### 2.2.2. Analyse de taille d'effet

Dans les modèles à effets aléatoires RVE, toutes les sources de Met testées avaient un effet positif sur le GMQ ( $P \leq 0,03$ ). Par rapport aux régimes de référence, l'augmentation moyenne ( $\pm$  écart type) du GMQ pour la DL-Met, L-Met et OH-Met était de  $83,2 \pm 17,7$ ,  $119,0 \pm 39,5$  et  $108,0 \pm 28,3$  g/j, respectivement. En raison de la grande hétérogénéité de la réponse ( $I_2 > 98\%$ ), plusieurs variables explicatives ont été testées dans des modèles de méta-analyse à effets mixtes RVE au sein de chaque source de Met (sous-ensemble). Dans les modèles DMB à effets mixtes avec une variable explicative pour chaque source de Met (DL-Met, L-Met et OH-Met), les variables  $Met_i$  ( $P > 0,10$ ), l'apport de Met + Cys<sub>i</sub> ( $P > 0,10$ ), de Cys<sub>i</sub> ( $P > 0,10$ ), la teneur en Cys (%) ( $P > 0,10$ ), la teneur en Met + Cys (%) ( $P > 0,10$ ) et le PV initial ( $P > 0,10$ ) n'étaient pas significatifs.

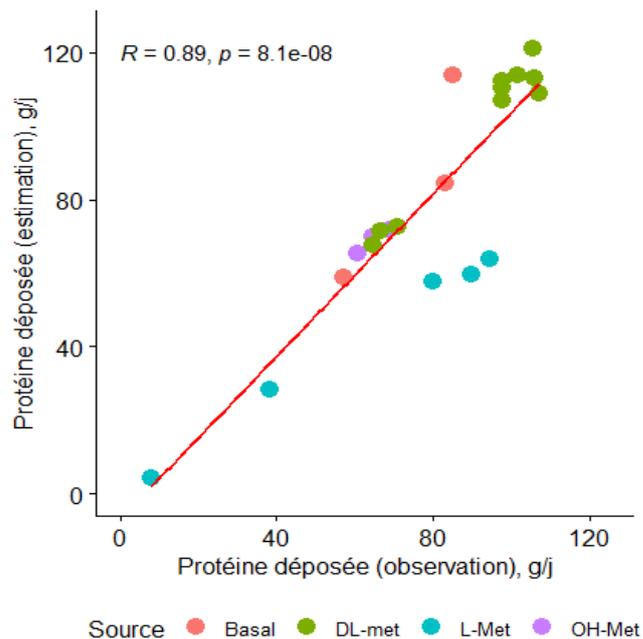
Le concept de taille d'effet a été utilisé différemment dans différents domaines de recherche. Dans cette étude, la taille d'effet fait référence aux résultats des études dans lesquelles les différences entre le groupe traitement et le groupe de référence sont exprimées en DMB ou en DMS (Harrer *et al.*, 2021). Les résultats de l'analyse de la taille de l'effet concordent avec l'analyse de méta-régression montrant que l'ajout de sources de Met libres telles que DL-Met, L-Met ou OH-Met a un effet positif sur le GMQ. Cependant, la taille d'effet des sources de Met n'était pas statistiquement différente. Dans le modèle à effets mixtes RVE étudiant l'impact de la supplémentation de la Met libre au régime de base sur l'augmentation du GMQ de ce dernier régime a réduit le  $\tau_2$  par rapport au modèle à effets mixtes RVE étudiant le rapport entre la  $Met_i$  et le GMQ total. Aussi, les modèles dérivés étudiant la relation entre la  $Met_i$  supplémentaire et GMQ supplémentaire avaient un BIC inférieur par rapport aux modèles dérivés considérant le  $Met_i$  DIS totale. En vue de ces résultats et d'intérêt de ces modèles d'un point de vue statistique (Harrer *et al.*, 2021), cette approche devrait être préférée dans les travaux de méta-analyse servant à évaluer l'efficacité des différentes sources de Met libre, ainsi que d'autres acides aminés.

### 2.2.3. Estimation de l'efficacité d'utilisation de la méthionine

Lors de la détermination des besoins en AA pour les animaux en croissance, la meilleure variable de réponse à utiliser est la PD, car il s'agit de la forme souhaitée d'utilisation métabolique des AA. Néanmoins, peu d'études ont utilisé la PD, ou la rétention d'azote, comme indicateur de réponse à l'apport de Met. Par conséquent, cette valeur a dû être estimée dans la présente étude. Les valeurs estimées de la PD ont été comparées à la PD observée, ce qui a donné un RSME de 1,4 g et une corrélation élevée ( $r = 0,89$ ; Figure 2) entre les variables sur la base de 21 observations (trois études comparables aux autres dans le jeu de données publié en 1999 et 2006). Bien que la proportion de la PD dans le GMQ change en fonction du poids corporel (Remus *et al.*, 2020), l'hypothèse faite dans les calculs de cette étude est que 16 % du GMQ est constitué de protéines semble valide.

La PD estimée (Figure 3) et le GMQ observé ont augmenté avec l'augmentation de  $Met_i$  ( $P < 0,01$ ) tandis que la kMet estimée a diminué marginalement de 19 points par gramme de Met supplémentaire ingéré ( $P < 0,01$ ; Figure 4). Cette pente n'était pas influencée par la source de Met ( $P > 0,05$ ). La  $Met_i$  expliquait à elle seule 22 % ( $R^2$  marginal) de la variance totale de la kMet, tandis que la Cys<sub>i</sub> expliquait 13 % et le PV initial 5 % ( $R^2$  total marginal de 0,40). L'essai, en tant qu'effet aléatoire, a expliqué 50% de la variance restante ( $R^2$  conditionnel de 0,88), les 10 % finaux étant attribués à l'erreur (Figure 4). Chez les porcs recevant le régime de base, l'ingestion de Met était 20 % inférieure, le GMQ 11 % inférieur et kMet 4% plus élevée que

les porcs supplémentés avec des sources de Met (Tableau 1). Il n'y avait aucune différence de  $Met_i$ , PD, GMQ et kMet entre les trois sources de Met.



**Figure 2** – Corrélation de Pearson entre les valeurs<sup>1</sup> observées et estimées chez les porcs (5 à 25 kg de poids corporel) dans trois études (n = 21 animaux)

<sup>1</sup>Le dépôt de protéines a été supposé correspondre à 16 % du gain quotidien moyen.

