

## **1.1 Ingrédients alternatifs au maïs et au tourteau de soya dans l'Est du Canada**

Afin d'optimiser l'utilisation des ingrédients alternatifs dans l'alimentation du bétail, plusieurs facteurs doivent être considérés, selon l'espèce concernée. Parmi ces facteurs, le prix, la composition nutritionnelle, leur digestibilité, l'absence de toxines et d'agents antinutritionnels, la constance de la composition, la facilité de manipulation et d'entreposage, l'appétence ainsi que les effets sur la qualité de la viande sont tous des éléments à considérer (Lafond, 2009). De plus, la disponibilité et la régularité de l'approvisionnement de chacun ces ingrédients sont des conditions essentielles à leur utilisation dans les formulations d'aliments pour porcs. D'ailleurs, bien que l'utilisation d'ingrédients alternatifs soit généralement intéressante d'un point de vue économique, le prix d'intérêt de chacun de ces produits varie en fonction du prix de l'ingrédient analogue qu'il remplace, ainsi que de sa disponibilité et sa qualité (Stein et de Lange, 2008).

Dans l'Est du Canada, les principaux ingrédients alternatifs qu'il est possible de retrouver sont les drêches de distilleries de maïs (parfois de blé) et de brasserie (principalement d'orge), le tourteau de canola, le gru de blé, le gros et le fin gluten de blé ou de maïs, les farines de pains et de biscuits, les écales de soya, les sous-produits laitiers liquides, les produits de la graine de lin, la pulpe de betterave ainsi que le pois. Une grande fraction de ces ingrédients est composée de résidus issus de l'industrie de la transformation de matières premières destinées à l'alimentation humaine et est redirigée vers l'alimentation animale. Il est notamment question des tourteaux, du gru de blé, des farines de pain et de biscuits, de la pulpe de betterave ainsi que des sous-produits laitiers liquides. Les drêches, quant à elles, proviennent de la transformation de grain pour fabriquer des produits industriels comme les biocarburants.

Par ailleurs, il existe des variations assez importantes dans la valeur nutritionnelle pour un même ingrédient d'un lot à l'autre. Ces variations sont principalement dues à la composition du produit ou grain d'origine, qui fluctue selon les variétés et les saisons, ainsi qu'aux procédés de transformation qui diffèrent d'une entreprise à l'autre. Généralement, les niveaux de fibres contenus dans les ingrédients alternatifs sont plus importants que ceux retrouvés dans les grains d'origine (Slominski et al., 2004). Comme la fibre alimentaire est difficilement dégradée par les monogastriques (AACC, 2001), les quantités d'ingrédients alternatifs pouvant être intégrées dans leurs aliments sont limitées.

L'impact des fibres sera traité plus en profondeur dans la section 1.3.3 *Propriétés des fibres alimentaires* du présent ouvrage.

En raison de la longue liste des ingrédients alternatifs d'intérêts, les sections suivantes décrivent brièvement seulement ceux qui seront utilisés lors de l'expérimentation présentée au **Chapitre 2**, c'est-à-dire la dèche de distillerie de maïs, la farine de pain, le gru de blé ainsi que le tourteau de canola. Afin de faciliter la comparaison entre les différents ingrédients, le *Tableau 1.1* présente une compilation de la composition nutritionnelle du maïs-grain et du tourteau de soya et de certains ingrédients alternatifs.

**Tableau 1.1** : Composition nutritionnelle de certains ingrédients de base et alternatifs utilisés dans l'alimentation des porcs dans l'Est du Canada.

	<b>Maïs-grain</b>	<b>Tourteau soya</b>	<b>Blé</b>	<b>DDGS de maïs</b>	<b>Farine de pain</b>	<b>Gru de blé</b>	<b>Tourteau canola</b>
DE <sup>1</sup> (kcal/kg)	3451	3619	3313	3620	3975 <sup>5</sup> -4180 <sup>7</sup>	3075	3273
Matière sèche <sup>1</sup>	88,3	90,0	88,7	89,3	88,0 <sup>5</sup> -91,6	89,1	91,3
PB <sup>1</sup>	8,2	47,7	14,5	27,3	11,9-12,7 <sup>5</sup>	15,8	37,5
Gras <sup>1</sup>	3,5	6,6	1,8	10,43	7,50 <sup>5</sup> -8,05 <sup>1</sup>	3,2	3,2
Fibres brutes <sup>1</sup>	2,0	3,9	2,6	7,06	-	5,2	10,5
Fibres ADF <sup>1</sup>	2,88	5,28	3,55	11,75	2,00 <sup>4</sup> -2,70 <sup>5</sup>	6,00	15,42
Fibres NDF <sup>1</sup>	9,11	8,21	10,60	32,50	13,0 <sup>4</sup>	34,97	22,64
NSP totaux	9,0 <sup>2</sup>	21,0 <sup>2</sup>	11,3 <sup>2</sup>	28,3 <sup>3</sup>	8,7	19,0 <sup>6</sup>	22,0 <sup>2</sup>
% NSP solubles	11,8 <sup>2</sup>	27,6 <sup>2</sup>	21,7 <sup>2</sup>	11,0 <sup>3</sup>	21,7 <sup>2</sup>	37,4 <sup>6</sup>	15,5 <sup>2</sup>
Cendres <sup>1</sup>	1,30	6,27	1,98	4,11	3,05 <sup>5</sup>	2,05	6,98
Ca <sup>1</sup>	0,02	0,33	0,06	0,12	0,10 <sup>5</sup>	0,11	0,69
P total <sup>1</sup>	0,26	0,71	0,39	0,73	0,18 <sup>5</sup>	0,98	1,08
Na <sup>1</sup>	0,02	0,08	0,01	0,22	0,78 <sup>5</sup>	0,05	0,07
Lysine totale <sup>1</sup>	0,25	2,96	0,39	0,77	0,35 <sup>5</sup>	0,65	2,07
Indice iode produit <sup>1</sup>	50,98	15,30	13,40	>37,90	-	38,40	21,42

AbréviationsJ : Composition nutritionnelle telle que servie (TQS), énergie digestible (DE), protéine brute (PB), polysaccharides non amylacés (NSP), calcium (Ca), phosphore total (P total) et sodium (Na).

<sup>1</sup> NRC, 2012

<sup>2</sup> Knudsen, 2014, %MS

<sup>3</sup> Pedersen et al., 2014, %MS

<sup>4</sup> Slominski et al., 2004, %MS

<sup>5</sup> Farine de pain Energro, Farines SPB Ltée : Cité par Lafond 2009

<sup>6</sup> Rosenfelder et al., 2013, %MS

<sup>7</sup> Farine de biscuit Faripro<sup>TM</sup>, PROREC inc. : cité par Lafond 2009

### 1.1.1 Drêches de distillerie de maïs avec solubles

La drêche de distillerie de maïs avec solubles (DDGS) est un résidu de fermentation de l'amidon de maïs en bioéthanol. Elle contient environ trois fois la concentration en composants nutritionnels du maïs-grain, sauf pour l'amidon qui est majoritairement converti en éthanol (*Tableau 1.1*). On obtient un produit avec une teneur similaire en énergie, mais enrichie en protéine, en lipides, en minéraux et en fibres. Les fibres alimentaires contenues dans les DDGS sont principalement des fibres insolubles (Urriola et al., 2010; Pedersen et al., 2014). Comme ce produit est riche en énergie et en protéine, il peut remplacer une partie du maïs ou du tourteau de soya dans l'alimentation des porcs. Toutefois, la qualité de la protéine provenant de la drêche est moindre que celle du maïs-grain. En effet, même si la DDGS est plus concentrée en lysine que le maïs, sa digestibilité est plus faible (DIA de 60 % vs 55 % et ATTD de 74 % et 61 % pour le maïs et la DDGS respectivement) (NRC, 2012). Ainsi, il est souvent nécessaire d'apporter d'un supplément de lysine à la ration afin de combler les besoins nutritionnels du porc (Stein et De Lange, 2008; Lafond, 2009; NRC, 2012). De plus, comme la concentration en phosphore est près de trois fois supérieures à celle du maïs-grain, il est possible de diminuer la supplémentation en P inorganique, ce qui diminue le coût de l'aliment ainsi que le P rejeté dans les fèces (Stein et De Lange, 2008).

Il est également possible d'utiliser d'autres grains pour la production de biocarburant, comme le blé, l'orge, ou le sorgho (Pedersen et al., 2014). Cependant, au Québec, la drêche de maïs est beaucoup plus abondante sur le marché, principalement à cause de la forte production de maïs-grain de la province (71 % du total des grains produits) et du midwest américain, ainsi que de nombreuses usines d'éthanol situées à proximité, par exemple celles de GreenField à Varennes (Québec), à Tiverton, à Chatham et à Johnstonw (Ontario) (MAPAQ, 2009; EIA, 2015).

Par ailleurs, une certaine variabilité dans le contenu nutritionnel des DDGS est rencontrée sur le marché nord-américain, notamment au niveau de la teneur en lipides. La DDGS de maïs contenait traditionnellement environ 15 % de matière grasse avant que l'extraction des huiles du maïs-grain à des fins de production de biodiesel ne fasse partie des procédés de transformation. Par la suite, les méthodes d'extraction des huiles ont évolué et sont devenues plus efficaces suite au passage de l'extraction par pression vers l'extraction par solvant qui laisse moins de lipides dans les drêches. Toutefois, comme l'industrie nord-américaine n'est pas uniforme quant aux méthodes d'extraction, il est possible de retrouver sur le marché des DDGS qui contiennent de 3 % à 14 % de lipides, ce

qui affecte en retour le contenu en énergie (Wu et al., 2016) ainsi que la digestibilité brute du produit (Urriola et al., 2010). Cette variabilité des teneurs lipidiques est cependant moindre sur le marché québécois puisque les principaux fournisseurs utilisent des méthodes de transformations semblables.

### **1.1.2 Farines de pains et de biscuits**

Les farines de pains et de biscuits sont des sous-produits de la fabrication du pain et de la transformation de céréales pour l'alimentation humaine. Elles contiennent différents sous-produits de boulangerie tels des pâtes alimentaires, farines, biscuiteries, céréales et croustilles. Bien que les minimums garantis pour certains composants nutritionnels soient respectés, la composition demeure variable, principalement selon la provenance des ingrédients et le dosage de ceux-ci dans les farines. De plus, la disponibilité des produits est relativement restreinte sur le marché, ce qui rend difficile leur incorporation sur une base régulière et à grande échelle en meunerie. Ces produits sont utilisés principalement comme source d'énergie en raison de leur forte teneur en amidon cuit, en sucres simples et en graisses, ce qui leur confère une bonne appétence et digestibilité pour les jeunes animaux. Le taux élevé de matière grasse dans la farine de biscuits peut toutefois rendre la conservation complexe à cause de sa tendance à l'oxydation (Lafond, 2009).

### **1.1.3 Gru de blé**

Le gru de blé (ou remoulage) est un sous-produit de la fabrication de la farine pour l'alimentation humaine. Le gru est constitué majoritairement de l'enveloppe interne du grain et contient aussi une proportion variable de farine, de germe et de son, l'enveloppe externe du grain. La composition du gru varie donc selon les procédés de fabrication propre à chacune des usines de même que selon les saisons (Lafond, 2009; Knudsen, 2014). Ces variations expliquent en partie la fluctuation de la composition observée, notamment au niveau de la teneur en fibres.

En raison de sa haute concentration en fibre, le gru est considéré comme un ingrédient de faible valeur énergétique qui peut réduire la densité énergétique de l'aliment (Feoli et al., 2006). Il contient également un niveau moyen de protéine avec un profil en acides aminés (AA) semblable à celui du grain, mais dont la digestibilité est relativement faible. Par ailleurs, comme les enveloppes du grain sont davantage exposées aux moisissures, le risque de contaminations du gru par les mycotoxines est élevé, ce qui peut en limiter l'incorporation (Lafond, 2009). Enfin, le gru est mieux adapté à une moulée cubée. En effet, comme le produit a une faible densité, il a tendance à se

séparer de la moulée lorsque celle-ci est transportée, entreposée et servie en farine non cubée, ce qui cause un problème d'homogénéité de la ration (Stein et De Lange, 2008).

#### **1.1.4 Tourteau de canola**

Le tourteau de canola est le sous-produit résultant de l'extraction de l'huile de la graine de canola. Contrairement au tourteau de soya, les écales de la graine de canola demeurent dans le tourteau, ce qui accentue le niveau de fibres et dilue l'énergie disponible du produit. Bien que le tourteau de canola contienne une importante quantité de protéines avec un bon profil en AA, leur digestibilité est restreinte dû au niveau élevé de fibres (de Lange et al., 1990). Tout comme pour les DDGS, l'extraction de l'huile de la graine de canola peut se faire par pression ou par solvant, ce dernier laissant beaucoup moins de résidus lipidiques (5 % vs 10-15 %) (Seneviratne et al., 2010). Comme les acides gras du canola sont principalement polyinsaturés, une importante quantité de cet ingrédient dans l'alimentation des porcs peut affecter négativement la qualité du gras de la carcasse de porc.

De plus, le tourteau de canola contient des glucosinolates, une substance anti-nutritionnelle qui diminue la consommation moyenne journalière (CMJ) des porcs et affecte la sécrétion d'hormones thyroïdiennes. Les variétés disponibles actuellement sur le marché ont des teneurs en glucosinolates beaucoup plus faibles qu'auparavant. Selon *Canola Council of Canada* (2015), le tourteau de canola canadien contient en moyenne 4,2  $\mu\text{mol/g}$  de glucosinolate, alors que le tourteau de colza traditionnel (ancêtre du tourteau de canola) contenait 120-130  $\mu\text{mol/g}$ . Toutefois, comme les quantités de glucosinolate sont variables dans différents tourteaux de canola sur le marché (4,0 à 23,2  $\mu\text{mol/g}$ ), cela limite encore quelque peu les taux d'incorporation de tourteau de canola dans les aliments pour porcs, plus par habitude que pour les conséquences réelles sur l'animal (Lafond, 2009; Seneviratne et al., 2010; Sanjayan et al., 2014 ; Canola Council of Canada, 2015).

## 1.2 Les fibres alimentaires

Comme vu précédemment, les aliments complets pour les porcs au Québec sont traditionnellement faits à base de maïs, de tourteau de soya et de céréales, mais des alternatives pourraient venir remplacer une partie de ces ingrédients afin de réduire les coûts de la production d'aliment. Ces ingrédients alternatifs sont intéressants, mais présentent toutefois une forte teneur en fibres alimentaires, fraction qui est faiblement dégradée chez les monogastriques (AACC, 2001; Ampuero, 2008).

La catégorie des fibres alimentaires est vaste et complexe. Afin de bien comprendre l'enjeu de cet élément dans un contexte de production porcine, il sera tout d'abord question de bien définir et classer les différents types de fibres alimentaires. Par la suite, la dégradation de la fibre chez le porc sera abordée ainsi que les effets sur le système digestif, la digestibilité des composants nutritionnels et de l'énergie ainsi que sur le métabolisme général de l'animal.

### 1.2.1 Définition

La notion de « fibre alimentaire » est complexe et sa définition ne fait pas toujours l'unanimité. L'une des définitions les plus populaires est celle du rapport de l'*American Association for Clinical Chemistry* (AACC, 2001) :

« Dietary fiber is the edible parts of plants or analogous carbohydrates that are resistant to digestion and absorption in the human small intestine with complete or partial fermentation in the large intestine. Dietary fiber includes polysaccharides, oligosaccharides, lignin, and associated plant substances. Dietary fibers promote beneficial physiological effects including laxation, and/or blood cholesterol attenuation, and/or blood glucose attenuation. »

Bien que cette définition réfère à l'alimentation humaine, elle demeure applicable pour la majorité des espèces animales monogastriques. Ainsi, les fibres alimentaires totales dont il est question dans le présent ouvrage comprennent les polysaccharides non amylacés des végétaux et leurs analogues qui sont résistants à la digestion endogène et à l'absorption par le système digestif des animaux monogastriques (Wenk, 2001; Trowell, 1985 : cité par NRC, 2007; NRC, 2012; Kerr et Shurson, 2013). Bien que la lignine ne soit pas un polysaccharide, mais plutôt un polymère phénolique, elle est liée de manière intrinsèque aux fibres, tout comme les cutines, les subérines, les cires, les

saponines et les tannins (AACC, 2001; Knudsen, 2014). De cette façon, tous ces éléments sont donc inclus dans la grande famille des fibres alimentaires (AACC, 2001).

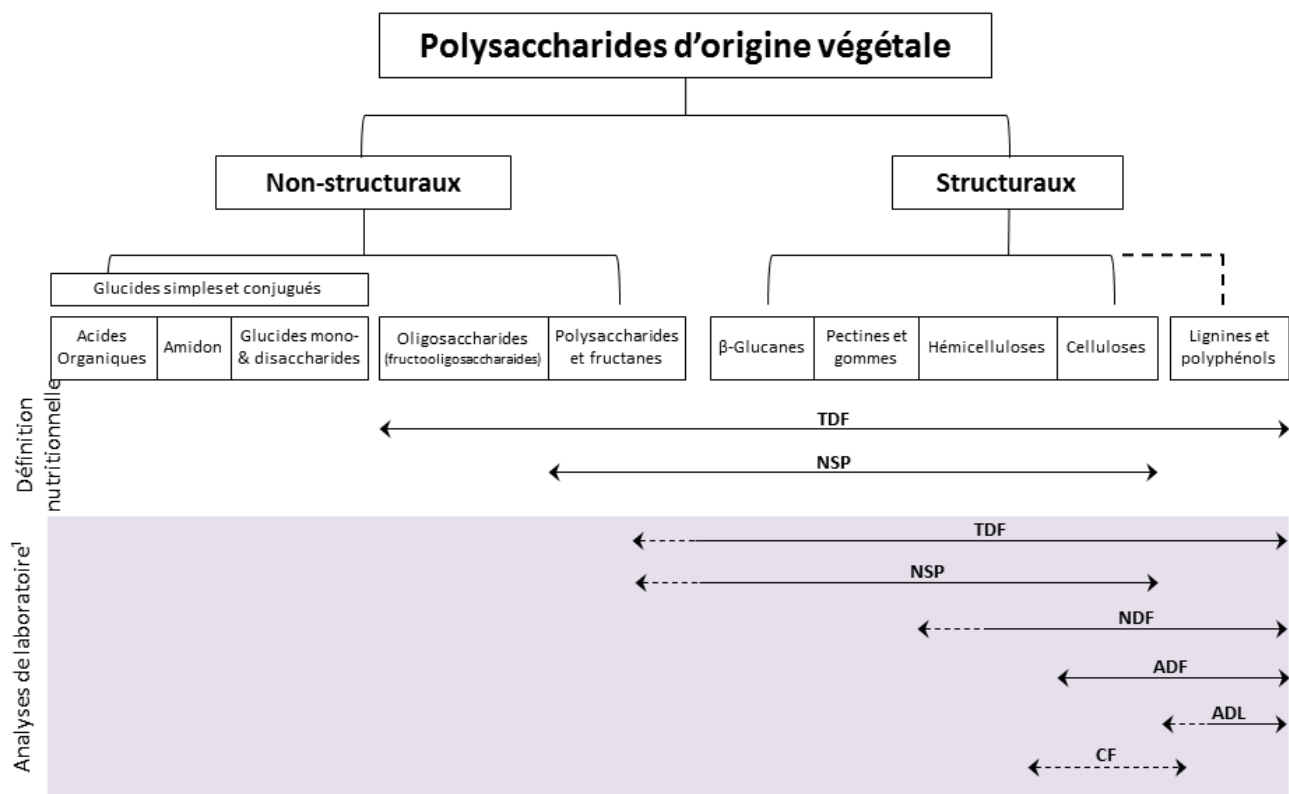
Cette catégorie renferme de nombreux composants aux caractéristiques assez différentes qui peuvent être classifiés selon leur composition chimique. Toutefois, comme il existe une multitude de variantes pour chaque constituant, la classification des fibres ne peut se limiter à un tel classement moléculaire.

### **1.2.2 Classification de la fibre**

D'un point de vue pratique, les polysaccharides (aussi connus sous le nom de glucides ou hydrates de carbone) peuvent être classifiés selon leur répartition dans la cellule végétale. Les polysaccharides d'origine végétale sont donc divisés en deux grandes catégories, les polysaccharides non structuraux, retrouvés à l'intérieur des cellules végétales, et les polysaccharides structuraux qui, comme leur nom l'indique, font plutôt partie des parois cellulaires. Les polysaccharides non structuraux peuvent aussi être subdivisés en sucres simples et leurs conjugués, ainsi qu'en glucides complexes (Kerr et Shurson, 2013). Toutefois, tous ces polysaccharides ne font pas partie de la grande famille des fibres alimentaires totales puisque certains glucides simples et leurs conjugués qui sont digestibles en sont exclus.

Ainsi, le système de classification des fibres alimentaires peut être basé sur deux aspects différents. D'un côté, le classement se base sur l'aspect nutritionnel physiologique des fibres, c'est-à-dire sur leur non-digestibilité par les enzymes digestives animales (non bactérienne). De l'autre côté, les fibres peuvent être classées selon les méthodes analytiques disponibles en laboratoires. Comme il sera possible de le voir dans les sections suivantes, les définitions issues des méthodes analytiques parviennent rarement à rencontrer les définitions des classes nutritionnelles et résultent, le plus souvent, en plusieurs catégories de fibres à la fois.

Les méthodes d'analyse de laboratoires les plus fréquemment utilisées pour doser les polysaccharides dans l'alimentation animale sont la fraction des fibres brutes (*Crude fiber*, CF), les fibres insolubles aux détergents neutres (NDF) et celles insolubles aux détergents acides (ADF), les lignines et les polysaccharides non amylacés (NSP), dont les arabinoxylanes (*Figure 1.1*).



Abréviations : TDF = fibres alimentaires totales (*Total dietary fiber*); NSP = polysaccharides non-amylacés (*Non-Starch Polysaccharides*); NDF = fibres insolubles au détergent neutre (*Neutral detergent fiber*); ADF = fibres insolubles au détergent acide (*Acid detergent fiber*); ADL = fibre ligneuse (*Acid detergent lignin*); CF = cellulose ou fibre brute (*Crude Fiber*).

<sup>1</sup> Dans la section « Analyses de laboratoire », la ligne pointillée indique que le dosage peut être incomplet.

**Figure 1.1** : Classification des polysaccharides d'origine végétale et de leurs analogues (adaptée de NRC, 2007 et 2012)

### 1.2.2.1 Fibres alimentaires totales

D'un point de vue nutritionnel, les fibres alimentaires totales (TDF) comprennent tous les glucides qui ne sont pas hydrolysables par les enzymes endogènes du système digestif des monogastriques. Toutefois, les résultats d'analyses pour les fibres alimentaires totales ne comprennent pas les oligosaccharides et seulement une fraction variable des fructanes (NRC, 2007). Ainsi, d'un point de vue analytique, les résultats d'analyse des TDF des aliments pour animaux sont souvent sous-estimés par rapport à la définition nutritionnelle (*Figure 1.1*).



### **1.2.2.2 Fibres brutes**

La fraction des fibres brutes, ou cellulose brute (*CF*), est analysée de routine lors de la caractérisation d'un aliment, tout comme la matière sèche ou encore la protéine brute. Même si son nom porte à confusion, cette fraction de la fibre alimentaire n'est pas en relation directe avec une définition nutritionnelle précise des fibres alimentaires totales, mais offre plutôt une estimation de la cellulose brute (*Figure 1.1*). En fonction du type d'alimentation, la valeur de la CF peut comporter 40 à 100 % de la cellulose, 15 à 20 % d'hémicellulose et 5 à 90 % de lignines (Mertens, 2003).

Pour analyser la fraction CF, les échantillons sont traités par hydrolyse acide puis hydrolyse basique afin d'imiter la digestion des sécrétions gastriques (Méthode 962.09 : AOAC, 2002; NRC, 2007). Cette méthode est particulièrement robuste et reproductible (Mertens, 2003), mais elle permet difficilement de faire des comparaisons entre les ingrédients puisque sa proportion dans la TDF est variable d'un ingrédient à l'autre. