

Impact de l'ajout d'enzymes sur la digestibilité iléale des carbohydrates chez le porc en croissance selon la taille et la fréquence de repas

Élisabeth CHASSÉ (1), Cecilie TOFT VANGSØE (2), Knud Erik BACH KNUDSEN (2), Frédéric GUAY (1),
Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Université Laval, Département des sciences animales, 2325 rue de l'Université, G1V 0A6, Québec (QC), Canada

(2) Aarhus University, Department of Animal Science, DK 8830 Tjele, Danemark

marie-pierre.letourneau-montminy.1@ulaval.ca

Impact de l'ajout d'enzymes sur la digestibilité iléale des carbohydrates chez le porc en croissance selon la taille et la fréquence de repas

Cette étude visait à déterminer l'effet de la taille et la fréquence des repas ainsi que de l'ajout de xylanase et de phytase sur la digestibilité d'un aliment riche en fibres. Les porcs ($n = 6$) ont été canulés à l'iléon distal et ont reçu chacun des traitements selon un dispositif en carré latin. Les traitements avec et sans enzymes consistaient en deux repas par jour comblant trois fois le besoin énergétique pour l'entretien (2R), une distribution de la même quantité en huit repas (8R) et une quantité comblant cinq fois le besoin en huit repas (8R+). Pour l'expérimentation *in vitro*, la digestibilité des fibres a été évaluée sans xylanase et avec xylanase. L'ajout d'enzymes a augmenté la digestibilité de l'amidon et la dégradation des polysaccharides non amylacés insolubles dans tous les traitements *in vivo* ($P < 0,05$). La fréquence des repas a seulement augmenté la digestibilité de l'amidon dans le 2R comparativement au 8R ($P = 0,049$). L'ajout d'enzymes a diminué la concentration en arabinoxylanes insolubles ($P < 0,05$) et permis l'augmentation des arabinoxyloligosaccharides solubles ($P < 0,05$) dans le contenu iléal et lors de l'incubation *in vitro*. Ces résultats confirment l'effet positif de la xylanase dans les aliments riches en fibres, alors que le nombre et la taille de repas a peu d'impact sur la digestibilité des aliments chez des porcs rationnés. Le modèle *in vitro* permet une bonne prédiction de l'action de la xylanase sur la dégradation des polysaccharides non amylacés.

Impact of enzyme supplementation on carbohydrate ileal digestibility in growing pigs according to size and frequency of meals

The aim of this study was to determine effects of meal size and frequency, as well as xylanase and phytase supplementation, on the digestibility of a high-fiber diet. Pigs ($n = 6$) were fitted with a T cannula, and each received all treatments using a Latin square experimental design. The treatments were formulated with and without enzymes and distributed differently: one received two meals per day that met three times the maintenance energy requirement (2R), one received the same amount in eight meals (8R), and one received an amount that met five times the requirements in eight meals (8R+). In the *in vitro* experiment, the digestibility of fibers with or without xylanase was assessed. Addition of enzymes increased the digestibility of starch and degradation of insoluble non-starch polysaccharides in all *in vivo* treatments ($P < 0.05$). The type of meal increased only the digestibility of starch in 2R compared to 8R ($P = 0.049$). Addition of enzymes decreased the concentration of insoluble arabinoxylans ($P < 0.05$) and allowed the increase of soluble arabinoxyloligosaccharides ($P < 0.05$) in the *in vivo* ileal content and also during *in vitro* incubation. These results confirm the positive effect of xylanase in high-fiber diets, while the number and size of meals has little influence on feed digestibility. The *in vitro* model provides good prediction of the action of xylanase on the degradation of non-starch polysaccharides.

INTRODUCTION

L'optimisation de l'utilisation des nutriments par le porc est un élément clé de la durabilité de la production. Pour une évaluation plus précise de leur valeur nutritive, une bonne compréhension du devenir des aliments et des nutriments dans le tube digestif est nécessaire. Les essais conduits pour évaluer la valeur nutritionnelle des aliments et leur digestibilité sont souvent menés avec des porcs nourris une à deux fois par jour avec une quantité limitée d'aliments (NRC, 2012). Cependant, le nombre et la taille des repas affecteraient la digestibilité des nutriments (Roth et Kirchgessner, 1985; Ruckebusch et Bueno, 2008) ainsi que leur absorption et leur disponibilité métabolique.

La digestibilité est également dépendante de facteurs antinutritionnels comme le phytate et les fibres. Pour y pallier, des enzymes telles que la phytase et la xylanase sont disponibles et souvent ajoutées aux aliments. En plus de leur action spécifique sur le phytate et les fibres, ces enzymes peuvent agir positivement sur la valeur nutritionnelle globale en améliorant la digestibilité des cendres, des acides aminés et de l'énergie (Selle *et al.*, 2009). Cependant, pour la xylanase, on observe des effets variables. Une partie de cette variation pourrait provenir du fait que son activité et son efficacité dépendent du pH et du temps de rétention.

L'utilisation de modèles de digestion *in vitro* est une approche intéressante afin d'évaluer l'efficacité des enzymes sur un substrat particulier (Aftab et Bedford, 2018), bien qu'ils ne puissent remplacer les expérimentations *in vivo* pendant lesquelles des effets des enzymes ne sont pas toujours observés.

La présente expérience avait pour premier objectif de déterminer les effets de la taille et de la fréquence des repas ainsi que de la supplémentation en enzymes sur la digestibilité des nutriments chez le porc en croissance et dans un deuxième temps de comparer les effets obtenus avec le modèle *in vitro*.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et chirurgie

Des porcs mâles castrés ((Yorkshire x Landrace) x Duroc ; n = 6) de 25 kg ont été utilisés pour l'étude *in vivo*. Les porcs étaient logés dans des parcs individuels sur caillebotis. Suite à une période d'adaptation de 10 jours, des chirurgies ont été pratiquées afin d'installer des canules iléales en T (Wubben *et al.*, 2001), qui ont été suivies d'une période de récupération de deux semaines avant le début de l'expérimentation.

1.2. Plan expérimental

Les animaux ont été pesés au début de chaque période expérimentale et ont reçu l'un des six traitements distribués pour que les traitements ne soient pas répétés au cours d'une même période et que chaque porc reçoive un traitement différent par période selon un dispositif expérimental en carré latin 6 × 6 (six porcs, six périodes expérimentales, six traitements). Chaque période expérimentale durait 14 jours. La quantité d'aliment distribuée quotidiennement était équivalente à trois fois les besoins en énergie métabolisable (EM) à l'entretien (106 kJ EM/j/PV^{0,75} ; NRC, 2012) dans le cas des traitements 2R et 8R et était plutôt de cinq fois les besoins EM pour le traitement 8R+. La quantité totale d'aliment allouée par jour était divisée en deux repas égaux distribués à 08h00 et

16h00 pour le traitement 2R et en huit repas égaux distribués à 08h00, 09h30, 11h00, 12h30, 14h00, 15h30, 17h00 et 18h30 pour les traitements 8R et 8R+. La quantité à offrir par jour a été calculée au début de chaque période selon le poids de l'animal mesuré à ce moment. Il y avait environ 10 à 15% de refus de nourriture pour les trois premiers jours de la période, mais la quantité totale était consommée par la suite. Les collectes de digestas, d'une durée de 12 heures, ainsi que les collectes de fèces ont eu lieu aux jours 13 et 14 de chaque période expérimentale. Tous les échantillons ont été congelés à -20°C immédiatement après leur prélèvement puis lyophilisés avant les analyses chimiques.

1.3. Aliments expérimentaux

L'aliment utilisé lors de l'expérimentation était granulé et formulé à base de blé, orge et tourteau de soya (Tableaux 1 et 2). Cet aliment a été servi aux animaux sans (2R, 8R et 8R+) et avec (2RE, 8RE et 8R+E) addition de xylanase (19700 bxu/kg) et phytase (692 FTU/kg) (Econase XT, Quantum Blue: AB Vista, Marlborough, UK). Les cendres insolubles ont été utilisées comme marqueur indigestible pour calculer la digestibilité des composés alimentaires.

1.4. Expérimentation *in vitro*

Le même aliment a été soumis à une digestion *in vitro*. Dans cette expérience, seulement la xylanase était ajoutée à la ration. Trois traitements différents ont été testés soit l'aliment sans xylanase (Xyl-Sans), l'aliment avec xylanase ajoutée lors de la formulation à l'usine (Xyl-Formule) et finalement l'aliment sans enzyme avec la xylanase ajoutée directement dans le dispositif *in vitro* (Xyl-Ajoutée). L'activité enzymatique de la xylanase dans le dispositif Xyl-Ajoutée était la même que dans le système Xyl-Formule soit de 19 700 bxu/kg d'aliment. La digestion *in vitro* a été effectuée selon le protocole de Vangsøe (2019). Le temps d'incubation dans l'estomac était de 90 minutes à un pH de 3,5 avec ajout de pepsine. Le pH était ensuite ajusté à 6,8, la pancréatine était ajoutée et l'incubation poursuivie pour 4 heures. Les enzymes étaient ensuite inactivées dans un bain à 80°C pendant 20 minutes afin de terminer la digestion. Les échantillons ont été filtrés afin de récolter la fraction soluble (filtrat). Le résidu indigestible a été lavé avec de l'éthanol et de l'acétone pour obtenir la fraction insoluble puis séché pour déterminer la dégradabilité de la matière sèche.

1.5. Analyses en laboratoire

Les échantillons d'aliment, de digesta et de fèces lyophilisées ont été broyés à l'aide d'un CT 193 CyclotecTM (FOSS North America, Eden Prairie, MN, USA). Tous ces échantillons ont été analysés pour la matière sèche (MS, méthode 935.29) et les cendres (méthode 942.05) afin de déterminer la matière organique (MO). Les fibres et les carbohydrates totaux (CHO) ont été déterminés selon Bach Knudsen (1997). Les polysaccharides non amylacés (NSP) totaux ont été hydrolysés en sucres monomères avec du H₂SO₄ 12 M pendant une heure et dosés par chromatographie gazeuse en tant qu'acétate d'alditol. Pour les CHO, la méthode est la même, à l'exception du fait que les échantillons ont été soumis à l'hydrolyse acide sans avoir retiré l'amidon et la précipitation réalisée dans l'éthanol (méthode directe). Le filtrat soluble collecté pendant l'expérience *in vitro* a été traité selon la procédure des CHO, mais avec une concentration en H₂SO₄ de 1 M durant

30 minutes pour éviter de réduire le contenu en monomères de cette fraction. Le résidu insoluble de la digestion *in vitro* a été analysé selon la méthode NSP précédemment décrite.

Tableau 1 – Composition des aliments expérimentaux

Ingrédients (kg)	[2R, 8R et 8R+]	[2RE, 8RE et 8R+E]
Blé	456,0	461,9
Orge	250,0	250,0
Tourteau de soja	146,7	145,7
Son de blé	50,0	50,0
Mixte d'huile	47,2	45,4
L-Lysine HCl	5,7	5,7
L-Thréonine	1,4	1,4
DL-Méthionine	0,7	0,7
L-Tryptophane	0,1	0,1
Pierre à chaux	8,8	11,4
Phosphore monocalcique	6,9	1,0
Sel	4,2	4,2
Micro prémélange	2,0	2,0
Sulfate de cuivre	0,3	0,3
Cendres insolubles	20,0	20,0
Econase XT ¹	-	0,1
Quantum Blue ²	-	0,15

¹Xylanase, apporte une activité de 19 700 bxu/kg.

²Phytase, apporte 692 FTU/kg.

Tableau 2 – Composition nutritionnelle (analysée) des aliments expérimentaux

Nutriments	Sans enzymes	Avec enzymes
	[2R, 8R et 8R+]	[2RE, 8RE et 8R+E]
MS, %	90,0	89,8
EB, MJ/kg MS	16,7	16,7
PB, %MS	19,9	19,7
Amidon, %MS	48,3	48,8
NSP totaux, %MS	12,8	12,9
I-NSP, %MS	9,3	9,6
AX totaux, %MS	6,5	6,5
I-AX, %MS	5,1	5,3
Cendres insolubles, %MS	1,5	1,6
Activité xylanase ¹ (bxu/kg)	< 2000	19700
Activité phytase ¹ (FTU/kg)	< 50	692

¹Les activités des enzymes ont été mesurées après la granulation

AX : arabinoxylanes, EB : énergie brute, I-AX : arabinoxylanes insolubles, I-NSP : polysaccharides non amylacés insolubles, MS : matière sèche, NSP : polysaccharides non amylacés, PB : protéine brute

1.6. Calculs et analyses statistiques

Les arabinoxylanes (AX) ont été calculés comme étant la somme de l'arabinose et du xylose analysés dans la méthode NSP. En supposant que les arabinoxyloligosaccharides (AXOS) ne précipitent pas dans 80% d'éthanol, ils ont donc été calculés comme suit :

$$AXOS, \% = AX_{direct} - AX_{soluble}$$

Les digestibilités iléales apparentes (DIA) *in vivo* ont été calculées selon la concentration en fibres et marqueur indigestible dans l'aliment et retrouvée dans le digesta :

$$DIA_{in\ vivo}, \% = 100 \times$$

$$[1 - (NSP_{digesta} / NSP_{aliment}) \times (Marqueur_{aliment} / Marqueur_{digesta})]$$

La libération de NSP, AX et xylose permet d'observer ce qui a été libéré de l'aliment dans la phase soluble du digesta. Elle a été calculée selon un rapport entre la concentration en chacun

obtenu par la méthode directe et leur concentration dans l'aliment :

Libération, % =

$$\text{Teneur en NSP}_{direct\ digesta} / \text{Teneur en NSP}_{total\ aliment}$$

La dégradation de la matière sèche *in vitro* a été calculée à l'aide du poids de départ de l'échantillon et le poids du résidu indigestible :

$$DIA_{MS\ in\ vitro}, \% = (1 - \text{Résidu}_{fin} / \text{échantillon}_{départ}) \times 100$$

Les digestibilités des carbohydrates *in vitro* étaient plutôt calculées selon les concentrations dans le filtrat soluble ou le résidu indigestible et l'aliment :

$$DIA_{NSP\ in\ vitro}, \% = (1 - NSP_{filtrat\ ou\ résidu} / NSP_{aliment}) \times 100$$

L'unité expérimentale était le porc. Les données ont été traitées selon une analyse factorielle afin de déterminer les effets de l'ajout d'enzymes et du mode de distribution des repas (n=3) ainsi que l'interaction Enzyme x Repas (Fréquence : 2R vs 8R ; Taille : 8R vs 8R+) pour l'expérimentation *in vivo* et les effets de l'ajout de xylanase pour l'expérience *in vitro*. Des contrastes ont été utilisés pour tester les effets fréquence et taille de repas (2R vs 8R, 8R vs 8R+) dans l'expérience *in vivo* et pour tester l'effet du mode d'ajout de xylanase (Xyl-Ajoutée vs Xyl-Formule) dans l'expérience *in vitro*. Le modèle statistique avait comme variables fixes l'ajout d'enzymes et le type de repas. La période de collecte et les porcs étaient inclus dans le modèle comme des effets aléatoires. Les données ont été analysées en utilisant la procédure Mixed de SAS (v9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Les différences ont été considérées comme significatives avec $P < 0,05$ et les tendances avec $P < 0,10$.

2. RESULTATS

2.1. In vivo

2.1.1. Digestibilité iléale apparente

Les résultats indiquent une amélioration de la DIA de la MS avec l'ajout d'enzymes de 1, 2 et 2% respectivement pour les traitements 2R, 8R et 8R+ ($P = 0,041$). Par ailleurs, la DIA des NSP et AX insolubles est aussi améliorée avec l'ajout d'enzymes de 13 et 14% respectivement pour le traitement 2R, de 18 et 18% pour le traitement 8R et finalement de 16 et 17% pour le traitement 8R+ ($P < 0,001$). Un effet repas est observé pour la DIA de l'amidon dont la digestibilité est supérieure de 0,3% avec la distribution 2R comparativement à la distribution 8R ($P = 0,049$) et tend à être supérieure de 0,6% pour la distribution 8R comparativement à la distribution 8R+ ($P = 0,092$). La DIA de MO tend à être supérieure avec l'ajout d'enzymes ($P = 0,065$) (Tableau 3).

2.1.2. Contenu iléal

Le ratio A:X insoluble et direct étaient diminués dans toutes les distributions avec l'ajout d'enzymes ($P < 0,05$). L'addition d'enzymes a augmenté le contenu iléal en CHO ($P = 0,021$) de 4, 1 et 2% et la concentration iléale en AXOS ($P = 0,008$) de 4, 7 et 7% respectivement pour les traitements 2R, 8R et 8R+. Le ratio A:X soluble et le ratio AXOS : CHO tendaient à augmenter avec l'ajout d'enzymes ($P = 0,051$; $P = 0,060$). Également, le ratio A:X insolubles sur NSP totaux tendait à diminuer avec l'ajout d'enzymes ($P = 0,068$) (Tableau 3).

2.1.3. Libération

La libération de AX et xylose soluble est augmentée par l'ajout d'enzymes de 5, 4 et 3% ainsi que 5, 5 et 2% respectivement dans les rations 2R, 8R et 8R+ ($P < 0,05$) (Tableau 3).

2.2. In vitro

2.2.1. Dégradabilité in vitro des aliments

Une augmentation de la dégradabilité *in vitro* des fibres NSP insolubles et AX insolubles a été observée avec l'ajout d'enzymes ($P < 0,05$). Par ailleurs, cette augmentation tendait à être plus importante lorsque la xylanase était ajoutée directement dans le système *in vitro* plutôt que dans la ration ($P = 0,073$) (Tableau 4).

2.2.2. Contenu du filtrat et du résidu

Une diminution du ratio A :X direct a été observée dans le filtrat avec l'addition de xylanase ($P < 0,01$) avec un effet plus marqué dans le système Xyl-Ajoutée comparée au système Xyl-Formule ($P = 0,004$). Une tendance à l'augmentation du contenu en CHO dans le filtrat soluble a été notée avec l'ajout de xylanase. Le contenu en AXOS du filtrat était aussi plus élevé avec l'ajout de xylanase ($P = 0,004$) et de manière plus marquée dans le système Xyl-Formule comparé au système Xyl-Ajoutée ($P = 0,003$). Le ratio A :X soluble du filtrat était diminué par l'ajout

de xylanase ($P < 0,001$). Une tendance à une diminution du ratio A :X soluble plus marquée dans le système Xyl-Ajoutée a été notée ($P < 0,10$) (Tableau 4).

2.2.3. Libération

La libération de NSP, AX et xylose solubles était augmentée avec l'addition de xylanase ($P < 0,001$). Elle tendait à être supérieure lorsque l'enzyme est ajoutée directement dans le système *in vitro* plutôt que directement dans l'aliment ($P < 0,10$) (Tableau 4).

3. DISCUSSION

Le premier objectif de cette étude était de déterminer l'effet de la taille et de la fréquence de repas ainsi que de l'ajout de xylanase et de phytase exogènes sur la digestibilité d'un aliment riche en fibres. L'augmentation de la DIA de la MS ainsi que des NSP et AX insolubles avec l'ajout d'enzymes peut s'expliquer dans un premier temps par une dégradation des fibres dans le tractus gastrointestinal (Owusu-Asiedu *et al.*, 2010).

Tableau 3 – Effet des modalités de repas et de l'ajout d'enzymes sur la digestibilité iléale apparente (DIA) et la concentration iléale en carbohydrates^{1,2}

%	2R		8R		8R+		Erreur type	P-Values		Contraste repas	
	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec		Enzyme	Repas	2R vs 8R	8R vs 8R+
DIA											
MS	76,6	77,6	76,5	78,7	75,6	77,7	1,6	0,024	0,511	0,559	0,254
Amidon	98,7	98,6	98,1	98,5	97,9	98,2	0,2	0,181	0,006	0,049	0,092
MO	77,8	78,1	77,7	79,7	76,4	78,4	1,6	0,065	0,333	0,414	0,144
I-NSP	41,0	47,0	41,0	50,1	38,7	46,0	4,5	<0,001	0,356	0,523	0,157
I-AX	43,5	50,5	44,1	53,6	41,2	49,8	4,3	<0,001	0,281	0,413	0,117
Concentration iléale											
<i>Insoluble</i>											
A:X	0,621	0,595	0,648	0,605	0,615	0,594	0,013	0,004	0,131	0,128	0,061
<i>Direct</i>											
CHO	37,7	39,2	39,1	39,6	38,9	39,8	0,6	0,021	0,117	0,066	0,964
A:X	0,686	0,650	0,695	0,652	0,675	0,663	0,011	<0,001	0,836	0,586	0,648
<i>Soluble</i>											
AXOS	13,1	13,7	12,8	13,8	13,0	13,9	0,3	0,008	0,874	0,848	0,611
A:X	0,864	0,991	0,831	0,963	0,876	1,225	0,130	0,052	0,399	0,806	0,202
Libération											
S-NSP	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	0,1	0,443	0,206	0,090	0,702
S-AX	2,6	2,8	2,6	2,7	2,7	2,8	0,1	<0,001	0,919	0,686	0,872
S-Xyl	2,6	2,8	2,6	2,8	2,6	2,7	0,1	0,002	0,883	0,624	0,797
Ratio											
I-NSP:NSP _{tot}	0,728	0,692	0,721	0,712	0,726	0,724	0,014	0,121	0,478	0,631	0,447
S-NSP:NSP _{tot}	0,272	0,308	0,279	0,288	0,274	0,276	0,014	0,121	0,478	0,631	0,447
I-AX:NSP _{tot}	0,381	0,356	0,372	0,365	0,381	0,372	0,010	0,068	0,569	0,985	0,348
S-AX:NSP _{tot}	0,125	0,138	0,132	0,134	0,130	0,126	0,010	0,630	0,793	0,842	0,508
AXOS:CHO	0,348	0,348	0,328	0,348	0,335	0,351	0,008	0,060	0,470	0,224	0,531

¹A:X : ratio arabinose/xylose, AXOS : arabino xylo oligo saccharides, CHO : carbohydrates totaux, I-AX : arabinoxylanes insolubles, I-NSP : polysaccharides non amylacés insolubles, MO : matière organique, MS : matière sèche, NSP_{tot} : polysaccharides non amylacés totaux, S-AX : arabinoxylanes solubles, S-NSP : polysaccharides non amylacés solubles, S-Xyl : xylose soluble.

²Interaction Enzyme x Repas : N.S. Modèle statistique : effet principal des enzymes et des repas, contrastes 2R vs 8R pour l'effet fréquence de repas et 8R vs 8R+ pour l'effet taille de repas

Tableau 4 – Effet de l’ajout de xylanase sur les carbohydrates iléaux évalués *in vitro*^{1,2}

%	Traitement enzymatique			Erreur type	P-values (contraste)	
	Xyl-Sans	Xyl-Ajoutée	Xyl-Formule		Ajout de xylanase	(Xyl-Ajoutée vs Xyl-Formule)
Dégradation						
MS	81,0	81,6	81,6	0,3	0,205	0,879
I-NSP	-13,3	-6,7	-10,4	1,1	0,023	0,073
I-AX	-16,5	-7,5	-11,7	1,5	0,020	0,122
Contenu résidu et soluble						
<i>Insoluble</i> (résidu indigestible)						
A:X	0,600	0,595	0,610	0,010	0,621	0,063
<i>Direct</i> (filtrat soluble)						
CHO	45,0	45,9	46,2	0,4	0,054	0,637
A:X	0,956	0,685	0,886	0,1	0,004	0,004
<i>Soluble</i> (filtrat soluble)						
AXOS	-0,05	-0,02	0,10	0,02	0,004	0,003
A:X	0,970	0,839	0,865	0,010	< 0,001	0,097
Libération						
S-NSP	15,9	27,4	29,3	0,6	< 0,001	0,090
S-AX	9,4	15,7	17,3	0,5	< 0,001	0,069
S-Xyl	7,9	16,0	15,7	0,3	< 0,001	0,531

¹ Abréviations : *idem* à tableau 3

² Modèle statistique : effet principal de la xylanase, contraste Xyl-Ajoutée vs Xyl-Formule pour effet du mode d’ajout de l’enzyme

Les changements observés au niveau des ratios A:X supportent une dégradation de l’AX par la xylanase. La diminution du ratio A:X insoluble avec l’ajout d’enzymes indique un clivage des xylanes dans la chaîne de xylose par la xylanase (Vangsøe *et al.*, 2019; Vangsøe *et al.*, 2020). Le ratio A:X soluble évolue dans le sens contraire montrant une augmentation du xylose dans la partie soluble. Par ailleurs, la diminution du ratio I-AX :NSP et la hausse du ratio AXOS :CHO permettent aussi de supporter une dégradation de l’AX. L’augmentation de la concentration en AXOS soluble par la xylanase suggère également que l’enzyme aurait favorisé la solubilisation de la fibre (Bedford, 2018; Vangsøe *et al.*, 2020). La solubilisation des fibres est intéressante puisqu’elle permet de fournir au microbiote intestinal du matériel rapidement fermentescible permettant d’augmenter la balance énergétique de la ration. En effet, les fibres solubles sont plus faciles à fermenter par le microbiote que les fibres insolubles qui demandent plus de dégradation (Bach Knudsen, 2005).

L’augmentation de la concentration en AXOS est également d’intérêt puisqu’ils peuvent contribuer à la santé intestinale des porcs (Rodríguez-Lagunas et Pérez-Cano, 2019). Ils font partie de l’effet prébiotique apporté par l’ajout de xylanase exogène. En dégradant les AX insolubles, la xylanase relâcherait dans la phase soluble les AXOS tel qu’observé dans la présente expérience. Les AXOS sont rapidement fermentés dans le gros intestin par les bactéries saccharolytiques en acides gras volatils (Bedford, 2018).

L’augmentation de la DIA de la MS avec l’ajout de xylanase et phytase peut aussi être impliquée dans la libération de nutriments. En effet, les nutriments de même que les enzymes endogènes peuvent se retrouver encapsuler dans la matrice des fibres et devenir non disponible pour l’absorption (de Lange *et al.*, 2010). Tel que mentionné précédemment, la xylanase dégrade les fibres et permet donc de libérer certains nutriments qui étaient encapsulés dans la matrice fibreuse (de Lange *et al.*, 2010).

Contrairement aux NSP, la DIA de l’amidon n’a pas été améliorée par les enzymes, mais était supérieure lorsque les porcs consommaient deux repas par jour au lieu de huit repas par jour (2R vs 8R ; $P = 0,049$). Ces effets peuvent être expliqués

par une modification du temps de rétention. En effet, un repas volumineux cause une vidange gastrique plus rapide durant les trente premières minutes (Auffray *et al.*, 1967). Par contre, l’arrivée rapide du digesta hypertonique dans le duodénum amène une distension de ce dernier. Les mécanorécepteurs de même que les récepteurs osmotiques envoient alors des signaux contribuant à arrêter la vidange gastrique (Auffray *et al.*, 1967). Le temps de rétention se retrouve donc augmenté dû à l’encombrement causé par un repas volumineux tel que pour le traitement 2R. Ruckebusch et Bueno (2008) ont aussi montré qu’en comparant des porcs nourris une à deux fois par jour à d’autres, nourris *ad libitum*, une réduction de la motilité de l’estomac et des intestins était observée chez les animaux recevant un nombre limité de repas. L’amidon est dégradé au niveau du duodénum par l’ α -amylase pancréatique (Gray, 1992). Ainsi, l’augmentation du temps de transit causé par le volume et la fréquence limités du traitement 2R permet une augmentation du temps de contact de l’amidon avec l’ α -amylase et expliquerait l’augmentation de la DIA de l’amidon observée. Aucun autre effet du mode de distribution de repas a été observé dans cette étude ce qui concorde avec les études de Mroz *et al.* (1994) et Chastanet *et al.* (2007) qui n’ont pas observé d’effet sur la digestibilité iléale et totale des nutriments selon le nombre de repas offert par jour.

La DIA de l’amidon tendait à être supérieure lorsque l’animal consommait moins d’aliment par jour (8R vs 8R+ ; $P = 0,092$). Cet effet est aussi expliqué par la modification du temps de rétention selon la taille des repas. Roth et Kirchgessner (1985) ont observé que le temps de rétention était de 52,2 heures avec une quantité d’aliments visant à couvrir une fois les besoins d’énergie à l’entretien. Cependant, dans la même étude, le temps de rétention est diminué à 35,3 heures lorsque l’animal est nourri à 2,5 fois les besoins d’entretien. La tendance observée pour la DIA de l’amidon supérieure dans 8R comparé à 8R+ dans la présente étude pourrait donc s’expliquer par un temps de rétention plus élevé pour 8R dû à la plus petite taille des repas.

En comparant l’expérimentation *in vivo* au modèle *in vitro*, il est possible de remarquer que l’effet de la xylanase va dans le même sens dans les deux expérimentations. Cela permet de

vérifier que les effets observés *in vivo* sont bel et bien dus à l'ajout d'enzyme. Le modèle *in vitro* permet une prédiction de l'effet xylanase bien que l'augmentation de la libération en NSP soit beaucoup plus élevée (45%) que l'amélioration de la DIA *in vivo* (18%). Cela peut être dû aux conditions plus contrôlées observées *in vitro* telles que le pH et le temps de rétention. *In vivo*, le pH varie à la suite des repas et en fonction de la fréquence des repas et de l'apport en fibres, car les aliments et les fibres peuvent agir comme tampons dans l'estomac (Wenk, 2001). La modification du pH influence l'activité des enzymes exogènes, car elles ont des valeurs de pH optimales pour la dégradation. Pour la xylanase, la fenêtre d'activité est comprise entre pH 4 et 6 (Svihus, 2010). Dans le modèle *in vitro*, le pH de l'estomac a été fixé à 3,5 et le pH de l'intestin à 6,8. Le pH n'a pas été mesuré *in vivo*, mais est dynamique et varie dans le temps. Le temps de rétention peut également jouer sur l'action de la xylanase. Un temps de rétention plus long donne plus de temps pour la dégradation, mais expose également la xylanase exogène aux protéases endogènes, ce qui peut entraîner une diminution de l'activité de la xylanase (Strube *et al.*, 2013). Le temps de rétention *in vitro* était de 90 minutes dans l'estomac et de 4 heures dans l'intestin grêle.

Le temps de rétention *in vivo* n'a pas été mesuré, mais varie en fonction de la taille et de la fréquence des repas ainsi que de l'apport en fibres. Van Leeuwen et Jansman (2007) ont rapporté que le temps de rétention était de 67,3 heures pour une ration riche en fibres distribuée deux fois par jour alors que Wilfart *et al.* (2007) ont plutôt mesuré 49,7 heures pour une ration avec une teneur en fibres similaire distribuée en six repas par jour. Aucun effet de l'expérience n'a été observé pour la DIA de MS indiquant que le modèle *in vitro* peut bien prédire la digestibilité globale de l'aliment (résultats non présentés).

CONCLUSION

En conclusion, la supplémentation en enzymes peut améliorer la digestibilité des NSP dans les aliments riches en fibres. Par contre, la taille et la fréquence des repas ont peu d'impact sur la digestibilité des fibres. Un modèle *in vitro* peut prédire l'effet de la xylanase *in vivo*. Cependant, l'évaluation du pH et du temps de rétention *in vivo* doit être effectuée afin de mieux comprendre l'effet limité de la taille des repas et de leur fréquence et de construire un modèle *in vitro* plus représentatif des conditions physiologiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aftab U., Bedford M., 2018. The use of NSP enzymes in poultry nutrition: myths and realities. *World's Poultry Science Journal*, 74, 277-286.
- AOAC, 2007. Official methods of analysis. AOAC International.
- Auffray P., Martinet J., Rérat A., 1967. Quelques aspects du transit gastro-intestinal chez le porc. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.*, 7, 261-279.
- Bach Knudsen K.E., 1997. Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 67, 319-338.
- Bach Knudsen K.E., 2005. Effect of dietary non-digestible carbohydrates on the rate of SCFA delivery to peripheral tissues. *Foods and Food Ingredients J. Japan*, 1008-1017.
- Bedford M.R., 2018. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. *Br. Poult. Sci.*, 59, 486-493.
- Chastanet F., Pahl A.A., Pedersen C., Stein H.H., 2007. Effect of feeding schedule on apparent energy and amino acid digestibility by growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 132, 94-102.
- de Lange C., Pluske J., Gong J., Nyachoti C., 2010. Strategic use of feed ingredients and feed additives to stimulate gut health and development in young pigs. *Livest. Sci.*, 134, 124-134.
- Gray G.M., 1992. Starch digestion and absorption in nonruminants. *J. Nutr.*, 122, 172-177.
- Mroz Z., Jongbloed A.W., Kempe P.A., 1994. Apparent digestibility and retention of nutrients bound to phytate complexes as influenced by microbial phytase and feeding regimen in pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 126-132.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine. Eds, National Academies Press, Washington, DC, xvii, 400 p.
- Owusu-Asiedu A., Simmins P.H., Brufau J., Lizardo R., Péron A., 2010. Effect of xylanase and β -glucanase on growth performance and nutrient digestibility in piglets fed wheat-barley-based diets. *Livest. Sci.*, 134, 76-78.
- Rodríguez-Lagunas M., Pérez-Cano F., 2019. Chapter 17 Fibre and fibre breakdown products as microbial and immune defense modulators. In: *The value of fibre: Engaging the second brain for animal nutrition*, G. González-Ortiz, M.R. Bedford, K.E. Bach Knudsen, C.M. Courtin, H.L. Classen (Eds.), Wageningen Academic Publishers, p 1055.
- Roth F.V., Kirchgessner M., 1985. Verdaulichkeit und intestinale Passagerate beim Schwein in Abhängigkeit vom Fütterungsniveau und Rohfasergehalt des Futters. *Zeitschr. Tierphys. Tierernähr. Futtermittelk.*, 53, 254-264.
- Ruckebusch Y., Bueno L., 2008. The effect of feeding on the motility of the stomach and small intestine in the pig. *Br. J. Nutr.*, 35, 397-405.
- Selle P., Ravindran V., Partridge G., 2009. Beneficial effects of xylanase and/or phytase inclusions on ileal amino acid digestibility, energy utilisation, mineral retention and growth performance in wheat-based broiler diets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 153, 303-313.
- Strube M.L., Meyer A.S., Boye M., 2013. Mini review: basic physiology and factors influencing exogenous enzymes activity in the porcine gastrointestinal tract. *Anim. Nutr. Feed Technol.*, 13, 441-459.
- Svihus, B., 2010. Effect of digestive tract conditions, feed processing and ingredients on response to NSP enzymes. In: *Enzymes in farm animal nutrition*. M.R. Bedford, G.G. Partridge (eds), CABI, Wallington, Oxford, UK, p.130
- van Leeuwen P., Jansman A., 2007. Effects of dietary water holding capacity and level of fermentable organic matter on digesta passage in various parts of the digestive tract in growing pigs. *Livest. Sci.*, 109, 77-80.
- Vangsøe C.T., Sørensen J.F., Bach Knudsen K.E., 2019. Aleurone cells are the primary contributor to arabinoxylan oligosaccharide production from wheat bran after treatment with cell wall-degrading enzymes. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 54, 2847-2853.
- Vangsøe C.T., Nørskov N.P., Devaux M.-F., Bonnin E., Bach Knudsen K.E., 2020. A carbohydrase complex rich in xylanases and arabinofuranosidases affects the autofluorescence signal and liberates phenolic acids from the cell wall matrix in wheat, maize, and rice bran: An *in vitro* digestion study. *J. Agric. Food Chem.*, 9878-9887.
- Wenk C., 2001. The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 90, 21-33.
- Wilfart A., Montagne L., Simmins H., Noblet J., van Milgen J., 2007. Effect of fibre content in the diet on the mean retention time in different segments of the digestive tract in growing pigs. *Livest. Sci.*, 109, 27-29.
- Wubben J.E., Smiricky M.R., Albin D.M., Gabert V.M., 2001. Improved procedure and cannula design for simple-T cannulation at the distal ileum in growing pigs. *J. Am. Assoc. Lab. Anim.*, 40, 27-31.