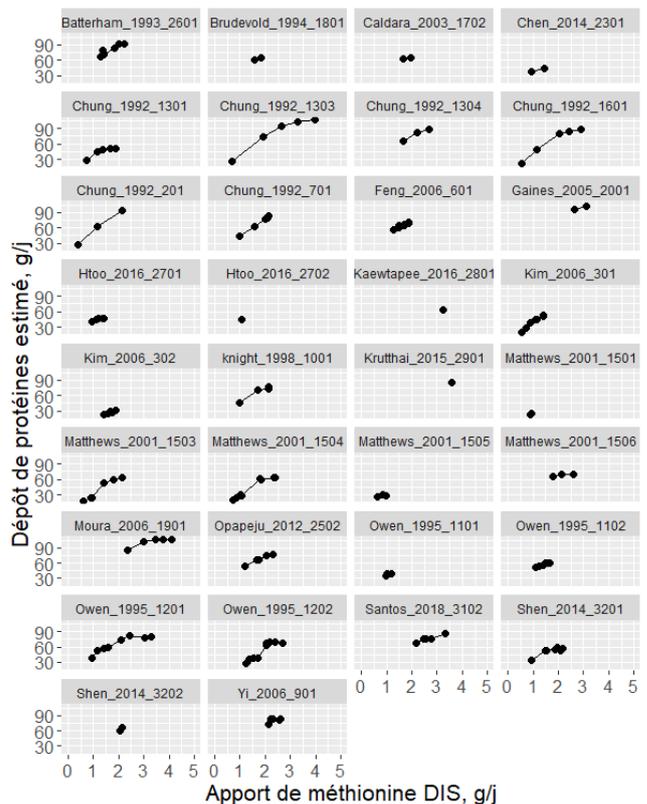
L'efficacité d'utilisation des AA est décrite comme la proportion de chaque augmentation marginale de l'apport en AA qui est déposée sous forme de protéines corporelles (Fatufe et Rodehutsord, 2005). L'efficacité d'utilisation des AA évolue généralement de façon quadratique à l'apport en AA. Ainsi, elle diminue progressivement lorsque les apports se rapprochent se rapprochent du besoin et diminue rapidement et devient nulle lorsqu'on le dépasse (Fatufe *et al.*, 2004). Dans la présente étude, la PD et le GMQ des porcs nourris en dessous du besoin ont augmenté de manière linéaire en fonction de l'apport de  $Met_i$ , tandis que son efficacité, kMet, a diminué de 19 % pour chaque gramme de  $Met_i$  supplémentaire, ce qui est en accord avec la littérature (Moehn *et al.*, 2004 ; Remus *et al.*, 2019). Néanmoins, la kMet moyenne était de 75 %, ce qui est considérablement plus élevée que la valeur (64 %) estimée par van Milgen *et al.* (2008). Cette différence entre les valeurs obtenues dans cette étude et celles de la littérature peuvent être le résultat de plusieurs facteurs : 1) la valeur estimée par van Milgen *et al.* (2008) a été calculée en supposant que le profil protéique idéal est correct pour un porc de 55 kg de PV et en supposant que l'efficacité de la Lys est fixe ; 2) les valeurs de PD ont été obtenues en supposant que la PD représente 16 % du GMQ (présente étude) ; 3) la teneur en Met dans la PD a été supposée constante. En ce qui concerne le premier point ci-dessus, les animaux plus jeunes peuvent être plus efficaces pour utiliser les AA (NRC, 2012) en accord avec les observations sur l'efficacité alimentaire. Le fait que les porcs en pouponnière de 12 kg de PV moyen soient probablement plus efficaces que les porcs de 55 kg, peut expliquer ces différences. En ce qui concerne le deuxième point, la teneur en PD du GMQ diminue avec le poids des animaux. Par exemple, 21 % du GMQ est constitué de PD chez les porcs de 15 kg de PV pendant qu'il n'est que de 14 % pour des porcs de 100 kg de PV (Remus *et al.*, 2020). Supposer un rapport PD/GMQ constant pourrait introduire une erreur de calcul dans l'estimation de kMet.

Finalement, pour le troisième point, lorsque le profil protéique idéal est utilisé (par exemple, point 1), on suppose que les animaux ont une PD avec une composition d'AA constante. Cependant, le profil AA change en fonction de la restriction des AA, et le profil AA de différentes protéines peut être modifié (Conde-Aguilera *et al.*, 2010 ; Remus *et al.*, 2019). Par conséquent, l'hypothèse d'une composition constante de Met dans la PD peut contribuer à augmenter les valeurs de kMet notamment lorsque la teneur en Met dans PD diminue en fonction de la restriction d'AA (Conde-Aguilera *et al.*, 2010). Néanmoins, après avoir considéré tous les facteurs possibles affectant les calculs de kMet, la valeur de 75 % de kMet pour les porcs en post-sevrage semble acceptable et en accord avec des études antérieures (Chung et Baker, 1992). Cependant, il serait convenable d'étudier l'évolution y aurait un besoin de mesurer désormais ces variables au fil du temps afin de mieux estimer les besoins en AA et de formuler des régimes ciblant une rétention maximale des nutriments. Le kMet était similaire parmi les sources de Met examinées. Dans une étude dans laquelle L-Met, DL-Met et OH-Met ont été supplémentées sur une base équimolaire, Rasch *et al.* (2019) ont signalé une reméthylation plus élevée et une trans-sulfuration plus faible dans les régimes déficients et supplémentés en OH-Met par rapport aux régimes supplémentés en L-Met et DL-Met. Néanmoins, la synthèse des protéines s'est avérée favorisée également par les régimes supplémentés en OH-Met, L-Met ou DL-Met. Sur la base de ces résultats, il semble que, bien que les sources de Met utilisent différents transporteurs pour l'absorption (Romanet *et al.*, 2021) et qu'elles utilisent différentes voies métaboliques pour la synthèse des protéines, elles semblent globalement être utilisées avec une efficacité équivalente, ceci en accord avec d'autres résultats de la littérature (Rasch *et al.*, 2019).

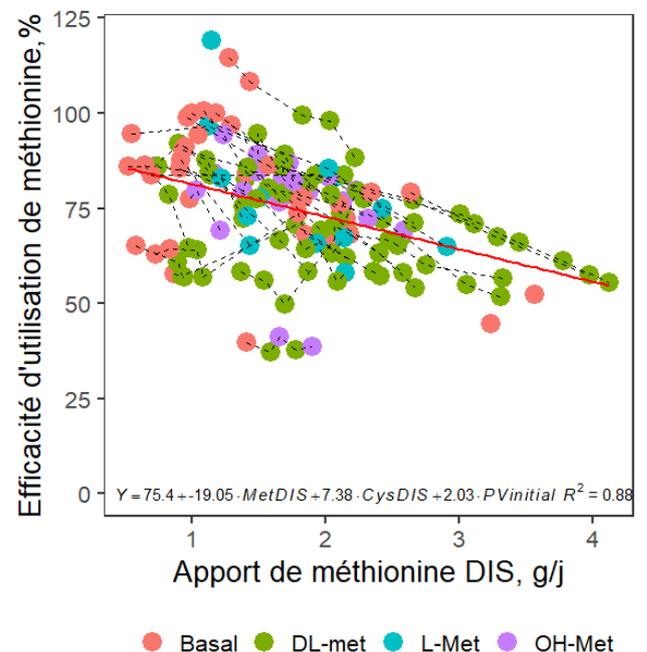
**Tableau 1** – Comparaisons (n = 145) des performances moyennes de croissance des porcs recevant des régimes limitants par rapport à l'apport de méthionine (Met) standardisé iléale digestible (DIS) (99 % ou moins des besoins estimés).

	Basal	Source de méthionine ajoutée				ES M	Valeur de P
		DL-Met	L-Met	OH-Met			
Nb d'observations	36	74	14	21			
Poids vif moyen, kg	12	12	12	12	0,6	0,67	
Consommation de DIS Met, g/j	1,6 <sup>a</sup>	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	0,2	<0,01	
Protéines déposées, g/j	56 <sup>a</sup>	62 <sup>b</sup>	62 <sup>b</sup>	62 <sup>b</sup>	4,2	<0,01	
Efficacité d'utilisation, %	77	75	75	74	3,1	0,33	

<sup>a-b</sup> Les valeurs d'une ligne suivies d'une lettre différente selon le test de Tukey diffèrent avec un probabilité de 5 %. ESM= Erreur Standard Maximale. Modèle statistique présenté sur la figure 4.



**Figure 3** – Dépôt protéique estimé (g/j) en fonction de l'apport de méthionine (Met) digestible iléale standardisé (DIS) chez les porcelets en sevrage (5 à 25 kg de poids vif). Le titre au-dessus de chaque facette nomme le premier auteur, suivi de l'année de publication et du code attribué à chaque essai dans l'article (par exemple, Auteur\_année\_Code).



**Figure 4** – Efficacité d'utilisation de la méthionine (Met) au-dessus de l'entretien en fonction de l'apport de méthionine digestible iléale (SID) standardisé (g/j). Les lignes pointillées relient les observations originales sans traitement statistique.

## CONCLUSION

Le gain moyen quotidien chez les porcelets nourris au niveau, ou en dessous, de leurs besoins en Met ne diffère pas entre les sources de Met libres (DL-Met, L-Met et OH-Met) selon les analyses méta-analytiques et de méta-

régression réalisées dans cette étude. L'efficacité d'utilisation de la Met augmente avec le niveau de carence de cet AA chez les porcs en post-sevrage, indépendamment de la source de Met libre utilisée. L'efficacité moyenne calculée de 75 % est similaire pour les différentes sources de Met libre étudiées.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agresti A., 2018. An introduction to categorical data analysis. Eds, John Wiley & Sons, 394 p., New Jersey, United States.
- Chung T.K., Baker D.H., 1992. Utilization of methionine isomers and analogs by the pig. *Can. J. Anim. Sci.*, 72, 185-188.
- Conde-Aguilera J., Barea R., Le Floc'h N., Lefaucheur L., van Milgen J., 2010. A sulfur amino acid deficiency changes the amino acid composition of body protein in piglets. *Animal*, 4, 1349-1358.
- De Lange C., Morel P., Birkett S., 2003. Modeling chemical and physical body composition of the growing pig. *J. Anim. Sci.*, 81, E159-E165.
- Dijkstra J., Bannink A., France J., Kebreab E., van Gastelen S., 2018. Short communication: antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *J. Dairy Sci.*, 101, 9041-9047.
- Fatufe A.A., Rodehutsord M., 2005. Growth, body composition, and marginal efficiency of methionine utilization are affected by nonessential amino acid nitrogen supplementation in male broiler chicken. *Poult. Sci.*, 84, 1584-1592.
- Fatufe A.A., Timmler R., Rodehutsord M., 2004. Response to lysine intake in composition of body weight gain and efficiency of lysine utilization of growing male chickens from two genotypes. *Poult. Sci.*, 83, 1314-1324.
- Hanigan M.D., Souza V.C., Martineau R., Daley V.L., Kononoff P., 2021. Predicting ruminally undegraded and microbial protein flows from the rumen. *J. Dairy Sci.*, 104, 8685-8707.
- Harrer M., Cuijpers P., Furukawa T.A., Ebert D.D., 2021. Doing meta-analysis with R: a hands-on guide. Eds, Chapman and Hall/CRC, 500 p., Boca Raton, United States.
- Hedges L.V., Tipton E., Johnson M.C., 2010. Robust variance estimation in meta-regression with dependent effect size estimates. *Res. Synth. Methods*, 1, 39-65.
- Kuznetsova A., Brockhoff P.B., Christensen R.H.B., 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *J. Stat. Softw.*, 82, 1-26.
- Lüdecke D., Ben-Shachar M.S., Patil I., Waggoner P., Makowski D., 2021. performance: An R package for assessment, comparison and testing of statistical models. *J. Open Source Softw.*, 6, 3139.
- Moehn S., Ball R.O., Fuller M.F., Gillis A.M., De Lange C.F.M., 2004. Growth potential, but not body weight or moderate limitation of lysine intake, affects inevitable lysine catabolism in growing pigs. *J. Nutr.*, 134, 2287-2292.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine. Eds, National Academy Press, Washington, DC, 420 p.
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372, n71.
- Pomar C., Andretta I., Remus A., 2021. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Front. Vet. Sci.*, 8, 742220.
- Rasch I., Görs S., Tuchscherer A., Htoo J.K., Kuhla B., Metges C.C., 2019. Substitution of dietary sulfur amino acids by DL-2-hydroxy-4-methylthiobutyric acid increases remethylation and decreases transsulfuration in weaned piglets. *J. Nutr.*, 149, 432-440.
- Remus A., Hauschild L., Methot S., Pomar C., 2020. Precision livestock farming: real-time estimation of daily protein deposition in growing-finishing pigs. *Animal*, 14, 360-370.
- Remus A., Hauschild L., Corrent E., Létourneau-Montminy M.-P., Pomar C., 2019. Pigs receiving daily tailored diets using precision-feeding techniques have different threonine requirements than pigs fed in conventional phase-feeding systems. *J. Anim. Sci. and Biotechnol.*, 10, 16.
- Romanet S., Aschenbach J.R., Pieper R., Zentek J., Htoo J.K., Whelan R.A., Mastroianni L., 2021. Expression of proposed methionine transporters along the gastrointestinal tract of pigs and their regulation by dietary methionine sources. *Genes Nutr.*, 16, 14.
- Sauer N., Emrich K., Piepho H.-P., Lemme A., Redshaw M., Mosenthin R., 2008. Meta-analysis of the relative efficiency of methionine-hydroxy-analogue-free-acid compared with DL-methionine in broilers using nonlinear mixed models. *Poult. Sci.*, 87, 2023-2031.
- Tipton E., Pustejovsky J.E., 2015. Small-sample adjustments for tests of moderators and model fit using robust variance estimation in meta-regression. *J. Educ. Behav. Stat.*, 40, 604-634.
- van Milgen J., Dourmad J.-Y., 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 6, 1.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.-Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.
- van Milgen J., Batouon-Alavo D.I., Mercier Y., Ferrer R., Toscan A., Martin-Venegas R., 2019. The cost of the conversion of L-methionine precursors in mammals and birds. In: EAAP Scientific Series (Eds), 3195-3202. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands.
- Viechtbauer W., 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *J. Stat. Softw.*, 36, 1-48.