



Impacts du seigle hybride dans l'alimentation des truies en gestation et en début de lactation sur les performances de reproduction et le microbiote intestinal des truies et leurs porcelets

Mémoire

Leila Mazroua

Maîtrise en sciences animales - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada



Impacts du seigle hybride dans l'alimentation des truies en gestation et en début de lactation sur les performances de reproduction et le microbiote intestinal des truies et leurs porcelets

Mémoire

Leila Mazroua

Sous la direction de :

Frédéric Guay, directeur de recherche

Maitrise en sciences animales - avec mémoire

Québec, Canada

Leila Mazroua, 2024

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

L'objectif de ce projet était de déterminer les effets du seigle hybride dans l'alimentation des truies gestantes sur leurs performances reproductrices à la parturition et au sevrage ainsi que sur leur microbiote et celui de leurs porcelets. À cette fin, 245 truies ont été réparties en 4 traitements alimentaires de la saillie jusqu'à la 1^{ère} semaine de lactation. Les régimes étaient : Témoin : maïs, drèche de maïs, tourteau de soja (10 % NDF) ; Fibre : maïs, drèche de maïs plus écaille d'avoine et remoulage de blé (20 % NDF) ; Seigle 30 % : seigle, maïs, drèche de maïs, remoulage de blé, écaille d'avoine (20 % NDF) ; Seigle 60 % : seigle, drèche de maïs, écaille d'avoine (20 % NDF). Aux 28 et 110^{ème} jours de gestation des prélèvements sanguins ont été effectués sur les truies. Des prélèvements fécaux ont été effectués 7 jours après la parturition sur les truies et trois porcelets par portée. Aucun effet sur les performances reproductrices n'a été signalé, à l'exception du pourcentage de mort-nés et du pourcentage de morts naissance-24h, qui ont été réduit et augmenté par le traitement Fibre ($P < 0,05$). Pour les truies, seulement le gain de l'épaisseur de gras dorsal en gestation était plus faible pour le traitement Seigle30 ($P < 0,05$), respectivement. Aucun impact des traitements n'a été observé pour le gain de la portée au sevrage. Parmi les analyses sanguines effectuées, seulement le propionate et le butyrate avant la mise-bas étaient plus élevés pour le Seigle60 ($P < 0,05$). L'analyse du microbiote a montré que les porcelets du groupe Témoin avait une alpha diversité inférieure aux autres traitements ($P < 0,05$). Les traitements Fibre, Seigle30 et 60 ont mené une augmentation des *Prevotellaceae* chez la truie ce qui a mené à une hausse de cette famille chez leurs porcelets ($P < 0,05$). En conclusion, l'ajout de 30 ou 60 % de seigle à l'alimentation de la truie pendant la gestation et le début de la lactation n'a pas affecté les performances de reproduction des truies à la mise-bas ou au sevrage mais la supplémentation en fibre provenant du seigle en gestation a modifié le microbiote des truies et son établissement chez leurs porcelets en début de lactation.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE.....	II
TABLE DES MATIÈRES.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	IX
REMERCIEMENTS.....	XI
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
1 Alimentation de la truie en gestation :.....	4
1.1 Les besoins d'entretiens : Énergie et acides aminés :.....	5
1.2 Les besoins de la croissance maternelle :.....	7
1.3 Les besoins de reproduction :.....	12
1.4 Application des besoins en énergie et en lysine en gestation :.....	15
1.5 Conclusion :.....	19
2 Les fibres alimentaires dans l'alimentation de la truie gestante :.....	20
2.1 Digestibilité et encombrement gastrique :.....	21
2.2 Les types de la fibre alimentaire :.....	22
2.2.1 Méthode des fibres brutes :.....	22
2.2.2 La méthode de la fibre détergente neutre (NDF) et la fibre détergente acide (ADF) :.....	23
2.2.3 La méthode d'analyse des NSP : soluble et insoluble :.....	23
2.3 Sources de la fibre alimentaire :.....	27
2.4 Les effets de la fibre sur le tube digestif et la santé intestinale :.....	27
2.5 Restriction alimentaire des truies pendant la gestation en incorporant la fibre dans les régimes alimentaires :.....	30
2.5.1 Approvisionnement énergétique restreint des truies pendant la gestation.....	31
2.5.2 Effets de l'utilisation de la fibre en gestation et conséquences sur les performances de la reproduction.....	31
2.6 Comportement d'ingestion et satiété :.....	33
2.6.1 Les comportements stéréotypés :.....	34
3 Les céréales à paille.....	35
3.1 L'avoine :.....	35
3.2 Le blé :.....	36

3.3	L'orge	37
3.4	Le triticale :.....	37
3.5	Le seigle :	38
3.6	Recours à l'utilisation du seigle hybride dans l'alimentation animale :.....	38
3.6.1	Caractéristiques du seigle hybride :	39
3.6.2	Production et caractéristiques agronomiques :	39
3.6.3	Composition chimique :	40
3.6.4	Biovars génomique et effet de l'ergot :	42
3.6.5	Digestibilité et valeur du nutriment énergétique :.....	43
3.6.6	Effet prébiotique du seigle :.....	45
3.6.7	La caractérisation des effets des fibres alimentaires du seigle :.....	45
3.6.8	Effets physiologiques des fructanes comme prébiotiques :.....	46
3.6.9	Les arabinoxylanes :.....	47
3.6.10	Les céréales renfermant les arabinoxylanes :	47
4	Microbiote intestinal	48
4.1	Définition et composition du microbiote :.....	48
4.2	Mise en place et développement du microbiote intestinal	51
4.2.1	Transfert intra-utérin pendant la naissance et après la naissance :.....	51
4.2.2	Contamination des porcelets par le microbiote vaginal et fécal de la truie/ Facteurs d'influence (microbiote fécal de la truie, le colostrum et le lait)	53
4.3	La manipulation du microbiote intestinal de la truie :.....	54
4.4	Développement du microbiote de la lactation au sevrage :	55
4.4.1	L'influence de l'exposition environnementale sur le microbiote intestinal des porcelets :.....	56
4.4.2	L'adoption des porcelets en lactation :.....	56
4.4.3	Le génome et la race :	57
4.4.4	L'âge des porcs :.....	59
4.4.5	Les antibiotiques en début de vie :.....	60
4.5	Conclusion sur le microbiote :	62
CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES		63
5	Animaux et traitements alimentaires appliqués :	63
5.1	Site expérimental et animaux :.....	63
5.2	Collecte des données au CDPQ :	64
5.3	Les traitements alimentaires :	65

5.4	Les prélèvements :.....	68
5.5	Les analyses du laboratoire :.....	68
5.6	Les analyses statistiques :.....	69
Chapitre III : RÉSULTATS ET DISCUSSION		71
6	Les performances de reproduction et croissance de la portée :.....	71
6.1	Consommation en gestation et croissance de la truie en gestation :.....	74
6.2	Les performances de la truie en lactation :	75
6.3	Les paramètres sanguins :.....	76
6.4	Analyse du microbiote des truies et des porcelets :.....	77
6.5	DISCUSSION.....	88
CONCLUSION		99
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définition des fibres alimentaires et des polysaccharides dans les aliments... 25	25
Tableau 2 : Effets des fibres alimentaires sur certains aspects de la production porcine : 29	29
Tableau 3 : Impacts des antibiotiques sur le microbiote et la santé des porcelets en bas âge 61	61
Tableau 4: Composition des aliments expérimentaux utilisés lors de l'essai. 65	65
Tableau 5 : Teneur des éléments nutritifs des aliments utilisés lors de l'essai. 66	66
Tableau 6 : Quantité quotidienne d'aliment distribuée aux truies de parité 1 depuis la saillie jusqu'au 28 ^{ème} jour de gestation pour les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60..... 67	67
Tableau 7 : Quantité quotidienne d'aliments distribuée aux truies des parités 2 et plus depuis la saillie jusqu'au 28 ^{ème} jour de la gestation et de 29 à 50 jours de gestation pour les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60..... 67	67
Tableau 8 : Résultats des performances de reproduction de truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation. 72	72
Tableau 9 : Les performances de croissance des portées en lactation provenant de truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation. 73	73
Tableau 10 : Consommation alimentaire de truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation..... 74	74
Tableau 11 : Poids des truies pendant la gestation, à la mise-bas et pendant la première semaine de lactation pour des truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation. 75	75
Tableau 12 : La consommation alimentaire des truies en lactation pour des truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation..... 76	76
Tableau 13: Les paramètres sanguins des truies au 28 ^{ème} jour de gestation pour des truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation 77	77
Tableau 14 : Les paramètres sanguins des truies avant la mise-bas ainsi que la concentration en IgG dans le colostrum et dans le plasma de leurs porcelets à 7 jours d'âge pour des truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation 78	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Augmentation des dépôts protéiques (g) dans les glandes mammaires et les besoins associés au fœtus au cours de la gestation chez la truie (NRC; 2012).	14
Figure 2 : Teneur en protéines chez le fœtus pendant la gestation, le gain en accréation protéique 0,25 g vs 4,63g/j) (McPherson et al. 2004).....	15
Figure 3 : Besoins prédits en lysine digestible(SID Lys; g/j) des truies de première et quatrième parité normales et hyper-prolififiques pendant la gestation selon le NRC (2012) avec les paramètres et les programmes d'alimentation commerciale suivants : poids corporel de la truie à la reproduction, 140 kg (1 ^{ère} parité normale; A), 145 kg (1 ^{ère} parité hyper-prolififique ; B), 230 kg (4 ^{ème} parité normale ; C), 243 kg (4 ^{ème} parité hyper-prolififique ; D); Taille prévue de la portée 13 porcelets (truies normales; A et C) ou 14 porcelets (hyper-prolififique; B et D) et le poids moyen prévu à la naissance, 1,4kg/porc.....	17
Figure 4 : Les besoins normalisés en Lys digestibles (SID lysine, g/j) prévus pour les cochettes et les truies du J5 à J108 de gestation (Thomas et al. 2021).....	18
Figure 5 : besoins énergétiques prévus (EM, kcal/j) des truies de première et quatrième parité normales ou hyper-prolififiques pendant la gestation selon (NRC 2012) avec les paramètres et les programmes d'alimentation commerciale suivants : poids corporel de la truie à la reproduction, 140 kg (1 ^{ère} parité normale; A), 145 kg (1 ^{ère} parité hyper-prolififique ; B), 230 kg (4 ^{ème} parité normale ; C), 243 kg (4 ^{ème} parité hyper-prolififique ; D); Taille prévue de la portée 13 porcelets (truies normales; A et C) ou 14 porcelets (hyper-prolififique; B et D) et le poids moyen prévu à la naissance, 1,4kg/porc (Solà-Oriol et Gasa 2017)	19
Figure 6 : Classification analytique des polysaccharides végétaux (NRC 2012).....	24
Figure 7 : Composition du microbiote fécal au jour 7 de lactation : a) au niveau du phylum; b) au niveau de la famille des truies nourris avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation. Témoin : Témoin; Fibre : 20 % de NDF; Seigle30 : 20 % de NDF avec 30 % de seigle; Seigle60 : 20 % de NDF avec 60 % de seigle.....	79
Figure 8 : : Diversité alpha estimée par les paramètres a) Observed, b) Chao1 c) Shannon et d); e) beta diversité estimée par Bray-Curtis du microbiote fécal des truies nourris en gestation avec CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle).....	81
Figure 9 : Abondance relative des familles a) Prevotellaceae, b) Christensenellaceae, c) Muribaculaceae, d) Erysipelatoclostridiaceae, e) Selenomonadaceae du microbiote fécal des truies nourris en gestation avec les traitements CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle). ^{a,b} Les valeurs avec différents exposants diffèrent significativement (P <0,05).	83
Figure 10 : Composition du microbiote fécal des porcelets a) au niveau du phylum; b) au niveau de la famille. Traitement des truies en gestation. Témoin: Témoin; Fibre : 20 % de NDF; Seigle30 : 20 % de NDF avec 30 % de seigle; Seigle60 : 20 % de NDF avec 60 % de seigle.	84

Figure 11 : Diversité alpha estimée par les paramètres a) Observed, b) Chao1 c) Shannon d) Simpson; b) bêta diversité estimée par Bray-Curtis du microbiote fécal des porcelets provenant de truies nourris en gestation avec CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle)..... 86

Figure 12 : Abondance relative des familles a) Muribaculaceae b) Prevotellaceae, c) Rikenellaceae, d) Butyricocccaceae du microbiote fécal des porcelets provenant de truies nourris en gestation avec les traitements CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle). ^{a, b} Les valeurs avec différents exposants diffèrent significativement ($P < 0,05$); ^{A, B} Les valeurs avec différents exposants tendent à être différentes ($P < 0,10$). 87

LISTE DES ABRÉVIATIONS

%	: Pourcentage
ADF	: Fibres détergentes acides (Acid Detergent Fiber en anglais)
ADN	: Acide Désoxyribonucléique
AGCC	: Acides Gras à Chaîne Courte
AGV	: Acides gras volatils
ARN	: Acide Ribonucléique
ASF	: Alimentation Automatique des Truies
BW	: Body Weight (Poids Corporel)
CDPQ	: Centre de Recherche du Porc à Québec
CECEPA	: Centre d'étude et de conseil en économie et politique agricole.
CECPA	: Centre d'étude et de conseil en production animale.
CERS	: Canada Emergency Rent Subsidy
Cm	: Centimètre
CNRC	: Conseil National de la Recherche du Canada
DDGS	: Drêches séchées de distillerie avec solubles (Distillers Dried Grains Solubles).
DF	: Dietary Fiber (Fibres Alimentaires en anglais)
DIN	: DNA Integrity Number (Numéro d'intégrité de l'ADN)
DNA	: Acide désoxyribonucléique
DP	: Dépôt protéique
DL	: Dépôt lipidique
EM	: Énergie Métabolisable
Eme	: Énergie métabolisable pour l'entretien
Ermf	: Énergie retenue dans les tissus maternels sous la forme de lipides
Ermp	: Énergie retenue dans les tissus maternels sous la forme de protéines
Eru	: Énergie retenue dans les contenus utérins
ETEC	: Enterotoxigenic E. Coli
FAO	: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FC	: Fibres Crues
FDI	: Fibres alimentaires (Dietary) Insoluble
FDS	: Fibres alimentaires (Dietary) Soluble
FT	: Fibres totales
FRAP	: Ferric Reducing Ability of Plasma
FTU	: Unité de libération de phosphore inorganique par minute
g	: Grammes
G\$: Milliards de dollars (abrégé en G pour "giga" en système international)
g/kg	: Grammes par kilogramme
GE	: Gross Energy
GIT	: Tractus Gastro-Intestinal
Ha	: Hectares
HITChip	: Phosphore
IgA	: Immunoglobuline A

IgG	: Immunoglobuline G
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
Kcal	: Kilocalories
Kcal/j	: Kilocalories par jour
Kcal/k g	: Kilocalories par kilogramme
Kcal	: Kilocalorie
Kf	: Efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable pour les dépôts de lipides
Kg	: Kilogrammes
KJ	: Kilojoules
Kp	: Efficacité d'utilisation de l'EM pour les dépôts de protéines
Ku	: Efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable pour les dépôts utérins
L	: Litre
MAPAQ	: ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
MDA	: Malondialdéhyde
mg/kg	: Milligramme par kilogramme
Mha	: Millions d'hectares
MJ	: MégaJoules
MJEM	: MégaJoules d'Énergie Métabolisable
MS	: Matière Sèche
NDF	: Neutral Detergent Fiber (Fibre détergente neutre)
NEF	: Fibres Également Neutres
NRC	: Conseil national de recherche (National Research Council)
NSP	: Polysaccharides non amylacés (Non-Starch Polysaccharides en anglais)
ONIC	: Office National Interprofessionnel des Céréales
PDIE	: Protéines Digestibles dans l'Intestin Grêle et Absorbables
PDIN	: Protéines Digestibles dans l'Intestin Grêle
pH	: Potentiel Hydrogène
PNA	: Polysaccharides non amylacés
PV^{0,75}	: Poids Vif à la puissance 0,75
SBH	: Farine de son d'avoine (Soluble and Insoluble Oat Hulls en anglais)
SID	: Standard d'Acides Aminés Digestibles (Standardized Ileal Digestible)
Lys	: Lysine Iléale Digestible
TCI	: Température Critique Inférieure
TGI	: Tractus Gastro-Intestinal
UFC/g	: Unité fourragère calorique par gramme
UFL	: Unités Fourragères Lait
UMV	: Université de Médecine Vétérinaire

REMERCIEMENTS

De prime abord, je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, M. Frédéric Guay, pour son accompagnement, son soutien, sa qualité humaine supérieure et sa pédagogie tout au long de ma maîtrise. Sans son aide, mon travail de recherche n'aurait jamais vu le grand jour. Merci de m'avoir octroyé cette chance et de m'avoir accompagné jusqu'au là.

Je tiens par la même occasion à remercier Mr Anthony T. Vincent pour son accueil aimable et ses explications pertinentes et précieuses ayant trait à la partie microbiote de mon projet de recherche.

Un merci spécial à mes amis Abdelouahid Dahmani et Ajjoutti Mohammed pour leurs soutiens sincères et leurs présence et disponibilité durant toute ma maîtrise.

Merci au personnel de laboratoire de la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval et à notre technicienne animalière Annick. Je tiens à remercier particulièrement M. Luca pour son aide précieuse, particulièrement au laboratoire.

Merci aux étudiantes et étudiants qui m'ont porté de l'aide et d'encouragement et le plus gros merci serait pour ma collègue et ma chère amie Rihab Nefzaoui pour son aide scientifique technique et humaine.

Finalement, le plus gros merci à mes parents qui m'ont soutenue et m'ont payé les études. Sans votre appui, votre amour et vos encouragements, je ne serais guère là où je suis aujourd'hui. Je vous exprime toute ma gratitude, mon amour et quoi que je fasse je ne saurais pas vous exprimer à quel point je vous aime.

INTRODUCTION

La production porcine est un secteur agroalimentaire important au Québec se classant au second rang après la production laitière (MAPAQ, 2019). Ainsi l'industrie porcine s'est dotée d'une structure qui comprend à la fois l'élevage, l'abattage ainsi que la transformation de près de 100 % de la production porcine québécoise. En 2021, le volume de cette production était estimé à 7,1 millions de têtes générant ainsi 1,4 \$ milliard des recettes provenant du marché et 4,3 \$ milliards des recettes provenant de la transformation (Statistique Canada, 2021). Le Québec se place donc premier producteur de porcs d'abattage au Canada avec une production couvrant 25 à 35 % de la production du pays. Il faut noter que le taux d'autosuffisance en production porcine au Canada était de 268 % en 2014 (MAPAQ, 2019). La contribution de cette production aux activités économiques est prépondérante, notamment en termes de création d'emplois où plus de 31 000 emplois sont maintenus dans toutes les régions du Québec.

Le Québec était le cinquième plus grand exportateur mondial de viande de porc réfrigérée et congelée. En 2021, la valeur des exportations de viande de porc du Québec a dépassé 1,63 \$ milliard. Environ 70 % de la production porcine du Québec est donc destinée à l'exportation, ce qui représentait environ 8 % du commerce mondial de la viande de porc. Ces exportations ont eu un impact économique de 3,36 \$ milliards. Au Canada, les exportations de viande porcine représentaient 7 % du commerce international du porc en volume et en valeur. Les producteurs/transformateurs canadiens de viande porcine ont exporté 1,2 million de tonnes de porc et de produits de porc dans 94 pays (Centre de commerce international, 2019). Selon le Conseil Canadien du Porc, la production porcine rapporte environ 9,8 \$ milliards chaque année.

Plusieurs facteurs sont tributaires à l'évolution de l'élevage porcin au Québec. L'alimentation des truies gestantes pour le système d'élevage en maternité représente une part importante et volatile des coûts de production. Selon le CECPA en 2017, le facteur principal de variation des coûts de production est l'alimentation. Le pilotage des performances de reproduction des truies gestantes et l'optimisation des coûts de production imposent une évolution constante

des pratiques d'élevage, incluant le coût d'alimentation des truies (Pomar et al. 2009). À l'égard de ce constat, le secteur porcin se retrouve dans une situation complexe incluant le défi économique d'une part, et l'optimisation des performances reproductrices de l'autre. La recherche de sources nutritionnelles alternatives à moindres coût, et l'adoption de certaines stratégies alimentaires conçues pour chaque type de production (engraissement, pouponnière et maternité) s'avèrent des moyens d'optimisation des performances (Bee 2017; Abd El-Wahab et al. 2020).

Il est communément connu, que les truies reproductrices sont nourries de façon à maintenir un état corporel satisfaisant tout au long de leur cycle de la reproduction. Ainsi, la surcharge pondérale pendant la mise-bas ainsi que l'épuisement des réserves corporelles lors de la lactation mènent à une altération des performances reproductrices (Dourmad et al. 1996). En pratique, les truies sont rationnées afin d'éviter un état d'engraissement excessif qui peut être nuisible à la parturition et pendant la lactation (Gaillard et al. 2021). En effet, la restriction alimentaire de la truie en gestation est une pratique d'élevage habituellement adoptée par une meilleure gestion des besoins nutritionnels en vue d'un bon déroulement de la mise-bas et pour assurer ainsi la longévité de la truie. Les truies restreintes pendant la gestation, reçoivent généralement une alimentation riche en fibres qui contribue à la prévention des désordres métaboliques et nutritionnels, améliore leur bien-être et leur santé tout en réduisant l'incidence des comportements stéréotypés (Massé et al. 2003).

Ainsi, les régimes riches en fibres contribuent à l'amélioration de la santé des truies (Jha et Berrocoso 2015) et à une réduction du taux des porcelets mort-nés (Feyera et al. 2017). Ils existent plusieurs sources de fibres qui sont utilisées en alimentation de la truie gestante dans l'optique d'une optimisation des coûts de production et du maintien des performances reproductrices. Le prix des céréales conventionnelles utilisées en alimentation porcine tel que (le blé et le maïs) varie constamment. Ces variations du prix de ces matières premières restent relatives à l'augmentation accrue de la demande en alimentation humaine et en production des biocarburants (Woyengo et al. 2014).

Le seigle hybride est l'une des céréales à pailles pouvant être utilisées en alimentation porcine. De récentes recherches ont montré la comparabilité des performances des truies

ayant reçu des régimes alimentaires à base du seigle hybride pendant la gestation, à celles à base d'orge et de blé (McGhee et Stein 2023). Le recours à l'utilisation des nouvelles variétés hybrides de seigle serait favorisé par la réduction de leur contenu en facteurs antinutritionnels et la diminution du risque de leur infection par l'ergot, qui est une maladie causée par des champignons du genre *Calviceps*. *Calviceps purpurea* qui infectent les jeunes ovaires du seigle généralement non fécondés, remplaçant les graines par des masses mycéliennes sombres appelées sclérotés (McGhee et Stein 2021).

Le présent mémoire de maîtrise aborde l'étude du seigle hybride en alimentation des truies gestantes et son effet sur leurs performances reproductrices et la croissance de leurs portées. Pour concrétiser ce projet de recherche, dans un premier ordre, une revue de littérature qui couvre l'alimentation, l'approvisionnement énergétique restreint, l'ajout de fibres alimentaires aux régimes des truies gestantes et le recours à l'utilisation du seigle hybride et son effet sur le microbiote intestinal et les performances reproductrices des truies gestantes, a été présentée. Dans un second ordre, une description de l'expérience, suivi par la présentation des résultats et du modèle statistique utilisé en analyse des données tout en mettant l'emphase sur l'effet d'ajout du seigle hybride sur les performances reproductrices de la truie et de sa portée, a été détaillée. Une discussion des résultats a été présentée et suivie par une conclusion générale en dernière partie de ce mémoire.

CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE.

1 Alimentation de la truie en gestation :

Les truies reproductrices en gestation sont régulièrement nourries pour maintenir une condition corporelle relativement constante tout au long du cycle de reproduction (Dourmad et al. 1996). Il est donc essentiel de choisir les régimes alimentaires en fonction de ces objectifs de production, et du potentiel génétique ainsi que du stade de gestation pour favoriser la croissance des fœtus, le développement de la truie en croissance et l'entretien des tissus. De plus, l'alimentation pendant la gestation assure le développement des tissus mammaires, ce qui est essentiel pour la production laitière. Le processus de reproduction, de la conception à la mise-bas, peut être considéré comme un processus visant à assurer le développement de la progéniture tout en assurant le maintien et l'intégrité des tissus maternels. Ce processus implique ainsi l'homéostasie et la répartition des nutriments entre les tissus maternels et les tissus reproducteurs, incluant les fœtus en développement ainsi que les tissus mammaires (Theil et al. 2022).

Afin de modéliser la répartition des nutriments et donc des besoins dans les différents tissus, différents modèles ont été proposés au cours des années (Dourmad et al. 2008; ; NRC 2012). Ces modèles pour la plupart divisent les besoins de la truie en gestation en trois parties : besoins d'entretien, besoins pour la croissance de la truie et besoins pour la croissance des tissus reproducteurs (fœtus et tissus mammaires). Par exemple, Dourmad et al. (2008) dans le modèle Inra Porc® définissent la truie comme étant un ensemble de compartiments, qui se retrouvent en évolution sans cesse tout au long de la gestation (les protéines et lipides corporelles [poids corporels], l'utérus, les glandes mammaires, et l'entretien), et les nutriments sous la forme de flux (Dourmad et al. 2017).

Pour une truie gestante, les besoins d'entretien se trouvent au sommet des priorités suivi par ceux associés à la croissance de la portée, du développement mammaire et du gain corporel de la truie. En fonction de cet ordre de priorisation, une multitude de stratégies alimentaires peut être proposée en fonction des performances reproductrices projetées, des conditions d'élevage et de la croissance prévue de la truie (Tokach et al. 2019). Bien qu'il soit possible

de définir les besoins de tous les nutriments, dans les prochaines sections, nous allons traiter particulièrement des besoins en énergie métabolisable (EM) et en acides aminés digestibles, en utilisant la lysine comme exemple (Tokach et al. 2019).

1.1 Les besoins d'entretiens : Énergie et acides aminés :

Besoin d'entretien en énergie : Les besoins énergétiques d'entretien sont définis comme les besoins permettant à l'animal de se maintenir en vie. Ils correspondent donc à l'ensemble des activités vitales du fonctionnement de l'organisme (circulation sanguine, respiration, activité musculaire minimale, thermorégulation, homéostasie acido-basique, digestion et l'élimination des déchets). Ils sont définis par la quantité d'énergie ingérée par un animal n'entraînant ni gain ni perte d'énergie corporelle. Les besoins énergétiques d'entretien de la truie pendant la gestation sont dépendants de trois principaux critères, soit le poids corporel, le niveau d'activité de la truie et la thermorégulation. Pendant la gestation, les besoins énergétiques d'entretien de la truie ont la prépondérance par rapport aux besoins totaux et évolue principalement en fonction du poids corporel de la truie. Ce poids de la truie dépend en grande partie de son rang de portée et varie également au cours de la gestation (Dourmad et Noblet 1996).

À partir du poids corporel, il est donc possible d'établir les besoins énergétiques de base d'entretien qui varie entre 420 et 440 kJ EM/kg PV^{0,75} où PV est le poids corporel de la truie (Dourmad et al. 2008). Dourmad et al. (2008) et NRC (2012), ont retenu une valeur moyenne de 440 kJ EM/kg PV^{0,75} considérant que cette valeur inclut en plus de l'entretien de base une moyenne de 4 heures/jour où la truie est debout. Une majeure partie des besoins énergétiques d'entretien évoluera donc selon le poids de la truie tout au long des cycles de la reproduction et donc des parités successives (NRC 2012).

En plus du poids, la température ambiante ainsi que le mode de logement (individuel, collectif, litière, utilisation de paille) impactent les besoins énergétiques d'entretien chez la truie gestante. Une température critique inférieure (TCI) a été fixée à 20 °C pour des truies logées individuellement par Noblet et al. (1989). Quant aux truies logées en groupe, une réduction de la TCI à 14 °C a été proposée par Noblet et al. (1989). En dessous de la TCI, les

besoins énergétiques d'entretien augmentent respectivement de 8 à 15 kJ EM °C⁻¹· kg de PV^{0,75} pour les truies logées en groupe ou individuellement.

Composantes des besoins énergétiques associés à l'entretien: Dans les conditions de thermoneutralité, les truies adultes non gestantes ayant un niveau d'activité nul et nourries à un niveau d'énergie de maintien, produisent de la chaleur à un niveau moyen de 260 kJ/kg PV^{-0,75}. Elle représente la première composante de la production de chaleur pendant la privation des aliments. L'énergie supplémentaire est relative à l'activité physique des truies. Cette activité physique est relative à la position de la truie debout ou couchée, où la production de chaleur s'élève à 0,30 kJ kg PV^{-0,75} par jour pour chaque minute passée debout par rapport à l'activité de base (Dourmad et al. 2008). De ce fait, le temps passé debout des truies s'avère un élément crucial pour l'estimation des besoins d'entretien des truies gestantes. Sur une durée de 24 heures, l'activité physique, qui est mesurée par la position debout, est généralement estimée à 4 heures/jour et représente environ 17 % de la production de chaleur à l'entretien (Noblet et al. 1997). La composante suivante des besoins d'entretien est représentée par l'effet thermique de l'alimentation avec une moyenne estimée à 75 kJ/kg PV^{-0,75} par jour.

Besoin d'entretien en lysine : Les principaux déterminants des besoins en acides aminés qui sont pris en compte dans le modèle de truie gestante comprennent : les pertes gastro-intestinales endogènes basales, qui sont liées à la prise alimentaire, les pertes de téguments en fonction du PV^{0,75}, le gain de protéines dans les six différents pools de protéines et l'efficacité de l'utilisation des acides aminés digestibles iléales standardisés (SID) pour toutes ces fonctions (NRC, 2012). Les besoins en acides aminés pour l'entretien sont donc prédits à partir des pertes d'acides aminés dans l'intestin (en tant que fonction de l'apport en matière sèche d'aliments), de la peau et des soies (en fonction du poids corporel métabolique; PV^{0,75}) et les pertes minimales d'azote dans l'urine. Cette approche est une évolution du NRC (1998), où les besoins en acides aminés pour l'entretien étaient prédits seulement à partir du PV^{0,75}. Dans le NRC(2012), les besoins en lysine pour l'entretien (g/jour) sont estimés ainsi : pertes endogènes intestinales = prise alimentaire (g/jour) × (0,47/1000) × 0,88 × 1,1; pertes

des téguments = $0,0045 \times PV^{0,75}$. La somme de ces deux composantes est divisée par 0,75 afin de tenir compte de l'efficacité d'utilisation de la lysine SID.

1.2 Les besoins de la croissance maternelle :

Besoin énergétique associé au gain maternel : Les truies reproductrices doivent être nourries au-delà de l'entretien et de la croissance des fœtus pour assurer leur croissance et maintenir leurs conditions corporelles constantes tout au long de leur cycle de reproduction (Dourmad et al 1994, 1996). En effet, l'accrétion des lipides et des protéines dans les tissus maternels pendant la gestation permet de compenser les pertes associées à la lactation précédente et de constituer des réserves corporelles pour la lactation suivante. Le défi de la gestation est donc de rétablir les réserves lipidiques maternelles et de supporter le développement de la truie tout en contrôlant le niveau d'adiposité ou l'état de chair des femelles afin de réduire les risques de dystocie à la mise bas, d'améliorer la longévité des truies et de maximiser l'appétit pendant l'allaitement réduisant la mobilisation excessive des réserves corporelles (Quesnel et al. 2014). En fait, de nombreux travaux ont montré qu'une déplétion excessive des réserves corporelles pendant la lactation est préjudiciable aux performances de reproduction ultérieures (Reese et al. 1982; Dourmad et al. 1994; Hélène Quesnel et al. 1998).

En effet, il existe des particularités d'espèce liées à la croissance de la truie, dont une poursuite de la croissance de la truie durant la gestation et le rétablissement des réserves lipides et des tissus musculaires associé à la mobilisation tissulaire associée à la lactation précédente. En fait, la croissance de la truie n'est pas complétée lors de ses premières gestations. En général, le poids à la maturité chez la truie n'est atteint qu'à partir de la 4^{ème} portée (Engblom et al. 2007; Rodriguez-Zas et al. 2006; NRC 2012). La croissance corporelle de la truie sera donc concomitante avec le gain spécifique associé à la gestation. Toutefois, cette croissance ne sera possible que si l'apport énergétique est suffisant pour combler les besoins associés à l'entretien et aux tissus reproducteurs.

Selon l'âge de la truie et la mobilisation des réserves corporelles en lactation, le gain de poids net de la mère peut représenter environ 2 fois celle du contenu utérin ce qui le place au 2^e

rang des besoins énergétiques en gestation. La plupart des variations de l'apport énergétique en gestation semblent donc associés à des variations extrêmes des réserves corporelles (Dourmad et al. 1994). Les dépôts de lipides maternels se voient accorder la plus faible priorité pour l'utilisation des nutriments. Le rétablissement des réserves lipidiques ou de l'état de chair sera donc possible que si l'apport en énergie surpasse les besoins pour l'entretien et le dépôt énergétique associé au tissus reproducteurs et mammaires (Dourmad et al. 2008).

Les dépôts lipidiques versus les besoins énergétiques associés au gain en gestation :

Pendant la gestation la constitution des réserves corporelles lipidiques est donc nécessaire pour le bon déroulement de la mise bas et une lactation productive (Dourmad et Gaillard 2021). Cependant, les besoins nutritionnels de la truie gestante sont relativement faibles (Beukovic et al. 2015a). En effet, l'apport énergétique pour la constitution des réserves lipidiques des truies à la mise bas n'affecte pas seulement l'état corporel des truies à la mise bas mais aussi le poids des porcelets à la naissance (Coffey et al. 1994). En fait vers la fin de la gestation, les apports nutritionnels sont maximisés en vue d'éviter tout effondrement des réserves corporelles lipidiques avant et après la mise bas (Dourmad et Gaillard 2021). Néanmoins, la mobilisation excessive des réserves lipidiques des truies pendant la lactation peut s'observer et se répercuter négativement sur les performances de reproduction par des retours en œstrus retardés. Afin d'optimiser les performances de reproduction et réduire les problèmes d'ordre nutritionnel, l'estimation de l'état corporel de la truie par la mesure de l'épaisseur du lard dorsal ou l'observation visuelle est une pratique couramment utilisée en élevage porcin des truies reproductrices (Roongsitthichai et Tummaruk 2014). La prise de poids des truies en gestation n'est pas seulement nécessaire pour la restitution des réserves corporelles de la lactation antérieure, mais aussi pour la poursuite de la croissance normale de la truie.

Au cours de la gestation, les substances alimentaires contribuent donc à l'accrétion des réserves protéiques et lipidiques au niveau des tissus maternels afin de tamponner les pertes de la lactation précédente et constituer les réserves pour la lactation suivante (Dourmad et Etienne 2002). En effet, la truie n'atteint le poids à la maturité qu'à partir de la quatrième

portée, dont il est indispensable d'apporter les éléments nécessaires à l'achèvement de sa croissance (Dourmad et al. 1996). Les besoins énergétiques de la truie en gestation sont calculés par une méthode factorielle en fonction du gain du poids vif projeté et l'épaisseur du lard dorsal. Ces deux outils (gain du poids vif et épaisseur du lard dorsal) permettent d'adapter adéquatement le niveau d'apport énergétique à la quantité de réserves corporelles à constituer (Dourmad et al. 2005).

Équation de prédiction de la composition chimique des truies à partir du poids vif vide (PVV, kg) et de l'épaisseur du lard dorsal (P_2 , mm)

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Lipides, kg} = -26,4 + 0,221 \mathbf{PVV} + 1,331 \mathbf{P}_2; \\ \mathbf{Énergie, MJ} = -1074 + 13,65 \mathbf{PVV} + 45,94 \mathbf{P}_2; \\ \mathbf{Protéines, kg} = 2,28 + 0,178 \mathbf{PVV} - 0,333 \mathbf{P}_2; \\ \mathbf{PVV: Poids vif vide de la truie;} \\ \mathbf{P}_2: \mathbf{épaisseur du lard dorsal}; \end{array} \right.$$

Cette approche reste limitée et ne peut prévoir la réponse affective des animaux en termes de variation de composition chimique corporelle ou de gain de poids. Donc, une approche plus déterministe avait été mise en place qui consiste à prédire les dépôts tissulaires en fonction de l'énergie et des protéines. C'est une approche qui contourne les aléas de l'approche factorielle (Van Milgen et al. 2005). Pour l'énergie, l'équation suivante décrit l'utilisation de l'énergie métabolisable par la truie selon Dourmad et al. (2005) en fonction des besoins associés à l'entretien, à ceux associés à la déposition dans les contenus utérins et dans les tissus lipidiques et protéiques maternelles (Dourmad et al. 2005) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{EM} = \mathbf{EM}_e + \frac{\mathbf{ER}_u}{\mathbf{K}_u} + \frac{\mathbf{ER}_{mf}}{\mathbf{K}_f} + \frac{\mathbf{ER}_{mp}}{\mathbf{K}_p} \\ \text{où:} \\ \mathbf{EM}_e: \mathbf{énergie métabolisable pour l'entretien;} \\ \mathbf{ER}_u: \mathbf{énergie retenue dans les contenus utérins;} \\ \mathbf{K}_u: \mathbf{efficacité d'utilisation d'énergie métabolisable pour les dépôts utérins 0,5;} \\ \mathbf{ER}_{mf}: \mathbf{énergie retenue dans les tissus maternels sous la forme des lipides;} \\ \mathbf{K}_f: \mathbf{efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable pour les dépôts de lipides 0,80;} \\ \mathbf{ER}_{mp}: \mathbf{énergie retenue dans les tissus maternels sous la forme de protéines;} \\ \mathbf{K}_p: \mathbf{efficacité d'utilisation de l'EM pour les dépôts de protéines 0,60.} \end{array} \right.$$

Équation de l'influence de la température ambiante

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \textbf{Influence de la température ambiante :} \\
 \textbf{Dans les conditions de thermoneutralité :} \\
 EM_e = 440 \text{ KJ.Kg } PV^{0,75} \text{ pour une activité (debout 240mn/j);} \\
 \text{Activité physique} = 0,30 \text{ KJ.kg } BW^{-0,75} \cdot mn^{-1}; \\
 \text{Au dessus de la température critique inférieure (TCI)} \\
 \text{Pour les truies en loge individuelle;} \\
 \text{La TCI} = 20^\circ C ; \\
 \text{La production de chaleur augmente de 15 à 18 KJ.Kg } PV^{0,75} \circ C^{-1} ; \\
 \textbf{Pour les truies en loge collective;} \\
 \text{La TCI} = 14^\circ C ; \\
 \text{La production de chaleur augmente de 8 à 10 KJ.Kg } PV^{0,75} \circ C^{-1}
 \end{array} \right.$$

Pareillement au porc en croissance, les besoins énergétiques sont couverts par ordre de priorité et l'excès est répartie entre le dépôt de protéines et de lipides. Cependant, la difficulté réside dans la prédiction de la rétention protéique. Pour les acides aminés non limitant la rétention protéique dépend de l'apport énergétique et/ou du potentiel maximal de dépôt de protéines de l'animal (Dourmad et al. 2005).

Équation de la rétention azotée à partir de la rétention totale et la rétention dans les contenus utérins

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \textbf{La rétention azotée} \\
 \text{où:} \\
 \textbf{NR: Rétention totale ;} \\
 \textbf{NR}_c: \text{Rétention dans les contenus utérins;} \\
 K_u: \text{Ln}(6,25 \text{ NR}_c) = 8,090 - 8,71e^{-0,0149t} + 0,0872 n; \\
 \textbf{Lorsque les rapports en protéine ne sont pas limitants;} \\
 \textbf{NR} = 0,85 (\text{NR}_c - 0,4 + 45,9 (\text{N}/100) - 105,3 (1/100)2 + 64,4 (\text{N}/100) 3 + a (EM - EM_{es})) \\
 a = 0,571 \text{ en première gestation, } 0,366 \text{ pour les gestations ultérieures} \\
 \textbf{EM}_{es} = \text{besoin d'entretien à la saillie;} \\
 \text{Lorsque les apports en acides aminés ne sont pas limitants (lysine)} \\
 6,25 \text{ N} = (-0,036 \text{ N}^2 + 0,065 \text{ lysine digestible}) / 0,065
 \end{array} \right.$$

Comme chez le porc en croissance, une relation de type linéaire-plateau est proposée par Williams et al., 1985. Toutefois, les résultats chez la truie primipare et multipare ne mettent pas en évidence l'existence d'un plateau de rétention protéique pour les niveaux habituels d'alimentation (Williams et al. 1985). À l'avenant, Dourmad et al. (2005) a proposé une relation empirique qui comprend deux composantes ; la rétention azotée dans les contenus utérins (NR_c) qui est déterminée par les équations proposées par (Noblet 1990) cités ci-dessus et la rétention azotée maternelle qui dépend du stade de la gestation, du numéro de la portée et de l'apport de l'énergie au-dessus de l'entretien (Dourmad et al. 2005).

La rétention azotée s'influence par des apports en acides aminés inférieurs aux besoins. Elle augmente linéairement avec l'apport de l'acide aminé limitant jusqu'à un maximum qui dépend du niveau énergétique et du stade de gestation. Chez les truies gestantes, l'efficacité moyenne de l'utilisation de la lysine digestible au-dessus des conditions d'entretien est d'environ 65 %. Pour le reste des acides aminés les rendements sont estimés à partir de celui de la lysine et du profil de la protéine idéale pour la gestation. En effet, la rétention azotée permet de prédire la quantité d'énergie déposée sous la forme de protéines dans les tissus corporels (ER_{mp}) (Dourmad et al. 2005).

Équation de la rétention d'énergie dans les contenus utérins et les tissus maternels

$$\left\{ \begin{array}{l} \textbf{Rétention d'énergie dans les contenus utérins et les tissus maternels :} \\ K_u = 0,5 \text{ Dans les contenus utérins (n = taille de la portée, t: stade de la gestation);} \\ \quad \textbf{Ln(énergie)} = 11,72 - 8,62e^{-0,0138t} + 0,0932 n; \\ \quad \textbf{Dans les tissus maternels;} \\ \quad \textbf{ER}_{mp} = 23,8 * 6,25 (NR - NR_c); \\ \quad \textbf{ER}_{mf} = 39,7 \text{ lip.} \end{array} \right.$$

Afin de déterminer la quantité correspondante d'énergie métabolisable, il faut préciser les rendements d'utilisation pour les différents dépôts maternels. Les valeurs retenues dans le modèle sont celles mesurées chez le porc en croissance, soit 80% (K_f) et 60% (K_p) pour les lipides et les protéines respectivement (Dourmad et al. 2005).

Équation de l'utilisation de l'énergie métabolisable

$$\left\{ \begin{array}{l} \textbf{Efficacité de l'utilisation de l'énergie métabolisable :} \\ K_u = 0,5, \textit{efficacité marginale;} \\ K_p = 0,60, \textit{efficacité pour les dépôts maternels de protéines;} \\ K_f = 0,80, \textit{efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable pour les dépôts de lipides 0,80;} \\ K_r = 0,75 \textit{efficacité moyenne pour les dépôts maternels.} \end{array} \right.$$

Les besoins en lysine digestible associés au gain maternel : Comme mentionné précédemment, la lysine est le premier acide aminé limitant dans les régimes à base de blé ou de maïs et de tourteaux. Les besoins de la truie en lysine SID pendant la gestation dépendent principalement des dépôts totaux des protéines pendant la gestation (Dourmad et al. 2008; NRC 2012). Les dépôts moyens des protéines pendant la gestation au cours du premier, moyen et dernier stade ont été estimés à 45,9 , 52,2 et 73,8 g/jour, respectivement (Dourmad et al. 1996; Thomas et al. 2021). Les dépôts protéiques au début et à la mi-gestation sont principalement dans les tissus maternels extra-utérins. Ces dépôts protéiques maternels sont déterminés indirectement en considérant la différence entre les dépôts protéiques du corps entier et le dépôt des protéines des fœtus. En début et mi-gestation, seulement 1 à 2 g/jour sont déposés dans les conceptus (fœtus et placenta) (Dourmad et al. 1996; NRC 2012). En effet, le dépôt des protéines dans les tissus maternelles extra-utérins diminue à mesure que la gestation progresse et la rétention protéique dans les conceptus et les glandes mammaires augmente (Dourmad et al. 1996 ; Moehn et Ball 2013). Il est donc recommandé de restaurer les tissus protéiques maternels extra-utérins en début et milieu de la gestation (Dourmad et al. 1996 ; Boyd et al., 2000). En fait, il existe une compétition physiologique variable entre la déposition des protéines entre les tissus extra-utérins et utérins aux différents moments de la gestation (Miller et al. 2016).

1.3 Les besoins de reproduction :

Comme nous l'avons noté précédemment, la priorité en matière d'apport énergétique est de couvrir les besoins en énergie pour l'entretien, suivie de l'énergie pour la croissance des fœtus et finalement l'énergie pour l'accrétion protéique et les dépôts lipidiques dans les tissus extra-utérins (NRC 2012). Les apports nutritionnels vers les tissus utérins sont donc priorisés par rapport aux tissus extra-utérins (Solà-Oriol et Gasa 2017), mais les besoins

d'entretien de l'organisme reste la priorité. Dans le modèle de Dourmad et al. (2008), le gain de poids, de protéines et d'énergie des conceptus est représenté explicitement et est fonction de la taille prévue de la portée à la naissance, du poids moyen des porcelets à la naissance et du moment de la gestation (Dourmad et al. 2008). Dans ce modèle, six pools de tissus différents sont identifiés : fœtus, placenta plus liquides, utérus, tissu mammaire et le dépôt maternel des tissus extra-utérins. Dans le modèle de truie gestante, le dépôt global dans les différents pools dépend du temps et du dépôt dans les conceptus qui varie donc selon la taille prévue de la portée et le poids moyen des porcelets à la naissance. Basé sur les changements dans le dépôt global avec le stade de gestation et à travers les parités, le modèle de truie en gestation montre clairement la nécessité d'augmenter les niveaux d'alimentation et donc d'énergie ainsi que des apports quotidiens en acides aminés vers la fin de la gestation afin de satisfaire les besoins accrus en énergie et en acides aminés pour les produits de la conception et d'éviter ainsi un bilan négatif et des pertes dans les tissus extra-utérins.

Comme les besoins associés aux tissus utérins, les besoins ayant trait à la croissance des glandes mammaires augmentent à partir du 80^{ème} jour de la gestation (NRC 2012). En effet, la croissance des tissus mammaires est réduite avant le 79^{ème} jour de gestation (Beukovic et al. 2015b), où l'accrétion protéique est de 0,41 g/j pour chacune des glandes mammaires en début de gestation alors qu'à partir du 80^{ème} jour de gestation ce dépôt est de 3,41 g/j (Kim et al. 1999). À l'approche de la mise bas, en plus de la hausse des besoins associés à la croissance fœtale, mammaire et des composés utérins, on observe également une augmentation des besoins associés à la production du colostrum (Figure 1, NRC 2012).

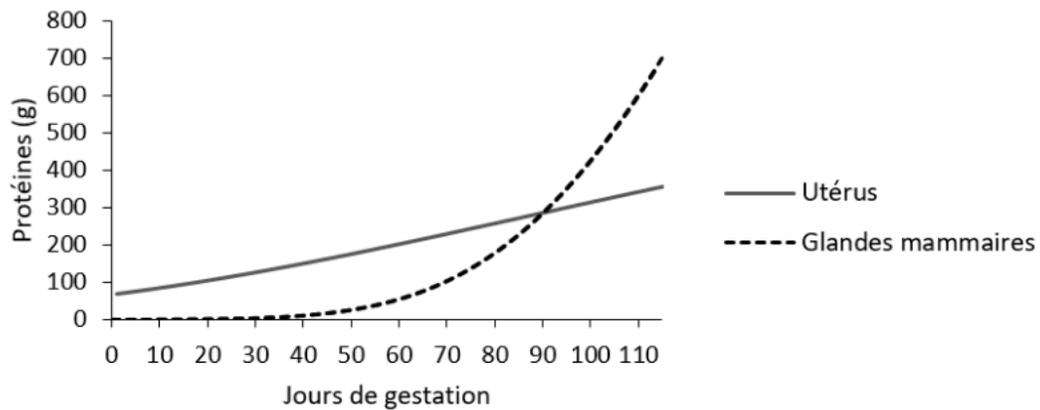


Figure 1 : Augmentation des dépôts protéiques (g) dans les glandes mammaires et les besoins associés au fœtus au cours de la gestation chez la truie (NRC; 2012).

Le poids fœtal augmente linéairement après 70 jours de gestation (McPherson et al. 2004). L'accrétion de protéines s'accélère donc après le jour 69 de gestation. Plus précisément, l'accrétion de protéines fœtales est de 3,0 g/j avant 69 jours de gestation et augmente à 55,6 g/j après 69 jours de gestation chez les cochettes gravides (Figure 2). Compte tenu des besoins en protéines pour le gain des tissus fœtaux avant et après 70 jour de gestation, la pratique consistant à fournir un aliment contenant une concentration constant en protéines alimentaires aux cochettes gravides pourrait limiter le gain maternel extra-utérin après 69 jour de gestation, pouvant compromettre ainsi les performances à long terme (McPherson et al. 2004; , Kim 2010).

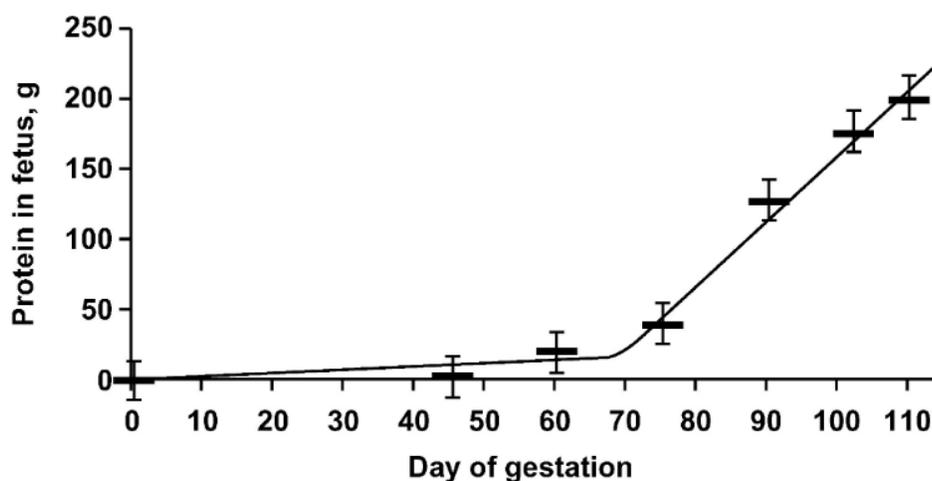


Figure 2 : Teneur en protéines chez le fœtus pendant la gestation, le gain en accréation protéique 0,25 g vs 4,63g/j) (McPherson et al. 2004).

Si l'on considère le gain protéique par fœtus, ce dernier gagne donc en moyenne 203,7 g de protéines entre le 70^{ème} et 114^{ème} jour de la gestation à raison de 4,60 g protéines/j. Pour une truie ayant une portée de 14 fœtus, le gain protéique fœtal passe donc de 3,5 et 64,8 g/j de gain de protéines pour le début et la fin de la gestation, respectivement. En effet, il s'agit d'une augmentation de 18,5 fois ($64,8/3,5 = 18,5$) du taux du gain de protéines tissulaires entre le début et la fin de la gestation (McPherson et al. 2004).

Besoin en lysine associés à la croissance fœtale : En lien avec cette hausse du gain protéique, fœtal, les besoins en lysine SID associés à la croissance fœtale augmentent. Pour une truie avec 14 fœtus les besoins en lysine passeraient donc de 0,27 g/jour en début de gestation à 4 g/jour vers la fin de gestation pour la croissance fœtale.

1.4 Application des besoins en énergie et en lysine en gestation :

L'analyse détaillée des besoins de la truie en gestation montre que la combinaison des besoins d'entretien et associés aux gains maternels extra-utérins et fœtaux mène à une variation des besoins nutritionnels des truies en gestation. En effet, au début et au milieu de la gestation, les nutriments sont utilisés majoritairement pour l'entretien ainsi que pour la croissance maternelle des tissus extra-utérins (Solà-Oriol et Gasa 2017). Pendant le dernier tiers de gestation, l'énergie et les nutriments, dont les acides aminés, sont utilisés par les cochettes et les truies gestantes pour la croissance fœtale, la croissance du placenta ainsi que

la croissance des tissus mammaires (NRC, 2012). Par exemple à ce stade, une quantité accrue en lysine SID est nécessaire pour assurer la croissance des fœtus (Solà-Oriol et Gasa 2017).

En utilisant la lysine comme exemple, on peut définir les besoins pour le début, le milieu et la fin de la gestation. En début et en milieu de gestation, le besoin total en lysine SID comprend le besoin pour l'entretien et celui associé au le gain protéiques des tissus maternels extra-utérins. Par exemple, pour les truies de 1^e rang de portée, les exigences en lysine SID seraient de 10,6 g/j en début et mi-gestation alors que vers la fin de gestation, au-delà du 90^{ème} jour de gestation, les besoins s'élèvent 16,7 g/j. Cette hausse s'explique par la croissance fœtale et le développement mammaire. Chez les truies ayant un rang de parité supérieur à 4, une plus grande proportion des besoins en acides aminés est attribuée aux besoins d'entretien. Le besoin total en lysine SID est estimé à 6,3 g/j entre 1-90^{ème} jour de gestation. Au-delà du 90^{ème} jour de gestation, le besoin total en lysine s'élèvent à 11 g/j (NRC, 2012). La figure 3 résume la représentation des besoins en lysine SID chez des truies de 1^e et de 4^e et plus pendant la gestation.

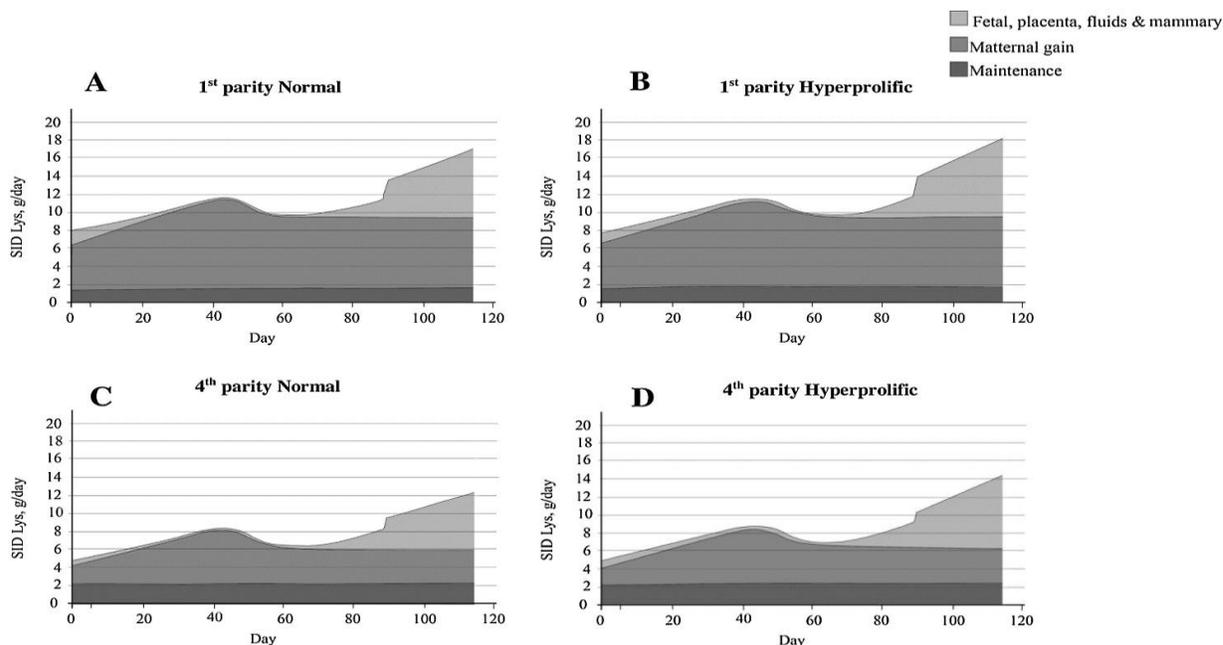


Figure 3 : Besoins prédits en lysine digestible(SID Lys; g/j) des truies de première et quatrième parité normales et hyper-prolifiques pendant la gestation selon le NRC (2012) avec les paramètres et les programmes d'alimentation commerciale suivants : poids corporel de la truie à la reproduction, 140 kg (1^{ère} parité normale; A), 145 kg (1^{ère} parité hyper-prolifique ; B), 230 kg (4^{ème} parité normale ; C), 243 kg (4^{ème} parité hyper-prolifique ; D); Taille prévue de la portée 13 porcelets (truies normales; A et C) ou 14 porcelets (hyper-prolifique; B et D) et le poids moyen prévu à la naissance, 1,4kg/porc.

Dans une étude récente Thomas et al. 2021 a modélisé les besoins quotidiens normalisés en lysine SID chez les truies en gestation avec des parité différents (cochettes, truies multipares) et selon les trois stades de gestation (Figure 4). Dans leur étude, Thomas et al. (2021) ont estimé que, pour les cochettes et les truies en gestation, un apport de lysine SID de 11 g/jour avaient des bilans négatifs en lysine SID aux jours 100 à 108 et 104 à 108 de la gestation, respectivement. Cependant, chez les cochettes et les truies ayant reçu 13,5 g/jour de lysine SID, le bilan était positif tout au long de la gestation, sauf après le 108^e jour de gestation indiquant que les truies nourries avec 13,5 g/jour de lysine digestible auraient reçu un niveau suffisant pour répondre aux besoins totaux.

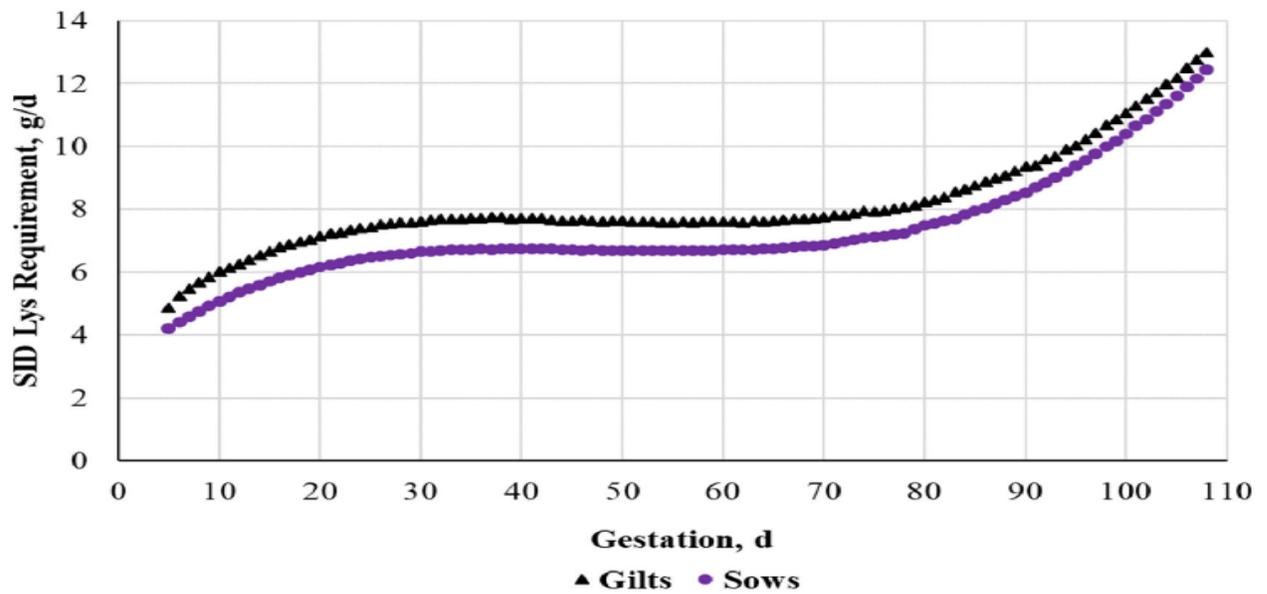


Figure 4 : Les besoins normalisés en Lys digestibles (SID lysine, g/j) prévus pour les cochettes et les truies du J5 à J108 de gestation (Thomas et al. 2021).

Comme pour la lysine, on peut quantifier le besoin total en EM chez la truie en gestation. La figure 5 représente l'estimation des besoins quotidiens en EM pendant la gestation pour des truies de 1^e et 4^e parités. On peut noter que le besoin pour l'entretien représente la majorité du besoin total en énergie alors que le besoin associé au gain maternel extra-utérin est significatif chez les truies de 1^e parité alors que le besoin associé aux fœtus progresse avec la gestation.

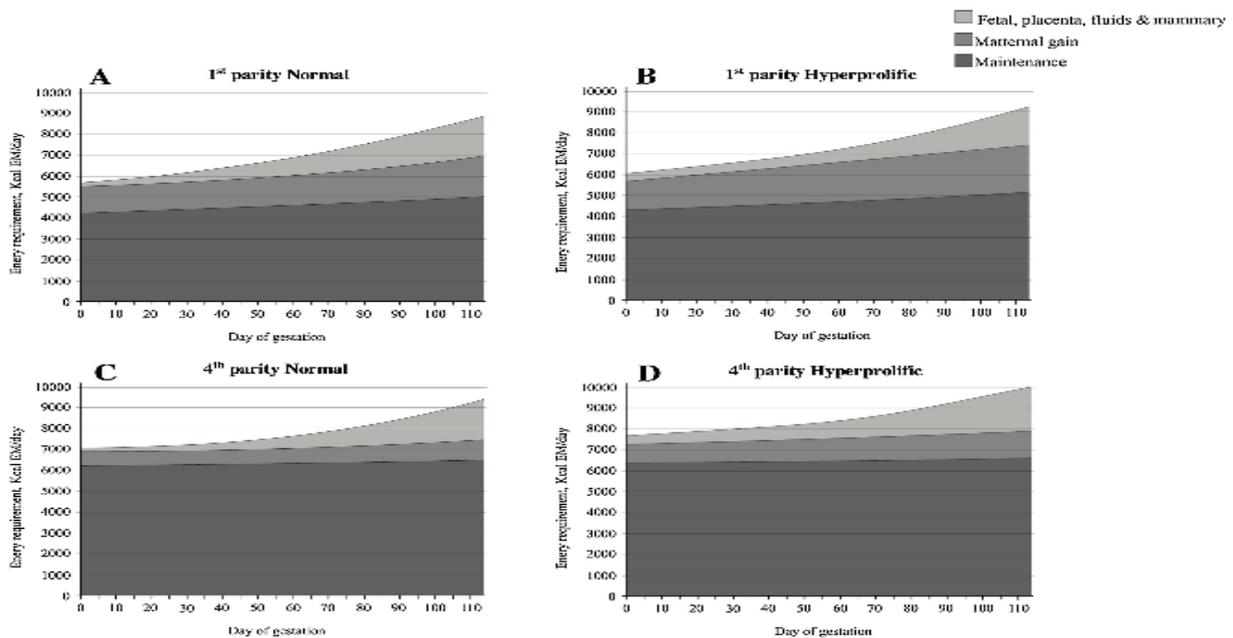


Figure 5 : besoins énergétiques prévus (EM, kcal/j) des truies de première et quatrième parité normales ou hyper-prolifiques pendant la gestation selon (NRC 2012) avec les paramètres et les programmes d'alimentation commerciale suivants : poids corporel de la truie à la reproduction, 140 kg (1^{ère} parité normale; A), 145 kg (1^{ère} parité hyper-prolifique ; B), 230 kg (4^{ème} parité normale ; C), 243 kg (4^{ème} parité hyper-prolifique ; D); Taille prévue de la portée 13 porcelets (truies normales; A et C) ou 14 porcelets (hyper-prolifique; B et D) et le poids moyen prévu à la naissance, 1,4kg/porc (Solà-Oriol et Gasa 2017) .

1.5 Conclusion :

Les nutriments et l'énergie des aliments sont utilisés par la truie gestante en début de la gestation pour la reconstitution de leurs réserves corporelles sous formes de dépôts lipidiques et d'accrétion protéique afin de compléter la croissance des cochettes gravides ou de compenser la perte de poids survenue lors de la lactation précédente. Il faut noter qu'après cette phase, les besoins nutritionnels augmentent à partir du 70^{ème} jour pour répondre aux besoins de la croissance du fœtus et des glandes mammaires. L'approvisionnement nutritionnel des truies gestantes durant cette phase devrait donc s'accroître et à défaut une mobilisation des réserves énergétiques ou des tissus protéiques extra-utérins de la truie serait mise en place afin de couvrir un tel déficit énergétique ou protéique.

2 Les fibres alimentaires dans l'alimentation de la truie gestante :

Les recherches récurrentes ayant traités aux effets de la fibre en alimentation ont suscité l'intérêt des chercheurs depuis le rapport de Scheunert (1906) qui confirme la capacité des porcs à dégrader la cellulose. Ce dernier avait largement mis l'emphase sur la manière dont les porcs peuvent performer avec des régimes alimentaires riches en fibres. Les fibres sont une composante commune des aliments destinés aux porcs, dont les sources sont diversifiées. Lorsqu'elles sont incorporées dans les régimes alimentaires des truies, les fibres confèrent une valeur ajoutée de satiété. Néanmoins, l'inclusion de fibres dans les régimes devrait se pratiquer avec une certaine prudence, notamment dans les phases de cycle de production où les besoins nutritifs sont plus élevés (dernier tiers de gestation et la lactation) (Miller et al. 2013).

La fibre alimentaire se définit comme étant la partie non hydrolysable par les enzymes de l'intestin grêle des mammifères et sont donc disponibles pour la fermentation microbienne dans le gros intestin. Cependant, malgré son indigestibilité partielle, elle affecte de multitudes processus physiologiques. Sa fermentation par les microorganismes au niveau du gros intestin produit des sous-produits physiologiquement actifs et des gaz. D'une façon directe, la fibre est également responsable du remplissage intestinal, et agit sur l'absorption des autres nutriments par des modification du contenu du tractus-gastro-intestinal (Goering et Soest 1970).

L'utilisation des fibres exige une certaine prudence à cause de ses propriétés anti-nutritives. De plus, les composantes alimentaires peuvent être liées à la fibre. Par exemple, 30 % de l'azote des ingrédients riches en fibre peuvent être liés aux fibres NDF ce qui entraîne la réduction de la digestibilité alimentaire de la protéine menant à une absorption insuffisante des acides aminés, particulièrement la thréonine (Jarrett et Ashworth 2018). De ce fait, plusieurs méthodes ont été suggérées afin d'atténuer les propriétés anti-nutritives des fibres alimentaires, dont le traitement thermique pour minimiser les facteurs anti-nutritifs thermolabiles, la réduction de la taille des particules afin d'améliorer la digestibilité et la scarification afin de réduire la teneur en tanin (Woyengo et al. 2014).

2.1 Digestibilité et encombrement gastrique :

Chez les mammifères monogastriques, les fibres alimentaires ne sont dégradées que par la fermentation microbienne au niveau du gros intestin. De ce fait, elles peuvent être caractérisées sur une base nutritionnelle, en termes de ses effets digestifs et physiologiques engendrés (Mertens 1994).

L'analyse des fibres est primordiale pour mettre en évidence l'importance nutritionnelle et la valeur énergétique des aliments riches en fibres et leurs rôles dans la digestion et l'absorption au niveau intestinal. En dépit de leur faible valeur énergétique et leurs effets néfastes sur la digestibilité des nutriments, elles sont incluses dans les régimes alimentaires des animaux à des teneurs minimales pour leurs effets bénéfiques aidant, entre autres, à maintenir une bonne physiologie et une bonne santé intestinale (Bach Knudsen 2001). Les fibres alimentaires dérivent principalement de la paroi cellulaire des végétaux. Elles sont composées principalement d'un amas de polysaccharides pariétaux qui peuvent être substitués à des composés non glucidiques (lignines ou protéines). La répartition physique des polysaccharides pariétaux agit sur leurs propriétés physico-chimiques ainsi que leur action au niveau du tractus gastro-intestinal (Bach Knudsen 2001). En effet, la composition de la paroi cellulaire varie considérablement entre les différents tissus végétaux des plantes (McDougall et al. 1996). Le coefficient de dégradabilité des fibres alimentaires varie de 40 à 60 % comparativement aux autres nutriments (sucres ou amidon, lipides et protéines) qui ont un coefficient de digestibilité supérieur à 80 % (Williams et al. 2019).

En alimentation porcine, les régimes riches en fibres sont principalement utilisés pour leur effet métabolique inerte afin de favoriser la satiété chez les truies en gestation. Les fibres contribuent également au développement et à l'augmentation du volume du tractus gastro-intestinal (aliment grossier volumineux), à la réduction de consommation alimentaire par kg de poids vif, à la diminution du temps du transit intestinal et une élévation de l'activité cellulotique du microbiote chez les truies (Lindberg 2014).

2.2 Les types de la fibre alimentaire :

L'étude des caractéristiques de la fibre a permis sa compréhension (Jha et Berrocoso 2015b), ainsi que la mise en évidence de leurs effets sur la digestion des nutriments et les fonctions physiologiques, immunitaires ainsi que sur la santé intestinale. Comme mentionné précédemment, la fibre comprend l'ensemble des glucides non digestibles par les enzymes endogènes, soit les polysaccharides (ensemble de polymères glucidiques) non amylacés (NSP) ainsi que la lignine (composé non glucidique) (Tungland et Meyer 2002). Ces glucides sont présents principalement dans la paroi cellulaire végétale incluant la cellulose, l'hémicellulose et la pectine. Cependant, les composantes non cellulaires de la paroi, comme l'amidon résistant et une partie des oligosaccharides non digestibles, ont des effets similaires à ceux des NSP des parois végétales et peuvent être classés comme de la fibre (Tungland et Meyer 2002).

La classification de la fibre est déterminée par deux paramètres :

- **Techniques analytiques au laboratoire :** Ces techniques permettent de quantifier les propriétés physiques et chimiques des fibres alimentaires dans les ingrédients végétaux.
- **La solubilité :** Elle délimite l'effet nutritionnel et physiologique de l'aliment. Les fibres solubles comprennent la pectine, le β -glucane, les gommes et le mucus, tandis que les fibres insolubles comprennent la cellulose et la plupart des hémicelluloses. La somme des fibres solubles et insolubles à caractère glucidique correspond également aux polysaccharides non amylacés (polysaccharides non amylacés, NSP) (Bach Knudsen 2001).

2.2.1 Méthode des fibres brutes :

Cette méthode est basée sur la solubilité et les propriétés des fibres. Elle consiste à l'extraction séquentielle avec un acide dilué et une base, suivie d'une détermination gravimétrique du résidu après séchage (Hindrichsen et al. 2006). C'est une ancienne méthode

qui ne mesure qu'une fraction faible et variable des composants fibreux en raison de la solubilisation des polysaccharides structuraux et de la lignine.

2.2.2 La méthode de la fibre détergente neutre (NDF) et la fibre détergente acide (ADF) :

Cette méthode (Van Soest 1964) mesure les fractions de fibres insolubles (hémicellulose, cellulose et lignine) dans des détergents neutres (NDF) et dans des détergents acides (ADF) permettant de mesurer la cellulose, la lignine, et par différence entre le NDF et l'ADF d'estimer l'hémicellulose. Néanmoins, les NSP qui sont solubles dans l'eau, ainsi que les substances pectiques insolubles dans l'eau peuvent être perdues durant le processus d'analyse du NDF. Les amidons et les protéines peuvent également contaminer les résidus de NDF et l'hémicellulose peut rester dans la fraction ADF (Goering 1970 ; Van Soest 1964).

2.2.3 La méthode d'analyse des NSP : soluble et insoluble :

L'évaluation des fractions solubles et insolubles des fibres peut se faire pour la dégradation successive des aliments dans des solutions enzymatiques spécifiques. Les fibres solubles dans l'eau correspondent aux pectines, glucanes, gommés et mucilages alors que les fibres insolubles dans l'eau sont la cellulose et la majorité des hémicelluloses. La somme des fibres solubles et insolubles de nature glucidique, correspond aux NSP totaux (Bach Knudsen 2001). Les parties soluble et insoluble des fibres vont avoir des effets sur la physiologie et la dégradation de ces fibres par le microbiote intestinal (Goering et Soest 1970). Les fibres solubles peuvent subir une fermentation microbienne plus importante au niveau du colon dont les produits finaux sont des acides gras volatils et des gaz (Jha et Berrocoso 2015). Les fibres insolubles sont généralement peu hydrolysables par le microbiote au niveau intestinal. Elles sont donc métaboliquement inertes et sont principalement responsables du remplissage gastrique (Doré et Blottière 2015). La figure 6 et le tableau 1 résument les différents concepts associés aux fibres alimentaires en alimentation porcine.

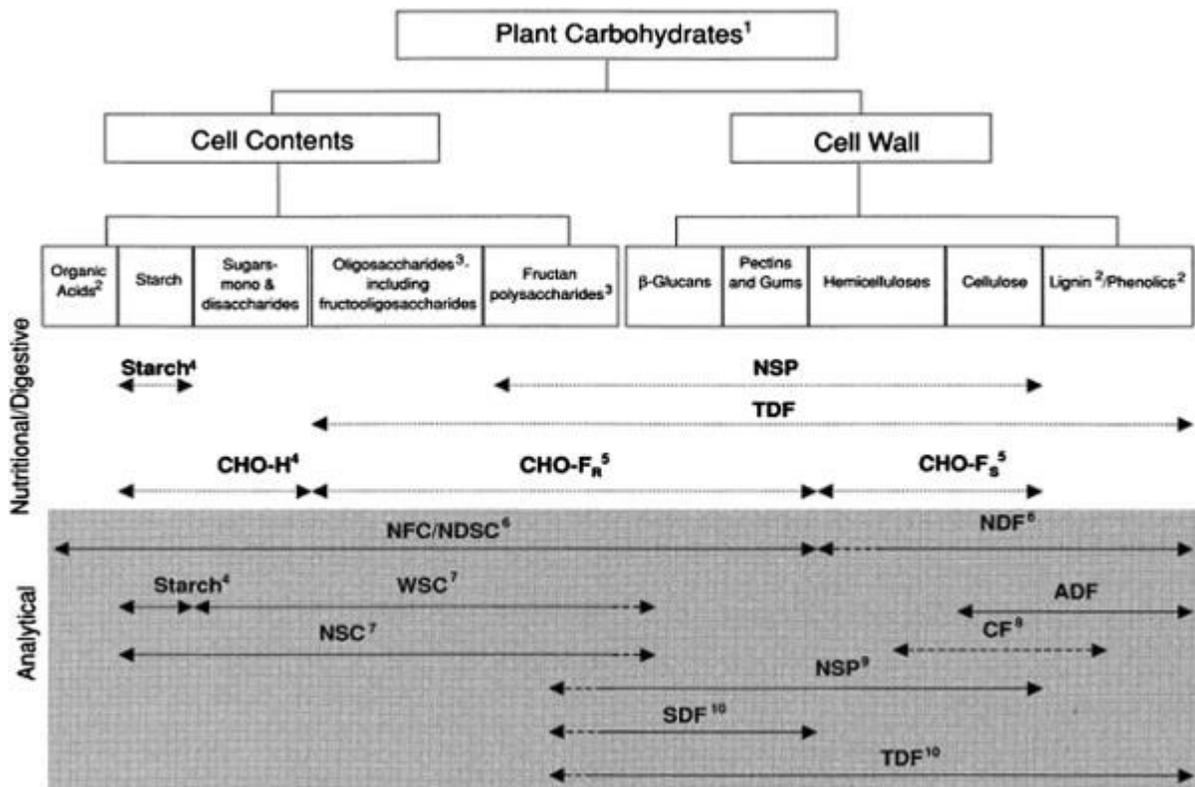


Figure 6 : Classification analytique des polysaccharides végétaux (NRC 2012).

Starch : Amidon, **NSP :** Non Starch Polysaccharides, ou polysaccharides non-amylacés, **TDF :** Total Dietary Fiber, ou fibre alimentaire totale, **NDF :** Neutral Detergent Fiber ou fibre à détergent neutre, **ADF :** Acid Detergent Fiber ou fibre à détergent acide, **NFC/NDSC :** Non Fiber Carbohydrates / Non Digestibles Carbohydrates, **WSC :** Water Swelling Capacity, **NSC :** Non Structural Carbohydrates ou hydrates de carbone non structuraux, **CF :** Crude Fiber ou fibre brute, **SDF :** Soluble Dietary Fiber ou fibre alimentaire soluble

Tableau 1 : Définition des fibres alimentaires et des polysaccharides dans les aliments.

Composant de la fibre	Définition
Fibres alimentaires totales	La FAO définit les fibres alimentaires comme « des polymères glucidiques avec un degré de polymérisation non inférieur à trois, qui ne sont ni digérés ni absorbés dans l'intestin grêle (FAO Annual Report 2018, 2019). La paroi cellulaire des biomasses lignocellulosiques est constituée d'une grande diversité de ces polysaccharides structuraux qui sont divisés en différentes catégories : la cellulose, les hémicelluloses (xyloglucanes, xylanes, β -glucanes et mannanes) et les pectines (homogalacturonanes, xylogalacturonanes, rhamnogalacturonanes type I et type II) (Carpita et al. 1996 ; Grabber 2005). Ces composés sont liés à des protéines pariétales et à des polyphénols (la lignine) (Carpita et al., 2000 ; Grabber, 2005). Les polysaccharides structuraux et la lignine sont les constituants les plus abondants dans la paroi cellulaire (Ebringerová et al. 2005 ; Ebringerová et al. 2008).
Fibres brutes	La fibre brute était censée mesurer la partie non digestible des aliments. Bien que la méthode soit empirique, la fibre brute a été utile, historiquement, pour estimer la digestibilité ou la valeur énergétique dans les aliments. Selon la matière première, la fibre brute peut contenir seulement 40 à 100 % de la cellulose, 15 à 20 % des pentosanes de l'hémicellulose et 5 à 90 % de la lignine (Goering et Soest 1970).
Fibres NDF et ADF	La fraction NDF est constituée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de tannins insolubles à pH neutre. Séquentiellement à l'action du détergent neutre, une solution de détergent acide, en excès, permet d'extraire les hémicelluloses, les tannins solubles en

	milieu acide et la lignine soluble en milieu acide. La fraction ADF est constituée de cellulose, de lignine insoluble en milieu acide et de tannins insolubles en milieu acide (de Mello et al. 2020).
Lignines	La lignine est un polymère constitué d'unités phénylpropanes telles que les alcools de type p-hydroxyphényle (dont l'alcool p-coumarylique), syringyle (dont l'alcool synapilique) et guaïacyle (dont l'alcool coniférylique) (van Kuijk et al. 2015). La quantité d'hémicelluloses des biomasses lignocellulosiques possédant une teneur importante en lignine soluble à pH acide est surestimée du fait que cette lignine soluble est contenue dans les NDF, mais elle n'est pas contenue dans les ADF (Thebaudin et al. 1997).
Polysaccharides non amylacés	Les polysaccharides non amylacés totaux ou NSP se composent de la cellulose, de l'hémicelluloses, de pectines et des gommes (exceptées celles qui sont hydrosolubles). Les NSP solubles semblent réguler en partie la digestion et de l'absorption dans l'intestin grêle (Kerr et Shurson 2013).
Arabinoxylanes	Les arabinoxylanes sont des NSP présents dans diverses parois cellulaires des grains céréaliers. Ils ont été spéculés pour jouer un rôle dans la réticulation des microfibrilles de cellulose et donc créer un réseau rigide dans l'architecture de la paroi cellulaire ainsi que dans la régulation de l'expansion cellulaire (Carpita 1996). Ce sont des polymères glucidiques contenant des pentoses et sont prénommés « les pentosanes ». Ayant été découverts dans la farine du blé pour la première fois par Hoffman et Gortner (1927), ils sont d'intérêt pour les chimistes céréaliers en raison de leur importance technologique. Les arabinoxylanes offrent des avantages nutritionnels de la fibre soluble et insoluble en raison de la présence de fractions phénoliques

	dans leurs structures moléculaires y compris leurs propriétés antioxydantes (Katapodis et al. 2003).
--	--

2.3 Sources de la fibre alimentaire :

Les ingrédients riches en fibres incluent le blé, l'avoine, l'orge et leurs sous-produits tels que les coques de céréales, les sons de céréales et les drêches séchées de distillerie avec solubles (DDGS) (Jha et Berrocoso 2015). Dans les pays tropicaux, les fourrages, les racines, les sous-produits fibreux de cultures, la farine de Konjac et la pulpe d'agrumes sont d'autres sources de fibre (Nowland et al. 2022). Il existe donc une panoplie d'ingrédients riches en fibres dont l'inclusion judicieuse en alimentation porcine dépend des objectifs de performances projetés en production. La dégradabilité des fibres alimentaires est variable et dépend majoritairement de la source des fibres (Nowland et al. 2022). Par exemple, la paille de blé est peu digérée en raison de sa forte teneur en lignine, tandis que la pulpe de betteraves sucrières est plus digestible en raison de sa forte teneur en substances pectiques (Jarrett et Ashworth 2018).

2.4 Les effets de la fibre sur le tube digestif et la santé intestinale :

L'impact d'un régime riche en fibres sur le tractus gastro-intestinal est conditionné par la durée de consommation des aliments (Martinez-Puig et al. 2003). De plus, la source des fibres alimentaires et le statut physiologique de l'animal déterminent en grande partie la façon dont ces fibres affecteront la santé animale. Le type et la teneur en fibres modifient considérablement l'équilibre microbien au niveau intestinal. En effet, l'inclusion judicieuse des fibres dans l'alimentation porcine semble modifier considérablement le microbiote intestinal et par conséquent la physiologie de du tractus digestif. Par exemple, les régimes riches en fibres à base de son de blé favorisent la multiplication de bactéries bénéfiques au microbiote intestinal, dont les Bifidobactéries et les Lactobacilles (Owusu-Asiedu et al. 2006 ; Heinritz et al. 2016). Les bactéries anaérobies de l'intestin distal peuvent fermenter les polysaccharides issus des fibres ingérées dont les produits finaux sont des acides gras

volatiles à chaîne courte (AGV, acétate, propionate et acide butyrique) et des gaz (méthane, sulfure d'hydrogène et dioxyde de carbone) (Bindelle et al. 2008).

Les AGV jouent un rôle prépondérant dans l'approvisionnement énergétique de l'animal. L'énergie fournie pour donner suite à la dégradation microbienne des polysaccharides des fibres est utilisée, entre autres, pour la croissance des cellules épithéliales intestinales (Bindelle et al. 2008). La contribution énergétique des AGV a été estimée à 3 % chez les truies en gestation, et cette dernière dépend largement de la maturité de la truie (Noblet et Goff 2001; Varel et Yen 1997). Cet approvisionnement énergétique provenant des fibres demeure faible comparativement à la partie provenant de l'amidon soluble.

Le temps de transit alimentaire et la satiété associée à la consommation des fibres sont fonction des propriétés physiques des fibres alimentaires, dont l'absorption et la rétention d'eau, la solubilité et la viscosité du digesta (Sun et al. 2015). En effet, les fibres alimentaires solubles procurent un sentiment de satiété plus précoce augmentant le temps de rétention dans l'estomac et provoquant ainsi la distension de la paroi de l'estomac. (Jarrett et Ashworth 2018). Le tableau 2 résume les certains effets observés des fibres en alimentation porcine.

Tableau 2 : Effets des fibres alimentaires sur certains aspects de la production porcine :

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comportement et bien être 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les régimes alimentaires riches en fibres favorisent la satiété postprandiale (vidange gastrique retardé, libération des peptides) et la réduction de la motivation alimentaire apparente, améliorant ainsi le bien être des truies gestantes restreintes en alimentation (Jensen et al. 2012). ▪ Ces régimes réduisent l'activité orale post prandiale et les stéréotypies (Holt et al. 2006).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reproduction 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une augmentation du nombre des porcelets sevrés par truie par an a été rapportée offrant un avantage économique considérable en production porcine (Jarrett et Ashworth 2018).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Statut immunitaire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une concentration plus élevée en globules blancs chez les cochettes gravides nourries à base d'un régime fibreux de pulpe de betteraves sucrières a été observée (McGlone et Fullwood 2001). ▪ Les régimes riches en fibres brutes pendant la gestation diminuent les niveaux de protéine C-réactive, qui est un marqueur d'inflammation, dans le colostrum (Werner et al. 2014).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excrétion d'azote et impact environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une alimentation riche en fibres chez les rats, provoque le transfert de l'urée du sang vers le gros intestin (Pastuszewska et al. 2000). Cela réduit l'excrétion urinaire d'azote et augmente sa production fécale, donc de la dégradation de l'urée en ammoniac.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'apport en fibres réduit donc l'émission d'ammoniac (Nahm 2003; Aarnink et Verstegen 2007). ▪ Les aliments supplémentés en fibres à base de pulpe de betteraves sucrières alloués aux truies avant l'accouplement réduisent d'environ 6 % des émissions de méthanes et d'oxyde nitreux des gaz à effet de serre (Ferguson et al. 2004).
--	---

2.5 Restriction alimentaire des truies pendant la gestation en incorporant la fibre dans les régimes alimentaires :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le concept de base en alimentation des truies reproductrices est le maintien d'une condition corporelle satisfaisante et stable tout au long du cycle de production afin d'assurer un rendement optimal (Dourmad et al. 1996). Ceci implique une restriction d'apport alimentaire en gestation afin d'éviter un gain corporel excessif et une accréation lipidique, qui peuvent être à l'origine de problèmes de locomotion, de dystocie et par conséquent une chute des performances de reproduction. Toutefois, la restriction alimentaire de la truie pendant la gestation a été pendant longtemps sujet de controverse. En fait, sa mise en pratique demande une certaine rigueur en termes d'allocation alimentaire (Aubé et al. 2019). Un apport alimentaire insuffisant peut être à l'origine d'une baisse de la viabilité des porcelets à la naissance, de faibles réserves corporelles à la mise-bas, un retour en œstrus retardé après la mise-bas et une diminution du taux de la conception (Champ et al. 2003) . Ainsi, la restriction alimentaire excessive semble compromettre les performances de reproductions des truies. Afin de préserver les performances reproductrices, il s'avère indispensable d'ajuster l'apport en éléments nutritifs selon le stade physiologique des truies. Comme noté dans les sections précédentes, durant la gestation, les besoins totaux en énergie dépendent des besoins d'entretien qui dépendent, entre autres, de l'activité physique des truies et de la température ambiante. Comme mentionné précédemment, les

besoins énergétiques quotidiens pour l'entretien se situent entre 420-440 kJ d'EM /kg PV^{0,75} (Van Milgen et Dourmad 2015).

Un apport supplémentaire en énergie et en nutriments est nécessaire afin de couvrir les besoins de croissance des tissus extra-utérins et des fœtus pour maintenir un bon état de chair et de meilleures performances de reproduction.

2.5.1 Approvisionnement énergétique restreint des truies pendant la gestation

Les truies sont pourvues d'une capacité élevée de consommation d'aliments et d'absorption des nutriments ce qui peut avoir des effets négatifs si l'on veut contrôler l'état de chair des truies pendant la gestation et éviter un état corporel excessif néfaste à la mise-bas. L'une des approches couramment utilisées pendant la gestation afin de restreindre l'apport en énergie et en nutriments est l'incorporation d'ingrédients fibreux aux rations alimentaires (Shi et Noblet 1993).

2.5.2 Effets de l'utilisation de la fibre en gestation et conséquences sur les performances de la reproduction

Les effets des régimes fibreux sur la taille de la portée, le poids à la naissance et la croissance des porcelets sont fortement liés à de multiples paramètres tels que le taux d'incorporation et la nature des fibres alimentaires (Ru et Bao 2004; Everts 1991). Ces effets des régimes fibreux distribués aux truies gestantes restreintes sont potentiellement bénéfiques et plus fréquents que les effets néfastes. Par exemple, un apport de 350 à 450 g de fibre NDF par jour pendant la gestation semble pouvoir maximiser la taille de la portée à la naissance (Etienne 1987). Les truies recevant un régime alimentaire fibreux à base de son de blé et des épis de maïs tout au long de la gestation ont eu une élévation du taux de la prolactine dans le sang 12 h avant la mise-bas, et le temps passé couché sur le côté durant la mise-bas a été augmenté, par rapport aux truies ayant été nourries à base de maïs, de soja ou d'avoine (Girard et al. 1995). De plus, les régimes fibreux réduisent considérablement la proportion des truies ayant une température rectale élevée ce qui révèle une réduction de l'inflammation durant la phase du péri-partum (McGlone et al. 2004 ; Girard et al. 1995). Quant aux

bénéfiques touchant aux porcelets (nombre de porcelets nés vivants, la mortalité avant le sevrage), ces régimes alimentaires riches en fibres semblent peu affecter ces paramètres (Matte et al. 1994).

L'utilisation de la fibre alimentaire est également introduite dans le cadre de l'instauration des stratégies alternatives à l'antibiothérapie en élevage porcin afin de moduler le microbiote intestinal dans une optique d'amélioration des performances de reproduction (Shang et al. 2019). De récentes études ont mis en évidence l'effet d'inclusion de la fibre alimentaire au régime des truies pendant la gestation et son effet sur les performances de reproduction ainsi que les paramètres physiologiques de la reproduction et de leurs porcelets (Jo et Kim 2023). La fibre alimentaire contribue ainsi à l'équilibre du microbiote intestinal de la truie menant à une amélioration des performances de reproduction des truies gestantes (Li et al. 2021). L'analyse bibliographique par méta-analyse de 15 rapports publiés entre 2008 et 2022 a rapporté qu'une supplémentation de fibre alimentaire en régime des truies gestantes augmentait de 0,4 porcelet né vivant par portée (Jo et Kim 2023). Cependant, cette analyse a évoqué que l'impact de la fibre alimentaire sur les performances de reproduction dépendent aussi de la source de la fibre, sa teneur en fibres détergentes neutre et de la parité.

Par exemple, un régime enrichi en fibre alimentaire soluble (SDF) pendant la gestation a contribué à l'augmentation du nombre d'embryons vivants et des taux de survie embryonnaire totale plus élevée par rapport aux truies nourries avec un régime enrichi avec des fibres alimentaires insolubles (FDI) (Renteria-Flores et al. 2008). De plus, l'ajout de fibre améliore l'uniformité des portées et réduit le nombre des porcelets ayant un retard de croissance (Zhuo et al. 2021). L'accroissement du nombre et de la viabilité des porcelets étaient relativement liés à la source de fibre alimentaire et la teneur incluse (Wu et al. 2020). Par exemple, le nombre et la viabilité des porcelets augmentaient lorsque les truies recevaient de 20 à 30 % de farine de paille hydrolysée (Bergner 1988) alors que 13 % de paille de blé moulue dans les régimes de gestation des truies a augmenté la taille de la portée et le poids total de la portée à la naissance (Veum et al. 2009). Des poids de naissance plus élevés ont également été rapportés lorsque les truies ont été nourries avec des aliments contenant 40 %

de pulpe de betterave pendant la gestation, ce qui pourrait être lié à une activité microbienne favorable (Rooney et al. 2019).

Dans d'autres études, un apport élevé en fibre alimentaire soluble (SDF) a augmenté la mortalité avant le sevrage et a diminué le nombre de porcelets sevrés par rapport aux truies nourries avec un régime riche en fibre alimentaire insolubles (IDF) (Yde et al. 2011). Une étude récente a également révélé que la teneur en IDF et en SDF, ainsi que le rapport IDF :SDF, variaient considérablement entre les différentes ressources en fibres, ce qui entraînait des changements spectaculaires dans les paramètres de cinétique de fermentation et la production de gaz (Mou et al. 2020). Le ratio IDF :SDF dans une ressource en fibres pourrait affecter l'utilisation globale de l'alimentation et jouer un rôle important dans l'amélioration des performances de reproduction des truies (Renteria-Flores et al. 2008b). De plus, il a été démontré que le ratio IDF :SDF avait un effet significatif sur l'état de santé des truies et de leur progéniture, dont un poids corporel moyen et un poids de la portée au sevrage plus élevés ont été observés lorsque le ratio IDF :SDF était de 3,89 dans le régime de gestation (Li et al. 2019).

Les performances reproductives des truies sont dépendantes du comportement périnatal de la truie et du déroulement du processus de la mise-bas. Ces facteurs affectent également la viabilité des porcelets ainsi que les performances de reproduction ultérieures. Le syndrome d'agalactie de la truie est une affection fréquemment observée chez les truies ayant reçu un apport alimentaire élevé en fin de gestation (Göransson 1989). L'une des mesures de prévention d'agalactie est l'incorporation de fibre, entre autres de son de blé et de farines de luzerne, dans les régimes alimentaires des truies notamment en fin de gestation (Wu et al. 2006). Une autre alternative consiste en une diminution de l'allocation alimentaire d'un régime concentré combinée à un accès libre au foin ou à la paille (Ashworth et al. 2009).

2.6 Comportement d'ingestion et satiété :

Le comportement alimentaire est un domaine de recherche important qui relie les sciences de la nutrition et du comportement (Johnson et al. 1999). Pour une même quantité

d'énergie, chez des truies logées en groupes ou individuellement, le temps d'alimentation du régime fibreux est plus long par rapport à celui du régime conventionnel. Ce temps augmente d'environ 30 % chez les truies nourries avec un régime riche en fibres (11,5 MJ EM, kg⁻¹), comparativement à un régime conventionnel (13 MJ EM kg⁻¹) (Brouns et al. 1995).

Le niveau de motivation alimentaire a été aussi évalué chez des truies nourries avec un régime fibreux. Robert et al. (1997) ont signalé un nombre de récompenses alimentaires réduit pour les truies nourries avec des régimes fibreux (farine de blé et coque d'avoine) comparativement aux truies ayant reçues des aliments concentrés (maïs et soja). De ce fait, ces résultats évoquent qu'une réduction de la motivation alimentaire chez les truies nourries avec l'aliment fibreux et que cette réduction était liée au fait que le régime alimentaire fibreux soit plus volumineux. Toutefois, il faut noter que la motivation alimentaire revient à un niveau prédéterminé par l'apport alimentaire une fois la distension gastro-intestinale est réduite après la prise alimentaire. Les régimes alimentaires volumineux distribués aux truies sont en faveur de l'augmentation de la sensation de satiété, mais ne résolvent pas complètement la motivation alimentaire à maintenir pour une plus longue durée (Robert et Martineau 2001).

2.6.1 Les comportements stéréotypés :

L'effet des régimes fibreux est largement influencé par le rang de parité, en raison de l'augmentation de la fréquence et de la rigidité des comportements stéréotypés au fil des parités successives (Dantzer 1986). Comme l'effet est modulé par le nombre de parité, il a été montré qu'une réduction de la manipulation stéréotypée des chaînes sur une période de 24 h pour les deux premières parités chez les truies nourries avec des régimes riches en fibres à base de son et de blé par rapport à un régime pauvre en fibre comparativement aux truies multipares (Robert et al. 1993). De plus, il faut noter que la réduction des comportements stéréotypés est plus importante lorsque le taux d'incorporation des fibres est d'environ 300 g de fibre NDF par kg (fibres détergents neutres) qu'à un niveau inférieur (100 g de NDF par kg) (Ramonet et al. 1999).

Quant aux comportements buccaux, leur incidence est réduite avec un régime alimentaire restreint contenant environ 107 g de fibres brutes par kg par rapport à un régime

conventionnel de 44 g fibres brutes, lorsque les deux régimes alimentaires étaient distribués une fois par jour dans des stalles d'alimentation individuelles. Une grande partie de l'effet des régimes fibreux sur les comportements stéréotypés est liée au fait que les truies passent plus de temps à manger une ration fibreuse, et aussi à l'augmentation de la masse d'aliments consommée (Meunier-Salaün et al 2001). Cependant, la réduction postprandiale des stéréotypies avec un régime riche en fibres reste significative même après la suppression du temps passé à manger (Ramonet et al. 1999).

3 Les céréales à paille

Les céréales à paille et leurs dérivés constituent la matière élémentaire des régimes utilisés en alimentation porcine. Ce sont donc les ingrédients de choix des animaux monogastriques, dont les truies. En botanique, un grain de céréale est un caryopse, dont selon l'espèce de la céréale, il pourrait être nu ou vêtu de ses glumelles. Le blé, l'orge, l'avoine, le seigle et le triticales sont les principales céréales à paille, ayant une valeur énergétique importante. Chez celles à grain vêtu telles que l'avoine et l'orge, elles conservent leurs enveloppes (Saulnier 2012). Par ailleurs, la plupart des céréales à paille contiennent des NSP, tels les xylanes, arabinoxylanes ou β -glucanes, ce qui représentent une source significative de fibre dans l'alimentation des monogastriques (Valade et al. 2020).

Les céréales possèdent des qualités nutritionnelles indéniables liées à l'importance de leur contenu en amidon. Elles peuvent en conséquence représenter jusqu'à pratiquement 70 % du régime des porcs (Johnston 2022). Leur teneur en protéine est relativement faible (8 à 12 %) et ne permet pas couvrir la totalité des besoins en acides aminés des porcs (Jha et Woyengo 2022).

3.1 L'avoine :

L'avoine est une espèce de plantes monocotylédones, de la famille des graminées (Poaceae). L'avoine est cultivée à la fois pour son caryopse et comme plante fourragère. Elle fait partie des céréales à paille utilisées en alimentation animale, notamment pour les équidés. L'avoine est un grain vêtu dont l'enveloppe reste adhérente à l'amande, ce qui diminue sa

valeur énergétique et son poids spécifique (50 kg/hl contre 78 kg/hl pour un blé) par rapport aux céréales à grain nu. Bien que sa valeur en énergie brute soit comparable à celle du maïs, sa valeur en énergie nette est clairement inférieure à celles du maïs, du blé et de l'orge. Cette valeur inférieure s'explique par son contenu élevé en fibres brutes à environ 12 % (Eastwood, 2021). L'avoine est un excellent choix pour l'alimentation des truies en gestation, du fait à sa faible densité énergétique et son contenu riche en fibre qui leur permet de procurer un sentiment de satiété (Johnston 2022).

3.2 Le blé :

Le blé est un terme générique qui désigne le grain (caryopse) produit par ces plantes et regroupe plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum*. Ce sont des monocotylédones de la famille des graminées, cultivées dans de très nombreux pays. Les deux espèces de blé les plus cultivées au monde sont le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) qui représente plus de 90 % de la production mondiale et le blé dur (*Triticum durum Desf.*) qui constitue 5 % de celle-ci et qui est traditionnellement cultivé dans le bassin méditerranéen (Awatef et al. 2017).

Le grain de blé se compose principalement d'amidon qui se localise au sein de l'album amylicé (66 % de la MS) (De Blas 2013). La valeur énergétique du blé est légèrement inférieure à celle du maïs (environ 95 %) tandis qu'elle est supérieure à celles des autres céréales. Sa valeur énergétique est de l'ordre de 16 317 kJ/kg d'EM (Villena Fernández et al. 2003). Les protéines représentent de 10 à 13 % de la MS et se dispersent de façon inégale dans la totalité des tissus où la concentration reste la plus élevée dans l'embryon et la couche à aleurone (Laudencia-Chingcuanco et al. 2007). Les protéines de la couche à aleurone représentent 20 % des protéines des grains de blé qui sont la source des acides aminés essentiels notamment la lysine (Tegge 1990). Les teneurs en acides aminés du blé sont 3,1, 4,2, 3,2 et 1,3 g/kg respectivement pour la lysine, la méthionine-cystéine, la thréonine et le tryptophane (Drogoul et al. 2004). Les fibres représentent 2 à 3 % de la MS et sont riches en pentosanes. Bien que le phosphore soit à 70 % sous forme phytique, il présente

une digestibilité de 50 %. La présence de phytases endogènes dans le grain permet une digestibilité partielle du phosphore phytique (Pointillart 1994).

3.3 L'orge

L'orge appartient au genre *Hordeum* espèce *Distichum* (orge à 2 rangs) et *Hordeum Vulgare* (escourgeon, orge à 6 rangs). C'est une plante monocotylédone qui appartient à la famille des graminées (Poacées). Il existe toutefois une variabilité importante entre les différents cultivars utilisables en alimentation porcine. Cette variabilité semble être à l'origine de différences dans la prise alimentaire, l'efficacité alimentaire et les taux de croissance associées à l'utilisation de différents types d'orge. En effet, en comparaison avec l'orge vêtue, l'orge à grain nu présente une teneur supérieure en protéines brutes et une teneur inférieure en fibres brutes (Badr et al. 2000).

Après l'avoine, l'orge est la céréale la plus riche en fibres brutes à raison de 3,90 %. L'orge a une valeur énergétique nette moyenne de 9 736 kJ/kg. La concentration en protéines brutes est d'environ 11 % et la teneur en lysine de 0,40% (Eastwood, 2021 ; Sauvart et al. 2004). De part ces caractéristiques, l'orge semble pouvoir remplacer le maïs dans les rations destinées aux truies en gestation.

3.4 Le triticale :

Le triticale est la première céréale créée par l'être humain, un hybride amphiploïde entre le blé (dur ou tendre) et le seigle. Son nom provient de la combinaison des noms latins du genre de blé *Triticum* et *Secale* (Vilariño et al. 2016). Le triticale regroupe potentiellement les caractéristiques nutritionnelles du blé à la rusticité du seigle (Catherine et al. 2007). La valeur énergétique du triticale se retrouve entre le blé et le seigle. Il a une teneur en lysine supérieure de 25 % à celle du blé (Pozo et al. 2023). Hormis, ses teneurs en acides aminés et en NSP, sa teneur en phosphore digestible affecte significativement la valeur alimentaire de cette céréale et conditionne les stratégies alimentaires aptes à réduire l'impact environnemental de l'élevage des monogastriques. L'activité phytasique du triticale est

fonction de la variabilité génotypique de la céréale, et est intermédiaire entre celle du blé et du seigle (respectivement 770, 450 et 5 300 unités FTU/kg) (Sauvant et al. 2004).

3.5 Le seigle :

Le seigle appartient à la famille des graminées. Le seigle d'automne est réputé pour sa rusticité hivernale supérieure en comparaison avec le blé d'automne. L'utilisation du seigle en alimentation porcine était restreinte en raison de sa susceptibilité à l'ergot qui est un champignon considéré comme un facteur antinutritionnel du seigle (Friend et Macintyre 1970). En plus de l'ergot, sa teneur élevée en NSP peut limiter son utilisation chez les jeunes porcelets (Jürgens et al. 2012). En revanche, son contenu riche en fructo-oligosaccharides, une fibre hautement fermentescible au niveau de l'intestin postérieur, représente une source intéressante de fibres dégradables pour les porcs. De même, la fermentation de ces NSP fournit du butyrate qui est considéré comme un substrat énergétique pour les entérocytes (Knudsen 2001). Ainsi, le seigle peut avoir un effet prébiotique lorsqu'il est inclus en alimentation des porcs. Le seigle en tant que céréale panifiable reste peu demandé mais commence à prendre son essor en alimentation animale, notamment avec l'émergence des nouveaux hybrides de seigle améliorant ses caractéristiques agronomiques et nutritionnelles. (McGhee et Stein 2021). Le premier seigle hybride a été introduit en 1984 (Laidig et al. 2017).

3.6 Recours à l'utilisation du seigle hybride dans l'alimentation animale :

Le choix des ingrédients en alimentation animale doit se faire dans l'objectif de maximiser la réussite d'élevage en termes d'optimisation des performances des porcs et ce en visant une meilleure efficacité alimentaire et une efficacité économique élevée sans pour autant compromettre l'environnement. Ainsi, en considérant le prix variable des aliments destinés aux animaux, il apparaît indispensable que nous cherchions des moyens efficaces pour contrôler les coûts relatifs à la satisfaction des besoins en ingrédients pour les porcs (Stewart et al. 2013). Cependant, la concrétisation d'un tel objectif exige en meilleure

connaissance des matières premières afin de choisir les ingrédients, dont les céréales, les moins dispendieux mais qui offrent une bonne qualité nutritionnelle afin de répondre aux besoins en nutriments et en énergie. Parmi les céréales à paille, le seigle hybride donne de meilleurs rendements en MS par hectare par rapport au blé et ce même dans des conditions de croissance sèches et humides (Schittenhelm et al. 2014). Ce seigle est donc réputé pour son rendement plus accru par rapport aux autres céréales (Miedaner et Geiger 2015).

Les grains du seigle hybride contiennent des fructanes, qui se dégradent peu dans la partie proximale de l'intestin, sont disponibles pour la microflore intestinale et agissent donc comme des prébiotiques. Les fructanes sont parfaitement adaptés pour la fabrication de l'acide butyrique par la flore intestinale, ce qui pourrait améliorer la santé et les performances des porcs (Wilke et al. 2021). De plus, les fibres du seigle hybride qui atteignent l'intestin distal et qui sont lentement et progressivement décomposés pourraient procurer un sentiment de satiété durable aux truies gestantes (Abd El-Wahab et al. 2020).

3.6.1 Caractéristiques du seigle hybride :

Le seigle hybride (*Secale cereale* L.) est une céréale annuelle diploïde ($2n= 2\times =14$) à pollinisation croisée dotée d'un système d'auto-incompatibilité gamétophyte efficace. Le seigle (*Secale cereale* L.) est une céréale pourvu d'une excellente résistance d'hivernage et d'une grande tolérance aux sol sablonneux, au sel, à la sécheresse et au stress à l'aluminium (Geiger et Miedaner 1999 ; Jürgens, Jansen, et Wegener 2012).

3.6.2 Production et caractéristiques agronomiques :

La culture du seigle en Europe représentait environ 75 % de la production mondiale, et est produite aussi en Russie, en Biélorussie, en Pologne, en Allemagne et en Ukraine. Sa production était destinée principalement pour la fabrication du pain, et secondairement pour la production des biogaz en tant que source d'énergie renouvelable. Au Moyen-Orient la culture du seigle s'est développée en tant que culture secondaire (Miedaner et Geiger 2015).

Le seigle peut pousser sur des sols pauvres, sablonneux et acides, il est très résistant au stress dû au froid et il est plus tolérant à la sécheresse que les autres céréales en raison de ses

racines profondes (Wolski, 1974, cité dans Jürgens et al. 2012). En conditions de croissance sèches et humides, le seigle s'est mieux comporté que le blé et l'orge, produisant de meilleurs rendements en MS, ce qui suggère que le seigle est une culture appropriée pour les conditions environnementales variables (Schittenhelm et al. 2014). Le seigle est résistant à de nombreux ravageurs typiques qui affectent d'autres céréales, bien que l'étendue de la résistance dépend en grande partie de l'environnement (Miedaner et Geiger 2015).

Le premier hybride de seigle a été lancé en 1984 et, en 2014, environ 80 % du seigle cultivé en Allemagne était un seigle hybride (Laidig et al. 2017). La caractéristique la plus importante du seigle hybride par rapport au seigle conventionnel est son potentiel de rendement accru (Miedaner et Geiger 2015a). La base de la sélection hybride du seigle est de maximiser l'hétérosis en sélectionnant 2 lignées génétiquement différentes de seigle consanguines pour produire un hybride F1 supérieur, tel que décrit par Miedaner et Geiger (2015). Le but de l'utilisation de lignées consanguines est de réduire la variation génétique et d'assurer une progéniture F1 uniforme. La culture du seigle hybride semble produire plus que les autres petites céréales, et il représente un rendement moyen de 20 % supérieur aux variétés du seigle conventionnelles à pollinisation libre (Niedziela et al. 2021).

3.6.3 Composition chimique :

La majeure partie de l'énergie contenue dans le seigle provient de l'amidon, qui compose de 50 à 65 % du grain (Strang et al. 2016). L'énergie brute dans le seigle est d'environ 18 409 kJ/kg sur une base de MS (Rodehutschord et al. 2016). Le seigle contient entre 12 et 17 % de fibres alimentaires, ce qui est plus important que celui observé chez le blé, le sorgho et le maïs, mais moins que l'orge (Strang et al. 2016 ; NRC, 2012). Les fibres alimentaires du seigle comprennent les oligosaccharides, les NSP, l'amidon résistant et la lignine (NRC, 2012).

Le seigle a des concentrations plus élevées de fructanes que les autres grains de céréales. Dans la littérature plus ancienne, les chaînes courtes d'unités de fructose sont appelées fructo-oligosaccharides, alors que les fructo-polysaccharides sont des chaînes plus longues et plus complexes des unités de fructose (Hansen et al. 2003). Les fructo-

oligosaccharides et les fructo-polysaccharides sont parfois catégorisés sous le terme général, de « fructanes ». Les valeurs publiées pour la concentration de fructanes du seigle varient en fonction de la méthode d'analyse. Lorsqu'il est analysé selon la procédure décrite par Bach Knudsen (1997), la concentration de fructanes dans le seigle est d'environ 3 % (Strang et al. 2016). Cependant, lorsqu'il est analysé par la méthode enzymatique décrite par McCleary et al. (2000), les valeurs pour les fructanes vont de 4,5 à 6,6 % (Hansen et al. 2003).

Les fructanes ne sont pas digérés dans le petit intestin mais sont dégradés rapidement dans le gros intestin et sont considérés comme un prébiotique (Karppinen et al. 2003). Par exemple, huit grammes de fructanes par jour augmentent la présence de *Bifidobacterium* et de *Lactobacillus* et réduit la présence d'*Escherichia colis* et *Clostridium* dans les populations microbiennes intestinales humaines (Bouhnik et al. 2007). En plus des fructanes, les arabinoxylanes, les β -glucanes mélangés et la cellulose sont abondants dans le seigle (Bach Knudsen 1997). Sur une base de MS, la concentration d'arabinoxylanes dans le seigle se situerait entre 6 et 12 %, mais plus généralement entre 8 à 9 % (Strang et al. 2016). Le seigle est plus riche en arabinoxylanes solubles par rapport aux autres grains, ce qui est corrélé à une viscosité accrue du digesta (Jürgens et al. 2012). La concentration, la structure, le degré de substitution, et la solubilité des arabinoxylanes sont influencés par le génotype de la plante et les conditions de croissance (Hansen et al. 2003). Le seigle contient de 1,5 à 2,5 % de β -glucanes mélangés sur une base MS (Bach Knudsen 1997).

Les β -glucanes mélangés sont présents à des concentrations plus élevées dans l'orge et l'avoine que dans le seigle, mais ils sont hautement fermentescibles (Rodehutschord et al. 2016). Bien que les liaisons β -1,3 et β -1,4 présentes dans les β -glucanes mixtes ne soient pas digestibles par des enzymes endogènes chez le porc, les β -glucanes fournissent de l'énergie au porc à la suite d'une fermentation microbienne (Bach Knudsen et Hansen 1991). La concentration d'amidon résistant dans le seigle est difficile à déterminer. Par isolement enzymatique, l'amidon résistant a été rapporté comme inférieure à 1 % dans le seigle, mais les valeurs publiées pour la digestibilité iléale apparente de l'amidon de seigle chez les porcs indiquent que la concentration d'amidon résistant dans le seigle peut être supérieure à 1 % (Cervantes-Pahm et Stein 2014).

La concentration de lignine dans le seigle est de 1 à 2 %, alors que la concentration d'ADL est de 0,7 à 0,9 % (Strang et al. 2016). Dans les ingrédients alimentaires, la présence de lignine en grande quantité n'est pas souhaitable car la lignine n'est pas dégradable par des enzymes endogènes ni fermentescible par des microbes, et elle réduit la digestibilité d'autres nutriments (Wenk 2001). La quantité de protéine présente dans le grain dépend du génotype, des conditions de croissance et du taux de fécondation (Jürgens et al. 2012). La concentration de protéines brutes dans le seigle hybride varie de 8 à 13 % (McGhee et Stein 2020). La concentration moyenne de lysine dans le seigle hybride est de 0,35 %, et les concentrations de méthionine, de thréonine et de tryptophane sont d'environ 0,15, 0,30 et 0,10 %, respectivement (Strang et al. 2016d). Les nouveaux cultivars de seigle hybride ont une concentration réduite de protéine par rapport aux cultivars plus anciens de seigle (NRC 2012; Laidig et al. 2017).

Une caractéristique unique du seigle est sa forte activité phytasique intrinsèque, qui peut libérer le phosphore phytique et ainsi améliorer la digestibilité du phosphore (Pointillart 1994). Le seigle peut contenir jusqu'à 4 000 unités FTU intrinsèque par kg de grain, alors que le blé ne contient que la moitié de cette activité. Le maïs et le sorgho sont pratiquement dépourvus de phytase endogène (Rodehutschord et al. 2016). Le seigle hybride a moins de lipides que la plupart des autres céréales, y compris l'orge, le blé, le maïs, et le sorgho, avec une teneur inférieure à 2 % (McGhee et Stein 2018). La teneur en cendres du seigle hybride est d'environ 1,5 % (McGhee et Stein 2020). Le seigle hybride contient environ 0,30 % de phosphore, qui est proche de la quantité de phosphore de l'orge, du blé, du maïs et du sorgho. Le seigle hybride est pratiquement dépourvu de calcium (0,05% ou moins) comme d'autres grains céréaliers (McGhee et Stein 2023).

3.6.4 Biovars génomique et effet de l'ergot :

Les nouveaux hybrides de seigle ont une concentration réduite en facteurs antinutritionnels (Makarska et al., 2007, cité par Schwarz et al. 2015) et leur prédisposition à l'infection à l'ergot a été partiellement atténuée (Miedaner et Geiger 2015). Parce que le seigle est une culture à pollinisation croisée, il est plus sensible à l'ergot que les autres grains,

en particulier lorsque la production de pollen n'est pas synchrone avec la floraison. Les graines de seigle hybride vendues dans le commerce contiennent un nouveau caractère, connu sous le nom de Pollen Plus, qui utilise les gènes restaurateurs de pollen Rfp1 et Rfp2 pour améliorer l'efficacité de la production du pollen et minimiser la possibilité pour l'ergot d'infecter les têtes de graines non fécondées. Pour le seigle hybride, la réduction du temps d'ouverture des fleurs pour la pollinisation et l'amélioration de la floraison synchrone, minimisent également le risque d'infection à l'ergot (Niedziela et al. 2021).

En raison de la nature de la sélection hybride, la génération F1 de semences hybrides est génétiquement plus uniforme que les variétés à pollinisation libre, ce qui se traduit par des champs plus uniformes avec des fenêtres de floraison et de pollinisation synchronisées (Miedaner et Geiger 2015). Outre le rendement des céréales et des plantes entières, la sélection pour la résistance aux maladies et à la verse est également un objectif de sélection importants lors du développement des lignées parentales (Miedaner et al. 2019).

3.6.5 Digestibilité et valeur du nutriment énergétique :

La digestibilité de la plupart des nutriments dans les cultivars plus anciens de seigle est supérieure à celle des nouveaux cultivars de seigle hybride, bien que peu d'études aient évalué la digestibilité du seigle hybride chez les porcs jusqu'à présent (Strang et al. 2016). La digestibilité iléale standardisée de la protéine est de 83 et 79 % dans le seigle et l'orge, respectivement (NRC, 2012). Cependant, la digestibilité iléale standardisée de la protéine dans le seigle a été estimée à des valeurs aussi basses que 68 % (Brestenský et al. 2013). Lærke et al. (2015) ont déterminé que la digestibilité iléale standardisée des acides aminés était d'environ 45 % dans le seigle grossièrement broyé et de 51 % dans le seigle finement moulu. Ces valeurs sont nettement inférieures aux blés grossiers et fins. Toutefois, les résultats de la plupart des recherches publiées indiquent que la digestibilité de la protéine dans le seigle est similaire à celle de l'orge, mais inférieure à celle des autres graines de céréales (Miedaner et Laidig 2019). Par exemple dans le seigle hybride, la digestibilité iléale standardisée de la protéine a été déterminée à 73 % chez les porcs (Strang et al. 2016).

Comme les autres céréales, les 2 premiers acides aminés limitants dans le seigle sont la lysine et la méthionine (Brestenský et al. 2013).

La plus faible digestibilité des acides aminés du seigle viendrait de la protéine qui est piégée dans la partie fibreuse insoluble du grain, et aussi de la plus grande proportions de fibres dans le seigle ce qui augmente les pertes endogènes en acides aminés (Jondreville et al. 2001) . La concentration d'EM dans le seigle chez les porcs est d'environ 15 773 kJ/kg de MS, ce qui est inférieure à celle du maïs, de l'orge décortiquée, du sorgho et du blé (Cervantes-Pahm et al. 2014). Il n'est pas clair si l'EM dans le seigle hybride est différent de l'EM dans les cultivars plus anciens de seigle. La majeure partie de l'énergie obtenue à partir du seigle est dérivée de l'amidon, qui est digestible à 92 à 97 % (Lærke et al. 2015). La digestibilité totale de l'énergie dans le seigle se situerait entre 85 et 90 %, ce qui est inférieur ou égal à autres grains. La dégradation de la MS dans l'intestin distal est plus importante dans le seigle que dans les autres grains de céréales, en raison de la teneur plus élevée en fibre fermentescible (Cervantes-Pahm et al. 2014).

La différence entre la digestibilité iléale apparente et la digestibilité apparente totale de l'énergie brute pour le seigle serait due à la hausse de la fermentation microbienne dans l'intestin postérieur. La fermentation microbienne des fibres entraîne la synthèse d'AGV qui peuvent être absorbés par le porc et utilisés comme source d'énergie. La dégradation des NSP est généralement faible dans l'intestin antérieur, autour de 10 à 15 % pour le seigle (Lærke et al. 2015). Toutefois, la fermentation microbienne est plus prononcée dans l'intestin postérieur et la dégradation du NSP peut atteindre 76 % pour le seigle (Nørgaard et al. 2016)

La supplémentation en xylanase microbienne dans les régimes riches en seigle entraîne une augmentation numérique de 3,3 % de la digestibilité iléale standardisée des acides aminés, de l'énergie brute et d'une augmentation significative de 1,7 % de la digestibilité totale de l'énergie brute (Nitrayová et al. 2010). Toutefois, les résultats d'une autre étude indiquent des effets négligeables de la supplémentation en xylanase sur la digestibilité de l'énergie dans seigle (Nørgaard et al. 2016). La xylanase microbienne pourrait agir sur la digestibilité en réduisant la viscosité du digesta et ainsi améliorer la dégradabilité du NSP du seigle (Lærke

et al. 2015). L'arabinoxylane de seigle serait plus facilement dégradé que celui de blé en raison de sa solubilité supérieure (McGhee et Stein 2023).

3.6.6 Effet prébiotique du seigle :

Comme nous l'avons défini, les fibres alimentaires sont peu dégradées par les enzymes endogènes des mammifères (FDA, 2016). En revanche, ils subissent une fermentation microbienne au niveau du tractus intestinal (Bach Knudsen 2001). Une prédominance des bactéries qui fermentent les glucides, les sucres et les fibres alimentaires est marquée au niveau du tractus digestif postérieur, dont le cæcum et le côlon proximal qui sont colonisés par une population microbienne diversifiée et importante (10^{12} unités formant des colonies (UFC)/ml) (Choque Delgado et al. 2013). Les AGV produits par cette fermentation ont de multitudes effets positifs sur l'organisme hôte (Burbach et al. 2017)

La production des AGV est généralement proportionnelle à la quantité des glucides fermentescibles, sachant que les glucides non-fermentescibles ne fournissent aucun rendement énergétique à l'hôte. Ils sont, malgré tout, bénéfiques par le fait de fournir une masse physique au digesta tout au long du tractus gastro-intestinal et par leur effets laxatifs qui permet d'accélérer le transit du digesta intestinal au niveau du côlon, Cette hausse de la vitesse du transit intestinale réduit le contact entre les cellules du côlon distal et les agents pathogènes ou les toxines (Gråsten et al. 2000). Le butyrate est considéré comme étant le substrat le plus énergétique et responsable du maintien et de la fonction des cellules épithéliales du côlon. Il contribue aussi à la fonction barrière du côlon ainsi qu'au maintien et à l'amélioration de la santé intestinale (Vogt et al. 2014).

3.6.7 La caractérisation des effets des fibres alimentaires du seigle :

L'alimentation des porcs riche en seigle est favorable à un changement bénéfique des populations bactériennes intestinales ce qui favorise la production du butyrate (Burbach et al. 2017), la réduction du pH intestinal favorable à la croissance des bactéries bénéfiques et l'inhibition de la colonisation par des pathogènes (Ilhan et al. 2017). Comme mentionné précédemment, le seigle contient entre 12 et 17 % de fibres alimentaires (Strang et al. 2016a; NRC, 2012). Les NSP sont présents en proportions élevées dans le seigle, les arabinoxylanes,

les β -glucanes mélangés et la cellulose étant les plus abondants (Bach Knudsen 2001). Le seigle a des concentrations plus élevées de fructanes que les autres grains de céréales. (Hansen et al. 2019).

3.6.8 Effets physiologiques des fructanes comme prébiotiques :

Le terme prébiotique a été défini en 1995 pour la première fois, comme étant un ingrédient alimentaire indigestible qui affecte avantageusement l'hôte en stimulant sélectivement la croissance ou l'activité d'une ou d'un nombre limité de bactéries déjà résidentes dans le côlon (Gibson et Roberfroid 1995). Les prébiotiques servent donc de nutriments pour les micro-organismes hébergés par l'hôte. Ainsi, les prébiotiques diffèrent des fibres alimentaires telles que les pectines, la cellulose et les xylanes, qui favorisent la croissance d'une grande variété de micro-organismes intestinaux. En effet, un prébiotique ne devrait pas être largement métabolisé, mais provoqué un métabolisme biaisé vers des micro-organismes favorables à la santé au sein de l'écosystème indigène. (Simpson et Campbell 2015).

En 2004, la définition des prébiotiques a évolué comme suit : « des ingrédients fermentés sélectivement qui permettent des changements spécifiques, à la fois dans la composition ou l'activité de la microflore gastro-intestinale, qui confèrent des avantages au bien-être et à la santé de l'hôte » (Gibson et al. 2004). En 2008, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a mis à jour la définition des prébiotiques : « des composants alimentaires non viables qui confèrent un bénéfice pour la santé de l'hôte associé à la modulation du microbiote ». Une exclusion du critère de la fermentation sélective avait été fait afin de ne pas exclure les antibiotiques (Pineiro et al. 2008). Une autre définition d'un prébiotique comme « un composé non digestible qui, par sa métabolisation par des micro-organismes dans l'intestin, module la composition ou l'activité du microbiote intestinal, conférant ainsi un effet physiologique bénéfique à l'hôte » (Bindels et al. 2015). Cette définition limitait les prébiotiques aux interactions avec le microbiote intestinal et supprimait la nécessité d'une fermentation sélective.

Les fructanes sont classés comme prébiotiques en raison de leurs effets bénéfiques sur la croissance des bactéries bénéfiques, dont les Bifidobacteries. Ils auraient une action positive sur la suppression de bactéries pathogènes putréfactives et permettraient également la réduction des concentrations en cholestérol dans le sérum sanguin (Roberfroid 2007). L'effet le plus évident de la consommation d'aliments riches en fructanes est la production accrue de butyrate. En effet en plus d'agir sur la muqueuse intestinales, le butyrate procure aussi un sentiment de satiété par le fait de stimuler les cellules L dans le colon à sécréter le peptide 1 de type glucagon (GLP-1) et le peptide YY (Hamer et al. 2008). Les fructanes ont aussi la capacité de moduler d'une façon directe les cellules immunitaires (Van den Ende et al. 2002). La modulation du système immunitaire par l'intermédiaire des fibres alimentaires prébiotiques peut être également salutaire pour réduire au minimum le coût énergétique et de soutenir le système immunitaire (c.-à-d., réduire l'inflammation). Par exemple, la diarrhée chez les jeunes porcs après le sevrage peut être réduite par la supplémentation en fructane (Oli et al. 1998). Chez les porcs en finition, la supplémentation en fructane améliore la croissance en réduisant les concentrations fécales d'*Escherichia coli* et l'excrétion fécale de produits nocifs de fermentation (Zhao et al. 2015).

3.6.9 Les arabinoxylanes :

L'arabinoxylane est une hémicellulose qui se trouve dans les parois cellulaires primaires et secondaires des plantes et des céréales. Il s'agit d'un copolymère de deux pentoses à savoir, l'arabinose et la xylose. Structuellement, il contient une multitude d'unités de xylose liés en 1,4. En revanche, les unités de xylose sont substituées par des résidus d'arabinose 2,3 ou 2,3 liés (Ebringerová et Heinze 2000). Outre leur rôle structurel dans les cellules végétale, ce sont des réservoirs d'acide furélique et d'autres acides phénoliques liés de façon covalente. Les acides phénoliques ont un rôle dans la défense et la protection contre les agents pathogènes fongiques et sont impliqués dans de nombreuses fonctions et avantages pour la santé via leur activité antioxydante (McCartney et al.2005).

3.6.10 Les céréales renfermant les arabinoxylanes :

Les arabinoxylanes sont l'un des principales composantes des fibres alimentaires solubles et insolubles des céréales (Lineback et al. 1977). Ils sont naturellement présents dans les céréales, comme le blé, le seigle, l'orge et le triticale. Une quantité considérable d'arabinoxylanes ingérés est fermentée par la microflore colique et transformée en arabinoxylanes de faibles poids moléculaires. Le seigle est la céréale la plus riche en arabinoxylanes solubles dont elle renferme 2,1 g par 100 g, comparativement à 0,71 g dans 100 g pour le blé (Dervilly et al. 2002). Une étude de Knudsen et Laerke (2010) a démontré que les arabinoxylanes du seigle ne peuvent être fermentés que par certaines espèces bactériennes telles que; les *Bactéroides ovatus*, *Ruminococcus flavefaciens* ainsi que *Roseburia intestinalis*. Ainsi, à l'issue de cette fermentation des polymères de arabinoxylanes complexes, une augmentation des lactobacilles et des bifidobactéries est notée. Ces deux groupes de bactéries sont généralement bénéfiques dans le tractus gastro-intestinal des mammifères (Rivière et al. 2015).

4 Microbiote intestinal

4.1 Définition et composition du microbiote :

Le microbiote se définit comme étant l'ensemble des micro-organismes y compris leurs génomes ainsi que les éléments extra chromosomiques présents dans ou sur un organisme hôte (Ursell et al. 2012), ainsi que leurs interactions (Kim et Isaacson 2015).

En revanche, le microbiome désigne une communauté microbienne caractéristique dans un habitat raisonnablement bien défini qui a des propriétés physico-chimiques distinctes entraînant la formation de niches écologiques distinctes (Berg et al. 2020).

Parmi les microbiotes des animaux, le tractus gastro-intestinal (TGI) est celui qui contient le plus grand nombre et la plus grande diversité de micro-organismes de tous les systèmes corporels (Lourenço et al. 2020). Le microbiote du TGI se définit comme étant un écosystème composé de micro-organismes commensaux, symbiotiques et pathogènes comprenant des bactéries, des virus, des parasites, des champignons, des archées et des protistes qui occupent l'intestin des mammifères (Patil et al. 2020).

La diversité génétique du microbiote intestinal des mammifères est très importante. Il peut contenir plus de 100 fois le nombre des gènes comparativement au génome des mammifères et à le potentiel d'ajouter de nombreuses activités biologiques qui sont absentes chez l'hôte (Bäckhed et al. 2005a). Les interactions entre le microbiote et l'hôte se font en coévolution et entraînent un échange anatomique et fonctionnel du TGI (Berg 1996). Le microbiote intestinal se compose principalement de bactéries dont le nombre surpasse celui des archées, virus et champignons (Hill et al. 2002). Le TGI abrite presque 10^{14} organismes bactériens dont 500 à 1 000 espèces uniques qui sont en lien synergique avec l'hôte (Ley et al. 2005 ; Jian Xu et Gordon 2003). Ce microbiote est donc en symbiose et contient des centaines espèces de bactéries, notamment des anaérobies, dans le côlon et le cæcum du porc à un niveau de $10^{11} - 10^{12}$ UFC/g de digesta (Pryde et al. 1999). Cependant, le nombre de bactéries anaérobies dans la partie antérieure du tube digestif (estomac et intestin grêle) reste plus faible variant de $10^7 - 10^9$ UFC/g de digesta (Jensen et Jørgensen 1994). Une coévolution synergique des micro-organismes intestinaux avec leurs organismes hôtes a mené à l'acquisition de fonctions microbiennes dans la digestion, incluant l'élimination des toxines, l'utilisation des nutriments, la protection contre des agents pathogènes et la modulation des systèmes endocriniens et immunitaires de l'hôte (Bäckhed et al. 2005b ; Ley et al. 2008).

Le microbiote intestinal est donc un stimulus important dans le déclenchement de la maturation du système immunitaire chez les animaux (Berg 1996) et joue un rôle dans la communication entre l'intestin et le cerveau (Thaiss et al. 2016). Ce microbiote semble considéré comme un organe supplémentaire de l'organisme hôte en raison du lien fonctionnel, mutualiste entre les bactéries qui peuplent l'intestin (Gérard 2011). Ce microbiote a donc un rôle important dans le maintien de l'homéostasie de l'organisme hôte (Sommer et Bäckhed 2013) en agissant sur la maturation des cellules épithéliales intestinales et leurs fonctions barrières, en favorisant ainsi l'homéostasie des systèmes immunitaire et intestinal (de Vries et Smidt 2019). Outre, son rôle métabolique, il contribue donc dans la promotion et le développement immunitaire de l'organisme hôte (Isolauri et al. 2001).

Grâce à l'essor des technologies innovantes de la génomique et de la phylogénie, la caractérisation des taxons et des populations microbiennes constituant le microbiote

intestinal animal s'avère de plus en plus étudiée. Ces techniques ont permis de mieux comprendre et d'identifier la structure et le fonctionnement des communautés bactériennes intestinales. Cette approche permet également de comprendre le dynamisme de cet écosystème microbien intestinal (Leser et al. 2002). En effet, la composition du microbiote intestinal varie d'un individu à l'autre en plus d'évoluer dépendamment du stade de croissance de l'hôte et d'être aussi tributaire des facteurs environnementaux et de la génétique de cet hôte. Toutefois, le régime alimentaire est en grande partie responsable de la modification de la composition de cet écosystème microbien du TGI (Upadhaya et Kim 2022). Un microbiote intestinal riche diversifié et équilibré est le reflet d'une bonne santé. En revanche, tout déséquilibre quantitatif ou qualitatif au niveau de la composition du microbiote s'avère à l'origine de certaines maladies. Successivement, le stress ou certaines maladies peuvent influencer négativement le microbiote intestinal (Patil et al. 2020).

L'implantation et le développement précoces du microbiote intestinal est d'une importance cruciale en faveur de la maturation du système immunitaire par l'activation de la fonction barrière en favorisant, entre autres, la production des immunoglobulines A (IgA) qui module à leur tour la colonisation bactérienne empêchant la translocation des bactéries à travers la couche épithéliale (Gutzeit et al. 2014). Le microbiote intestinal a aussi été associé à la promotion de la croissance et de la santé chez les porcelets nouveau-nés en modifiant la sensibilité à l'hormone de croissance (Shanahan et al. 2017).

Comme mentionné précédemment, le gros intestin est le principal lieu de fermentation microbienne chez les porcs ayant une diversité microbienne importante (Adhikari et al. 2019). Le microbiote dans la lumière du gros intestin joue un rôle primordial dans le métabolisme énergétique et la digestion des fibres (Niu et al. 2015). Néanmoins, le jéjunum qui est un site majeur de digestion et d'absorption des nutriments, peut être un site significatif de la fermentation et de la dégradation des fibres (Crespo-Piazuelo et al. 2019).

Le microbiote intestinal de l'intestin grêle est aussi pourvu de fonctions immunitaires liées aux maladies infectieuses (Zhao et al. 2015). Les interactions entre l'alimentation, le microbiote et les réponses du système immunitaire seraient donc plus marquées dans l'intestin grêle (Petry et al. 2021).

4.2 Mise en place et développement du microbiote intestinal

4.2.1 Transfert intra-utérin pendant la naissance et après la naissance :

La colonisation potentielle du microbiote utérin, ou l'exposition fœtale aux métabolites du microbiote intestinal maternel, semble avoir des effets importants sur le processus d'établissement et de développement du système immunitaire ainsi que sur la colonisation post-natale (Nowland et al. 2019). Un dogme autour du sujet de l'exposition bactérienne de l'intestin à des microbes dans l'utérus ou pendant la mise bas est toujours controversée (de Goffau et al. 2021). Cependant, le microbiote du méconium prélevé 6 heures avant la parturition différait du microbiote fécal prélevé pendant l'allaitement du porcelet (Wang et al. 2020). Ainsi, une suggestion hypothétique du concept d'établissement précoce du microbiote intestinal pendant la parturition a été émise par Nowland et al. (2019). En égard à l'hypothèse de l'utérus stérile de Tessier (1900) et Escherich (1885), le microbiote s'établirait par une colonisation rapide et majeure du TGI pendant la parturition lors de l'exposition des porcelets aux microbiotes fécal et vaginal de la truie et à celui de l'environnement (Mackie et al. 1999 ; Dominguez-Bello et al. 2010).

Avec l'émergence des techniques de séquençage d'ADN bactérien des tissus fœtaux (placenta, liquide amniotique, cordon ombilical, membranes fœtales et le sang), une remise en question a été proposée à l'égard de la stérilité de l'environnement intra-utérin pendant la gestation où le méconium s'est avéré contenir des bactéries avec une prédominance d'*Enterococcus* et de *Staphylococcus* (Jiménez et al. 2008). En utilisant le méconium et les fèces infantiles, il s'est avéré que le méconium contenait des bactérie du phylum Firmicutes avec un rapport positif de culture de *Staphylococcus* (Moles et al. 2013). Bien que certaines études aient confirmées la présence de bactéries dans le méconium et le liquide amniotique,

ces affirmations ont été réfutés en raison des approches moléculaires utilisées (Perez-Munoz et al. 2017).

Parallèlement, le pyro-séquençage des microbiotes maternel et fœtal a révélé une réciprocity entre le microbiote intestinal des nouveaux nés et le microbiote vaginal de leurs mères lorsqu'ils sont nés par voie vaginale tandis que les nouveaux nés qui sont nés par césarienne avaient un microbiote intestinal similaire au microbiote cutané (Dominguez-Bello et al. 2010). Cependant, l'étude des dyades mères-fœtus de souris et d'humains a révélé que le microbiote fœtal a de faibles biomasses bactériennes et présente des compositions différentes temporelles évolutives en fonction du stade de gestation.

En fait, le placenta était considéré comme une barrière empêchant la contamination fœtale par les toxines et les microbes maternels (Saavedra et Dattilo 2012), mais de récentes études ont montré que les microbes colonisent le liquide amniotique, le cordon ombilical et le placenta, suggérant ainsi qu'une colonisation microbienne du fœtus semble déjà commencer *in utero* soutenant l'hypothèse que les microbes colonisent le fœtus avant la naissance (Perez-Muñoz et al. 2017). En revanche, la présence de certaines bactéries dans le colon spiralé des porcelets mort-nés indique que la colonisation bactérienne du tractus gastro-intestinal s'est produite au moins durant la période prénatale immédiate tandis que la colonisation microbienne *in utero* chez les porcelets n'est pas été démontrée à ce jour (Nowland et al. 2022). Quoique le moment exacte de la colonisation initiale n'est pas encore déterminée chez les porcs, les recherches ayant traités sur la colonisation microbienne initiale chez l'homme montrent qu'elles sont principalement influencées par la mère et qu'une éventuelle perturbation au début de la vie semble avoir des répercussions négatives sur la santé à long terme (Cahenzli et al. 2013 ; Brown et al. 2012 ; Carlson et al. 2018).

Tous les changements affectant le microbiote de la truie n'est pas nécessairement transmis au microbiote des porcelets. En effet, certaines espèces bactériennes telles que *Clostridium clostridioforme* et *Lactobacillus* ont été observées dans les fèces des porcelets mais absentes dans les fèces des truies. Donc, les changements spécifiques du microbiote de la truie ne sont pas nécessairement adoptés par sa progéniture (Berry et al. 2021). Cependant, il est possible que l'exposition du porcelet à d'autres facteurs tels que le vagin de la truie, l'environnement

de l'enclos et l'exposition aux antibiotiques de la truie (Chen et al. 2018) ainsi que des traitements alimentaires ou le délai d'exposition du porcelet au microbiote de la truie seraient des facteurs contributifs à l'établissement du microbiote des porcelets (Leblois et al. 2018).

4.2.2 Contamination des porcelets par le microbiote vaginal et fécal de la truie/ Facteurs d'influence (microbiote fécal de la truie, le colostrum et le lait)

Immédiatement après la naissance, les porcelets dans les élevages commerciales sont logés avec leurs mères. Ils sont donc exposés à une masse importante de micro-organismes du canal vaginal, des matières fécales de la truie, de sa peau, des liquides et des surfaces des muqueuses (Nowland et al. 2019). En effet, le microbiote vaginal est influencé par les excréments de la truie (Chen et al. 2018), et joue ainsi un rôle important dans la colonisation précoce du microbiote intestinal de la progéniture (Cortes et al. 2018). Le microbiote fécal de la truie favorisait donc directement ou indirectement le développement du microbiote dans les jours qui suivent la naissance (Morissette et al. 2018). D'ailleurs, l'élimination des excréments des truies des cages de mise bas durant les 10 premiers jours suivant la naissance des porcelets, modifie la colonisation microbienne des porcelets (Nowland et al. 2022).

Le lait maternel est aussi considéré comme un facteur extrinsèque jouant un effet considérable sur le développement du microbiote intestinal du porcelet (Liu et al. 2019). Dans les 24 h qui suivent la naissance, les porcelets reçoivent le colostrum de la truie. Le colostrum est riche en nutriments, en énergie, en oligosaccharides, en matières grasses et en acides aminés qui activent les fonctions intestinales et créent ainsi un environnement propice pour la colonisation du microbiote intestinal (Liu et al. 2019). Le colostrum maternel administré aux porcelets durant les premières heures de vie du porcelet (12 à 48 h) contient également un assortiment de bactéries et de prébiotiques en faveur de la colonisation du microbiote intestinal et du développement du système immunitaire (Ma et al. 2016). De surcroît, les oligosaccharides du lait et du colostrum favorisent considérablement le développement du microbiote intestinal (Salcedo et al. 2016). D'ailleurs, l'administration orale de fructo-

oligosaccharides aux porcelets allaités augmentent l'abondance relative des *Lactobacillaceae* et des *Bifidobactéries* dans le colon et améliorerait la fonction de barrière par la réduction de la signalisation des cytokines dans la muqueuse jéjunale (Schokker et al. 2018). Il a aussi été suggéré que la quantité du lait ingurgitée par les porcelets pendant la lactation semble impacter éventuellement la santé et les performances de l'organisme hôte en liaison avec la modulation du microbiote intestinal. En effet, les porcelets les plus lourds pendant la lactation présentaient une abondance plus élevée en *Bacteroidetes*, *Bacteroides* et *Ruminococcaceae* et des portions plus faibles d'*Actinobacillus porcinus* et de *Lactobacillus amylovorus* en comparaison avec les porcelets plus légers (Wylensek et al. 2020). La diversité du microbiote intestinal de la truie notamment en lactation est donc supposée déterminer l'établissement d'un microbiote intestinal optimal des porcelets. Toutefois, la composition du microbiote gastro-intestinal de la truie est variable tout au long des différentes phases du péri partum, dont la diversité bactérienne est réduite durant les trois premiers jours de lactation de la truie. À l'opposé de son 109^e jour de gestation et de son 8^e au 14^e jour de lactation où la diversité bactérienne est élevée (Gaukroger et al. 2020). Ce changement peut également moduler les liens entre les microbiotes de la truie et celui de ces porcelets.

4.3 La manipulation du microbiote intestinal de la truie :

La manipulation du microbiote intestinal de la truie est possible par la modification du régime alimentaire de ces dernières. Cette stratégie pourra du même coup affecter le microbiote luminal dans l'intestin de la progéniture par l'intermédiaire de la truie (PaBlack et al. 2015). Toutefois, puisque le régime alimentaire des truies est différent de celui des porcelets, la forme d'altération du microbiote intestinal chez les truies est aussi différente de celle de leur progéniture (Leblois et al. 2017). Chez les porcelets allaités par des truies ayant reçu un régime alimentaire supplémenté avec un symbiotique, ces derniers présentaient des changements significatifs dans leur microbiote luminal du colon réduisant également les stress immunitaire et oxydatif systémiques (Ma et al. 2020). Dans un autre exemple, les porcelets nés des truies nourries avec des régimes supplémenté avec *Bacillus subtilis* avaient une augmentation des espèces bactériennes de genre *Lactobacillus* et une réduction du nombre de *Clostridium perfringens* dans l'iléon (Ma et al. 2020).

4.4 Développement du microbiote de la lactation au sevrage :

Les variations du microbiote intestinal des porcelets aux différents stades de croissance sont tributaires de plusieurs facteurs dont l'alimentation et la maturation du système immunitaire de l'hôte. En effet, le microbiote des porcelets de la lactation est différent de celui des porcelets en phase de pouponnière après le sevrage. Après la phase critique du stress du sevrage, le microbiote intestinal tend vers une maturation ainsi que la colonisation et la mise en place d'un microbiote intestinal (Wang et al. 2020). La maturation finale du microbiote intestinal prend forme vers l'âge de 80 jours chez les porcelets (Ke et al. 2019) alors que le microbiote intestinal est relativement stable à 6 mois (Zhao et al. 2015). La maturation du microbiote intestinal s'accomplit donc de la lactation jusqu'à environ 6 mois. Le sevrage reste toutefois au moment où les porcelets passent d'un régime alimentaire à base de lait à un régime contenant des ingrédients végétaux (Honda et Littman 2016).

Le sevrage est donc un processus durant lequel les porcelets passent d'une alimentation lactée liquide à une alimentation solide. Un défi d'ordres nutritionnel, psychologique et environnemental est à l'origine du stress du sevrage (Campbell et al. 2013) causant une dysbiose du microbiote intestinal, qui est le principal facteur contribuant aux infections en post-sevrage (Gresse et al. 2019). En effet, l'aliment ingéré au sevrage est le principal facteur de modulation du microbiote intestinal à la suite du sevrage (Wang et al. 2020). Ainsi, le développement du microbiote intestinal est tributaire à la transition brutale d'une alimentation liquide vers une alimentation solide à base de plantes qui modifie les conditions physico-chimiques et la disponibilité des substrats dans l'intestin (Ma et al. 2016). Le sevrage est aussi accompagné d'une réduction de l'apport en IgG du lait (Dunne-Castagna et al. 2020). En outre, des changements physico-chimiques dans le tractus gastro-intestinal dus au stress du sevrage peuvent également altérer le microbiote intestinal en modifiant les composés bioactifs (Li et al. 2018). Ainsi, le stress du sevrage semble jouer un rôle dans l'évolution du microbiote intestinal (Galley et al. 2014). En effet, le concept de manipulation nutritionnelle du microbiote est possible en stimulant la prolifération bénéfique du microbiote tout en approvisionnant un environnement nuisible aux agents pathogènes (Lo Verso et al. 2020). Compte tenu des propriétés fonctionnelles complémentaires des additifs

alimentaires, un mélange d'additifs composé d'extrait de canneberge, de carvacrol, de mannanes dérivés de levure et de β -glucanes et de colostrum de bovin a augmenté l'abondance de bactéries bénéfiques telles que *Lactobacillus reuteri* et *Faecalibacterium prausnitzii* et a réduit l'abondance des *Helicobacter* dans la muqueuse iléale, et à améliorer l'état de santé et les performances de croissance des porcs en pouponnière (Lo Verso et al. 2020).

4.4.1 L'influence de l'exposition environnementale sur le microbiote intestinal des porcelets :

L'acquisition du microbiote intestinal des porcelets évolue avec l'organisme hôte et est influencée par divers facteurs de l'environnement d'élevage. Elle se fait lors de son contact avec son environnement (enclos, mamelle, vulve de la truie, fèces de ses frères de la même portée et de la truie). Il paraît que l'impact de l'environnement domine celui de la génétique de la mère en termes du développement du microbiote intestinal du porc (Mach et al. 2015).

4.4.2 L'adoption des porcelets en lactation :

Lorsque le nombre des porcelets nés d'une truie sont supérieurs au nombre des mamelles fonctionnels de la truie, le déplacement des porcelets vers une autre truie est pratiqué pour qu'ils soient allaités (Huting et al. 2017). C'est une pratique d'élevage très courante, et les études ayant trait à l'effet de cette dernière sur le microbiote intestinal des porcelets sont sujet à controverses (Maradiaga et al. 2018). Les adoptions de porcelets à l'intérieur d'une race auraient aucun impact significatif sur le microbiote intestinal des porcelets. L'absence d'impact pourrait également être relative au fait que dans un élevage, il n'existe pas de différences majeures entre le microbiote des truies allaitantes du fait que la variabilité nourricière entre les truies n'est pas assez importante pour engendrer des différences entre les porcelets adoptés ou non (Huting et al. 2017). Les résultats de cette approche sont toutefois différents chez les porcelets adoptés ou non entre les truies de races Meishan et Yorkshire pour leur statut immunitaire et leur microbiote colique. En effet, les porcelets nourris par des truies Meishan ont présenté des taux plus élevés des médiateurs

d'inflammation (interleukine 19 et Foxp3-positives) ce qui montre une amélioration de la fonction anti-inflammatoire de l'épithélium intestinal en raison d'un microbiote différent. Mu et al. (2019) et Xian et al. (2014) ont également montré que les porcelets non adoptés de race Jinhua avaient un microbiote caecal différent des porcelets adoptés par des truies Yorkshire et que cette modification était associée avec une meilleure croissance.

4.4.3 Le génome et la race :

Nous avons mentionné plus haut que l'établissement du microbiote des porcelets était principalement influencé par l'environnement et que l'origine génétique était un facteur secondaire de mise en place du microbiote. Le profil microbiome/métabolome du tractus gastro-intestinal peut toutefois être impacté par le génome de l'organisme hôte et la nature de la race des porcs. En effet, une différence significative des métabolites produits par les micro-organismes naturellement présents dans la lumière intestinale, tels que les AGV, les acides biliaires secondaires, l'acide désoxycholique et l'acide lithocholique, avait été notée pour des porcelets Meishan et des porcelets Landrace. (Ajouz et al. 2014). Une étude comparative entre les porcs de la race Jinhua et les porcs Landrace a montré une différence en termes de diversité bactérienne du microbiote et des performances de croissance. Pour les porcelets de la race Jinhua, les chercheurs ont remarqué une activation immunitaire plus faible en réponse à une stimulation avec *Escherichia coli* entérotoxigène (ETEC) K88. Un taux de diarrhée plus faible et de meilleures performances de croissance a aussi été noté pour les porcelets Jinhua par rapport aux porcelets Landrace. Les porcelets Landrace présentaient une proportion globale plus élevée de *Lactobacillus spp* et un rapport plus élevée de Lactobacilles sur *Escherichia coli* (Gao et al. 2013). En effet, le microbiote intestinal fournit à l'hôte de multiples fonctions bénéfiques, que l'hôte ne peut pas remplir, telles que la digestion des polysaccharides complexes, la production des vitamines et la prévention de la colonisation par des agents pathogènes (Caballero et Pamer 2015). En effet, outre l'alimentation et l'environnement, la génétique est un facteur connu pour influencer les communautés microbiennes intestinales (Costello et al. 2012). Avec l'émergence des techniques de séquençage à haut débit, l'étude des populations bactériennes composant le

microbiote s'est grandement amélioré. Le séquençage de l'ARNr microbien 16S est couramment utilisé pour estimer la composition du microbiote intestinal, tandis que le séquençage *shotgun* des brins d'ADN isolés après cisaillement des échantillons fécaux ou autres est utilisé pour la caractérisation du métagénome (tous les génomes collectifs microbiens) (Xiao et al. 2016a). Récemment le séquençage du métagénome entier a été utilisé pour obtenir le catalogue de gènes de référence du microbiote intestinal du porc (Xiao et al. 2016). Il avait été démontré que l'héritabilité de la composition microbienne des genres de l'intestin du porc varie de valeurs faibles à élevées (Camarinha-Silva et al. 2017). En conséquence, la génétique de l'hôte a été suggérée comme étant un facteur important dans la détermination de la composition microbienne intestinale (Turpin et al. 2016).

À l'inverse, la génétique de l'hôte semble avoir un impact mineur sur le microbiote par rapport à l'âge, à l'alimentation ou à l'environnement (Spor et al. 2011). Ce n'est pas surprenant, car les conditions sont difficiles à normaliser entre les individus. À cet égard, les porcs de production représentent un modèle parfait pour mesurer l'effet de la génétique et de l'hôte sur la formation du microbiote en raison de leur régime alimentaire et facteurs environnementaux similaires tout au long de leur cycle d'élevage. Cependant, la relation entre le génome du porc et la composition de son microbiote intestinal n'a pas été entièrement décrite (Caporaso et al. 2010).

Chez les jeunes porcelets, la diversité du microbiote intestinal, l'abondance des bactéries et les proportions distinctes spécifiques à chaque race sont variables de la naissance au sevrage. Néanmoins, les porcelets de races pures différentes et qui cohabitent ensemble pendant plusieurs semaines présentaient des communautés microbiennes intestinales similaires avec toutefois une certaine proportion spécifique de taxons liée à la race (Pajarillo et al. 2015). Par exemple, au sein du même milieu d'élevage, la prévalence de *Firmicutes* et des *Bactéroïdes* pour la communauté bactérienne fécale est variable entre certaines races. Dans leurs études, Yang et al. (2018) et Pajarillo et al. (2015) ont montré que les races occidentales telles que Duroc, Yorkshire et Landrace se composaient respectivement de 39, 42 et 45 % de *Firmicutes* et de 57, 51 et 47 % de *Bactéroïdes* (Yang et al. 2018 ; Pajarillo et

al. 2015) alors que chez les porcelets de race Jinhua chinois, la population fécale était composée de 70 % de *Firmicutes* et de 14 % de *Bactéroïdes*.

4.4.4 L'âge des porcs :

On a discuté plus haut de l'évolution du microbiote selon les étapes de la production, principalement du sevrage. La relation qui existe entre la croissance des porcelets et la diversité du microbiote s'avère toutefois très complexe. Cette relation n'est pas dépendante seulement de l'alimentation, mais dépend aussi du mélange dans les enclos et des pratiques de sevrage (Han et al. 2018). L'âge des porcelets a un impact direct majeur dans la composition du microbiote fécale des porcelets. En fait, cette composition change continuellement jusqu'à ce que les porcs atteignent l'âge de 6 mois. À ce moment, le microbiote se stabiliserait (Kim et al. 2011). En effet, la densité et la diversité des populations bactériennes intestinales ne cessent d'évoluer au fur et à mesure que les porcelets avancent en âge. Durant les 5 premiers jours après la naissance, la communauté microbienne est dominée par les aérobies strictes et les anaérobies facultatives, qui sont progressivement remplacés presque majoritairement par des aérobies stricts à partir du 7^e jour jusqu'au 22^e jours après la naissance (Inoue et al. 2005). En effet, le changement primaire et significatif dans la diversité microbienne intestinale se produit chez les porcelets entre les 4^e et 7^e jours en raison de la diminution du nombre des clostridies (*Clostridium perfringens*). Le rapport des bactéries *Firmicutes/Bactéroïdes* change également avec l'âge (Kim et al. 2011), et aurait un effet sur la dégradation des polysaccharides, l'absorption des nutriments, la perméabilité intestinale et la réponse inflammatoire (Mathur et Barlow 2015). En effet chez les porcelets, il a été démontré que les espèces bactériennes appartenant au phylum des *Bactéroïdes* qui sont responsables de la dégradation des glucides diminuent avec l'âge où ils sont responsables d'un gain de poids ultérieur (Zhou et al. 2015):

Comme nous l'avons noté précédemment, les populations bactériennes du tractus gastro-intestinal des porcelets subissent un grand changement durant la phase où les porcelets passent d'un régime à base de lait à un régime solide (Rodas et al. 2018). L'effet de

l'environnement initial sur le développement et la composition du microbiote des porcelets est réduit après le sevrage. Toutefois l'exposition à un type particulier d'aliment avant même le sevrage est susceptible de modifier la diversité bactérienne du microbiote intestinal des porcelet. Les porcelets exposés à des aliments à base de fibres dès l'âge de 2 jours avaient une diversité accrue en bactéries fibrolytiques et productrices de butyrate comme les *Ruminococcus*, *Lachnospira*, *Roseburia*, *Eubacterium* et *Prevotella* à l'âge de 28 jours (avant sevrage) comparativement aux porcelets non exposés (Choudhury et al. 2021).

4.4.5 Les antibiotiques en début de vie :

Hormis l'alimentation qui est considérée comme étant le facteur principal qui affecte le microbiote intestinal des porcelets et stimule la population bénéfique à la composition du microbiote, les composants associés aux régimes alimentaires tel que les additifs alimentaires, les prébiotiques et les antibiotiques ont aussi un impact sur la composition microbienne intestinale. En effet, ces additifs jouent aussi un rôle dans la modulation du microbiote. L'une des pratiques thérapeutiques utilisées dans les élevages est celle de l'antibiothérapie à titre préventif et curatif des maladies respiratoires et intestinales chez les truies et leurs porcelets. Des répercussions de l'usage des antibiotiques au sein de l'élevage porcin sont à l'origine de l'altération du microbiote commensal (Nowland et al. 2022). Ce dernier joue un rôle prépondérant dans le maintien et la maturation du système immunitaire qui est essentiel à la santé de l'hôte. Une utilisation accrue et prolongée dans le temps des antibiotiques non sélectifs est souvent à l'origine d'une dysbiose entérique dont une réduction de la diversité microbienne du microbiote intestinal ainsi qu'une augmentation des bactéries résistantes aux antibiotiques (Wlodarska et al. 2011 ; Looft et al. 2014).

L'antibiothérapie maternelle durant les 7 derniers jours de la gestation de la truie s'accompagne par des altérations de l'expression génique dans l'iléon des porcelets à l'âge de 7 à 21 jours ainsi que par une diminution de la profondeur des cryptes de l'iléon à l'âge de 7 jours (Xu et al. 2018). Ainsi, des différences dans la colonisation microbienne et des retards dans le développement intestinal chez les porcelets jusqu'à l'âge de 5 semaines ont été observés lorsque les truies étaient traitées par de l'amoxicilline durant les 7 derniers jours

de gestation (de Greeff et al. 2020). L'administration des antibiotiques chez les porcelets se fait généralement durant les 5 premiers jours de vie des porcelets. Le tableau 3 résume les effets de l'impact du traitement antibiotique chez les porcelets sur leur microbiote intestinal ou fécal.

Tableau 3 : Impacts des antibiotiques sur le microbiote et la santé des porcelets en bas âge (Nowland et al. 2022).

Antibiotiques	Effets négatifs chez les porcelets
Tulathromycine	Diversité microbienne jéjunale plus élevée à l'âge de 8 jours; augmentation des bactéries anaérobies <i>Bifidobacterium</i> , <i>Eubacterium</i> et une diminution des <i>Streptococcus aureus</i> (Schokker et al. 2015).
Amoxicilline et florfinicol	Diminution de l'abondance des bactéries pathogènes du microbiote fécal y compris celles des bactéries potentiellement bénéfiques (<i>Provetella</i> , <i>Butyrimonas</i>) (Hansen et al. 2019).
Ceftiofur	Aucun impact sur le microbiote fécal des porcelets à l'âge de 7 jours. Une éventuelle administration 12 heures après la mise bas est à l'origine de modifications du microbiote des porcelets à l'âge de 12, 28 et 97 jours. Une diversité microbienne et une croissance à long termes réduites (Nowland et al. 2019) .
Amoxicilline	L'administration à l'âge de 1 jour est à l'origine d'une modification de la composition du microbiote colique jusqu'à l'âge d'au moins 5 semaines (Janczyk et al. 2007).

Ainsi, le moment et le type d'antibiotique administré influencent la modification du microbiote intestinal des porcelets. Les altérations ayant trait à la colonisation microbienne et l'activation du système immunitaire justifient la nécessité d'étudier les conséquences à long termes du recours à l'antibiothérapie des porcelets en début de vie.

4.5 Conclusion sur le microbiote :

L'élevage porcin ne cesse de s'accroître et des défis à relever en termes d'amélioration de la santé et la survie des porcelets sont croissants. En effet, le contrôle du microbiote intestinal est important pour améliorer la santé et prometteur à générer des solutions efficaces. Il détient son importance par le fait de son implication dans de nombreux processus de l'organisme (immunitaire, homéostatique, etc.). La période du présevrage des porcelets s'avère critique et elle est de plus liée à la colonisation microbienne initiale du microbiote intestinal des porcelets. Cependant, les porcelets en début de leurs vies sont confrontés à plusieurs facteurs qui façonnent l'acquisition et le développement de leur microbiote. Ainsi, les désordres liés à l'implantation du microbiote intestinal peuvent se répercuter négativement sur l'ensemble de l'hôte et plus particulièrement sur les systèmes intestinal et immunitaire (Nowland et al. 2022b ; Maradiaga et al. 2018). La prérogative de l'industrie porcine se concrétise par la maîtrise des facteurs sur lesquels les porcelets sont exposés en présevrage. Cette approche semble efficace pour le développement de certaines stratégies ciblant à soutenir une colonisation optimale du microbiote. Le microbiote intestinal est le sujet d'actualité où les thèmes d'étude en lien avec son établissement, sa manipulation et son développement sont en faveur de la promotion de la santé et des performances de croissance des porcelets (Gaukroger et al. 2020b), ainsi que la manipulation microbienne pour améliorer le gain moyen quotidien et l'efficacité alimentaire (McCormack et al. 2019) ne sont pas totalement maîtrisés.

Hypothèse de la recherche :

Le seigle hybride est une céréale alternative aux autres céréales menant à des performances de reproduction équivalentes et une meilleure vitalité des porcelets incluant son microbiote.

Objectifs de la recherche :

- 1- Déterminer les effets du seigle hybride sur les performances de reproduction et de croissance de la truie et de ses porcelets.
- 2- Évaluer l'effet du seigle hybride sur la vitalité du porcelet et son microbiote.

CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

5 Animaux et traitements alimentaires appliqués :

5.1 Site expérimental et animaux :

Ce projet de recherche a eu lieu à la maternité de recherche du Centre de développement du porc à Québec (CDPQ) situé à Armagh (Québec, Canada) qui compte 336 places dans le bloc de saillie, 405 places dans le bloc de gestation en groupe et 135 places dans le bloc de lactation. Un total de 240 truies (29 cochettes et truies multipares [27 truies 2^e parité, 102 truies 3^e parité ; 87 truies 4^e parité] Yorkshire × Landrace, Olymel, QC, Canada), divisées en 2 lots de 120 truies, ont été utilisées dans ce projet. L'expérience animale a débuté au mois de mai 2021 et s'est terminée en mars 2022. Environ 7 jours avant la saillie, les truies ont été transférées dans le bloc saillie (2 rangées de cages de 61 cm × 213 cm pour les cochettes et 4 rangées de 71 cm × 224 cm pour les multipares) et ont été inséminées au moment approprié de l'œstrus avec une ou deux doses de semence (1,5 spermatozoïdes par dose). L'œstrus était évalué deux fois par jour en présence d'un verrat mature. Après l'insémination, les truies ont été maintenues en cage pour une période de 28 jours.

Après cette période, les truies ont été transférées dans 2 enclos de 60 truies avec une densité de 2,03 m² par truie du 28^e au 110^e jour de gestation. Les deux grands enclos comprenaient 4 mangeoires automatisées et 8 bols d'eau (4 par enclos) et des espaces de repos sur une surface en béton-plein. Avant le transfert en groupe au jour 28 de gestation, un test de gestation a été effectué à l'aide d'un échographe (SU2 Ssonoptek, Chine) afin de valider le statut gestant de la truie. À l'approche de la mise bas, les truies ont été déplacées en cage de mise bas/lactation (1,6 × 2,1 m) entre 4 à 6 jours avant la date prévue de mise bas et y ont été gardées pour toute la durée de la lactation qui était en moyenne de 20,4 jours. La mise-bas

des truies n'a pas été induite. Les interventions humaines ont été réduites au minimum. Si l'intervalle entre la sortie de deux porcelets dépassait 40 minutes, les interventions pendant la mise bas (une intervention manuelle et une injection d'ocytocine à raison de 2 ml) était effectuées.

Environ 24 h après la naissance, les porcelets surnuméraires ont été adoptés aux truies du même traitement alimentaire ayant moins de porcelets que leur nombre de tétines fonctionnelles. Les traitements usuels et soins aux porcelets (coupe de la queue, injection de fer et de l'analgésique, castration des mâles) ont été effectués selon la gestion normale de l'élevage.

Pour l'ensemble des sections de la maternité de recherche, les truies ont été alimentées avec un système d'alimentation de distribution automatisé (Jyga Technologie, Lévis, Qc, Canada) permettant de distribuer l'un des quatre traitements alimentaires.

5.2 Collecte des données au CDPQ :

À la saillie, au moment du transfert des truies en enclos de gestation aux cages de mise bas et après le sevrage, toutes les truies ont été pesées sur une balance au sol calibrée et l'épaisseur de gras dorsal a été estimée (Ultra Scan 50, Alliance Médical Inc. Limerick Irlande). Durant la semaine de mise-bas, les truies ont été observées et suivies afin de suivre le déroulement de la mise-bas. La durée de la mise bas, les interventions manuelles, le moment de de la naissance du premier porcelet et la délivrance du placenta ont été notées et enregistrées. Pour chaque portée, le poids de naissance des porcelets a été noté lors de la mise bas et les porcelets ont été identifiés à l'aide d'un tag à l'oreille. À la naissance, les porcelets ont également été classés en nés vivants, en mort-nés et en momifiés. À 24 h, les porcelets vivants, mort-nés et surnuméraires (adoptés et retirés) ont été pesés individuellement. Par la suite, le poids des porcelets morts et la cause de mortalité étaient notés pendant la lactation. Au sevrage, le poids total de la portée a été mesuré.

5.3 Les traitements alimentaires :

Les truies ont été nourries avec un système d'alimentation automatique dans le bloc saillie et dans les enclos en groupe (Gestal 3G, Jyga Technologie, QC, Canada) et avec un système automatisé pendant la lactation (Gestal Quattro, Jyga Technologie, QC, Canada) permettant de distribuer jusqu'à quatre aliments différents. Ainsi, il était possible d'appliquer 4 traitements alimentaires à des sujets différents faisant partie d'un même groupe de truies. Pour chacun des groupes de 120 truies, les traitements étaient attribués en tenant compte de la parité et du poids de la truie à l'intérieur de la même parité. Les quatre traitements se décrivaient ainsi (Tableaux 4 et 5) :

- Le régime témoin (TEM) : composé de maïs, de drêche de maïs et de tourteau de soja contenant environ 10 % de NDF (13,8 MJ/kg EM).
- Le régime avec un contenu haussé en fibre (Fibre) : composé de maïs, de tourteau de soja, de drêche de maïs, de remoulage de blé et de coques d'avoine contenant environ 20 % de NDF (12 MJ/kg EM).
- Le régime fibre-30 % seigle (Seigle30) : composé de maïs, de drêche de maïs, de tourteau de soja, de coques d'avoine et de 30 % de seigle hybride contenant 20 % de NDF (12 MJ/kg EM).
- Le régime fibre-60% seigle (Seigle60) : composé de drêche de maïs, de tourteau de soja, de coques d'avoine et de 60 % de seigle hybride contenant 20 % de NDF (12 MJ/kg EM).

Le seigle utilisé ne contenait pas de toxines de l'ergot.

Tableau 4: Composition des aliments expérimentaux utilisés lors de l'essai.

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60
Ingrédients, g/kg				
Maïs	689,5	440,26	295,0	54,0
Seigle hybride			299,34	600,54
Remoulage de blé	32,0	300,0	180,0	
Drêche maïs avec soluble	150,0	150,0	65,0	150,0
Coque d'avoine		59,0	83,0	104,0
Tourteau de soja	98,0	20,0	46,0	61,0

Pierre à chaux	15,26	16,7	14,4	14,8
BioFos_Monophosphate	3,44	1,46	4,52	3,94
Sel	5,85	6,36	6,06	5,80
Lysine HCl	1,66	2,0	2,0	1,66
L-Thréonine	0,36	0,40	0,82	0,44
Choline 60	0,72	0,72	0,72	0,72
Micro-vitamine/micro-minéraux	3,00	3,00	3,00	3,00
Phytase (750 FTU/kg)	0,10	0,10	0,10	0,10

Tableau 5 : Teneur des éléments nutritifs des aliments utilisés lors de l'essai.

Composition calculée	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60
Énergie nette, MJ/kg	10,46	9,31	9,31	9,31
Protéine brute, %	14,9	14,4	12,83	13,91
Phosphore totale, %	0,48	0,61	0,54	0,45
Phosphore digestible, %	0,33	0,33	0,33	0,33
Calcium, %	0,70	0,73	0,70	0,71
Acide détergent fibre, %	5,32	8,92	7,71	7,70
Neutral détergent fibre, %	14,4	24,6	21,2	20,5
Lysine digestible, %	0,60	0,54	0,54	0,54
Composition mesurée				
Protéine brute, %	15,1	14,8	14,5	15,1
Phosphore totale, %	0,44	0,55	0,49	0,47
Calcium, %	0,68	0,68	0,62	0,63
Cendre, %	4,72	5,25	4,58	4,94
Acide détergent fibre, %	4,71	7,42	6,65	7,56
Neutral détergent fibre, %	12,2	19,7	19,7	20,4

Les traitements alimentaires ont été appliqués à partir du 7^e jour de gestation et pour tout le reste la gestation ainsi que la première semaine de lactation. Après cette semaine, les truies ont été nourries avec un aliment de lactation commerciaux (Aliment-Lactation commercial, Olymel, QC, Canada). Pour les truies des traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60, la quantité de nourriture distribuée du jour 0 à 28 de gestation a été déterminée en fonction de la parité, du poids et de l'épaisseur de gras dorsal à la saillie (Tableaux 6 et 7). Après le transfert en groupe, la quantité d'aliment a été fixée à 2,25 kg/jour des jours 29 à 89 des gestation et

haussée à 3,00 kg/jour du jour 90 de gestation jusqu'à la mise bas pour les truies de parité 1. Pour les truies multipares, la quantité d'aliment des jours 28 à 50 a été établie selon le tableau 7. Entre les jours 50 et 90 de gestation, la quantité d'aliment a été fixée à 2,43 kg/jour alors que des jours 90 à la mise bas toutes les truies ont reçu 3,05 kg. Pour les truies du traitement Témoin, les quantités estimées pour les autres traitements étaient réduites de 10 % afin de tenir compte des concentrations supérieures en énergie et en nutriments. Au cours de la première semaine de lactation, les aliments étaient distribués à volonté afin d'augmenter l'apport alimentaire quotidien et pour maximiser l'apport alimentaire pendant cette période.

Tableau 6 : Quantité quotidienne d'aliment distribuée aux truies de parité 1 depuis la saillie jusqu'au 28^{ème} jour de gestation pour les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60.

Poids saillie	Épaisseur gras, mm	Aliment dans le bloc-saillie, kg
>150 kg	>10	2,25
	<10	2,65
140-149 kg	>12	2,25
	<12	2,65
135-139 kg	> 17	2,25
	[12-16,9]	2,65
<134 kg	<12	2,95
		3,00

Tableau 7 : Quantité quotidienne d'aliments distribuée aux truies des parités 2 et plus depuis la saillie jusqu'au 28^{ème} jour de la gestation et de 29 à 50 jours de gestation pour les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60

Épaisseur de gras, mm	Aliment dans le bloc-saillie, kg	Aliment en groupe de 29 à 50 jours de gestation
< 12 mm	3,11	3,11
12-14,9 mm	2,81	2,81
15-17,9 mm	2,43	2,43
18-19,9 mm	2,24	2,43
> 20 mm	2,04	2,43

5.4 Les prélèvements :

Des prélèvements sanguins ont été effectués sur 25 truies par traitement après 8 heures de jeûne lors du transfert du bloc-saille à la gestation en groupe et lors du transfert en cage de mise-bas afin de collecter le sérum après centrifugation à $1\ 500 \times g$ pour 15 minutes. Le sérum a ensuite été congelé à $-20\ ^\circ\text{C}$. Des prélèvements de colostrum ont été également pris sur 30 truies par traitement pendant la mise-bas. Sept jours après la mise-bas, des prélèvements fécaux ont été effectués sur 16 truies par traitement et leur portée (3 porcelets par portée) pour évaluer la composition du microbiote. Les prélèvements fécaux ont été mis dans des tubes PERFORMAbiome GUT Sample Collection Kit (DNA Genotek, ON, Canada) et entreposés à $-80\ ^\circ\text{C}$ jusqu'à l'analyse. Sur les mêmes trois porcelets par portée, un prélèvement sanguin a également été effectué et le sérum a été collecté après centrifugation, regroupé en un échantillon et congelé à $-20\ ^\circ\text{C}$.

5.5 Les analyses du laboratoire :

Dans le sérum des truies prélevées, le glucose (Glucose Go Assay Kit, Sigma-Aldrich, GAGO20-1KT), l'insuline (RayBio Porcine Insulin ELISA kit, RayBiotech, ELP-Insulin), la prolactine (prolactin ELISA kit, Cusabio, CSB-E15801P-5), l'œstradiol (Estradiol ELISA kit, Cayman, 501890-480S), le « ferric reducing ability of plasma » (FRAP, Iris et al. 1996), le malondialdéhydes (MDA, Ermis et al. 2005) ont été déterminés. Dans le sérum des porcelets et dans le colostrum, la concentration en IgG a aussi été déterminée (IgG ELISA kit, FORTIS Life Sciences Bethyl, E101-104).

Le microbiote : L'extraction de l'ADN a été faite à partir des échantillons de contenu fécal en utilisant la trousse QIAamp® PowerFecal Pro DNA kit (QIAGEN). La concentration de l'ADN récupéré a ensuite été mesurée avec l'appareil NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific Inc.), tandis que son intégrité a été évaluée à l'aide du système Tape Station 4200 (Agilent Technologies), qui donne un score de qualité appelé DIN (DNA Integrity Number), compris de 1 à 10 (un DIN de 10 correspondants à un ADN de qualité parfaite). Les échantillons d'ADN ont par la suite été congelés à $-80\ ^\circ\text{C}$ avant d'être séquencés sur un

système MiSeq Illumina (Plate-forme d'analyses génomiques de l'Université Laval, IBIS) pour les études de métagénomique.

L'analyse bio-informatique des séquences des gènes rARN 16S a été réalisée comme rapporté par Laforge et al. (2023). Brièvement, les variantes de séquence d'amplicons (ASV) ont été générées à l'aide du package de flux de travail DADA2 (version 1.22.0 ; R version 4.1.1). La déréplication, l'inférence d'échantillons, l'identification de chimères et la fusion des lectures appariées ont été effectuées en utilisant les paramètres par défaut. L'attribution taxonomique a été effectuée à l'aide de la base de données SILVA rRNA (version 138.1) avec la méthode de classificateur bayésien naïf (la commande assignTaxonomy du package DADA2). Un arbre phylogénétique a été construit sur la base d'un alignement multiple (package DECIPHER R version 2.22.0). Les décomptes, les taxons, les métadonnées d'étude et les arbres phylogénétiques ont ensuite été combinés dans un objet phyloseq. Les décomptes d'ASV ont été normalisés en abondance relative pour la visualisation et l'extraction de l'abondance relative des phylums et familles (ampvis2, package R version 2.7.13).

5.6 Les analyses statistiques :

Les données en maternité ont été analysées à l'aide du logiciel Minitab Statistical Software (version 21). Pour les données en maternité, la truie ou sa portée était l'unité expérimentale. La fonction procédure MIXE a été utilisée à l'exception des pourcentages de mort-nés et de la mortalité naissance-sevrage où la régression de Poisson a été utilisée. Le modèle statistique incluait l'effet fixe du traitement (Témoin, Fibre, Seigle30 ou Seigle30) reçu par la truie alors que la parité et le lot ont été considérés comme un effet aléatoire. Pour la proportion des truies ayant eu une intervention manuelle ou une injection d'ocytocine pendant la mise bas, l'effet des traitements a été évalué en utilisant la régression logistique binaire de Minitab Statistical Software. Les effets fixes du modèle statistique étaient considérés significatifs à $P \leq 0,05$, et les tendances à $0,05 < P \leq 0,10$.

La diversité alpha a été calculée sur des données non normalisées (phyloseq version 1.30.0). La richesse spécifique a été évaluée avec un indice Observé et Chao1 et la régularité a été évaluée avec l'indice de Shannon et Simpson. Un test Anova a été utilisé pour comparer les

différents traitements alimentaires. Pour évaluer les différences entre la diversité des traitements, un test Tukey HSD a été effectué (agricolae, package R version 1.3-5). La diversité bêta (entre les échantillons) a été calculée pour les comptes d'ASV normalisés en utilisant les distances UniFrac non pondérées et pondérées et les dissimilarités de Bray Curtis (progiciel Phyloseq R version 1.38.0). L'analyse des coordonnées principales (PCoA) a été utilisée pour visualiser les distances entre les échantillons (Ampvis2, package R version 2.7.13 ; Andersen et al., 2018). L'analyse permutacionnelle des dispersions multivariées (PERMDISP) a été utilisée pour tester l'homogénéité de la dispersion pour chaque catégorie de métadonnées (fonction bêta-disper du package vegan R). Un test Anova a été utilisé pour comparer l'abondance relative des différentes familles entre les différents traitements alimentaires. Pour évaluer les différences spécifiques entre les traitements, un test Tukey HSD a été effectué (agricolae, package R version 1.3-5).

Chapitre III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

6 Les performances de reproduction et croissance de la portée :

Les résultats indiquent que les régimes alimentaires utilisés pendant la gestation ont eu aucun effet sur le nombre de porcelets totaux et vivants par portée à la mise bas ainsi que sur le nombre de porcelets vivants à 24 h avant et après l'adoption et le nombre de porcelets sevrés (tableau 8). Malgré l'absence d'effet sur les performances reproductives à la mise bas, à 24 h et au sevrage, le pourcentage des mort-nés a été réduit pour le traitement Fibre comparativement au traitement Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,001$). La même tendance a été observé pour le nombre de mort-nés ($P = 0,089$). Toutefois, le pourcentage de morts de la naissance à 24 h était plus élevé pour le traitement Fibre comparativement au traitement Seigle30 et Témoin avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle60 ($P < 0,001$). Le pourcentage de morts de 24 h au sevrage tendait également à être plus élevé pour le traitement Seigle30 comparativement aux autres traitements ($P = 0,076$). L'âge au sevrage ainsi que la durée de mise bas n'ont pas été influencés par les traitements alimentaires en gestation. Les proportions de truies ayant eu une intervention manuelle ou une injection d'ocytocine pendant la mise bas n'ont également pas été influencées par les traitements.

Tableau 8 : Résultats des performances de reproduction de truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation.

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	Erreur Type	Valeur P
Performance de reproduction						
Totaux nés/portée	15,8	15,6	15,6	15,2	0,49	0,804
Nés vivants/portée	14,6	14,9	14,7	14,2	0,44	0,649
Mort-nés/portée	1,15	0,73	0,88	0,99		,0,089
	[0,88-1,51],	[0,53-0,99]	[0,65-1,19]	[0,75-1,32,		
% Mort-nés	7,08 ^c	4,50 ^a	5,12 ^{ab}	5,96 ^{bc}		0,001
	[6,34-7,91]	[3,96-5,09]	[4,52-5,80]	[5,32-6,69]		
Vivant_24h_Avant_Adoption/portée	14,1	13,9	14,4	13,5	0,38	0,396
Morts_Naissance_24h/portée	0,69	0,93	0,64	0,79		0,267,
	[0,49-0,98],	[0,70-1,24],	[0,45-0,91],	[0,58-1,08],		
% Morts_Naissance_24h	4,68 ^b	5,86 ^c	3,74 ^a	5,42 ^{bc}		0,001
	[4,11-5,33]	[5,23-6,58]	[3,24-4,33]	[4,81-6,12]		
Vivant_24h_AprèsAdoption/portée	13,7	13,8	13,4	13,3	0,25	0,198
Morts_24h_sevrage/portée	1,32	1,31	1,47	1,25		0,766,
	[1,03-1,69],	[1,03-1,66],	[1,16-1,86],	[0,98-1,61],		
% Morts 24h_sevrage	9,43	9,12	10,41	9,15		0,076
	[8,59-10,35]	[8,34-9,98]	[9,52-11,37]	[8,35-10,03]		
Sevrés/portée	12,2	12,6	12,1	12,1	0,23	0,239
Âge au sevrage, jour	20,4	20,4	20,2	20,3	0,33	0,934
Durée de mise bas, min	355	299	328	346	45,1	0,497
Intervention manuelle, %	52,5	53,8	59,5	66,1		0,382,
	[38,7-65,9,	[40,6-66,5],	[45,5-72,0],	[52,5-77,5],		
Injection ocytocine, %	38,5	50,9	40,8	46,8		0,479
	[25,9-52,7]	[37,8-64,1]	[28,1-54,9]	[33,6-60,4]		

Les poids totaux de la portée à la naissance, des nés vivants, des vivants à 24 h (avant ou après l'adoption) et des sevrés n'ont pas été influencés par les traitements alimentaires pendant la gestation des truies (tableau 9). Les poids totaux des morts naissance-24 h et 24 h-sevrage n'ont également pas été affectés par les traitements alimentaires en gestation.

Tableau 9 : Les performances de croissance des portées en lactation provenant de truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation.

Performance des portées	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	Erreur Type	Valeur P
Poids portée (total) mise bas, kg	22,6	21,7	21,7	21,6	0,590	0,555
Poids porcelet mise bas, kg	1,44	1,41	1,41	1,41	0,042	0,846
Poids portée (vivant) mise bas, kg	21,2	20,8	20,9	20,4	0,60	0,763
Poids porcelet (vivant) mise bas, kg	1,45	1,41	1,43	1,42	0,047	0,711
Poids mort-nés portée, kg	2,40 ^b	1,57 ^a	1,74 ^{ab}	1,63 ^a	0,235	0,008
Poids mort-nés porcelet, kg	1,17	1,08	1,11	1,17	0,067	0,630
Poids portée (vivant) 24h Avant Adoption, kg	20,6	20,2	20,5	19,8	0,62	0,713
Poids porcelet (vivant) 24h Avant Adoption, kg	1,48	1,45	1,45	1,46	0,041	0,848
Poids Portée Morts 0_24h, kg	1,23	1,19	1,37	1,16	0,181	0,703
Poids Porcelet Mort 0_24h, kg	0,86	0,71	0,80	0,84	0,079	0,147
Poids Portée (vivant) 24h Après Adoption, kg	20,3	20,1	19,6	19,7	0,60	0,538
Poids Porcelet (vivant) 24h Après Adoption, kg	1,49	1,45	1,46	1,47	0,050	0,643
Poids Portée (Mort) 24h_Sevrage, kg	2,61	2,48	3,02	2,51	0,319	0,401
Poids Porcelet (Mort) 24h_Sevrage, kg	1,34	1,25	1,39	1,37	0,102	0,747
Poids Portée Sevrage, kg	76,4	77,9	77,2	76,7	2,26	0,902
Poids Porcelet Sevrage, kg	6,25	6,31	6,48	6,43	0,195	0,664
Gain Portée 24-Sevrage, kg	54,9	57,5	56,9	56,2	2,02	0,715
Gain Porcelet 24_Sevrage, kg	4,55	4,67	4,78	4,71	0,162	0,730

Seulement, le poids total des mort-nés a été réduit pour les traitements Fibre et Seigle60 comparativement au traitement Témoin avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle30 ($P < 0,008$). Les poids moyens des porcelets de la naissance au sevrage n'ont pas été influencés par les traitements alimentaires. Finalement, le gain total de la portée et le

gain moyenne par porcelet en lactation n'ont également pas été affectés par les traitements alimentaires en gestation.

6.1 Consommation en gestation et croissance de la truie en gestation :

Les résultats du tableau 10 concernant la consommation alimentaire en gestation montrent des différences statistiquement significatives entre les régimes alimentaires pendant la gestation pour les périodes 0-28 jours et 29-110 jours. Pour la période des jours 0-28, la distribution alimentaire aux truies était plus faible pour le traitement Témoin comparativement aux autres traitements ($P < 0,001$) comme cela avait été prévu par le protocole expérimental. Le même effet a été observé pour la distribution des aliments entre les jours 29-110 de gestation ainsi que des jours 110 à 115 de gestation après le transfert des truies dans les cages de mise bas ($P < 0,001$)

Tableau 10 : Consommation alimentaire de truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation.

Jour de la gestation	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	Erreur Type	Valeur P
0-28, kg/j	3,00 ^a	3,24 ^b	3,24 ^b	3,23 ^b	0,069	0,001
28-110, kg/j	2,37 ^a	2,63 ^b	2,65 ^b	2,63 ^b	0,027	0,001
110-115, kg/d	2,45 ^a	2,71 ^b	2,68 ^b	2,66 ^b	0,068	0,001

Le poids des truies pendant la gestation (saillie, aux jours 28 et 110) n'a pas été affecté par les traitements alimentaires distribués aux truies. Le gain de poids en gestation n'a également pas été influencé par les traitements alimentaires en gestation. Les épaisseurs de gras dorsal à saillie et au jour 28 de la gestation n'ont pas été affectés par les traitements mais l'épaisseur à la mise bas tendait à être plus élevée pour les truies du traitement Témoin comparativement au traitement Seigle30 avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Fibre et Seigle60 ($P = 0,062$). Cette épaisseur réduite à la mise bas s'expliquait par une réduction significative du gain d'épaisseur du gras dorsal en gestation pour les truies du traitement Seigle30 comparativement aux truies du traitement Témoin ($P < 0,027$).

Tableau 11 : Poids des truies pendant la gestation, à la mise-bas et pendant la première semaine de lactation pour des truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation.

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	Erreur Type	Valeur P
Poids des truies, kg						
Saillie	201	203	204	204	16,8	0,652
Transfert en groupe (28 ^{ème} jour)	206	208	210	210	13,2	0,365
Avant mise bas	249	246	248	251	12,1	0,563
Sevrage	221	219	221	224	14,1	0,396
Gain gestation	48,8	44,5	45,7	46,9	6,12	0,109
Gras dorsal des truies, mm						
Saillie	12,9	13,1	12,6	13,3	0,49	0,586
Transfert en groupe (28 ^{ème} jour)	12,8	13,3	12,3	12,9	0,74	0,128
Avant mise bas	15,3	14,7	13,7	14,8	1,23	0,062
Sevrage	12,5	12,5	11,6	12,4	0,54	0,229
Gain gestation	2,20 ^b	1,57 ^{ab}	1,21 ^a	1,54 ^{ab}	1,048	0,027

6.2 Les performances de la truie en lactation :

La consommation alimentaire journalière des truies pendant la première semaine de lactation était plus élevée pour les truies du traitement Seigle30 comparativement aux truies Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Témoin et Seigle60 ($P < 0,022$). Toutefois, la consommation journalière pour toute la lactation n'a pas été affectée par les traitements alimentaires. Le gain de poids et le gain d'épaisseur de gras dorsal en lactation n'ont également pas été influencés par le régime alimentaire des truies en gestation.

Tableau 12 : La consommation alimentaire des truies en lactation pour des truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation.

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	Erreur Type	Valeur P
Consommation en lactation, kg/jour						
Totalité de la lactation	6,93	7,04	7,18	6,97	0,448	0,465
Jours 0-7 de lactation	4,76 ^{ab}	4,72 ^a	5,11 ^b	4,82 ^{ab}	0,366	0,022
Gain en lactation						
Poids, kg	-27,1	-27,6	-26,8	-27,1	3,10	0,986
Épaisseur de gras dorsal	-2,39	-2,35	-2,09	-2,03	0,703	0,592

6.3 Les paramètres sanguins :

Parmi les paramètres sanguins mesurés à 28 jours de gestation, seulement la concentration de glucose était plus faible pour le traitement Fibre comparativement aux truies du traitement Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,034$). Avant la mise bas, la concentration en propionate était plus élevée pour les truies du traitement Seigle60 comparativement au traitement Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Fibre et Seigle30 ($P < 0,001$). Pour la concentration en butyrate, les truies du traitement Seigle60 avaient aussi une valeur plus élevée que les truies des traitements Témoin et Fibre avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle30 ($P < 0,001$). À la différence, les truies du traitement Témoin avaient une concentration plus élevée d'iso-valérate comparativement au traitement Fibre avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,019$). Les autres paramètres sanguins estimés chez les truies avant la mise bas n'ont pas été affectés par les traitements alimentaires en gestation. La concentration en IgG du colostrum ainsi que la concentration sanguine en IgG mesurée aux porcelets à 7 jours d'âge n'ont pas aussi été influencées par les traitements alimentaires en gestation.

Tableau 13: Les paramètres sanguins des truies au 28ème jour de gestation pour des truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	SEM	Valeur P
Glucose, µg/ml	1656 ^b	1174 ^a	1464 ^{ab}	1449 ^{ab}	436,5	0,034
Insuline, µU/ml	9,49	12,5	9,59	12,0	5,886	0,831
Prolactine, pg/ml	2,775	1,129	2,105	1,995	0,8316	0,232
Estradiol, pg/ml	68,6	73,6	69,1	63,6	17,71	0,635
FRAP, µM	0,169	0,169	0,159	0,167	0,0761	0,789
MDA, nmole/ml	10,3	10,3	10,8	9,06	1,374	0,678

FRAP : Réduction Ferrique Antioxydante du Plasma.

MDA : Malonidialdéhyde.

6.4 Analyse du microbiote des truies et des porcelets :

L'analyse du microbiote fécal chez les truies à une semaine de lactation a montré que les deux principaux phyla rencontrés étaient les Firmicutes et les Bactéroidota. Les principales familles mises en évidence étaient les *Lactobacillaceae*, les *Lachnospiraceae*, les *Prevotellaceae*, *Peptostreptocaccaceae* et les *Clostridiaceae* (Figure 7).

Tableau 14 : Les paramètres sanguins des truies avant la mise-bas ainsi que la concentration en IgG dans le colostrum et dans le plasma de leurs porcelets à 7 jours d'âge pour des truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation

	Témoin	Fibre	Seigle30	Seigle60	SEM	Valeur P
Paramètres sanguins avant mise bas						
Glucose, µg/ml	1342	1267	1248	1178	139,8	0,820
Insuline, µU/ml	2,487	2,562	2,617	2,196	1,3481	0,846
Prolactine, pg/ml	15,8	7,89	12,1	12,9	8,45	0,448
Œstradiol, pg/ml	887	851	819	888	119,8	0,923
FRAP, µM	0,148	0,152	0,141	0,141	0,0519	0,901
MDA, nmole/ml	9,65	9,11	9,75	10,18	3,839	0,653
Acides gras volatils						
Acétate, µmol/L	106,6	115,9	113,8	121,9	12,47	0,172
Propionate, µmol/L	0,659 ^a	0,825 ^{ab}	0,838 ^{ab}	0,951 ^b	0,0814	0,001
Iso-Butyrate, µmol/L	0,507	0,459	0,547	0,526	0,0330	0,145
Butyrate, µmol/L	1,411 ^a	1,718 ^a	1,912 ^{ab}	2,333 ^b	0,3215	0,001
Iso-Valérate, µmol/L	0,679 ^b	0,541 ^a	0,614 ^{ab}	0,607 ^{ab}	0,0385	0,019
Totaux, µmol/L	109,9	119,5	117,7	126,4	12,89	0,137
IgG Colostrum, mg/ml	221	232	237	277	52,5	0,348
IgG Porcelet Serum, mg/mL	38,0	32,1	67,6	42,7	27,32	0,214

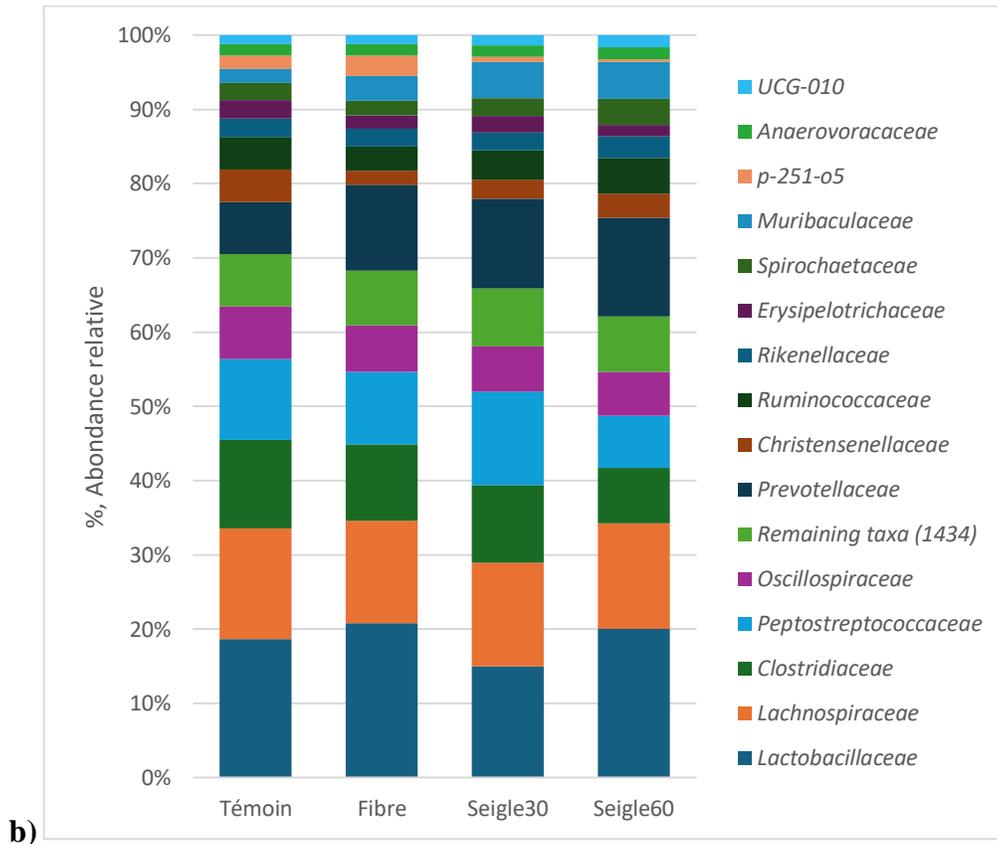
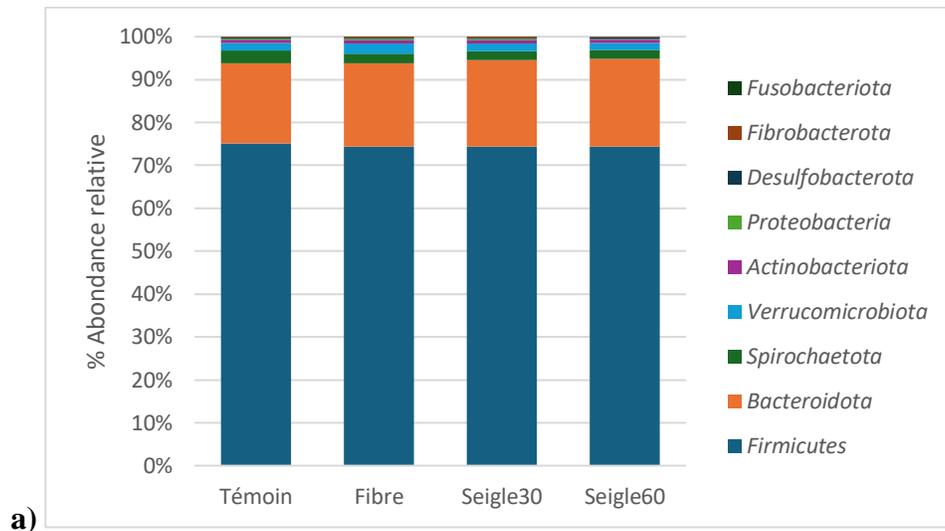
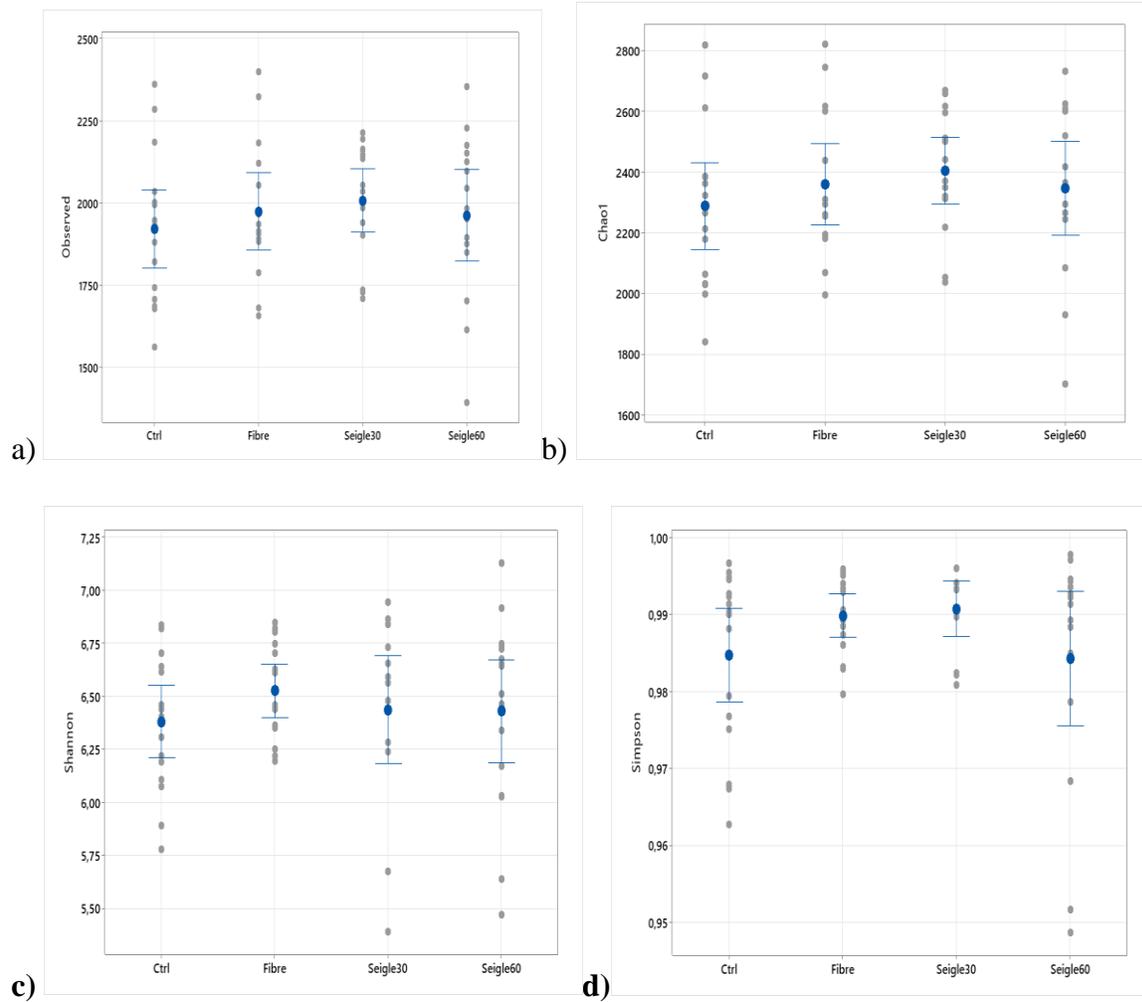


Figure 7 : Composition du microbiote fécal au jour 7 de lactation : a) au niveau du phylum; b) au niveau de la famille des truies nourries avec des régimes contenant une teneur haussée en fibre provenant (Seigle30 et Seigle60) ou non (Fibre) du seigle hybride pendant la gestation. Témoin : Témoin; Fibre : 20 % de NDF; Seigle30 : 20 % de NDF avec 30 % de seigle; Seigle60 : 20 % de NDF avec 60 % de seigle.

Les mesures de l'alpha diversité (Observed : $P < 0,642$; Chao1 : $0,591$; Shannon : $P < 0,639$; Simpson : $P < 0,273$) et la beta diversité (Permanova : $P < 0,749$) du microbiote fécal des truies n'ont pas été influencés les traitements alimentaires en gestation (Figure 8).



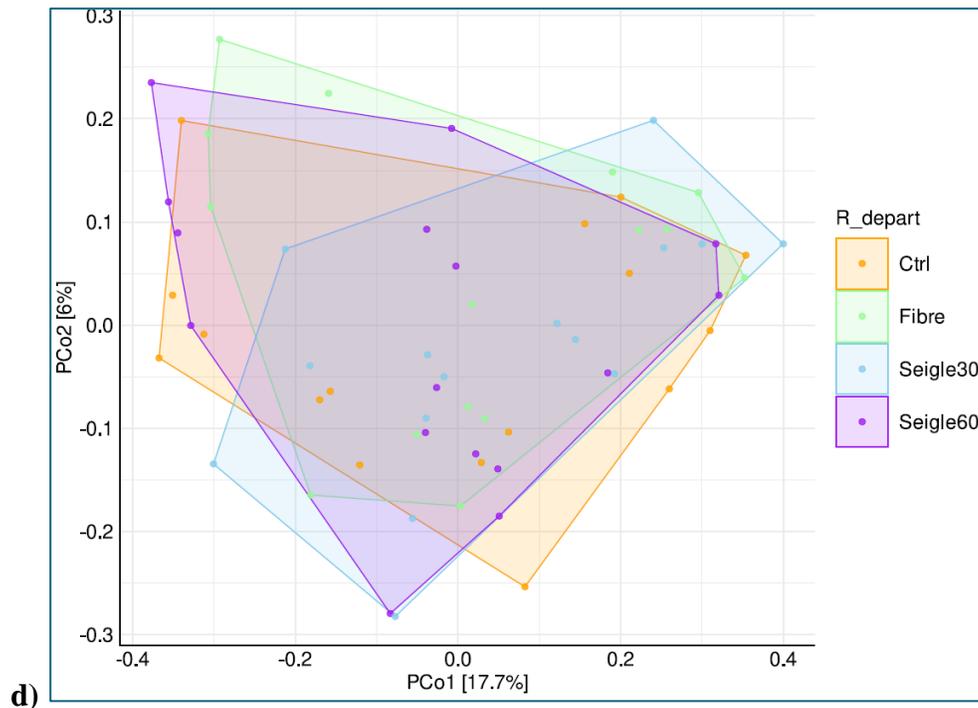


Figure 8 : Diversité alpha estimée par les paramètres a) Observed, b) Chao1 c) Shannon et d); e) beta diversité estimée par Bray-Curtis du microbiote fécal des truies nourries en gestation avec CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle). **La diversité alpha :** calculée sur des données non normalisées (phyloseq version 1.30.0). **La richesse spécifique :** évaluée avec un indice Observé et Chao1 **La régularité :** évaluée avec l'indice de Shannon et Simpson. **Test Anova :** utilisé pour comparer les différents traitements alimentaires. **Tukey HSD :** évalue les différences entre la diversité des traitements (agricolae, package R version 1.3-5).

Parmi les familles, cinq ont été identifiées comme différentes entre les quatre traitements alimentaires en gestation. Les abondances relatives de *Prevotellaceae* et *Selenomonadaceae* étaient plus faibles chez les truies du groupe Témoin comparativement aux autres traitements ($P < 0,004$ et $P < 0,001$; Figure 9). L'abondance relative de *Muribaculaceae* était plus élevée pour les traitements Seigle30 et 60 comparativement au traitement Témoin ($P < 0,001$) avec une valeur intermédiaire pour le traitement Fibre. L'abondances relative des *Erysipelatoclostridiaceae* était aussi plus élevée pour le traitement Seigle60 comparativement aux traitements Témoin et Fibre avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle30 ($P < 0,001$). Finalement, l'abondance relative de *Christensenellaceae*

était plus élevée pour le traitement Témoin comparativement au traitement Fibre avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,001$).

L'analyse du microbiote fécal des porcelets âgés d'une semaine a montré que les principaux phyla détectés étaient les Firmicutes, les Proteobacteria et les Bacteroidota. Au niveau des familles, les principales identifiées étaient les *Lactobacillaceae*, les *Enterobacteriaceae*, les *Clostridiaceae*, les *Streptococcaceae* et les *Bacteroidaceae*. L'analyse de l'alpha diversité estimée pour les indices « Observed » et « Chao1 » a montré une hausse de la diversité pour les porcelets des truies des traitements Fibre et Seigle30 comparativement aux truies Témoin avec des valeurs intermédiaires pour le traitement Seigle60 ($P < 0,008$, $P < 0,009$ respectivement). L'indice d'alpha diversité de Shannon a aussi montré une valeur inférieure pour les porcelets des truies Témoin comparativement aux porcelets allaités par des truies du traitement Fibre ($P < 0,029$) alors que l'indice de Simpson a montré une diversité alpha plus élevée pour les porcelets des traitements Fibre et Seigle60 comparativement à ceux du traitement Témoin ($P < 0,027$). La beta diversité du microbiote fécal des porcelets n'a pas été influencée les traitements alimentaires en gestation (Permanova : $P < 0,189$, Figure 11).

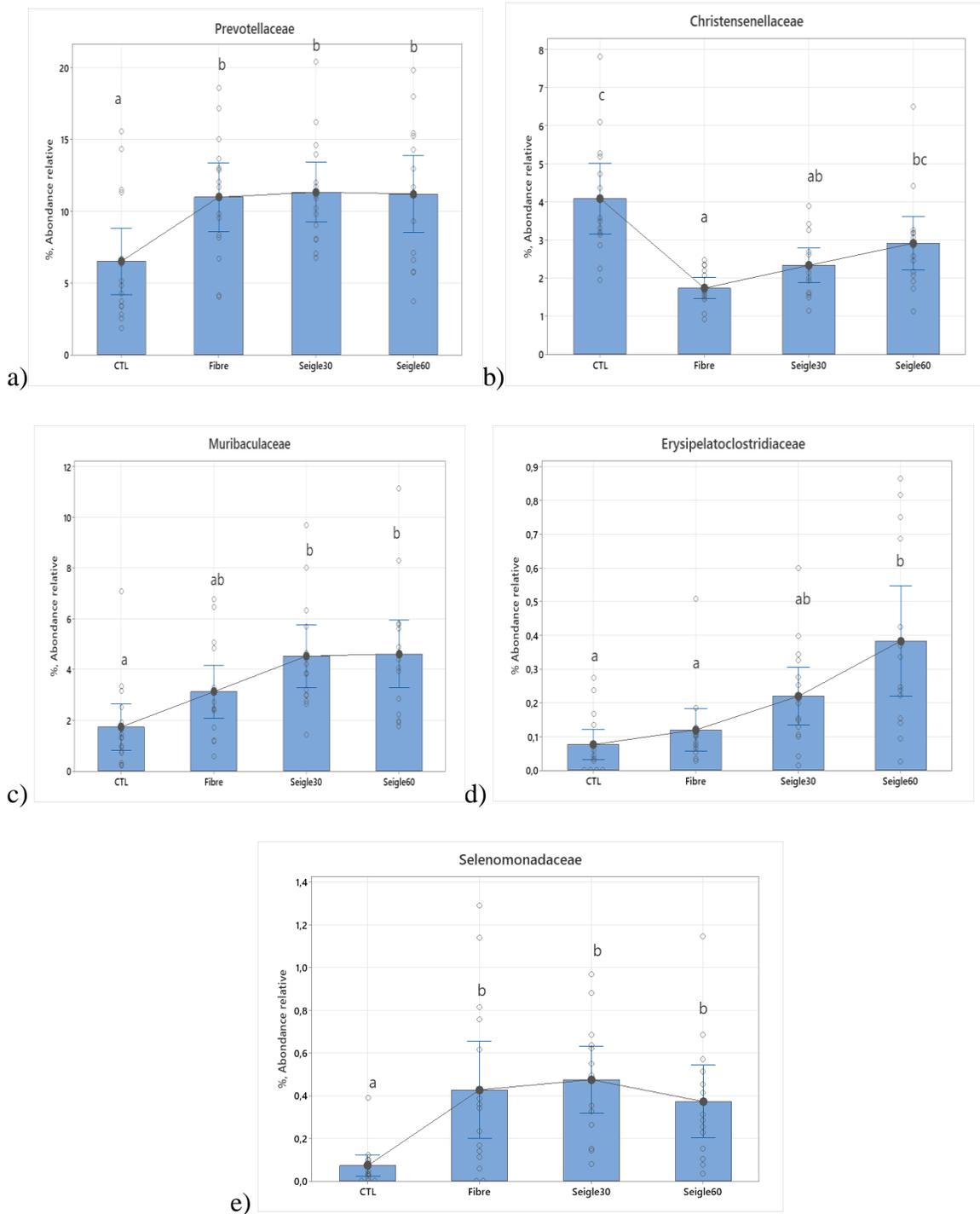


Figure 9 : Abondance relative des familles a) *Prevotellaceae*, b) *Christensenellaceae*, c) *Muribaculaceae*, d) *Erysipelatoclostridiaceae*, e) *Selenomonadaceae* du microbiote fécal des truies nourries en gestation avec les traitements CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle).
^{a,b} Les valeurs avec différents exposants diffèrent significativement ($P < 0,05$).

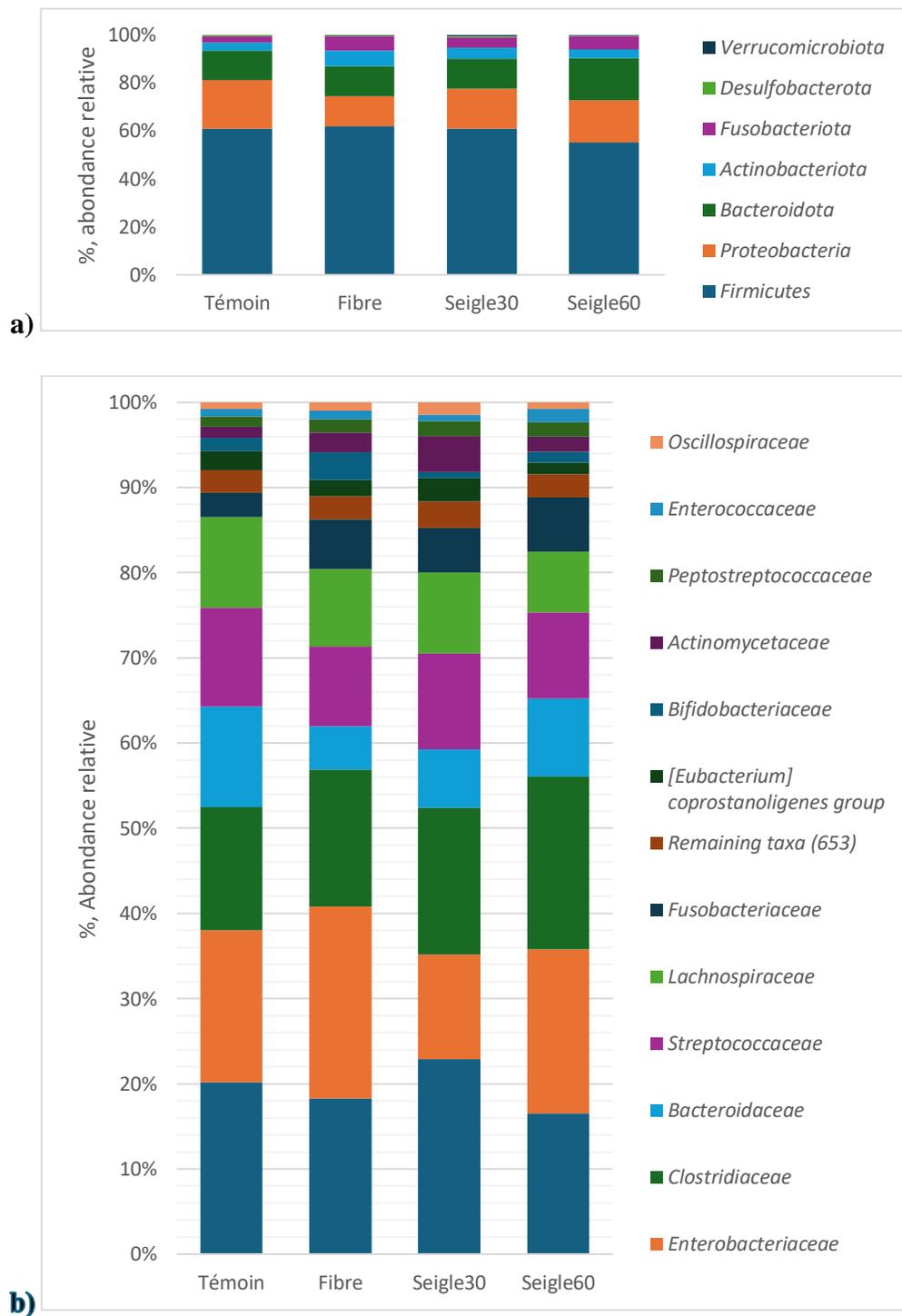
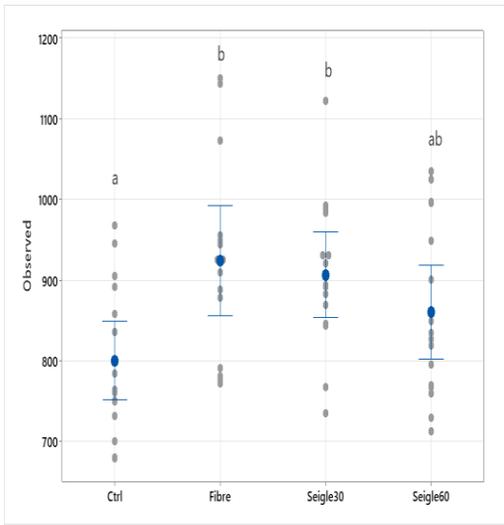
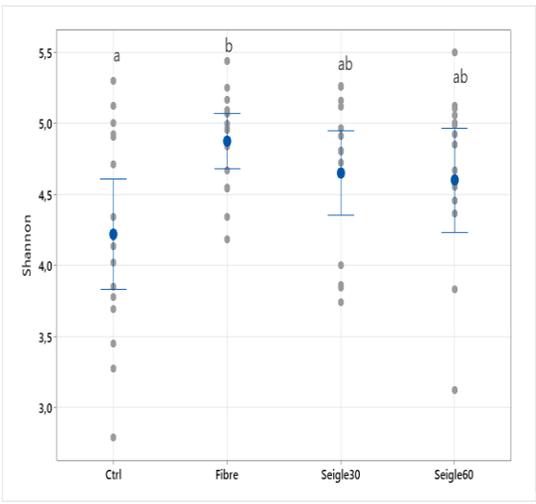
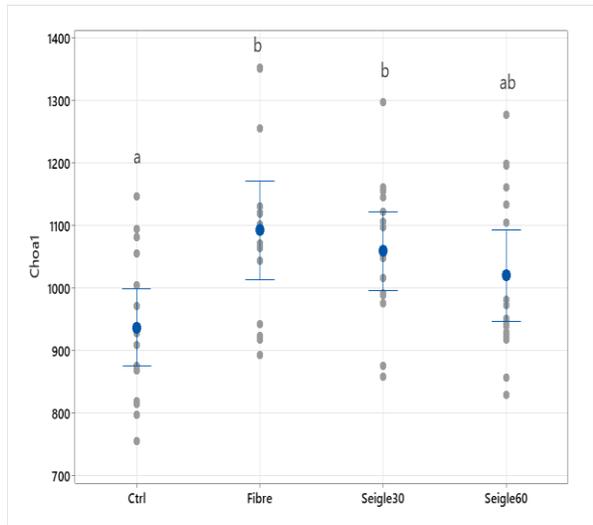


Figure 10 : Composition du microbiote fécal des porcelets a) au niveau du phylum; b) au niveau de la famille. Traitement des truies en gestation. Témoïn: Témoïn; Fibre : 20 % de NDF; Seigle30 : 20 % de NDF avec 30 % de seigle; Seigle60 : 20 % de NDF avec 60 % de seigle.



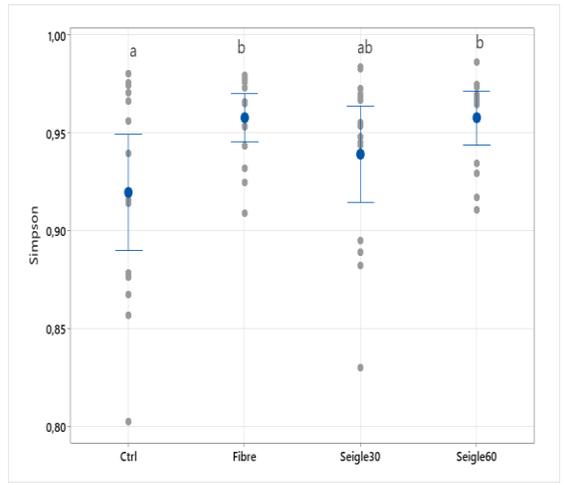
a)

b)



c)

d)



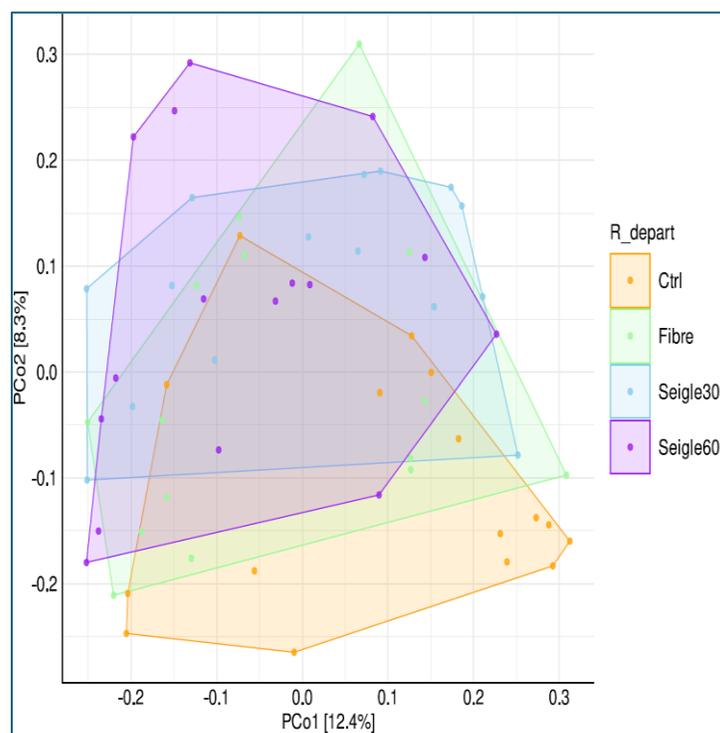


Figure 11 : Diversité alpha estimée par les paramètres a) Observed, b) Chao1 c) Shannon d) Simpson; b) bêta diversité estimée par Bray-Curtis du microbiote fécal des porcelets provenant de truies nourries en gestation avec CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle).

Parmi les familles du microbiote des porcelets, quatre ont été identifiées comme différentes entre les quatre traitements alimentaires des truies en gestation. L'abondance relative de *Muribaculaceae* était plus élevée pour les traitements Fibre comparativement aux traitements ($P < 0,001$). L'abondance relative des *Rikenellaceae* était aussi plus élevée pour le traitement Fibre comparativement au Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,049$). L'abondance relative de *Prevotellaceae* était aussi plus élevée chez les porcelets des groupes Fibre et Seigle30 comparativement traitement CTL avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle60 ($P < 0,034$).

L'abondances relative des *Erysipelatoclostridiaceae* était plus élevée pour le traitement Seigle60 comparativement aux traitements Témoin et Fibre avec une valeur intermédiaire pour le traitement Seigle30 ($P < 0,001$). Finalement, l'abondance relative de *Christensenellaceae* était plus élevée pour le traitement Témoin comparativement au

traitement Fibre avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle30 et Seigle60 ($P < 0,001$). Finalement, l'abondance relative de *Butyricocceae* tendait à être plus élevée pour le traitement Seigle30 comparativement au Témoin avec des valeurs intermédiaires pour les traitements Seigle60 et Fibre ($P < 0,094$).

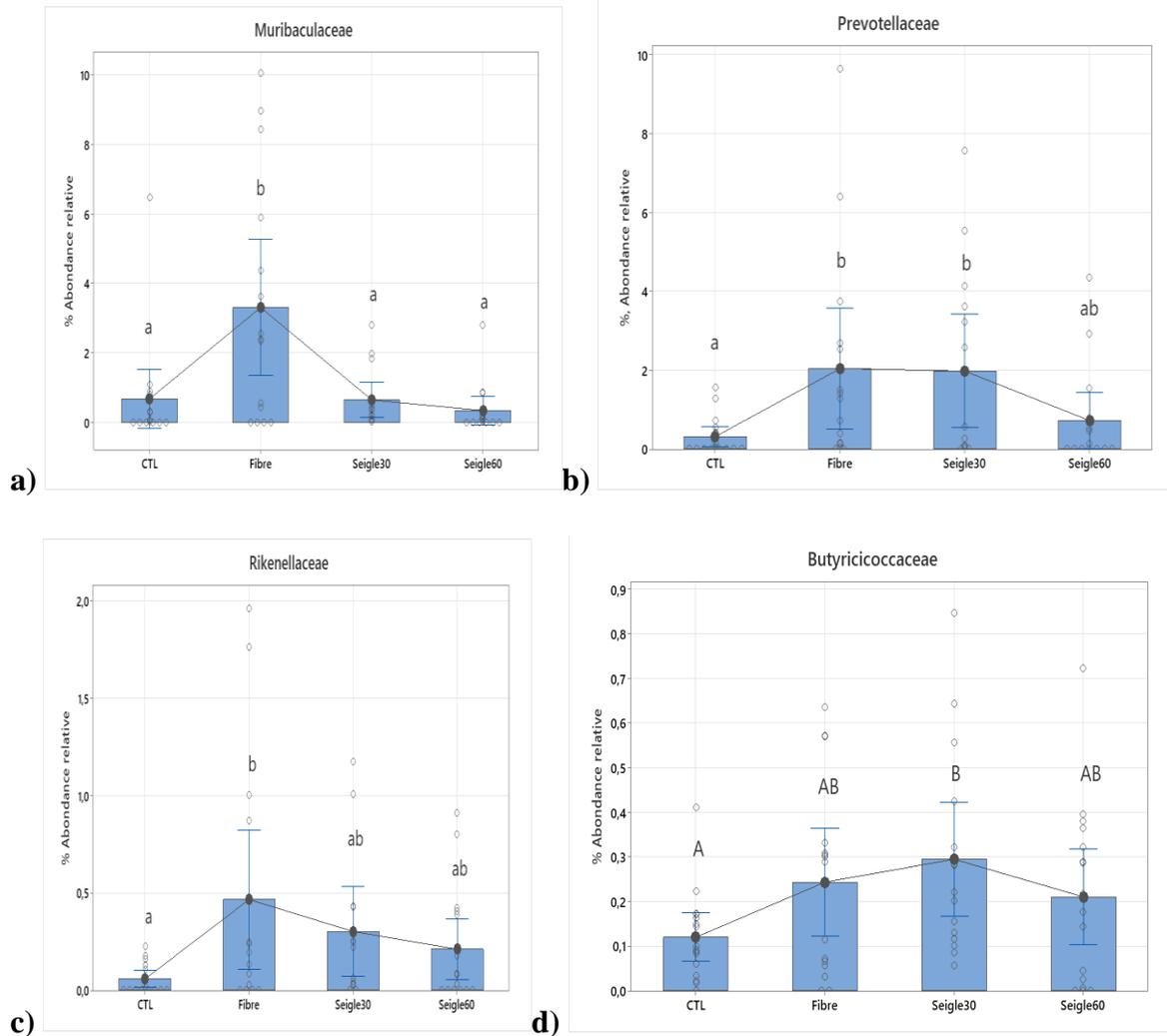


Figure 12 : Abondance relative des familles a) *Muribaculaceae* b) *Prevotellaceae*, c) *Rikenellaceae*, d) *Butyricocceae* du microbiote fécal des porcelets provenant de truies nourries en gestation avec les traitements CTL (Témoin), Fibre (20 % de NDF), Seigle30 (20 % de NDF avec 30 % de seigle) et Seigle60 (20 % de NDF avec 60 % de seigle). ^{a, b} Les valeurs avec différents exposants diffèrent significativement ($P < 0,05$);). ^{A, B} Les valeurs avec différents exposants tendent à être différentes ($P < 0,10$).

6.5 DISCUSSION

La finalité de ce projet de recherche était d'élucider l'impact de l'utilisation du seigle hybride, comme un ingrédient alternatif dans l'alimentation des truies pendant la gestation et pendant leur première semaine de lactation. L'objectif était d'évaluer l'impact du seigle hybride à deux niveaux d'incorporation de 30 et 60 % respectivement sur les performances de reproduction de la truie et à la croissance de sa portée ainsi que sur le microbiote fécal des truies et leurs porcelets. Pour ce faire, l'objectif principal avait été divisé en trois sous-objectifs ; dont le premier était en lien avec les performances de reproduction des truies, leur consommation alimentaire durant les trois phases de la gestation et la première semaine de lactation ainsi que leur gain du poids durant la gestation et la lactation. Le deuxième objectif était en lien avec les performances liées à la croissance de la portée et la survie des porcelets jusqu'au sevrage. Quant aux au troisième, ce dernier était par rapport au microbiote intestinal des truies et leurs porcelets étant donné le lien entre l'alimentation et la modification du microbiote ainsi que l'influence du microbiote maternel sur l'établissement du microbiote chez ses porcelets.

Les truies gestantes sont généralement restreintes en gestation afin d'éviter leur sur-engraissement et d'optimiser leurs performances de reproduction à court et à long termes (Trottier et al. 2014). Dans le présent projet, le traitement alimentaire Témoin contenait plus énergétique (10,5 MJ/kg NE) et de nutriments, et était composé essentiellement de maïs, de drêche de maïs et de tourteau de soya. Cet aliment contenait également moins de fibre avec 12 % de NDF. Ce traitement avait été formulé afin de répondre aux besoins d'une truie gestante avec un niveau de restriction modéré assurant le maintien d'une condition d'état corporelle satisfaisante des truies et le développement et la croissance de leur portée (Dourmad, et al. 2008 ; NRC 2012). Les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60 ont été formulés afin de contenir des concentrations similaires en énergie nette (et en acides aminés digestibles) ainsi qu'en fibre NDF à raison de 9,3 MJ/kg et 20 % respectivement.

L'inclusion d'ingrédients riches en fibre dans les traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60 nécessitait une hausse de la distribution d'aliment afin de maintenir un apport suffisant en

nutriments et en énergie. La distribution et donc la consommation alimentaire estimées des truies des traitements Fibre, Seigle30 et Seigle60 était donc haussé de 8 % et 11 % pour les périodes 0 à 28 jours et de 28 à 110 jours de gestation respectivement. Cette hausse de l'apport en aliment correspond à la réduction de concentrations en énergie nette et en acides aminés digestibles (moins 10 %) ce qui a permis d'avoir un apport égal en nutriments et en énergie nette peu importe les traitements.

Afin de valider ce point, la croissance (poids et gras dorsal) des truies ainsi que le nombre de porcelets et le poids de la portée à la naissance des porcelets ont été évalués. Les besoins en énergie nette et en acides aminés digestibles des truies en gestation dépendent du poids moyenne de la truie (besoin d'entretien), du gain maternel et du poids de la portée ou du nombre de porcelets à la naissance (Dourmad et al. 2008 ; NRC 2012). Dans la présente étude, le nombre de porcelets ainsi que le poids de la portée à la naissance n'ont pas été influencés par les traitements alimentaires en gestation. Ces résultats confirment ceux publiés par plusieurs études (Zhuo et al. 2020 ; Gao et al. 2023 ; Li et al. 2021) où les truies recevaient un aliment en gestation supplémenté en fibres avaient des performances à la mise bas identiques à celles recevant un aliment Témoin. Le gain de poids des truies en gestation n'a également pas été influencé par les traitements alimentaires en gestation confirmant les résultats rapportés par Quesnel et al. (2008). Pour le seigle, McGhee et Stein (2021) ont montré que l'incorporation de seigle jusqu'à 50 % dans un aliment gestation n'a pas eu d'effet sur le gain de poids des truies en gestation, et le poids des porcelets ou de la portée à la mise bas.

Contrairement au gain de poids en gestation, le gain d'épaisseur de gras dorsal pendant la gestation était plus faible pour les traitements plus riches en fibres, principalement le traitement Seigle30. Guillemet et al. (2007) ont également observé une réduction du gain de l'épaisseur de gras dorsal avec un aliment pour gestation contenant 30 % de NDF comparativement à un aliment de 17 % de NDF. Le contenu en énergie nette des aliments a été établi à partir des valeurs théoriques des ingrédients (NRC 2012). Ces valeurs pourraient surestimées les valeurs réelles en énergie nette des ingrédients fibreux de nos aliments. De plus, le contenu en énergie nette des ingrédients plus fibreux peut être plus variable selon le

niveau de dégradation de la fibre et de l'utilisation des produits de cette dégradation (Noblet, 2007). Il est donc possible que la concentration en énergie nette des traitements fibreux (Fibre, Seigle30 et Seigle60) fût légèrement plus faible que la valeur prévue menant à un apport quotidien réduit en énergie pour les truies recevant ces traitements. La priorisation des transferts de nutriments vers le système utéro-placentaire a probablement limité les effets sur le développement de la portée (Dourmad, et al. 2008) mais à diminuer le dépôt lipidique maternel.

Le traitement Fibre a réduit le pourcentage des mort-nés tout en haussant le pourcentage de morts naissance-24 h. Il a été rapporté que l'ingestion d'un régime alimentaire riche en fibres pendant la gestation ou la période périnatale atténuait la durée prolongée de la mise bas en ramollissant les selles et en fournissant de l'énergie à partir de l'intestin postérieur (Feyera et al. 2017; Loisel et al. 2013). L'alimentation riche en fibre des truies en gestation agirait donc positivement sur le déroulement de la mise bas par l'effet laxatif de passage rapide des aliments ingérés au niveau intestinal qui évite la constipation qui peut être à l'origine d'une mise bas prolongée (Kleine 2012). D'ailleurs, la durée de la mise a été réduite numériquement de 15 % pour les truies du traitement Fibre comparativement au traitement Témoin. Li et al. (2021) ont noté que la supplémentation de l'aliment gestation avec de l'inuline réduisait la durée de mise bas ainsi que le nombre de mort-nés chez la truie. Aussi, Liu et al. (2020) ont confirmé ces réductions de la durée de mise bas et de l'intervalle entre les naissances avec un aliment contenant 30 % de NDF comparativement à un aliment Témoin à 17 % (Liu et al. 2020). Toutefois, la réduction des mort-nés n'a pas été associée à une hausse des nombres de porcelets à 24 h ou au sevrage. En fait, la mortalité naissance-24 h était plus élevée pour le traitement Fibre menant à une mortalité périnatale totale similaire pour tous les traitements avec une valeur moyenne à 10,6 %. De plus, les pourcentages d'intervention ainsi que d'injection d'ocytocine pendant la mise-bas n'ont pas été affectés par les traitements suggérant que le déroulement des mises bas n'aurait pas été significativement influencé par les traitements alimentaires en gestation.

En lien avec les performances à la mise bas et la mortalité pré-sevrage, le nombre de porcelets sevrés n'a pas été influencé par les traitements alimentaires en gestation. Ces résultats sont

en accord avec ceux rapportés par Guillemet et al. (2007) et Quesnel et al. (2008) avec des aliments en gestation contenant 30 % de NDF ou ceux de Li et al (2020) avec des aliments en fin de gestation supplémentés avec de l'inuline. Avec le seigle, McGhee et Stein (2021) ont noté que des aliments en gestation et en lactation contenant 17 et 30 % de seigle maximisait le nombre de sevré avec +0,93 et +0,70 porcelet sevré par portée par rapport à aucun apport en seigle. La différence observée entre les deux études pourrait s'expliquer par l'aliment utilisé en lactation qui était le même pour tous les traitements à partir de 7 jours de lactation dans la présente étude en comparaison à l'étude de McGhee et Stein (2021) qui ont utilisé un aliment contenant la même concentration en seigle dans l'aliment gestation et lactation. En lactation, McGhee et Stein. (2021) ont rapporté que la mortalité naissance sevrage passait de 18,7 % à 13,8 % lorsque la concentration des aliments gestation/lactation passait de 0 à 30 % de seigle (McGhee et Stein 2021).

En ce qui concerne, la croissance de la portée, aucune différence n'a été notée entre les traitements en gestation. En fait, bien que la consommation pendant la première semaine de lactation fût plus grande pour les truies du traitement Seigle30 comparativement au traitement Fibre, cette différence ne s'est pas maintenue pendant la totalité de la lactation. Cet effet limité sur la consommation d'aliment en lactation a été associée avec l'absence d'effet des traitements en gestation sur le gain de poids de la portée en lactation ainsi que sur le poids au sevrage. Ces résultats sont contraires à ceux publiés par Quesnel et al. (2008) et Gao et al. (2023) qui rapportaient que la consommation d'un aliment riche en fibre en gestation représentant deux à trois fois la concentration en NDF ou fibre brute du traitement Témoin stimulait la consommation alimentaire de la truie ainsi que la croissance de la portée en lactation. Toutefois, une autre étude utilisant ces mêmes variations d'apport en fibre n'a pas réussi à montrer une hausse de la consommation ainsi que de la croissance des porcelets en lactation (Guillemet et al. 2007).

Il est possible dans notre étude que la différence de concentration en fibre et donc de la prise alimentaire en gestation était insuffisante pour stimuler le développement du système digestif de la truie favorisant ainsi une hausse de la capacité d'ingestion en lactation. Gao et al. (2023) ont montré que la stimulation de la consommation d'aliment en lactation était associée

positivement avec la prise alimentaire en gestation et donc proportion à la concentration en fibre de l'aliment en gestation. Pour le seigle, McGhee et Stein (2021) ont montré qu'une combinaison d'aliments en gestation et en lactation contenant 30 % de seigle améliorerait la consommation des truies et la croissance de la portée en lactation (McGhee et Stein 2021). Ces auteurs ont suggéré que l'effet « fibre » du seigle en gestation a pu mieux préparer les truies à hausser leur consommation en lactation. Ils ont aussi proposé que l'aliment lactation contenant du seigle à 30 % pouvait favoriser un comportement des truies favorable à la croissance et à la survie des porcelets via une réduction des changements de posture pendant la lactation. Dans notre étude, l'aliment en gestation contenant du seigle a été distribué seulement pendant la première semaine de lactation. Par la suite, un aliment commercial en lactation a été distribué à toutes les truies. La croissance de la portée en lactation progressant durant les trois premières semaines de lactation (Guillemet et al. 2007), il est possible que l'effet de l'aliment seigle après seulement une semaine de lactation ait été insuffisant pour influencer la croissance globale de la portée et des porcelets pendant trois semaines de lactation.

Il est connu que l'insuline régule le métabolisme des glucides, des protéines et des lipides en favorisant l'absorption du glucose par différentes cellules. Chez la truie gestante, une résistance à l'insuline est observée vers la fin de la gestation (Père et Etienne 2007). Dans notre étude, la concentration d'insuline estimées après 8 h de jeûne était plus élevée à 28 jours qu'avant la mise bas. Toutefois, cette concentration d'insuline n'a pas été influencée par les traitements alimentaires. Ces résultats confirment les résultats de Loisel et al. (2013) qui montraient qu'un aliment en gestation riche en fibre ne modifiait pas la résistance à l'insuline des truies gestantes. Pour le glucose, Quesnel et al. (2008) ont montré qu'un aliment riche en fibre diminuait la concentration de glucose en raison du délai d'absorption post-prandial. Dans notre étude, l'aliment Fibre a diminué la concentration de glucose à 28 jours de gestation mais pas avant la mise bas. Comme noté précédemment, la résistance à l'insuline augmentant pendant la gestation, l'effet de la concentration en fibre alimentaire sur le glucose sanguin pourrait être différent. Parmi les autres hormones, aucune n'a été modifiée

par les traitements alimentaires en gestation comme rapporté par Loisel et al. (2013) et Liu et al. (2020).

Toutefois, les concentrations de prolactine et d'œstradiol étaient plus élevées à la fin de gestation. La prolactine est une hormone essentielle pour initier et maintenir la production laitière et l'œstradiol est un facteur important pour stimuler le développement mammaire de la truie (Hurley 2019). Comme la prolactine et l'œstradiol, les marqueurs du statut oxydatif, MDA et FRAP, n'ont pas été influencés par les traitements alimentaires en gestation. Des études ont montré que le stress oxydatif de truies gestantes nourries avec un aliment riche en fibre était réduit par la hausse de la capacité antioxydant (Liu et al. 2020; Huang et al. 2020). Toutefois, notre étude a montré que la concentration du FRAP était plus faible avant la mise bas comparativement au jour 28 de gestation. La demande en énergie et en oxygène à la fin de la gestation mènerait à une hausse du stress oxydatif qui pourrait altérer le statut antioxydant (Berchieri-Ronchi et al. 2011). La concentration en IgG du colostrum n'a pas aussi été affectée par l'apport en aliment fibreux en gestation comme rapporté par Loisel et al. (2013) qui ont comparé deux aliments contenant 13 et 20 % de NDF. Les résultats de Liu et al. (2020) où les truies étaient nourries avec un régime enrichi en fibre insoluble ou soluble ont montré une fonction immunitaire améliorée avec une concentration croissante d'immunoglobulines plasmatiques et de facteurs anti-inflammatoires (Liu et al. 2020). Gao et al. (2023) ont aussi rapporté une hausse des IgG du colostrum pour des truies nourries en gestation avec des aliments contenant 6 ou 8 % de fibre brute comparativement à un régime contenant 3 % de fibre brute (Gao et al. 2023). Pour le seigle, McGhee et Stein (2021) ont noté aucun effet de l'inclusion de 0 à 30 % de seigle dans les aliments gestation et lactation sur la concentration d'IgG plasmatique des truies avant la mise bas et des porcelets à 20 jours d'âge. L'effet limité des traitements alimentaires en gestation sur les IgG du colostrum a été associé avec l'absence d'effet sur les IgG sériques des porcelets à 7 jours de lactation. Il est connu que la consommation d'IgG venant du colostrum est corrélée avec la teneur plasmatique en IgG des porcelets à 24 h d'âge (Devillers et al. 2011).

Parmi les métabolites et hormones du sang, seulement les concentrations d'acides gras volatils, le propionate, le butyrate et l'iso-valérate, avant la mise bas différaient de manière

significative entre les traitements gestation. Pour le butyrate et le propionate, les concentrations augmentaient principalement pour les truies du traitement Seigle60. Les fibres alimentaires dans le seigle sont constituées principalement d'arabinoxylanes, fructo-oligosaccharides, de β -glucanes et de cellulose. La fermentation des fibres de seigle entraînerait donc une synthèse accrue de butyrate, un substrat énergétique préféré des cellules intestinales du côlon et un promoteur de la santé intestinale (Gall et al. 2009). Les résultats des concentrations du butyrate et du propionate de notre étude corroborent avec celles trouvées dans des études antérieures chez des porcs nourris avec du seigle (Bach Knudsen 2001; Hansen et al. 1991). Ces changements sont partiellement expliqués par des modifications du microbiote de la truie.

L'analyse du séquençage du microbiote fécal des truies à une semaine de lactation a montré que les principaux phylums rencontrés étaient les Firmicutes et les Bactéroideta. Nos résultats sont en accord avec ceux d'études récentes qui ont montré que ces phylum étaient les prédominants retrouvés chez les truies en lactation (Cheng et al. 2018; Zhou et al. 2017; Liu et al. 2019). Les Bacteroideta et les Firmicutes sont les embranchements les plus dominants dans l'intestin, représentant environ 73 % de la séquence totale des micro-organismes (Niu et al. 2019). Aussi, les résultats pour l'expérience de Strang et al. (2016), qui ont étudié la structure du microbiote à travers le traitement alimentaire ont montré une structure taxonomique globale du microbiote intestinal dominée par les *Firmicutes* et le *Bactériodetes*.

Bien que les alpha et beta-diversités du microbiote des truies n'ont pas été modifiées par les traitements alimentaires, les *Prevotellaceae*, *Selenomonadaceae*, *Muribaculaceae*, *Erysipelatoclostridiaceae* et les *Christensenellaceae* avaient des abondances relatives variables selon le traitement alimentaire alloué aux truies pendant la gestation. Liu et al. (2021) ont obtenu une modification du microbiote intestinal des truies à la suite de la consommation des fibres alimentaires provenant de différentes sources pendant la gestation. Les genres dominants retrouvés par Liu et al. (2021) étaient; les Clostridies, les Lactobacilles, les Bactéroïdes, *Prevotellaceae*, *Lachnospiraceae* et les *Christensenellaceae* avec des abondances variables entre les traitements expérimentaux fibreux et le traitement Témoin. La similitude de la majeure partie de la composante structurelle du microbiote intestinal des

truie entre notre étude et celle de Liu et al. (2021) semble confirmer que les sources de fibres incluses en régime alimentaire des truies gestantes pourraient réguler la composition du microbiote intestinal des truies en favorisant la prolifération des bactéries qu'on retrouve d'une façon standardisée chez les truies nourries à base d'un aliment contenant des fibres pendant la gestation (Liu et al. 2018). Selon une étude récente, les genres bactériens dominants chez les truies pendant la gestation qui ont été assignées à un traitement à base de gomme de guar à 2 % et d'amidon de maïs cireux pré-gélatinisé étaient *Eubacterium*, *Prevotella*, *Oscillospira*, *Bacteoides*, *Treponema*, *Clostridium* et *Ruminococcus* (Xu et al. 2020). Yu et al. (2020) ont également montré qu'une alimentation riche en fibres (résidu de *Stevia rebaudiana*) chez les truies gestantes augmentait significativement l'abondance relative du groupe Lachnospirace-XPB1014 et du groupe *Christensenellaceae*, ce qui est toutefois différent de nos résultats avec la famille bactérienne des *Christensenellaceae* avec une abondance plus élevée pour le traitement Témoin (Yu et al. 2020). Cela indique que la différence entre les sources de fibres alimentaires, la teneur en fibre et la sensibilité des microbes intestinaux déterminent en partie le système microbien complexe de l'intestin (Tian et al. 2020). En effet, les différences dans les sources de fibres alimentaires et la sensibilité microbienne intestinale déterminent en partie la complexité du système microbien intestinal et affectent la richesse et la diversité relative des micro-organismes intestinaux (Guan et al. 2019 ; Xu et al. 2020b ; Wu et al. 2020).

Dans notre étude, le seigle à raison d'une teneur de 60 % a haussé les concentrations d'AGV, le propionate et le butyrate, par rapport au traitement Témoin. Les études du lien entre les métabolites et les bactéries chez les porcs montrent l'existence d'une corrélation entre l'abondance relative des bactéries *Christensenellaceae* et *Prevotellaceae* et la production des AGV (Beaumont et al. 2021). La diversité, la composition et la fonction des communautés microbiennes intestinales retrouvées est donc influencées par la composition des différents régimes alimentaires expérimentaux en conditionnant le métabolisme des NSP (Luo et al. 2022). En effet, les fibres alimentaires sont la principale source d'énergie du microbiote intestinal dans la partie distal de l'intestin, ce qui signifie que l'ajout d'une quantité

appropriée de fibres alimentaires peut augmenter l'abondance de micro-organismes spécifiques et donc la production d'AGV spécifique (Sappok et al. 2015).

Les résultats ayant trait à la diversité et la composition du microbiote fécal des porcelets à la suite de l'analyse de séquençage des échantillons fécaux à une semaine de lactation soutiennent la prémisse scientifique selon laquelle l'exposition à des régimes alimentaires maternels riches en fibres pendant la gestation et le début de la lactation impactent l'établissement du microbiote intestinal à court terme. Les trois premiers principaux phylums en abondance relative retrouvés chez les porcelets à une semaine de lactation étaient les *Firmicutes*, les *Protéobacteria*, et les *Bacteroideta*. Les embranchements des *Firmicutes* et des *Bacteroidetes* sont connus pour représenter plus de 90 % du total des séquences, comme dans les microbiotes iléaux, caecaux et fécaux des porcelets sevrés et d'engraissement (Dirkjan Schokker et al. 2014). Selon deux essais qui ont été menés dans une ferme porcine commerciale par Chen et al. (2017) pendant la période d'allaitement, il a été démontré que les *Firmicutes* et les *Bacteroidetes* constituaient les deux embranchements prédominants du microbiote intestinal des porcelets. Outre les *Firmicutes* et les *Bactéroidetes*, les *Fusobactéries*, les Protéobactéries et les *Actinobactéries* étaient également présents dans les fèces des porcelets (Chen et al. 2017). Quant aux familles, les principales identifiées étaient les *Lactobacillaceae*, les *Enterobacteriaceae*, les *Clostridiaceae*, les *Streptococcaceae* et les *Bacteroidaceae*. En effet, les *Lactobacillaceae* étaient les prédominantes en termes d'abondance relative, ce qui appuie les effets de l'alimentation maternelle riche en lactose et en oligosaccharides du lait favorisant les *Lactobacillus spp.* (Kaevska et al. 2016).

Dans notre étude, la diversité alpha estimée par les indices de biodiversité (Observed, Chao1) a montré une hausse notamment chez les porcelets, des traitements Fibre et Seigle30. Des recherches antérieures ont montré que le microbiote maternel joue un rôle essentiel dans la composition de la flore intestinale de la progéniture. Par exemple, la composition de l'alimentation pendant la gestation a des effets importants sur la structure du microbiote intestinal de la progéniture (Ma et al. 2014). Entre autres, l'ajout de l'inuline à un régime de gestation module non seulement le microbiote intestinal chez les truies mais aussi celui de leur progéniture (Paßlack et al. 2015). Une étude de Cheng et al. (2018) a montré que

l'inclusion des fibres solubles combinés à de l'amidon de maïs cireux pré-gélatinisé et de gomme de guar dans un régime de gestation avait des effets sur la composition du microbiote intestinal des porcelets. Chez les porcelets, l'établissement microbien commence à la naissance lorsque le nouveau-né est exposé à une grande variété de micro-organismes, principalement fournis par la mère pendant et après le passage dans le tractus vaginale et de son contact avec l'environnement (Katouli et al. 1997). Cet environnement dépend en grande partie de la mère, étant donné que les porcelets nouveau-nés sont en contact permanent avec les fèces de la truie, la peau et les surfaces muqueuses jusqu'au sevrage (Thompson et al. 2008).

En plus d'avoir modifié les diversités alpha et beta, les traitements alimentaires en gestation ont affecté l'abondance relative de certaines familles bactériennes. L'abondance relative de la famille des *Muribaculaceae* et *Rikenellaceae* était plus élevée chez les porcelets allaités par les truies nourries avec le traitement Fibre en gestation. L'abondance relative de *Prevotellaceae* et *Butyricoccaceae* était également plus élevée chez les porcelets des groupes Seigle30 ou Fibre. Les *Muribaculaceae* auraient la capacité de produire des enzymes dégradant la cellulose et pourraient donc être stimulées en présence d'aliments contenant une concentration plus élevée de fibre contenant de la cellulose (Lagkouvardos et al. 2019). Les *Prevotella* sont des membres microbiens clé du tractus gastro-intestinal des animaux adultes. Elles sont cruciales pour la dégradation de l'amidon et des polysaccharides végétaux (Ivarsson et al. 2014) Frese et al. (2015) ont révélé que l'abondance relative des *Prevotellaceae* a augmenté de près de 50 fois, passant d'une moyenne de 0,3 % chez les porcelets allaités à 14,8 % chez les porcelets sevrés. Toutefois, Yang et al. (2018) ont montré une faible abondance relative de *Prevotella* chez les porcelets en bonne santé en lactation alors qu'une abondance beaucoup plus élevée chez les porcelets en bonne santé après le sevrage (Yang et al. 2018). On pense que cette différence est liée à un régime alimentaire contenant des aliments solides moins digestibles médicamenteux (Holman et al. 2017). Dans son étude chez les porcelets en transition au moment du sevrage, Beaumont et al. (2021) ont démontré une corrélation positive des *Butyricoccaceae* et *Muribaculaceae* avec la prise de poids pendant le 5 jours post-sevrage. Les *Butyricoccaceae* sont toutes des bactéries

productrices d'AGV (Beaumont et al. 2021). L'ensemble de ces données suggère que les porcelets de truies nourris avec un aliment enrichi en fibre semblent avoir un établissement du microbiote différent qui serait favorable à la suite du sevrage. En effet, d'autres études appuient que l'établissement précoce d'un microbiote intestinal optimal et stable joue un rôle important dans le développement de la fonction physiologique du tractus gastro-intestinal ainsi que la maturation du système immunitaire inné des porcelets après le sevrage (Lin et al. 2018). Ceci impacte directement les performances des porcs en croissance et en finition (Dou et al. 2017).

CONCLUSION

L'intérêt de ce projet réalisé au cours de cette maîtrise comportait plusieurs volets. De prime abord, le coût d'alimentation des truies représente généralement plus de 60 % de l'ensemble du coût de production des porcelets en maternité. Entre autres, la hausse des prix des céréales conventionnelles utilisées en alimentation des truies gestantes régit la quête de nouvelles céréales à moindre coût. Toutefois, le pilotage des performances des truies gestantes doit être considéré parallèlement aux défis économiques. Dans ce contexte, le seigle hybride semble être une alternative intéressante au maïs, à l'orge, au blé et à l'avoine. La composition nutritionnelle du seigle hybride, dont sa teneur en fibres, peut en faire un avantage par rapport aux céréales traditionnelles. Les études antérieures sur le recours au seigle hybride en alimentation porcine s'intéressaient davantage sur la digestibilité iléale standardisée des polysaccharides non amylacés et sur les performances de croissance des truies ainsi que des porcs en finition. En revanche, peu d'études se sont penchées sur le maintien des performances de reproduction des truies.

Notre étude a montré que les performances de reproduction des truies ont été maintenues avec les deux taux d'inclusion du seigle hybride à raison de 30 et 60 %. L'éventualité d'utiliser le seigle hybride comme une céréale alternative pour les truies en gestation s'avère réalisable. De façon générale, les truies nourries en gestation avec un aliment contenant 30 ou 60 % de seigle ont eu un nombre de porcelets à la naissance et au sevrage équivalent aux truies nourries avec un régime témoin ou témoin riche en fibre. Le gain de la portée en lactation n'a pas aussi été affecté par l'ajout de seigle à l'aliment en gestation. Toutefois, les aliments riches en fibres et contenant 30 % de seigle n'ont pas permis de maintenir le même niveau d'épaisseur de gras dorsal des truies pendant la gestation. Cela suggère que l'évaluation du contenu énergétique du seigle dans les aliments pour truie que l'on retrouve dans les tableaux nutritionnel (NRC, 2012) pourrait être surestimé menant à un apport réel en énergie et en nutriments réduit par rapport aux valeurs prévues. Des études complémentaires seraient donc nécessaires afin de déterminer plus précisément la valeur nutritionnelle du seigle chez la truie.

Notre étude a mis en évidence l'influence des différents traitements alimentaires et différentes teneurs en seigle hybride utilisées en gestation sur la composition et le développement du microbiote et des truies et des porcelets. L'essai expérimental dont nous avons réalisé a créé des biotopes différents entre les truies qui appartiennent aux quatre groupes expérimentaux. Ces biotopes ont influencé la biocénose des communautés bactériennes qui s'y développent au niveau du tractus gastro-intestinal. Il faut toutefois mentionner que le dispositif expérimental où les truies des différents traitements alimentaires étaient regroupées dans les enclos des jours 28 à 110 jours de gestation a pu limiter les effets des différents traitements sur le microbiote des truies. Par conséquent, il en résultait une différence réduite entre les communautés bactériennes qui composent le microbiote intestinal des truies. Malgré la différence réduite du microbiote des truies entre les traitements alimentaires, cette différence a été suffisante pour induire une différence significative du microbiote de leurs porcelets en début de lactation. Entre autres, la présence précoce des *Prevotellaceae* chez les porcelets des truies nourries avec des aliments enrichis en fibre pourrait être un avantage pour la transition des porcelets au moment du sevrage. Ainsi, les effets similaires observés entre le microbiote des porcelets avec ceux de leurs mères pourraient être expliqués par un phénomène du transfert du microbiote intestinal maternel à prédominance de certaines familles bactériennes par rapport à d'autres. Chez les truies nourries avec les aliments supplémentés en seigle, la présence des *Prevotellaceae* et *Muribaculaceae* est associée avec une hausse des concentrations en propionate et en butyrate. Le butyrate est connu pour son rôle dans nutrition des entérocytes et donc le maintien des fonctions de la muqueuse intestinale.

En résumé, l'utilisation du seigle hybride à raison de 30 ou 60 % en alimentation de la truie pendant la gestation et le début de la lactation n'a pas affecté les performances de reproduction des truies à la mise-bas ou au sevrage mais la supplémentation en fibre en gestation a modifié le microbiote des truies et son établissement chez leurs porcelets en début de lactation pouvant être favorable à l'établissement de leur microbiote à plus long terme.

D'autres études sur ce sujet seront nécessaires afin de confirmer cette hypothèse et ainsi améliorer la transition des porcelets au moment du sevrage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aarnink, A. J. A., et M. W. A. Verstegen. 2007. « Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production ». *Livestock Science*, 10th International Symposium on Digestive Physiology in Pigs, Denmark 2006, Part 2, 109 (1): 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.01.112>.
- Abd El-Wahab, Amr, Jan Lingens, Bussarakam Chuppava, Marwa Ahmed, Ahmed Osman, Marion Langeheine, Ralph Brehm, et al. 2020. « Impact of Rye Inclusion in Diets for Broilers on Performance, Litter Quality, Foot Pad Health, Digesta Viscosity, Organ Traits and Intestinal Morphology ». *Sustainability* 12 (septembre). <https://doi.org/10.3390/su12187753>.
- Adhikari, Bishnu, Sung Woo Kim, et Young Min Kwon. 2019. « Characterization of Microbiota Associated with Digesta and Mucosa in Different Regions of Gastrointestinal Tract of Nursery Pigs ». *International Journal of Molecular Sciences* 20 (7): 1630. <https://doi.org/10.3390/ijms20071630>.
- Ajouz, Hana, Deborah Mukherji, et Ali Shamseddine. 2014. « Secondary Bile Acids: An Underrecognized Cause of Colon Cancer ». *World Journal of Surgical Oncology* 12 (mai):164. <https://doi.org/10.1186/1477-7819-12-164>.
- Aubé, L., F. Guay, R. Bergeron, G. Bélanger, G. F. Tremblay, et N. Devillers. 2019. « Sows' preferences for different forage mixtures offered as fresh or dry forage in relation to botanical and chemical composition ». *animal* 13 (12): 2885-95.
- Awatef, Ghennai, Zérafa Chafia, et Benlaribi Mostefa. 2017. « Étude de la diversité génétique de quelques variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et de blé dur (*Triticum durum* Desf.) selon la base des caractères de l'U.P.O.V ». *Journal of Applied Biosciences* 113 (1): 11246. <https://doi.org/10.4314/jab.v113i1.13>.
- Bach Knudsen, K. E. 2001a. « The nutritional significance of “dietary fibre” analysis ». *Animal Feed Science and Technology*, The Role of Dietary Fibre in Pig Production, 90 (1): 3-20. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00193-6).
- Bach Knudsen, K. E., et I. Hansen. 1991. « Gastrointestinal Implications in Pigs of Wheat and Oat Fractions. 1. Digestibility and Bulking Properties of Polysaccharides and Other Major Constituents ». *The British Journal of Nutrition* 65 (2): 217-32. <https://doi.org/10.1079/bjn19910082>.
- Bäckhed, Fredrik, Ruth E. Ley, Justin L. Sonnenburg, Daniel A. Peterson, et Jeffrey I. Gordon. 2005a. « Host-Bacterial Mutualism in the Human Intestine ». *Science* 307 (5717): 1915-20.
- Badr, A., K. M, R. Sch, H. El Rabey, S. Effgen, H. H. Ibrahim, C. Pozzi, W. Rohde, et F. Salamini. 2000. « On the Origin and Domestication History of Barley (*Hordeum vulgare*) ». *Molecular Biology and Evolution* 17 (4): 499-510. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a026330>.
- Beaumont, Martin, Laurent Cauquil, Allan Bertide, Ingrid Ahn, Céline Barilly, Lisa Gil, Cécile Canlet, et al. 2021. « Gut Microbiota-Derived Metabolite Signature in Suckling and Weaned Piglets ». *Journal of Proteome Research* 20 (1): 982-94. <https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.0c00745>.

- Beaumont, Martin, Corinne Lencina, Louise Painteaux, Joffrey Viémon-Desplanque, Orasin Phornlaphat, William Lambert, et Tristan Chalvon-Demersay. 2021. « A mix of functional amino acids and grape polyphenols promotes the growth of piglets, modulates the gut microbiota in vivo and regulates epithelial homeostasis in intestinal organoids ». *Amino Acids* 54 (octobre):1-13. <https://doi.org/10.1007/s00726-021-03082-9>.
- Bee, Giuseppe. 2017. « Gestational strategies affecting sow reproduction and piglet birth weight ». In *Proceedings of the the 11th International Symposium Modern Trends in Livestock Production*.
- Berchieri-Ronchi, C. B., S. W. Kim, Y. Zhao, C. R. Correa, K.-J. Yeum, et A. L. A. Ferreira. 2011. « Oxidative Stress Status of Highly Prolific Sows during Gestation and Lactation ». *Animal: An International Journal of Animal Bioscience* 5 (11): 1774-79. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000772>.
- Berg, Gabriele, Daria Rybakova, Doreen Fischer, Tomislav Cernava, Marie-Christine Champomier Vergès, Trevor Charles, Xiaoyulong Chen, et al. 2020. « Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges ». *Microbiome* 8 (1): 103. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0>.
- Berg, Rodney D. 1996. « The indigenous gastrointestinal microflora ». *Trends in microbiology* 4 (11): 430-35.
- Bergner, H. 1988. « [The significance of fiber for swine nutrition with special reference to HCl-treated straw meal] ». *Archiv Fur Tierernahrung* 38 (12): 1071-87. <https://doi.org/10.1080/17450398809434365>.
- Berry, Alexander SF, Meghann K. Pierdon, Ana M. Mistic, Megan C. Sullivan, Kevin O'Brien, Ying Chen, Samuel J. Murray, Lydia A. Ramharack, Robert N. Baldassano, et Thomas D. Parsons. 2021. « Remodeling of the maternal gut microbiome during pregnancy is shaped by parity ».
- Beukovic, M., I. Jajic, et D. Beukovic. 2015a. « Review of nutrition model for gestation sows ».
- 2015b. « Review of Nutrition Model for Gestation Sows », septembre. <http://arhiva.nara.ac.rs/handle/123456789/659>.
- Bian, Gaorui, Shouqing Ma, Zhigang Zhu, Yong Su, Erwin G. Zoetendal, Roderick Mackie, Junhua Liu, Chunlong Mu, Ruihua Huang, Hauke Smidt, et al. 2016. « Age, introduction of solid feed and weaning are more important determinants of gut bacterial succession in piglets than breed and nursing mother as revealed by a reciprocal cross-fostering model ». *Environmental Microbiology* 18 (5): 1566-77. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13272>.
- Bindelle, Jerome, Pascal Leterme, et A. Buldgen. 2008. « Nutritional and environmental consequences of dietary fibre in pig nutrition ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 12 (janvier).
- Bindels, Laure B., Nathalie M. Delzenne, Patrice D. Cani, et Jens Walter. 2015. « Towards a More Comprehensive Concept for Prebiotics ». *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology* 12 (5): 303-10. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2015.47>.
- Bouhnik, Yoram, Lotfi Achour, Damien Paineau, Michel Riottot, Alain Attar, et Francis Bornet. 2007. « Four-week short chain fructo-oligosaccharides ingestion leads to

- increasing fecal bifidobacteria and cholesterol excretion in healthy elderly volunteers ». *Nutrition Journal* 6 (1): 42. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-6-42>.
- Brestenský, M., S. Nitrayová, P. Patráš, et J. Heger. 2013. « Standardized Ileal Digestibilities of Amino Acids and Nitrogen in Rye, Barley, Soybean Meal, Malt Sprouts, Sorghum, Wheat Germ and Broken Rice Fed to Growing Pigs ». *Animal Feed Science and Technology* 186 (1-2): 120-24. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.09.006>.
- Brouns, F., S. A. Edwards, et P. R. English. 1995. « Influence of fibrous feed ingredients on voluntary intake of dry sows ». *Animal Feed Science and Technology* 54 (1): 301-13. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00767-H](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00767-H).
- Brown, Kirsty, Daniella DeCoffe, Erin Molcan, et Deanna L. Gibson. 2012. « Diet-Induced Dysbiosis of the Intestinal Microbiota and the Effects on Immunity and Disease ». *Nutrients* 4 (8): 1095-1119. <https://doi.org/10.3390/nu4081095>.
- Burbach, K., E.J.P. Strang, R. Mosenthin, A. Camarinha-Silva, et J. Seifert. 2017. « Porcine intestinal microbiota is shaped by diet composition based on rye or triticale ». *Journal of Applied Microbiology* 123 (6): 1571-83. <https://doi.org/10.1111/jam.13595>.
- Caballero, Silvia, et Eric G. Pamer. 2015. « Microbiota-Mediated Inflammation and Antimicrobial Defense in the Intestine ». *Annual Review of Immunology* 33:227-56. <https://doi.org/10.1146/annurev-immunol-032713-120238>.
- Cahenzli, Julia, Yasmin Köller, Madeleine Wyss, Markus B. Geuking, et Kathy D. McCoy. 2013. « Intestinal Microbial Diversity during Early-Life Colonization Shapes Long-Term IgE Levels ». *Cell Host & Microbe* 14 (5): 559-70. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2013.10.004>.
- Camarinha-Silva, Amelia, Maria Maushammer, Robin Wellmann, Marius Vital, Siegfried Preuss, et Jörn Bennewitz. 2017. « Host Genome Influence on Gut Microbial Composition and Microbial Prediction of Complex Traits in Pigs ». *Genetics* 206 (3): 1637-44. <https://doi.org/10.1534/genetics.117.200782>.
- Campbell, Joy M., Joe D. Crenshaw, et Javier Polo. 2013. « The Biological Stress of Early Weaned Piglets ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 4 (1): 1-4. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-19>.
- Caporaso, J. Gregory, Justin Kuczynski, Jesse Stombaugh, Kyle Bittinger, Frederic D. Bushman, Elizabeth K. Costello, Noah Fierer, et al. 2010. « QIIME Allows Analysis of High-Throughput Community Sequencing Data ». *Nature Methods* 7 (5): 335-36. <https://doi.org/10.1038/nmeth.f.303>.
- Carlson, Alexander L., Kai Xia, M. Andrea Azcarate-Peril, Barbara D. Goldman, Mihye Ahn, Martin A. Styner, Amanda L. Thompson, Xiujuan Geng, John H. Gilmore, et Rebecca C. Knickmeyer. 2018. « Infant Gut Microbiome Associated With Cognitive Development ». *Biological Psychiatry, Early Life Environments and Later Vulnerabilities*, 83 (2): 148-59. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.06.021>.
- Carpita, N., M. McCann, et L. R. Griffing. 1996. « The Plant Extracellular Matrix: News from the Cell's Frontier ». *The Plant Cell* 8 (9): 1451-63. <https://doi.org/10.1105/tpc.8.9.1451>.
- Carpita, Nicholas C. 1996. « Structure and Biogenesis of the Cell Walls of Grasses ». *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 47 (1): 445-76. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.47.1.445>.

- Catherine, Jondreville, Genthon Clotilde, Bouguennec Annaig, et Nys Yves. 2007. « UTILISATION DU TRITICALE DANS L'ALIMENTATION DU POULET : ESTIMATION DE L'EFFICACITE DE LA PHYTASE VEGETALE POUR AMELIORER LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE ».
- Cervantes-Pahm, Sarah K., Yanhong Liu, et Hans H. Stein. 2014. « Digestible Indispensable Amino Acid Score and Digestible Amino Acids in Eight Cereal Grains ». *British Journal of Nutrition* 111 (9): 1663-72. <https://doi.org/10.1017/S0007114513004273>.
- Champ, Martine, Anna-Maria Langkilde, Fred Brouns, Bernd Kettlitz, et Yves Le Bail Collet. 2003. « Advances in dietary fibre characterisation. 1. Definition of dietary fibre, physiological relevance, health benefits and analytical aspects ». *Nutrition Research Reviews* 16:71-82.
- Chen, Limei, Yuesong Xu, Xiaoyu Chen, Chao Fang, Liping Zhao, et Feng Chen. 2017. « The maturing development of gut microbiota in commercial piglets during the weaning transition ». *Frontiers in microbiology* 8:1688.
- Chen, Xue, Jumei Xu, Erdou Ren, Yong Su, et Weiyun Zhu. 2018. « Co-occurrence of early gut colonization in neonatal piglets with microbiota in the maternal and surrounding delivery environments ». *Anaerobe* 49 (février):30-40. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.12.002>.
- Cheng, Chuanshang, Hongkui Wei, Chuanhui Xu, Xiaowei Xie, Siwen Jiang, et Jian Peng. 2018. « Maternal Soluble Fiber Diet during Pregnancy Changes the Intestinal Microbiota, Improves Growth Performance, and Reduces Intestinal Permeability in Piglets ». Édité par Johanna Björkroth. *Applied and Environmental Microbiology* 84 (17): e01047-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.01047-18>.
- Choque Delgado, Grethel Teresa, Wirla Maria da Silva Cunha Tamashiro, Mário Roberto Maróstica Junior, et Glaucia Maria Pastore. 2013. « Yacon (*Smallanthus Sonchifolius*): A Functional Food ». *Plant Foods for Human Nutrition* 68 (3): 222-28. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0362-0>.
- Choudhury, R., A. Middelkoop, J. G. de Souza, L. A. van Veen, W. J. J. Gerrits, B. Kemp, J. E. Bolhuis, et M. Kleerebezem. 2021. « Impact of Early-Life Feeding on Local Intestinal Microbiota and Digestive System Development in Piglets ». *Scientific Reports* 11 (1): 4213. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83756-2>.
- Coffey, M. T., B. G. Diggs, D. L. Handlin, D. A. Knabe, C. V. Maxwell Jr, P. R. Noland, T. J. Prince, et G. L. Gromwell. 1994. « Effects of dietary energy during gestation and lactation on reproductive performance of sows: a cooperative study ». *Journal of Animal Science* 72 (1): 4-9.
- Cortes, Luis Carlos Pena, Rhiannon M. LeVeque, Julie A. Funk, Terence L. Marsh, et Martha H. Mulks. 2018. « Development of the tonsil microbiome in pigs and effects of stress on the microbiome ». *Frontiers in Veterinary Science* 5 (SEP). <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00220>.
- Costello, Elizabeth K., Keaton Stagaman, Les Dethlefsen, Brendan J. M. Bohannan, et David A. Relman. 2012. « The Application of Ecological Theory toward an Understanding of the Human Microbiome ». *Science (New York, N.Y.)* 336 (6086): 1255-62. <https://doi.org/10.1126/science.1224203>.
- Council, National Research. 2012a. « Nutrient requirements of swine ».
- 2012b. « Nutrient requirements of swine ».

- Council, National Research, Division on Earth and Life Studies, Board on Agriculture and Natural Resources, et Committee on Nutrient Requirements of Swine. 2012a. *Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition*. National Academies Press.
- Crespo-Piazuelo, Daniel, Lourdes Migura-Garcia, Jordi Estellé, Lourdes Criado-Mesas, Manuel Revilla, Anna Castelló, María Muñoz, et al. 2019. « Association between the Pig Genome and Its Gut Microbiota Composition ». *Scientific Reports* 9 (1): 8791. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45066-6>.
- Dantzer, R. 1986. « Behavioral, Physiological and Functional Aspects of Stereotyped Behavior: A Review and a Re-Interpretation ». *Journal of Animal Science* 62 (6): 1776-86. <https://doi.org/10.2527/jas1986.6261776x>.
- De Blas, J. C. 2013. « Nutritional impact on health and performance in intensively reared rabbits ». *Animal* 7 (janvier):102-11. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000213>.
- De Rodas, Brenda, Bonnie P Youmans, Jessica L Danzeisen, Huyen Tran, et Timothy J Johnson. 2018. « Microbiome profiling of commercial pigs from farrow to finish ». *Journal of Animal Science* 96 (5): 1778-94. <https://doi.org/10.1093/jas/sky109>.
- Dervilly, G, C Leclercq, D Zimmermann, C Roue, J. -F Thibault, et L Saulnier. 2002. « Isolation and characterization of high molar mass water-soluble arabinoxylans from barley and barley malt ». *Carbohydrate Polymers* 47 (2): 143-49. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00172-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00172-2).
- Devillers, N., J. Le Dividich, et A. Prunier. 2011. « Influence of Colostrum Intake on Piglet Survival and Immunity ». *Animal: An International Journal of Animal Bioscience* 5 (10): 1605-12. <https://doi.org/10.1017/S175173111100067X>.
- Dominguez-Bello, Maria G., Elizabeth K. Costello, Monica Contreras, Magda Magris, Glida Hidalgo, Noah Fierer, et Rob Knight. 2010. « Delivery Mode Shapes the Acquisition and Structure of the Initial Microbiota across Multiple Body Habitats in Newborns ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (26): 11971-75. <https://doi.org/10.1073/pnas.1002601107>.
- Doré, Joël, et Hervé Blottière. 2015. « The influence of diet on the gut microbiota and its consequences for health ». *Current Opinion in Biotechnology, Food Biotechnology • Plant Biotechnology*, 32 (avril):195-99. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.01.002>.
- Dou, S., P. Gadonna-Widehem, V. Rome, D. Hamoudi, L. Rhazi, et L. Lakhali. 2017. « Characterisation of Early-Life Fecal Microbiota in Susceptible and Healthy Pigs to Post-Weaning Diarrhoea ». *PLoS ONE* 12 (1): e0169851.
- Dourmad, J Y, M Etienne, et J Noblet. 1996. « Reconstitution of Body Reserves in Multiparous Sows during Pregnancy: Effect of Energy Intake during Pregnancy and Mobilization during the Previous Lactation. » *Journal of Animal Science* 74 (9): 2211. <https://doi.org/10.2527/1996.7492211x>.
- Dourmad, J. Y., M. Étienne, J. Noblet, A. Valancogne, S. Dubois, et J. van Milgen. 2005. « InraPorc: building a tool for decision making in sow nutrition. » *Journées de la Recherche Porcine en France* 37:299-306.
- Dourmad, Jean-Yves, Ludovic Brossard, Candido Pomar, Jesus Pomar, Patrick Gagnon, et Laetitia Cloutier. 2017. « Development of a decision support tool for precision

- feeding of pregnant sows ». In 8. *European Conference on Precision Livestock Farming (ECPLF)*, np.
- Dourmad, Jean-Yves, et M. Etienne. 2002a. « Dietary lysine and threonine requirements of the pregnant sow estimated by nitrogen balance ». *Journal of Animal Science* 80 (8): 2144-50.
- Dourmad, Jean-Yves, M. Etienne, et Jean Noblet. 1996a. « Reconstitution of body reserves in multiparous sows during pregnancy: effect of energy intake during pregnancy and mobilization during the previous lactation ». *Journal of Animal Science* 74 (9): 2211-19.
- Dourmad, Jean-Yves, M. Etienne, Armelle Prunier, et Jean Noblet. 1994. « The effect of energy and protein intake of sows on their longevity: a review ». *Livestock production science* 40 (2): 87-97.
- Dourmad, Jean-Yves, Michel Etienne, Alain Valancogne, Serge Dubois, Jaap van Milgen, et Jean Noblet. 2008. « InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of sows ». *Animal Feed Science and Technology* 143 (1-4): 372-86.
- Dourmad, Jean-Yves, Michel Étienne, Alain Valancogne, Serge Dubois, Jaap van Milgen, et Jean Noblet. 2008. « InraPorc: A Model and Decision Support Tool for the Nutrition of Sows ». *Animal Feed Science and Technology* 143 (1-4): 372-86. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019>.
- Dourmad, Jean-Yves, et Charlotte Gaillard. 2021. « Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives ». *INRAE Productions Animales*, septembre, 111-26. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4861>.
- Dourmad, Jean-Yves, Raphaël Gauthier, et Charlotte Gaillard. 2021. « Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives ». *INRAE Productions Animales* 34 (2): 111-26. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4861>.
- Drogoul, Carole, Raymond Gadoud, et Marie-Madeleine Joseph. 2004. *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage*. Educagri Editions.
- Dunne-Castagna, Vanessa P., David A. Mills, et Bo Lönnerdal. 2020. « Effects of Milk Secretory Immunoglobulin A on the Commensal Microbiota », avril. <https://doi.org/10.1159/000505335>.
- Eastwood, L. s. d. « 21-002 — Alimentation des porcs avec des céréales à petits grains ».
- Ebringerová, Anna, et Thomas Heinze. 2000. « Xylan and Xylan Derivatives – Biopolymers with Valuable Properties, 1. Naturally Occurring Xylans Structures, Isolation Procedures and Properties ». *Macromolecular Rapid Communications* 21 (9): 542-56. [https://doi.org/10.1002/1521-3927\(20000601\)21:9<542::AID-MARC542>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1521-3927(20000601)21:9<542::AID-MARC542>3.0.CO;2-7).
- Ebringerová, Anna, Zdenka Hromádková, et Thomas Heinze. 2005. « Hemicellulose ». In *Polysaccharides I: Structure, Characterization and Use*, édité par Thomas Heinze, 1-67. De Livres Advances in Polymer Science. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/b136816>.
- Ebringerová, Anna, Zdenka Hromádková, Vera Hříbalová, Chunlin Xu, Bjarne Holmbom, Anna Sundberg, et Stefan Willför. 2008. « Norway Spruce Galactoglucomannans Exhibiting Immunomodulating and Radical-Scavenging Activities ». *International*

- Journal of Biological Macromolecules* 42 (1): 1-5.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2007.08.001>.
- Engblom, L., N. Lundeheim, E. Strandberg, M. del P. Schneider, A.-M. Dalin, et K. Andersson. 2007. « Factors affecting length of productive life in Swedish commercial sows1 ». *J Anim Sci* 2008:432-41.
- Escherich, Theodor. 1885. « Die Darmbakterien des Neugeborenen und Säuglings ». *Fortschritte der Medicin* 3 (No. 16 und 17): 515-54.
- Etienne, M. 1987. « Utilization of High Fibre Feeds and Cereals by Sows, a Review ». *Livestock Production Science* 16 (3): 229-42. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(87\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0301-6226(87)90041-8).
- Everts, H. 1991. « The Effect of Feeding Different Sources of Crude Fibre during Pregnancy on the Reproductive Performance of Sows ». *Animal Science* 52 (1): 175-84. <https://doi.org/10.1017/S000335610000581X>.
- Ferguson, E. M., C. J. Ashworth, M. G. Hunter, P. Penny, J. Slevin, et S. A. Edwards. 2004. « The effect of feeding a high fibre diet from mid lactation until breeding on subsequent litter size of sows ». *BSAP Occasional Publication* 31 (janvier):175-79. <https://doi.org/10.1017/S0263967X00040398>.
- Feyera, T., C. K. Højgaard, J. Vinther, T. S. Bruun, et P. K. Theil. 2017. « Dietary supplement rich in fiber fed to late gestating sows during transition reduces rate of stillborn piglets ». *Journal of Animal Science* 95 (12): 5430-38.
- Feyera, Takele, et Peter Kappel Theil. 2017. « Energy and Lysine Requirements and Balances of Sows during Transition and Lactation: A Factorial Approach ». *Livestock Science* 201 (juillet):50-57. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.001>.
- Frese, Steven A., Kent Parker, C. Chris Calvert, et David A. Mills. 2015. « Diet shapes the gut microbiome of pigs during nursing and weaning ». *Microbiome* 3 (1): 28. <https://doi.org/10.1186/s40168-015-0091-8>.
- Friend, D. W., et T. M. Macintyre. 1970. « Effect of Rye Ergot on Growth and N-Retention in Growing Pigs ». *Canadian Journal of Comparative Medicine: Revue Canadienne De Medecine Comparee* 34 (3): 198-202.
- Gaillard, Charlotte, Maëva Durand, Christine Largouët, Jean-Yves Dourmad, et Céline Tallet. 2021. « Effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding ». *Animal Feed Science and Technology* 279:115034.
- Gaillard, Charlotte, Raphaël Gauthier, Laetitia Cloutier, et Jean-Yves Dourmad. 2019. « Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows ». *Journal of Animal Science* 97 (12): 4934-45.
- Gaillard, Charlotte, Nathalie Quiniou, Raphaël Gauthier, Laetitia Cloutier, et Jean-Yves Dourmad. 2020a. « Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows ». *Journal of Animal Science* 98 (9): skaa255.
- Gall, Maud Le, Anja Serena, Henry Jørgensen, Peter Kappel Theil, et Knud Erik Bach Knudsen. 2009. « The Role of Whole-Wheat Grain and Wheat and Rye Ingredients on the Digestion and Fermentation Processes in the Gut – a Model Experiment with Pigs ». *British Journal of Nutrition* 102 (11): 1590-1600. <https://doi.org/10.1017/S0007114509990924>.

- Galley, Jeffrey D, Zhongtang Yu, Purnima Kumar, Scot E Dowd, Mark Lyte, et Michael T Bailey. 2014. « The structures of the colonic mucosa-associated and luminal microbial communities are distinct and differentially affected by a prolonged murine stressor ». *Gut Microbes* 5 (6): 748-60. <https://doi.org/10.4161/19490976.2014.972241>.
- Gao, Tie, Xueying Chen, Zhen Liu, et Xinping Diao. 2023. « Effects of Soybean Hulls and Corn Stalk on the Performance, Colostrum Composition and Faecal Microflora of Pregnant Sows ». *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 107 (2): 485-94. <https://doi.org/10.1111/jpn.13721>.
- Gao, Y., F. Han, X. Huang, Y. Rong, H. Yi, et Y. Wang. 2013. « Changes in gut microbial populations, intestinal morphology, expression of tight junction proteins, and cytokine production between two pig breeds after challenge with Escherichia coli K88: A comparative study1 ». *J. Anim. Sci* 5614:5625.
- Gaukroger, C. H., S. A. Edwards, J. Walshaw, A. Nelson, I. P. Adams, C. J. Stewart, et I. Kyriazakis. 2020a. « The international journal of animal biosciences ».
- Geiger, H. H., et T. Miedaner. 1999. « Hybrid Rye and Heterosis ». In *Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops*, 439-50. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/1999.geneticsandexploitation.c41>.
- Gérard, P. 2011. « Le microbiote intestinal: composition et fonctions ». *Phytothérapie* 9 (2): 72-75. <https://doi.org/10.1007/s10298-011-0615-8>.
- Gibson, Glenn R., Hollie M. Probert, Jan Van Loo, Robert A. Rastall, et Marcel B. Roberfroid. 2004. « Dietary Modulation of the Human Colonic Microbiota: Updating the Concept of Prebiotics ». *Nutrition Research Reviews* 17 (2): 259-75. <https://doi.org/10.1079/NRR200479>.
- Gibson, Glenn R., et Marcel B. Roberfroid. 1995. « Dietary Modulation of the Human Colonic Microbiota: Introducing the Concept of Prebiotics ». *The Journal of Nutrition* 125 (6): 1401-12. <https://doi.org/10.1093/jn/125.6.1401>.
- Girard, C. L., S. Robert, J. J. Matte, C. Farmer, et G. P. Martineau. 1995. « Influence of high fibre diets given to gestating sows on serum concentrations of micronutrients ». *Livestock Production Science* 43 (1): 15-26. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00003-4](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00003-4).
- Goering, H. K., et Peter J. Van Soest. 1970. *Forage Fiber Analyses (Apparatus, Reagents, Procedures, and Some Applications)*. U.S. Agricultural Research Service.
- Goering, H. Keith. 1970. « Forage fiber analyses ». *Agriculture handbook* 379:1-20.
- Goffau, Marcus C. de, D. Stephen Charnock-Jones, Gordon C. S. Smith, et Julian Parkhill. 2021. « Batch effects account for the main findings of an in utero human intestinal bacterial colonization study ». *Microbiome* 9 (1): 6. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00949-z>.
- Göransson, L. 1989. « The Effect of Feed Allowance in Late Pregnancy on the Occurrence of Agalactia Post Partum in the Sow ». *Journal of Veterinary Medicine Series A* 36 (1-10): 505-13. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.1989.tb00760.x>.
- Grabber, John H. 2005. « How Do Lignin Composition, Structure, and Cross-Linking Affect Degradability? A Review of Cell Wall Model Studies ». *Crop Science* 45 (3): 820-31. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0191>.

- Gråsten, S. M., K. S. Juntunen, K. S. Poutanen, H. K. Gylling, T. A. Miettinen, et H. M. Mykkänen. 2000. « Rye Bread Improves Bowel Function and Decreases the Concentrations of Some Compounds That Are Putative Colon Cancer Risk Markers in Middle-Aged Women and Men ». *The Journal of Nutrition* 130 (9): 2215-21. <https://doi.org/10.1093/jn/130.9.2215>.
- Greeff, Astrid de, Dirkjan Schokker, Petra Roubos-van den Hil, Peter Ramaekers, Stephanie A Vastenhouw, Frank Harders, Alex Bossers, Mari A Smits, et Johanna M J Rebel. 2020. « The effect of maternal antibiotic use in sows on intestinal development in offspring ». *Journal of Animal Science* 98 (6): skaa181. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa181>.
- Gresse, Raphaële, Frédérique Chaucheyras Durand, Lysiane Dunière, Stéphanie Blanquet-Diot, et Evelyne Forano. 2019. « Microbiota Composition and Functional Profiling Throughout the Gastrointestinal Tract of Commercial Weaning Piglets ». *Microorganisms* 7 (9): 343. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090343>.
- Guan, Guiping, Sujuan Ding, Yulong Yin, Veeramuthu Duraipandiyar, Naif Abdullah Al-Dhabi, et Gang Liu. 2019. « Macleaya Cordata Extract Alleviated Oxidative Stress and Altered Innate Immune Response in Mice Challenged with Enterotoxigenic Escherichia Coli ». *Science China Life Sciences* 62 (8): 1019-27. <https://doi.org/10.1007/s11427-018-9494-6>.
- Guillemet, R., A. Hamard, H. Quesnel, M. C. Père, M. Etienne, J. Y. Dourmad, et M. C. Meunier-Salaün. 2007. « Dietary fibre for gestating sows: effects on parturition progress, behaviour, litter and sow performance ». *animal* 1 (6): 872-80. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000110>.
- Gutzeit, Cindy, Giuliana Magri, et Andrea Cerutti. 2014. « Intestinal IgA Production and Its Role in Host-Microbe Interaction ». *Immunological Reviews* 260 (1): 76-85. <https://doi.org/10.1111/imr.12189>.
- Hamer, H. M., D. Jonkers, K. Venema, S. Vanhoutvin, F. J. Troost, et R.-J. Brummer. 2008. « Review Article: The Role of Butyrate on Colonic Function ». *Alimentary Pharmacology & Therapeutics* 27 (2): 104-19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2036.2007.03562.x>.
- Han, Geon Goo, Jun-Yeong Lee, Gwi-Deuk Jin, Jongbin Park, Yo Han Choi, Sang-Kee Kang, Byung Jo Chae, Eun Bae Kim, et Yun-Jaie Choi. 2018. « Tracing of the Fecal Microbiota of Commercial Pigs at Five Growth Stages from Birth to Shipment ». *Scientific Reports* 8 (1): 6012. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24508-7>.
- Hansen, Camilla H. F., Christian S. Larsen, Henriette O. Petersson, Line F. Zachariassen, Andreas Vegge, Charlotte Lauridsen, Witold Kot, Łukasz Krych, Dennis S. Nielsen, et Axel K. Hansen. 2019. « Targeting Gut Microbiota and Barrier Function with Prebiotics to Alleviate Autoimmune Manifestations in NOD Mice ». *Diabetologia* 62 (9): 1689-1700. <https://doi.org/10.1007/s00125-019-4910-5>.
- Hansen, Hanne Boskov, Claus V Rasmussen, Knud Erik Bach Knudsen, et Åse Hansen. 2003. « Effects of Genotype and Harvest Year on Content and Composition of Dietary Fibre in Rye (*Secale Cereale* L) Grain ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83 (1): 76-85. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1284>.

- Hansen, Inge, T. Larsen, K. E. Bach Knudsen, et B. O. Eggum. 1991. « Nutrient Digestibilities in Ingredients Fed Alone or in Combinations ». *British Journal of Nutrition* 66 (1): 27-35. <https://doi.org/10.1079/BJN19910006>.
- Heinritz, Sonja N., Eva Weiss, Meike Eklund, Tobias Aumiller, Charlotte M. E. Heyer, Sabine Messner, Andreas Rings, Sandrine Louis, Stephan C. Bischoff, et Rainer Mosenthin. 2016. « Impact of a High-Fat or High-Fiber Diet on Intestinal Microbiota and Metabolic Markers in a Pig Model ». *Nutrients* 8 (5): 317. <https://doi.org/10.3390/nu8050317>.
- Hill, Janet E., Robyn P. Seipp, Martin Betts, Lindsay Hawkins, Andrew G. Van Kessel, William L. Crosby, et Sean M. Hemmingsen. 2002. « Extensive profiling of a complex microbial community by high-throughput sequencing ». *Applied and environmental microbiology* 68 (6): 3055-66.
- Hindrichsen, I.K., M. Kreuzer, J. Madsen, et K.E. Bach Knudsen. 2006. « Fiber and Lignin Analysis in Concentrate, Forage, and Feces: Detergent Versus Enzymatic-Chemical Method ». *Journal of Dairy Science* 89 (6): 2168-76. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72287-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72287-1).
- Holman, Devin B., Brian W. (en anglais seulement) Brunelle, Julian Trachsel, et Heather K. Allen. 2017. « Meta-analysis To Define a Core Microbiota in the Swine Gut ». *mSystems* 2 (3): 10.1128/msystems.00004-17. <https://doi.org/10.1128/msystems.00004-17>.
- Holt, J. P., L. J. Johnston, S. K. Baidoo, et G. C. Shurson. 2006. « Effects of a high-fiber diet and frequent feeding on behavior, reproductive performance, and nutrient digestibility in gestating sows^{1,2} ». *Journal of Animal Science* 84 (4): 946-55. <https://doi.org/10.2527/2006.844946x>.
- Honda, Kenya, et Dan R. Littman. 2016. « The Microbiota in Adaptive Immune Homeostasis and Disease ». *Nature* 535 (7610): 75-84. <https://doi.org/10.1038/nature18848>.
- Huang, Shuangbo, Jianfu Wei, Haoyuan Yu, Xiangyu Hao, Jianjun Zuo, Chengquan Tan, et Jinping Deng. 2020. « Effects of Dietary Fiber Sources during Gestation on Stress Status, Abnormal Behaviors and Reproductive Performance of Sows ». *Animals* 10 (1): 141. <https://doi.org/10.3390/ani10010141>.
- Hurley, W. L. 2019. « Review: Mammary gland development in swine: embryo to early lactation ». *Animal* 13 (janvier):s11-19. <https://doi.org/10.1017/S1751731119000521>.
- Huting, A. M. S., K. Almond, I. Wellock, et I. Kyriazakis. 2017. « What Is Good for Small Piglets Might Not Be Good for Big Piglets: The Consequences of Cross-Fostering and Creep Feed Provision on Performance to Slaughter^{1,2} ». *Journal of Animal Science* 95 (11): 4926-44. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1889>.
- Ilhan, Zehra Esra, Andrew K Marcus, Dae-Wook Kang, Bruce E Rittmann, et Rosa Krajmalnik-Brown. 2017. « pH-Mediated Microbial and Metabolic Interactions in Fecal Enrichment Cultures. » *mSphere* 2 (3): e00047-17. <https://doi.org/10.1128/msphere.00047-17>.
- Inoue, Ryo, Takamitsu Tsukahara, Nobuo Nakanishi, et Kazunari Ushida. 2005. « Development of the intestinal microbiota in the piglet ». *J. Gen. Appl. Microbiol* 51:257-65.

- Isolauri, Erika, Yelda Sütas, Pasi Kankaanpää, Heikki Arvilommi, et Seppo Salminen. 2001. « Probiotics: effects on immunity1–3 ». *Am J Clin Nutr* 73:444S-50S.
- Ivarsson, E., S. Roos, H. Y. Liu, et J. E. Lindberg. 2014. « Fermentable non-starch polysaccharides increases the abundance of Bacteroides–Prevotella–Porphyromonas in ileal microbial community of growing pigs ». *animal* 8 (11): 1777-87. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001827>.
- Janczyk, Pawel, Robert Pieper, Wolfgang Bernhard Souffrant, Diane Bimczok, Hermann-Josef Rothkötter, et Hauke Smidt. 2007. « Parenteral Long-Acting Amoxicillin Reduces Intestinal Bacterial Community Diversity in Piglets Even 5 Weeks after the Administration ». *The ISME Journal* 1 (2): 180-83. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.29>.
- Jarrett, Selene, et Cheryl J. Ashworth. 2018. « The role of dietary fibre in pig production, with a particular emphasis on reproduction ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 9 (1): 59. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0270-0>.
- Jensen, Bent Borg, et H. Jørgensen. 1994. « Effect of dietary fiber on microbial activity and microbial gas production in various regions of the gastrointestinal tract of pigs ». *Applied and environmental microbiology* 60 (6): 1897-1904.
- Jensen, M. B., L. J. Pedersen, P. K. Theil, C. C. Yde, et K. E. Bach Knudsen. 2012. « Feeding motivation and plasma metabolites in pregnant sows fed diets rich in dietary fiber either once or twice daily ». *Journal of Animal Science* 90 (6): 1910-19. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3289>.
- Jha, R., et J. D. Berrocoso. 2015a. « Dietary fiber utilization and its effects on physiological functions and gut health of swine ». *Animal* 9 (9): 1441-52. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000919>.
- Jha, Rajesh, et Tofuko A. Woyengo. 2022. « Cereal Grains, Cereal By-products, and Other Energy Sources in Swine Diets ». In *Sustainable Swine Nutrition*, édité par Lee I. Chiba, 1^{re} éd., 285-306. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119583998.ch11>.
- Jiménez, Esther, María L. Marín, Rocío Martín, Juan M. Odriozola, Mónica Olivares, Jordi Xaus, Leonides Fernández, et Juan M. Rodríguez. 2008. « Is meconium from healthy newborns actually sterile? ». *Research in Microbiology* 159 (3): 187-93. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2007.12.007>.
- Jo, Hyunwoong, et Beob Gyun Kim. 2023. « Effects of dietary fiber in gestating sow diets — A review ». *Animal Bioscience* 36 (11): 1619-31. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0206>.
- Johnson, Rodger K., Merlyn K. Nielsen, et David S. Casey. 1999. « Responses in ovulation rate, embryonal survival, and litter traits in swine to 14 generations of selection to increase litter size ». *Journal of Animal Science* 77 (3): 541-57. <https://doi.org/10.2527/1999.773541x>.
- Johnston, Lee J. 2022. « Feeding Reproducing Swine and Neonatal Pigs ». In *Sustainable Swine Nutrition*, édité par Lee I. Chiba, 1^{re} éd., 623-45. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119583998.ch22>.
- Jondreville, Catherine, Jan Van Den Broecke, François Gâtel, François Grosjean, Sabine Van Cauwenbergh, et Bernard Sève. 2001. « Ileal Digestibility of Amino Acids and Estimates of Endogenous Amino Acid Losses in Pigs Fed Wheat, Triticale, Rye,

- Barley, Maize and Sorghum ». *Animal Research* 50 (2): 119-34. <https://doi.org/10.1051/animres:2001120>.
- Jürgens, Hans-Ulrich, Gisela Jansen, et Christina Birgid Wegener. 2012a. « Characterisation of Several Rye Cultivars with Respect to Arabinoxylans and Extract Viscosity ». *Journal of Agricultural Science* 4 (5): p1. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n5p1>.
- Kaevska, M., A. Lorencova, P. Videnska, K. Sedlar, I. Provaznik, et M. Trckova. 2016. « Effect of sodium humate and zinc oxide used in prophylaxis of post-weaning diarrhoea on faecal microbiota composition in weaned piglets ». *Veterinarni Medicina* 61 (6): 328-36.
- Karppinen, S., O. Myllymäki, P. Forssell, et K. Poutanen. 2003. « Fructan Content of Rye and Rye Products ». *Cereal Chemistry* 80 (2): 168-71. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.2.168>.
- Katapodis, Petros, Maria Vardakou, Emanuel Kalogeris, Dimitris Kekos, Basil J. Macris, et Paul Christakopoulos. 2003. « Enzymic Production of a Feruloylated Oligosaccharide with Antioxidant Activity from Wheat Flour Arabinoxylan ». *European Journal of Nutrition* 42 (1): 55-60. <https://doi.org/10.1007/s00394-003-0400-z>.
- Katouli, M., A. Lund, P. Wallgren, I. Kühn, O. Söderlind, et R. Möllby. 1997. « Metabolic Fingerprinting and Fermentative Capacity of the Intestinal Flora of Pigs during Pre- and Post-weaning Periods ». *Journal of Applied Microbiology* 83 (2): 147-54. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1997.00202.x>.
- Ke, Shanlin, Shaoming Fang, Maozhang He, Xiaochang Huang, Hui Yang, Bin Yang, Congying Chen, et Lusheng Huang. 2019. « Age-based dynamic changes of phylogenetic composition and interaction networks of health pig gut microbiome feeding in a uniformed condition ». *BMC Veterinary Research* 15 (1): 172. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-1918-5>.
- Kerr, Brian J., et Gerald C. Shurson. 2013. « Strategies to Improve Fiber Utilization in Swine ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 4 (1): 11. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-11>.
- Kim, Hyeun Bum, Klaudyna Borewicz, Bryan A. White, Randall S. Singer, Srinand Sreevatsan, Zheng Jin Tu, et Richard E. Isaacson. 2011. « Longitudinal investigation of the age-related bacterial diversity in the feces of commercial pigs ». *Veterinary Microbiology* 153:124-33.
- Kim, Hyeun Bum, et Richard E. Isaacson. 2015. « The Pig Gut Microbial Diversity: Understanding the Pig Gut Microbial Ecology through the next Generation High Throughput Sequencing ». *Veterinary Microbiology* 177 (3): 242-51. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2015.03.014>.
- Kim, S W, W L Hurley, I K Han, H H Stein, et R A Easter. 1999. « Effect of Nutrient Intake on Mammary Gland Growth in Lactating Sows. » *Journal of Animal Science* 77 (12): 3304. <https://doi.org/10.2527/1999.77123304x>.
- Kim, Sung. 2010. « Recent advances in sow nutrition ». *Revista Brasileira De Zootecnia-brazilian Journal of Animal Science - REV BRAS ZOOTECA* 39 (juillet). <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300033>.

- Kleine, Susanne Ulrike. 2012. *Untersuchungen zum Einfluss von Maissilage als Rohfaserquelle in der Flüssigfütterung tragender Sauen auf Gesundheit und Leistung in der folgenden Laktation*.
- Knudsen, K E Bach. 2001a. « The Nutritional Significance of "dietary fibre" Analysis ». *Animal Feed Science and Technology*.
- Knudsen, Knud Erik Bach. 1997. « Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding ». *Animal Feed Science and Technology* 67 (4): 319-38. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00009-6).
- Kuijk, S. J. A. van, A. S. M. Sonnenberg, J. J. P. Baars, W. H. Hendriks, et J. W. Cone. 2015. « Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: A review ». *Biotechnology Advances* 33 (1): 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.014>.
- Lærke, H. N., S. Arent, S. Dalsgaard, et K. E. Bach Knudsen. 2015. « Effect of xylanases on ileal viscosity, intestinal fiber modification, and apparent ileal fiber and nutrient digestibility of rye and wheat in growing pigs^{1,2} ». *Journal of Animal Science* 93 (9): 4323-35. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9096>.
- Lagkouvardos, Ilias, Till R. Lesker, Thomas C. A. Hitch, Eric J. C. Gálvez, Nathiana Smit, Klaus Neuhaus, Jun Wang, et al. 2019. « Sequence and Cultivation Study of Muribaculaceae Reveals Novel Species, Host Preference, and Functional Potential of This yet Undescribed Family ». *Microbiome* 7 (1): 28. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0637-2>.
- Laidig, Friedrich, Hans-Peter Piepho, Dirk Rentel, Thomas Drobek, Uwe Meyer, et Alexandra Huesken. 2017. « Breeding Progress, Variation, and Correlation of Grain and Quality Traits in Winter Rye Hybrid and Population Varieties and National on-Farm Progress in Germany over 26 Years ». *TAG Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik* 130 (5): 981-98. <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2865-9>.
- Laudencia-Chinguanco, Debbie, Boryana Stamova, Frank You, Diane Beckles, et Olin Anderson. 2007. « Transcriptional profiling of wheat caryopsis development using cDNA microarrays ». *Plant molecular biology* 63 (avril):651-68. <https://doi.org/10.1007/s11103-006-9114-y>.
- Leblois, Julie, Sébastien Massart, Bing Li, José Wavreille, Jérôme Bindelle, et Nadia Everaert. 2017. « Modulation of Piglets' Microbiota: Differential Effects by a High Wheat Bran Maternal Diet during Gestation and Lactation ». *Scientific Reports* 7 (1): 7426. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07228-2>.
- Leblois, Julie, Sébastien Massart, Hélène Soyeurt, Clément Grelet, Frédéric Dehareng, Martine Schroyen, Bing Li, José Wavreille, Jérôme Bindelle, et Nadia Everaert. 2018. « Feeding Sows Resistant Starch during Gestation and Lactation Impacts Their Faecal Microbiota and Milk Composition but Shows Limited Effects on Their Progeny ». *PLOS ONE* 13 (7): e0199568. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199568>.
- Leser, Thomas D., Joanna Z. Amenuvor, Tim K. Jensen, Rikke H. Lindcrons, Mette Boye, et Kristian Møller. 2002. « Culture-Independent Analysis of Gut Bacteria: the Pig Gastrointestinal Tract Microbiota Revisited ». *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 673-90.

- Ley, Ruth E., Fredrik Bäckhed, Peter Turnbaugh, Catherine A. Lozupone, Robin D. Knight, et Jeffrey I. Gordon. 2005. « Obesity Alters Gut Microbial Ecology ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (31): 11070-75. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504978102>.
- Ley, Ruth E., Micah Hamady, Catherine Lozupone, Peter J. Turnbaugh, Rob Roy Ramey, J. Stephen Bircher, Michael L. Schlegel, et al. 2008. « Evolution of Mammals and Their Gut Microbes ». *Science* 320 (5883): 1647-51. <https://doi.org/10.1126/science.1155725>.
- Li, Hao, Jie Yin, Bie Tan, Jiashun Chen, Haihan Zhang, Zhiqing Li, et Xiaokang Ma. 2021. « Physiological function and application of dietary fiber in pig nutrition: A review ». *Animal Nutrition* 7 (2): 259-67. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.11.011>.
- Li, Na, Shimeng Huang, Lili Jiang, Wei Wang, Tiantian Li, Bin Zuo, Zhen Li, et Junjun Wang. 2018. « Differences in the Gut Microbiota Establishment and Metabolome Characteristics Between Low- and Normal-Birth-Weight Piglets During Early-Life ». *Frontiers in Microbiology* 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.01798>.
- Li, Yang, Jiaqi He, Lijia Zhang, Haoyu Liu, Meng Cao, Yan Lin, Shengyu Xu, Zhengfeng Fang, Lianqiang Che, Bin Feng, et al. 2021. « Effects of Dietary Fiber Supplementation in Gestation Diets on Sow Performance, Physiology and Milk Composition for Successive Three Parities ». *Animal Feed Science and Technology* 276 (juin):114945. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114945>.
- Li, Yang, Lijia Zhang, Haoyu Liu, Yi Yang, Jiaqi He, Meng Cao, Min Yang, Wei Zhong, Yan Lin, et Yong Zhuo. 2019. « Effects of the Ratio of Insoluble Fiber to Soluble Fiber in Gestation Diets on Sow Performance and Offspring Intestinal Development ». *Animals: an open access journal from MDPI* 9 (7): 422.
- Lin, Chunhui, Jiajia Wan, Yong Su, et Weiyun Zhu. 2018. « Effects of early intervention with maternal fecal microbiota and antibiotics on the gut microbiota and metabolite profiles of piglets ». *Metabolites* 8 (4): 89.
- Lindberg, Jan Erik. 2014. « Fiber effects in nutrition and gut health in pigs ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 5 (1): 15. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-5-15>.
- Lineback, D. R., N. Somnapan Kakuda, et C. C. Tsen. 1977. « CARBOHYDRATE COMPOSITION OF WATER-SOLUBLE PENTOSANS FROM DIFFERENT TYPES OF WHEAT FLOURS ». *Journal of Food Science* 42 (2): 461-67. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb01523.x>.
- Liu, Boshuai, Wenjing Wang, Xiaoyan Zhu, Xiao Sun, Junnan Xiao, Defeng Li, Yalei Cui, Chengzhang Wang, et Yinghua Shi. 2018. « Response of gut microbiota to dietary fiber and metabolic interaction with SCFAs in piglets ». *Frontiers in microbiology* 9:2344.
- Liu, Boshuai, Xiaoyan Zhu, Yalei Cui, Wenjing Wang, Hua Liu, Zidan Li, Zhiguo Guo, et al. 2021. « Consumption of Dietary Fiber from Different Sources during Pregnancy Alters Sow Gut Microbiota and Improves Performance and Reduces Inflammation in Sows and Piglets ». Édité par Mariana X. Byndloss. *mSystems* 6 (1): e00591-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00591-20>.

- Liu, Hongbin, Chengli Hou, Ning Li, Xiaoya Zhang, Guolong Zhang, Feiyun Yang, Xiangfang Zeng, Zuohua Liu, et Shiyao Qiao. 2019. « Microbial and Metabolic Alterations in Gut Microbiota of Sows during Pregnancy and Lactation ». *The FASEB Journal* 33 (3): 4490-4501. <https://doi.org/10.1096/fj.201801221RR>.
- Liu, Hongbin, Xiangfang Zeng, Guolong Zhang, Chengli Hou, Ning Li, Haitao Yu, Lijun Shang, et al. 2019. « Maternal milk and fecal microbes guide the spatiotemporal development of mucosa-associated microbiota and barrier function in the porcine neonatal gut ». *BMC Biology* 17 (1): 106. <https://doi.org/10.1186/s12915-019-0729-2>.
- Liu, Yang, Nan Chen, Dan Li, Hua Li, Zhengfeng Fang, Yan Lin, Shengyu Xu, Bin Feng, Yong Zhuo, et De Wu. 2020. « Effects of dietary soluble or insoluble fiber intake in late gestation on litter performance, milk composition, immune function, and redox status of sows around parturition ». *Journal of Animal Science* 98 (10): skaa303.
- Lo Verso, Luca, Guylaine Talbot, Bruno Morissette, Frédéric Guay, J. Jacques Matte, Chantal Farmer, Joshua Gong, Qi Wang, Nathalie Bissonnette, et Carole Beaulieu. 2020. « The combination of nutraceuticals and functional feeds as additives modulates gut microbiota and blood markers associated with immune response and health in weanling piglets ». *Journal of Animal Science* 98 (8): skaa208.
- Loisel, F., C. Farmer, P. Ramaekers, et H. Quesnel. 2013. « Effects of High Fiber Intake during Late Pregnancy on Sow Physiology, Colostrum Production, and Piglet Performance1 ». *Journal of Animal Science* 91 (11): 5269-79. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6526>.
- Looft, Torey, Heather K. Allen, Thomas A. Casey, David P. Alt, et Thaddeus B. Stanton. 2014. « Carbadox has both temporary and lasting effects on the swine gut microbiota ». *Frontiers in Microbiology* 5.
- Lourenço, Marta, Lorenzo Chaffringeon, Quentin Lamy-Besnier, Thierry Pédrón, Pascal Campagne, Claudia Eberl, Marion Bérard, Bärbel Stecher, Laurent Debarbieux, et Luisa De Sordi. 2020. « The Spatial Heterogeneity of the Gut Limits Predation and Fosters Coexistence of Bacteria and Bacteriophages ». *Cell Host & Microbe* 28 (3): 390-401.e5. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2020.06.002>.
- Luo, Yuheng, Wen Ren, Hauke Smidt, André-Denis G. Wright, Bing Yu, Ghislain Schyns, Ursula M. McCormack, et al. 2022. « Dynamic Distribution of Gut Microbiota in Pigs at Different Growth Stages: Composition and Contribution ». *Microbiology Spectrum* 10 (3): e00688-21. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00688-21>.
- Ma, Cui, Qiankun Gao, Wanghong Zhang, Qian Zhu, Wu Tang, Francois Blachier, Hao Ding, et Xiangfeng Kong. 2020. « Supplementing Synbiotic in Sows' Diets Modifies Beneficially Blood Parameters and Colonic Microbiota Composition and Metabolic Activity in Suckling Piglets ». *Frontiers in Veterinary Science* 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2020.575685>.
- Ma, Jun, Amanda L. Prince, David Bader, Min Hu, Radhika Ganu, Karalee Baquero, Peter Blundell, R. Alan Harris, Antonio E. Frias, et Kevin L. Grove. 2014. « High-fat maternal diet during pregnancy persistently alters the offspring microbiome in a primate model ». *Nature communications* 5 (1): 3889.
- Mach, Núria, Mustapha Berri, Jordi Estellé, Florence Levenez, Gaëtan Lemonnier, Catherine Denis, Jean-Jacques Leplat, Claire Chevalere, Yvon Billon, et Joël Doré. 2015.

- « Early-life establishment of the swine gut microbiome and impact on host phenotypes ». *Environmental microbiology reports* 7 (3): 554-69.
- Mackie, Roderick I, Abdelghani Sghir, et H Rex Gaskins. 1999. « Developmental Microbial Ecology of the Neonatal Gastrointestinal Tract ». *The American Journal of Clinical Nutrition* 69 (5): 1035S-1045S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.5.1035s>.
- Maradiaga, Nidia, Brian Aldridge, Mohamed Zeineldin, et James Lowe. 2018. « Gastrointestinal microbiota and mucosal immune gene expression in neonatal pigs reared in a cross-fostering model ». *Microbial Pathogenesis* 121 (août):27-39. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.05.007>.
- Martinez-Puig, Daniel, José Francisco Pérez, Marisol Castillo, Montserrat Anguita, Joaquin Morales, Josep Gasa, et Anna Andaluz. 2003. « Consumption of Raw Potato Starch Increases Colon Length and Fecal Excretion of Purine Bases in Growing Pigs ». *The Journal of Nutrition* 133 (1): 134-39. <https://doi.org/10.1093/jn/133.1.134>.
- Massé, D. I., F. Croteau, L. Masse, R. Bergeron, J. Bolduc, Y. Ramonet, M. C. Meunier-Salaun, et S. Robert. 2003. « Effect of dietary fiber incorporation on the characteristics of pregnant sows slurry ». *Canadian Biosystems Engineering* 45:6-7.
- Mathur, Ruchi, et Gillian M. Barlow. 2015. « Obesity and the microbiome ». *Expert Review of Gastroenterology & Hepatology* 9 (8): 1087-99.
- Matte, J. J., S. Robert, C. L. Girard, C. Farmer, et G.-P. Martineau. 1994. « Effect of bulky diets based on wheat bran or oat hulls on reproductive performance of sows during their first two parities1 ». *Journal of Animal Science* 72 (7): 1754-60. <https://doi.org/10.2527/1994.7271754x>.
- McCartney, Lesley, Susan E. Marcus, et J. Paul Knox. 2005. « Monoclonal Antibodies to Plant Cell Wall Xylans and Arabinoxylans ». *Journal of Histochemistry & Cytochemistry* 53 (4): 543-46. <https://doi.org/10.1369/jhc.4B6578.2005>.
- McCormack, U. M., T. Curião, B. U. Metzler-Zebeli, T. Wilkinson, H. Reyer, F. Crispie, P. D. Cotter, C. J. Creevey, G. E. Gardiner, et P. G. Lawlor. 2019. « Improvement of feed efficiency in pigs through microbial modulation via fecal microbiota transplantation in sows and dietary supplementation of inulin in offspring ». *Appl Environ Microbiol* 85:e01255-19.
- McDougall, Gordon J, Ian M Morrison, Derek Stewart, et John R Hillman. 1996. « Plant Cell Walls as Dietary Fibre: Range, Structure, Processing and Function ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 70 (2): 133-50. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199602\)70:2<133::AID-JSFA495>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199602)70:2<133::AID-JSFA495>3.0.CO;2-4).
- McGhee, M. L., et H. H. Stein. 2023a. « Preference for feed, but not growth performance, is reduced if hybrid rye replaces corn in diets for growing pigs ». *Animal Feed Science and Technology* 296 (février):115566. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115566>.
- McGhee, Molly L, et Hans H Stein. 2018. « Apparent and standardized ileal digestibility of AA and starch in hybrid rye, barley, wheat, and corn fed to growing pigs1 ». *Journal of Animal Science* 96 (8): 3319-29. <https://doi.org/10.1093/jas/sky206>.
- McGhee, Molly L., et Hans H. Stein. 2021. « Hybrid rye may replace up to 75% of the corn in diets for gestating and lactating sows without negatively impacting sow and piglet performance ». *Journal of animal science* 99 (9): skab230.

- McGhee, Molly L, et Hans H Stein. 2021. « Hybrid Rye May Replace up to 75% of the Corn in Diets for Gestating and Lactating Sows without Negatively Impacting Sow and Piglet Performance ». *Journal of Animal Science* 99 (9): skab230. <https://doi.org/10.1093/jas/skab230>.
- McGlone, J. J., et S. D. Fullwood. 2001. « Behavior, reproduction, and immunity of crated pregnant gilts: effects of high dietary fiber and rearing environment1 ». *Journal of Animal Science* 79 (6): 1466-74. <https://doi.org/10.2527/2001.7961466x>.
- McGlone, J. J., B. Vines, A. C. Rudine, et P. DuBois. 2004. « The Physical Size of Gestating Sows1 ». *Journal of Animal Science* 82 (8): 2421-27. <https://doi.org/10.2527/2004.8282421x>.
- McPherson, R. L., F. Ji, G. Wu, J. R. Blanton, et S. W. Kim. 2004. « Growth and Compositional Changes of Fetal Tissues in Pigs1 ». *Journal of Animal Science* 82 (9): 2534-40. <https://doi.org/10.2527/2004.8292534x>.
- Mello, Julia Eisenhardt de, Diogo La Rosa Novo, Gilberto Silva Coelho Junior, Priscila Tessmer Scaglioni, et Marcia Foster Mesko. 2020. « A Green Analytical Method for the Multielemental Determination of Halogens and Sulfur in Pet Food ». *Food Analytical Methods* 13 (1): 131-39. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01549-w>.
- Mertens, D. R. 1994. « Regulation of Forage Intake ». In *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*, 450-93. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c11>.
- Meunier-SalauÈn, M C, S A Edwards, et S Robert. 2001. « Effect of Dietary @bre on the Behaviour and Health of the Restricted Fed Sow ». *Animal Feed Science and Technology*.
- Miedaner, Thomas, et Hartwig H. Geiger. 2015a. « Biology, Genetics, and Management of Ergot (Claviceps Spp.) in Rye, Sorghum, and Pearl Millet ». *Toxins* 7 (3): 659-78. <https://doi.org/10.3390/toxins7030659>.
- Miedaner, Thomas, Viktor Korzun, et Eva Bauer. 2019. « Chapter 15 - Genomics-Based Hybrid Rye Breeding ». In *Applications of Genetic and Genomic Research in Cereals*, édité par Thomas Miedaner et Viktor Korzun, 329-48. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102163-7.00015-6>.
- Miedaner, Thomas, et Friedrich Laidig. 2019. « Hybrid Breeding in Rye (Secale Cereale L.) ». In *Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals: Volume 5*, édité par Jameel M. Al-Khayri, Shri Mohan Jain, et Dennis V. Johnson, 343-72. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23108-8_9.
- Milgen, Jaap van, et Jean-Yves Dourmad. 2015. « Concept and Application of Ideal Protein for Pigs ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6 (1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0016-1>.
- Milgen, Jaap van, Alain Valancogne, Serge Dubois, Jean-Yves Dourmad, Bernard Sève, et Jean Noblet. 2008. « InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of growing pigs ». *Animal Feed Science and Technology* 143 (1-4): 387-405.
- Miller, E. G., C. L. L. Levesque, N. Trottier, et C. F. M. de Lange. 2016. « Dynamics of nitrogen retention in gestating gilts at two feeding levels ». *Journal of animal science* 94 (8): 3353-61.

- Miller, Elwyn R., Duane E. Ullrey, et Austin J. Lewis. 2013. *Swine Nutrition*. Butterworth-Heinemann.
- Moehn, Soenke, et Ronald O. Ball. 2013. « Nutrition of pregnant sows ». In *Proceedings of the 2013 London Swine Conference, Managing for Production, London, Ontario*, 55-63. Citeseer.
- Moles, Laura, Marta Gómez, Hans Heilig, Gerardo Bustos, Susana Fuentes, Willem de Vos, Leónides Fernández, Juan M. Rodríguez, et Esther Jiménez. 2013. « Bacterial Diversity in Meconium of Preterm Neonates and Evolution of Their Fecal Microbiota during the First Month of Life ». *PloS One* 8 (6): e66986. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066986>.
- Morissette, B., G. Talbot, C. Beaulieu, et M. Lessard. 2018. « Growth Performance of Piglets during the First Two Weeks of Lactation Affects the Development of the Intestinal Microbiota ». *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 102 (2): 525-32. <https://doi.org/10.1111/jpn.12784>.
- Mou, Daolin, Shuang Li, Chuan Yan, Qianqian Zhang, Jing Li, Qiuji Wu, Peng Qiu, Yang He, Yang Li, et Haoyu Liu. 2020. « Dietary fiber sources for gestation sows: Evaluations based on combined in vitro and in vivo methodology ». *Animal feed science and technology* 269:114636.
- Mu, Chunlong, Gaorui Bian, Yong Su, et Weiyun Zhu. 2019. « Differential effects of breed and nursing on early-life colonic microbiota and immune status as revealed in a cross-fostering piglet model ». *Applied and Environmental Microbiology* 85 (9): e02510-18.
- Nahm, K. H. 2003. « Influences of Fermentable Carbohydrates on Shifting Nitrogen Excretion and Reducing Ammonia Emission of Pigs ». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 33 (2): 165-86. <https://doi.org/10.1080/10643380390814523>.
- Niedziela, Agnieszka, Waldemar Brukwiński, et Piotr Tomasz Bednarek. 2021. « Genetic mapping of pollen fertility restoration QTLs in rye (*Secale cereale* L.) with CMS Pampa ». *Journal of Applied Genetics* 62 (2): 185-98. <https://doi.org/10.1007/s13353-020-00599-9>.
- Nitrayová, S., J. Heger, P. Patráš, M. Brestenský, et P. Dolešová. 2010. « Effect of Essential: Total N Ratio on Endogenous Amino Acid Losses and N Retention in Growing Pigs ». *Livestock Science* 134 (1-3): 62-64. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.06.098>.
- Niu, Qing, Pinghua Li, Shuaishuai Hao, Sung Woo Kim, Taoran Du, Jindi Hua, et Ruihua Huang. 2019. « Characteristics of gut microbiota in sows and their relationship with apparent nutrient digestibility ». *International journal of molecular sciences* 20 (4): 870.
- Niu, Qing, Pinghua Li, Shuaishuai Hao, Yeqiu Zhang, Sung Woo Kim, Huizhi Li, Xiang Ma, et al. 2015. « Dynamic Distribution of the Gut Microbiota and the Relationship with Apparent Crude Fiber Digestibility and Growth Stages in Pigs ». *Scientific Reports* 5 (1): 9938. <https://doi.org/10.1038/srep09938>.
- Noblet, J., J. Y. Dourmad, M. Etienne, et J. Le Dividich. 1997. « Energy metabolism in pregnant sows and newborn pigs1 ». *Journal of Animal Science* 75 (10): 2708-14. <https://doi.org/10.2527/1997.75102708x>.

- Noblet, Jean. 2007. « Net Energy Evaluation of Feeds and Determination of Net Energy Requirements for Pigs ». *Revista Brasileira de Zootecnia* 36 (suppl): 277-84. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000025>.
- Noblet, Jean, Jean-Yves Dourmad, Jean Le Dividich, et Serge Dubois. 1989. « Effect of ambient temperature and addition of straw or alfalfa in the diet on energy metabolism in pregnant sows ». *Livestock Production Science* 21 (4): 309-24.
- Noblet, Jean, et GI Goff. 2001. « Effect of dietary fibre on the energy value of feeds for pigs ». *Animal Feed Science and Technology - ANIM FEED SCI TECH* 90 (mars):35-52. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00195-X).
- Nørgaard, Birgitte, Eva Draborg, et Jan Sørensen. 2016. « Adaptation and Reliability of the Readiness for Inter Professional Learning Scale in a Danish Student and Health Professional Setting ». *BMC Medical Education* 16 (1): 60. <https://doi.org/10.1186/s12909-016-0591-7>.
- Nowland, T. L., R. N. Kirkwood, et J. R. Pluske. 2022a. « Review: Can early-life establishment of the piglet intestinal microbiota influence production outcomes? » *animal*, Manipulating Pig Production XVIII: Proceedings of the Eighteenth Biennial Conference of the Australasian Pig Science Association (APSA), 15-18 November 2021, Brisbane, Australia, 16 (juin):100368. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100368>.
- Nowland, Tanya L., Kate J. Plush, Mary Barton, et Roy N. Kirkwood. 2019. « Development and Function of the Intestinal Microbiome and Potential Implications for Pig Production ». *Animals* 9 (3): 76. <https://doi.org/10.3390/ani9030076>.
- Nowland, T.L., R.N. Kirkwood, et J.R. Pluske. 2022a. « Review: Can Early-Life Establishment of the Piglet Intestinal Microbiota Influence Production Outcomes? » *Animal* 16 (juin):100368. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100368>.
- Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition*. 2012. Washington, D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13298>.
- Oli, M. W., B. W. Petschow, et R. K. Buddington. 1998. « Evaluation of Fructooligosaccharide Supplementation of Oral Electrolyte Solutions for Treatment of Diarrhea: Recovery of the Intestinal Bacteria ». *Digestive Diseases and Sciences* 43 (1): 138-47. <https://doi.org/10.1023/a:1018892524790>.
- Owusu-Asiedu, A., J. F. Patience, B. Laarveld, A. G. Van Kessel, P. H. Simmins, et R. T. Zijlstra. 2006. « Effects of Guar Gum and Cellulose on Digesta Passage Rate, Ileal Microbial Populations, Energy and Protein Digestibility, and Performance of Grower Pigs_{1,2} ». *Journal of Animal Science* 84 (4): 843-52. <https://doi.org/10.2527/2006.844843x>.
- Pajarillo, Edward Alain B., Jong Pyo Chae, Marilen P. Balolong, Hyeun Bum Kim, Kang-Seok Seo, et Dae-Kyung Kang. 2015. « Characterization of the Fecal Microbial Communities of Duroc Pigs Using 16S rRNA Gene Pyrosequencing ». *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 28 (4): 584-91. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0651>.
- Paßlack, Nadine, Wilfried Vahjen, et Jürgen Zentek. 2015a. « Dietary inulin affects the intestinal microbiota in sows and their suckling piglets ». *BMC Veterinary Research* 11 (1): 51. <https://doi.org/10.1186/s12917-015-0351-7>.

- . 2015b. « Dietary Inulin Affects the Intestinal Microbiota in Sows and Their Suckling Piglets ». *BMC Veterinary Research* 11 (1): 51. <https://doi.org/10.1186/s12917-015-0351-7>.
- Pastuszezwska, B., J. Kowalczyk, et A. Ochtabińska. 2000. « Dietary Carbohydrates Affect Caecal Fermentation and Modify Nitrogen Excretion Patterns in Rats: I. Studies with Protein-Free Diets. » *Archives of Animal Nutrition* 53 (3): 207-25.
- Patil, Yadnyavalkya, Ravi Gooneratne, et Xiang-Hong Ju. 2020. « Interactions between host and gut microbiota in domestic pigs: a review ». *Gut Microbes* 11 (3): 310-34. <https://doi.org/10.1080/19490976.2019.1690363>.
- Père, M.-C., et M. Etienne. 2007. « Insulin Sensitivity during Pregnancy, Lactation, and Postweaning in Primiparous Gilts ». *Journal of Animal Science* 85 (1): 101-10. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-130>.
- Perez-Munoz, Maria, Marie-Claire Arrieta, Amanda Ramer-Tait, et Jens Walter. 2017. « A critical assessment of the “sterile womb” and “in utero colonization” hypotheses: Implications for research on the pioneer infant microbiome ». *Microbiome* 5 (avril). <https://doi.org/10.1186/s40168-017-0268-4>.
- Perez-Muñoz, Maria Elisa, Marie-Claire Arrieta, Amanda E. Ramer-Tait, et Jens Walter. 2017. « A critical assessment of the “sterile womb” and “in utero colonization” hypotheses: implications for research on the pioneer infant microbiome ».
- Petry, Amy L., John F. Patience, Lucas R. Koester, Nichole F. Huntley, Michael R. Bedford, et Stephan Schmitz-Esser. 2021. « Xylanase Modulates the Microbiota of Ileal Mucosa and Digesta of Pigs Fed Corn-Based Arabinoxylans Likely through Both a Stimbiotic and Prebiotic Mechanism ». *PLOS ONE* 16 (1): e0246144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246144>.
- Pineiro, Maya, Nils-Georg Asp, Gregor Reid, Sandra Macfarlane, Lorenzo Morelli, Oscar Brunser, et Kieran Tuohy. 2008. « FAO Technical Meeting on Prebiotics ». *Journal of Clinical Gastroenterology* 42 (septembre):S156. <https://doi.org/10.1097/MCG.0b013e31817f184e>.
- Pointillart, A. 1994. « Phytates, phytases: leur importance dans l'alimentation des monogastriques ». *Productions Animales* 7 (1): 29-39.
- Pointillart, Alain. 1994. « Phytates, phytases: Leur importance dans l'alimentation des monogastriques ». *INRA Prod. Anim.* 7 (février):29-39. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1994.7.1.4155>.
- Pomar, C., L. Hauschild, Guo-hua Zhang, J. Pomar, et Paolo Alberto Lovatto. 2009. « Applying Precision Feeding Techniques in Growing-Finishing Pig Operations ». *Revista Brasileira De Zootecnia*. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300023>.
- Pozo, Alejandro del, Ana María Méndez-Espinoza, et Dalma Castillo. 2023. « Chapter 13 - Triticale ». In *Neglected and Underutilized Crops*, édité par Muhammad Farooq et Kadambot H. M. Siddique, 325-62. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90537-4.00029-6>.
- PRYDE, SUSAN E., ANTHONY J. RICHARDSON, COLIN S. STEWART, et HARRY J. FLINT. 1999. « Molecular Analysis of the Microbial Diversity Present in the Colonic Wall, Colonic Lumen, and Cecal Lumen of a Pig ».

- Quesnel, H., L. Brossard, A. Valancogne, et N. Quiniou. 2008. « Influence of some sow characteristics on within-litter variation of piglet birth weight ». *animal* 2 (12): 1842-49. <https://doi.org/10.1017/S175173110800308X>.
- Quesnel, H., N. Quiniou, H. Roy, A. Lottin, S. Boulot, et F. Gondret. 2014. « Supplying dextrose before insemination and L-arginine during the last third of pregnancy in sow diets: Effects on within-litter variation of piglet birth weight1 ». *Journal of Animal Science* 92 (4): 1445-50. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6701>.
- Quesnel, Hélène, A. Pasquier, A. M. Mounier, et Armelle Prunier. 1998. « Influence of feed restriction during lactation on gonadotropic hormones and ovarian development in primiparous sows ». *Journal of Animal Science* 76 (3): 856-63.
- Ramonet, Y, M C Meunier-Salaün, et J Y Dourmad. 1999a. « High-Fiber Diets in Pregnant Sows: Digestive Utilization and Effects on the Behavior of the Animals. » *Journal of Animal Science* 77 (3): 591. <https://doi.org/10.2527/1999.773591x>.
- Ramonet, Y., Marie-Christine Meunier-Salaün, et Jean-Yves Dourmad. 1999b. « High-fiber diets in pregnant sows: digestive utilization and effects on the behavior of the animals ». *Journal of animal science* 77 (3): 591-99.
- Reese, D. E., B. D. Moser, E. R. Peo Jr, A. J. Lewis, Dwane R. Zimmerman, J. E. Kinder, et W. W. Stroup. 1982. « Influence of energy intake during lactation on subsequent gestation, lactation and postweaning performance of sows ». *Journal of Animal Science* 55 (4): 867-72.
- Renteria-Flores, J. A., L. J. Johnston, G. C. Shurson, R. L. Moser, et S. K. Webel. 2008a. « Effect of Soluble and Insoluble Dietary Fiber on Embryo Survival and Sow Performance ». *Journal of Animal Science* 86 (10): 2576-84. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0376>.
- Renteria-Flores, J. A., L. J. Johnston, Gerald C. Shurson, R. L. Moser, et S. K. Webel. 2008b. « Effect of soluble and insoluble dietary fiber on embryo survival and sow performance ». *Journal of animal science* 86 (10): 2576-84.
- Rivière, Audrey, Mérielie Gagnon, Stefan Weckx, Denis Roy, et Luc De Vuyst. 2015. « Mutual Cross-Feeding Interactions between *Bifidobacterium longum* subsp. *longum* NCC2705 and *Eubacterium rectale* ATCC 33656 Explain the Bifidogenic and Butyrogenic Effects of Arabinoxylan Oligosaccharides ». *Applied and Environmental Microbiology* 81 (22): 7767-81. <https://doi.org/10.1128/AEM.02089-15>.
- Roberfroid, Marcel. 2007. « Prebiotics: The Concept Revisited1,2 ». *The Journal of Nutrition* 137 (3): 830S-837S. <https://doi.org/10.1093/jn/137.3.830S>.
- Robert, S., et G. P. Martineau. 2001. « Effects of repeated cross-fosterings on preweaning behavior and growth performance of piglets and on maternal behavior of sows1 ». *Journal of Animal Science* 79 (1): 88-93. <https://doi.org/10.2527/2001.79188x>.
- Robert, S., J. J. Matte, C. Farmer, C. L. Girard, et G. P. Martineau. 1993. « High-fibre diets for sows: effects on stereotypies and adjunctive drinking ». *Applied Animal Behaviour Science* 37 (4): 297-309.
- Rodehutschord, Markus, Christine Rückert, Hans Peter Maurer, Hans Schenkel, Wolfgang Schipprack, Knud Erik Bach Knudsen, Margit Schollenberger, et al. 2016. « Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains

- from different genotypes ». *Archives of Animal Nutrition* 70 (2): 87-107. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2015.1133111>.
- Rodriguez-Zas, S. L., C. B. Davis, P. N. Ellinger, G. D. Schnitkey, N. M. Romine, J. F. Connor, R. V. Knox, et B. R. Southey. 2006. « Impact of Biological and Economic Variables on Optimal Parity for Replacement in Swine Breed-to-Wean Herds1 ». *Journal of Animal Science* 84 (9): 2555-65. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-635>.
- Rooney, Hazel B., Keelin O'Driscoll, John V. O'Doherty, et Peadar G. Lawlor. 2019. « Effect of l-carnitine supplementation and sugar beet pulp inclusion in gilt gestation diets on gilt live weight, lactation feed intake, and offspring growth from birth to slaughter ». *Journal of animal science* 97 (10): 4208-18.
- Roongsitthichai, Atthaporn, et Padet Tummaruk. 2014. « Importance of backfat thickness to reproductive performance in female pigs ». *The Thai Journal of Veterinary Medicine* 44 (2): 171-78.
- Ru, Y. J., et Y. M. Bao. 2004. « Feeding Dry Sows Ad Libitum with High Fibre Diets ». *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 17 (2): 283-300.
- Saavedra, José M., et Anne M. Dattilo. 2012. « Early Development of Intestinal Microbiota: Implications for Future Health ». *Gastroenterology Clinics of North America* 41 (4): 717-31. <https://doi.org/10.1016/j.gtc.2012.08.001>.
- Salcedo, J., S.A. Frese, D.A. Mills, et D. Barile. 2016. « Characterization of Porcine Milk Oligosaccharides during Early Lactation and Their Relation to the Fecal Microbiome ». *Journal of Dairy Science* 99 (10): 7733-43. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10966>.
- Sappok, M. A., O. Pérez Gutiérrez, H. Smidt, W. F. Pellikaan, M. W. A. Verstegen, Guido Bosch, et W. H. Hendriks. 2015. « Adaptation of faecal microbiota in sows after diet changes and consequences for in vitro fermentation capacity ». *Animal* 9 (9): 1453-64.
- Saulnier, Luc. 2012. « Les grains de céréales : diversité et compositions nutritionnelles ». *Cahiers de Nutrition et de Diététique, Céréales, petit déjeuner et santé*, 47 (1, Supplement 1): S4-15. [https://doi.org/10.1016/S0007-9960\(12\)70292-4](https://doi.org/10.1016/S0007-9960(12)70292-4).
- Sauvant, D., J.-M. Perez, et G. Tran, éd. 2004. *Tables of composition and nutritional value of feed materials: Pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses and fish*. Brill | Wageningen Academic. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-668-7>.
- Schittenhelm, Siegfried, Martin Kraft, et Klaus-Peter Wittich. 2014. « Performance of Winter Cereals Grown on Field-Stored Soil Moisture Only ». *European Journal of Agronomy* 52 (janvier):247-58. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.010>.
- Schokker, D., J. Zhang, S. A. Vastenhouw, HGHJ Heilig, H. Smidt, et J. M. J. Rebel. 2015. « Long-Lasting Effects of Early-Life Antibiotic Treatment and Routine Animal Handling on Gut Microbiota Composition and Immune System in Pigs ». *PLoS ONE* 10 (2): e0116523.
- Schokker, Dirkjan, Jan Fledderus, Rutger Jansen, Stephanie A Vastenhouw, Freddy M de Bree, Mari A Smits, et Alfons A J M Jansman. 2018. « Supplementation of fructooligosaccharides to suckling piglets affects intestinal microbiota colonization and immune development1 ». *Journal of Animal Science* 96 (6): 2139-53. <https://doi.org/10.1093/jas/sky110>.

- Schokker, Dirkjan, Jing Zhang, Ling-li Zhang, Stéphanie A. Vastenhouw, Hans GHJ Heilig, Hauke Smidt, Johanna MJ Rebel, et Mari A. Smits. 2014. « Early-life environmental variation affects intestinal microbiota and immune development in new-born piglets ». *PloS one* 9 (6): e100040.
- Schwarz, Tomasz, Wiktor Kuleta, Artur Turek, Ryszard Tuz, Jacek Nowicki, Bartosz Rudzki, et Pawel Bartlewski. 2015. « Assessing the efficiency of using a modern hybrid rye cultivar for pig fattening, with emphasis on production costs and carcass quality ». *Animal Production Science* 55 (mars):467-73. <https://doi.org/10.1071/AN13386>.
- Shanahan, Fergus, Douwe Van Sinderen, Paul W O'Toole, et Catherine Stanton. 2017. « Feeding the Microbiota: Transducer of Nutrient Signals for the Host ». *Gut* 66 (9): 1709-17. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2017-313872>.
- Shang, Qinghui, Hansuo Liu, Sujie Liu, Tengfei He, et Xiangshu Piao. 2019. « Effects of dietary fiber sources during late gestation and lactation on sow performance, milk quality, and intestinal health in piglets ». *Journal of Animal Science* 97 (12): 4922-33.
- Shi, X. S, et J Noblet. 1993. « Contribution of the hindgut to digestion of diets in growing pigs and adult sows: effect of diet composition ». *Livestock Production Science* 34 (3): 237-52. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90110-4).
- Simpson, H. L., et B. J. Campbell. 2015. « Review Article: Dietary Fibre–Microbiota Interactions ». *Alimentary Pharmacology & Therapeutics* 42 (2): 158-79. <https://doi.org/10.1111/apt.13248>.
- Solà-Oriol, D., et J. Gasa. 2017a. « Feeding Strategies in Pig Production: Sows and Their Piglets ». *Animal Feed Science and Technology* 233 (novembre):34-52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018>.
- Sommer, Felix, et Fredrik Bäckhed. 2013. « The gut microbiota—masters of host development and physiology ».
- Spor, Aymé, Omry Koren, et Ruth Ley. 2011. « Unravelling the Effects of the Environment and Host Genotype on the Gut Microbiome ». *Nature Reviews. Microbiology* 9 (4): 279-90. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2540>.
- Stewart, L. L., D. Y. Kil, F. Ji, R. B. Hinson, A. D. Beaulieu, G. L. Allee, J. F. Patience, J. E. Pettigrew, et H. H. Stein. 2013. « Effects of dietary soybean hulls and wheat middlings on body composition, nutrient and energy retention, and the net energy of diets and ingredients fed to growing and finishing pigs1 ». *Journal of Animal Science* 91 (6): 2756-65. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5147>.
- Strang, E. J. P., M. Eklund, P. Rosenfelder, N. Sauer, J. K. Htoo, et R. Mosenthin. 2016a. « Chemical Composition and Standardized Ileal Amino Acid Digestibility of Eight Genotypes of Rye Fed to Growing Pigs ». *Journal of Animal Science* 94 (9): 3805-16. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0599>.
- Sun, H. Q., C. Q. Tan, H. K. Wei, Y. Zou, G. Long, J. T. Ao, H. X. Xue, S. W. Jiang, et J. Peng. 2015. « Effects of different amounts of konjac flour inclusion in gestation diets on physio-chemical properties of diets, postprandial satiety in pregnant sows, lactation feed intake of sows and piglet performance ». *Animal Reproduction Science* 152 (janvier):55-64. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.11.003>.
- Tegge, G. 1990. « Y. Pomeranz (Ed.): Wheat, Chemistry and Technology. 3rd Edition. Vol I and II. American Association of Cereal Chemists (AACC, 3340 Pilot Knob Road,

- St. Paul, MN 55121, U.S.A.), 1988. Vol. I: 562 p: Vol. II: 514p. Hardcover, \$135.00 U.S.; Outside the U.S. Add 10% for Shipping and Handling ». *Starch - Stärke* 42 (6): 243-243. <https://doi.org/10.1002/star.19900420612>.
- Thaiss, Christoph A., Niv Zmora, Maayan Levy, et Eran Elinav. 2016. « The Microbiome and Innate Immunity ». *Nature* 535 (7610): 65-74. <https://doi.org/10.1038/nature18847>.
- Thebaudin, J. Y., A. C. Lefebvre, M. Harrington, et C. M. Bourgeois. 1997. « Dietary fibres: Nutritional and technological interest ». *Trends in Food Science & Technology* 8 (2): 41-48. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01007-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01007-8).
- Theil, Peter K., Uffe Krogh, Thomas S. Bruun, et Takele Feyera. 2022. « Feeding the modern sow to sustain high productivity ». *Molecular Reproduction and Development*.
- Thomas, L.L., R.D. Goodband, M.D. Tokach, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, et Jordan T. Gebhardt. 2021. « Modeling Standardized Ileal Digestible Lysine Requirements during Gestation on Gilts and Sows ». *Livestock Science* 248 (juin):104500. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104500>.
- Thompson, Claire L., Bing Wang, et Andrew J. Holmes. 2008. « The immediate environment during postnatal development has long-term impact on gut community structure in pigs ». *The ISME journal* 2 (7): 739-48.
- Tian, Min, Jiaming Chen, Jiaxin Liu, Fang Chen, Wutai Guan, et Shihai Zhang. 2020. « Dietary fiber and microbiota interaction regulates sow metabolism and reproductive performance ». *Animal Nutrition* 6 (4): 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.10.001>.
- Tissier, Henry. 1900. *Recherches sur la flore intestinale des nourrissons (état normal et pathologique)*. Méd.--Paris.
- Tokach, M. D., M. B. Menegat, K. M. Gourley, et R. D. Goodband. 2019. « Nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements ». *Animal* 13 (12): 2967-77.
- Trottier, N.I., L.J. Johnston, et C.f.m. de Lange. 2014. « 6. Applied amino acid and energy feeding of sows ». In *The gestating and lactating sow*, 117-46. Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-803-2_6.
- Tungland, B. C., et D. Meyer. 2002. « Nondigestible oligo- and polysaccharides (Dietary Fiber): their physiology and role in human health and food ». *Comprehensive reviews in food science and food safety* 1 (3): 90-109.
- Turpin, Williams, Osvaldo Espin-Garcia, Wei Xu, Mark S. Silverberg, David Kevans, Michelle I. Smith, David S. Guttman, et al. 2016. « Association of Host Genome with Intestinal Microbial Composition in a Large Healthy Cohort ». *Nature Genetics* 48 (11): 1413-17. <https://doi.org/10.1038/ng.3693>.
- Upadhaya, Santi Devi, et In Ho Kim. 2022. « Maintenance of Gut Microbiome Stability for Optimum Intestinal Health in Pigs - a Review ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 13 (1): 140. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00790-4>.
- Ursell, Luke K, Jessica L Metcalf, Laura Wegener Parfrey, et Rob Knight. 2012. « Defining the Human Microbiome ». *Nutrition Reviews* 70 (août):S38-44. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2012.00493.x>.
- Valade, Romain, Béatrice ORLANDO, Claude Maumene, Valérie Laval, Anne-Sophie Walker, Renaud Ioo, Anne-Laure Boutigny, et al. 2020. *La fusariose des épis des*

céréales à paille : synthèse de 10 années de recherche pour une meilleure gestion intégrée de la maladie.

- Van den Ende, Wim, An Michiels, Joke De Roover, et Andrea Van Laere. 2002. « Fructan Biosynthetic and Breakdown Enzymes in Dicots Evolved From Different Invertases. Expression of Fructan Genes Throughout Chicory Development ». *The Scientific World Journal* 2 (mai):1281-95. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.288>.
- Van Soest, P. J. 1964. « Symposium on nutrition and forage and pastures: new chemical procedures for evaluating forages ». *Journal of animal science* 23 (3): 838-45.
- Varel, V. H., et J. T. Yen. 1997. « Microbial perspective on fiber utilization by swine1 ». *Journal of Animal Science* 75 (10): 2715-22. <https://doi.org/10.2527/1997.75102715x>.
- Veum, T. L., J. D. Crenshaw, T. D. Crenshaw, G. L. Cromwell, R. A. Easter, R. C. Ewan, J. L. Nelssen, et al. 2009. « The Addition of Ground Wheat Straw as a Fiber Source in the Gestation Diet of Sows and the Effect on Sow and Litter Performance for Three Successive Parities ». *Journal of Animal Science* 87 (3): 1003-12. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1119>.
- Vilariño, Maria, Jean-Paul Métayer, Brigitte Mahaut, Isabelle Bouvarel, Philippe Lescoat, Pascal Chartrin, Yann Fournis, Patrick Hogrel, Laurent Bonnal, et Denis Bastianelli. 2016. « Caractériser la valeur nutritionnelle des aliments par des méthodes innovantes de mesure de la digestibilité pour une aviculture durable », janvier.
- Villena Fernández, Eduardo, Jiménez Ruiz Matas, et coord. 2003. *Técnico en ganadería*. Madrid: Cultural.
- Vogt, Leonie M., Diederick Meyer, Gerdie Pullens, Marijke M. Faas, Koen Venema, Uttara Ramasamy, Henk A. Schols, et Paul de Vos. 2014. « Toll-like Receptor 2 Activation by B2→1-Fructans Protects Barrier Function of T84 Human Intestinal Epithelial Cells in a Chain Length-Dependent Manner ». *The Journal of Nutrition* 144 (7): 1002-8. <https://doi.org/10.3945/jn.114.191643>.
- Vries, H. de, et H. Smidt. 2019. « 7. Microbiota development in piglets ». In *The suckling and weaned piglet*, 179-205. Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-894-0_7.
- Wang, Youxia, Xiaoling Chen, Zhiqing Huang, Daiwen Chen, Bing Yu, Jie Yu, Hong Chen, Jun He, Yuheng Luo, et Ping Zheng. 2020. « Dietary Ferulic Acid Supplementation Improves Antioxidant Capacity and Lipid Metabolism in Weaned Piglets ». *Nutrients* 12 (12): 3811. <https://doi.org/10.3390/nu12123811>.
- Wenk, Caspar. 2001. « The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig ». *Animal Feed Science and Technology*, The Role of Dietary Fibre in Pig Production, 90 (1): 21-33. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00194-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00194-8).
- Werner, Christina, Antje Schubbert, Wieland Schrödl, Monika Krüger, et Albert Sundrum. 2014. « Effects of Feeding Different Roughage Components to Sows in Gestation on Bacteriological and Immunological Parameters in Colostrum and Immune Response of Piglets ». *Archives of Animal Nutrition* 68 (1): 29-41. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2013.876184>.
- Wilke, Volker, Richard Grone, Andreas Felde, Amr Abd El-Wahab, Petra Wolf, et Josef Kamphues. 2021. « Effects of increasing dietary rye levels on physicochemical characteristics of digesta and its impact on stomach emptying as well as the formation

- of ‘doughballs’ in stomachs of young pigs ». *J Anim Physiol a Anim Nutr* 105 Suppl 1 (juillet). <https://doi.org/10.1111/jpn.13549>.
- Williams, Barbara A., Deirdre Mikkelsen, Bernadine M. Flanagan, et Michael J. Gidley. 2019. « “Dietary fibre”: moving beyond the “soluble/insoluble” classification for monogastric nutrition, with an emphasis on humans and pigs ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 10 (mai):45. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0350-9>.
- Wlodarska, M., B. Willing, K. M. Keeney, A. Menendez, K. S. Bergstrom, N. Gill, S. L. Russell, B. A. Vallance, et B. B. Finlay. 2011. « Antibiotic Treatment Alters the Colonic Mucus Layer and Predisposes the Host to Exacerbated *Citrobacter rodentium*-Induced Colitis ». *INFECTIO AND IMMUNITY*, 1536-45.
- Woyengo, T. A., E. Beltranena, et R. T. Zijlstra. 2014. « Nonruminant nutrition symposium: Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: A review ». *Journal of Animal Science* 92 (4): 1293-1305.
- Wu, G., F. W. Bazer, J. M. Wallace, et T. E. Spencer. 2006. « BOARD-INVITED REVIEW: Intrauterine Growth Retardation: Implications for the Animal Sciences1 ». *Journal of Animal Science* 84 (9): 2316-37. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-156>.
- Wu, Jian, Yi Xiong, Ming Zhong, Yong Li, Haifeng Wan, De Wu, et Qi Liu. 2020a. « Effects of Purified Fibre-Mixture Supplementation of Gestation Diet on Gut Microbiota, Immunity and Reproductive Performance of Sows ». *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 104 (4): 1144-54. <https://doi.org/10.1111/jpn.13287>.
- Wylensek, David, Thomas C. A. Hitch, Thomas Riedel, Afrizal Afrizal, Neeraj Kumar, Esther Wortmann, Tianzhe Liu, et al. 2020. « A Collection of Bacterial Isolates from the Pig Intestine Reveals Functional and Taxonomic Diversity ». *Nature Communications* 11 (1): 6389. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19929-w>.
- Xian, Lingjin, Ying Li, Zhi Jiang, Jideng Ma, Long Jin, Lei Chen, Chaowei Zhou, Jie Zhang, Yingkai Liu, et Li Zhu. 2014. « Alterations in cecal microbiota of Jinhua piglets fostered by a Yorkshire sow ». *Chinese Science Bulletin* 59 (32): 4304-11.
- Xiao, Liang, Jordi Estellé, Pia Kiilerich, Yuliaxis Ramayo-Caldas, Zhongkui Xia, Qiang Feng, Suisha Liang, et al. 2016a. « A Reference Gene Catalogue of the Pig Gut Microbiome ». *Nature Microbiology* 1 (septembre):16161. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.161>.
- Xu, Chuanhui, Chuanshang Cheng, Xiu Zhang, et Jian Peng. 2020a. « Inclusion of soluble fiber in the gestation diet changes the gut microbiota, affects plasma propionate and odd-chain fatty acids levels, and improves insulin sensitivity in sows ». *International journal of molecular sciences* 21 (2): 635.
- Xu, Jian, et Jeffrey I. Gordon. 2003. « Honor Thy Symbionts ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (18): 10452-59. <https://doi.org/10.1073/pnas.1734063100>.
- Xu, Jinqiang, Yuhui Li, Zhiqiang Yang, Chunhui Li, Hongyan Liang, Zuowei Wu, et Wanxia Pu. 2018. « Yeast Probiotics Shape the Gut Microbiome and Improve the Health of Early-Weaned Piglets ». *Frontiers in Microbiology* 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02011>.
- Yang, Hua, Yingping Xiao, Junjun Wang, Yun Xiang, Yujie Gong, Xueting Wen, et Defa Li. 2018. « Core Gut Microbiota in Jinhua Pigs and Its Correlation with Strain, Farm

- and Weaning Age ». *Journal of Microbiology (Seoul, Korea)* 56 (5): 346-55. <https://doi.org/10.1007/s12275-018-7486-8>.
- Yde, Christian Clement, Hanne Christine Bertram, Peter Kappel Theil, et Knud Erik Bach Knudsen. 2011. « Effects of High Dietary Fibre Diets Formulated from By-Products from Vegetable and Agricultural Industries on Plasma Metabolites in Gestating Sows ». *Archives of Animal Nutrition* 65 (6): 460-76. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2011.621284>.
- Yu, Miao, Tie Gao, Zhen Liu, et Xinping Diao. 2020. « Effects of dietary supplementation with high fiber (stevia residue) on the fecal flora of pregnant sows ». *Animals* 10 (12): 2247.
- Zhao, Wenjing, Yapeng Wang, Shuyun Liu, Jiaojiao Huang, Zhengxiao Zhai, Chuan He, Jinmei Ding, et al. 2015. « The Dynamic Distribution of Porcine Microbiota across Different Ages and Gastrointestinal Tract Segments ». *PLOS ONE* 10 (2): e0117441. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117441>.
- Zhou, Jizhong, Zhili He, Yunfeng Yang, Ye Deng, Susannah G. Tringe, et Lisa Alvarez-Cohenc. 2015. « High-Throughput Metagenomic Technologies for Complex Microbial Community Analysis: Open and Closed Formats ».
- Zhou, Pan, Yang Zhao, Pan Zhang, Yan Li, Taotao Gui, Jun Wang, Chao Jin, Lianqiang Che, Jian Li, et Yan Lin. 2017. « Microbial mechanistic insight into the role of inulin in improving maternal health in a pregnant sow model ». *Frontiers in Microbiology* 8:2242.
- Zhuo, Yong, Meng Cao, Yuechan Gong, Lianchao Tang, Xuemei Jiang, Yang Li, Min Yang, Shengyu Xu, Jian Li, et Lianqiang Che. 2021. « Gut microbial metabolism of dietary fibre protects against high energy feeding induced ovarian follicular atresia in a pig model ». *British Journal of Nutrition* 125 (1): 38-49.
- Zhuo, Yong, Bo Feng, Yuedong Xuan, Lianqiang Che, Zhengfeng Fang, Yan Lin, Shengyu Xu, Jian Li, Bing Feng, et De Wu. 2020. « Inclusion of purified dietary fiber during gestation improved the reproductive performance of sows ». *Journal of Animal Science and Biotechnology* 11 (1): 47. <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00450-5>.

RÉFÉRENCES ÉLÉCTRONIQUES :

[MAPAQ - Porcs \(gouv.qc.ca\)](#)

[Les publications du CECPA](#)

[Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie du porc au Québec \(quebec.ca\)](#)

[Portrait-diagnostic sur l'évolution de l'environnement d'affaires en secteur porcin \(gouv.qc.ca\)](#)

[Évolution de l'industrie porcine canadienne \(statcan.gc.ca\)](#)

Rapport annuel EPQ - 2021-2022 (leseleveursdeporcsduquebec.com)

Monographie de l'industrie porcine au Québec / rédaction et coordination, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), Sous-ministériat aux politiques agroalimentaires, Direction du développement des secteurs agroalimentaires | BAnQ numérique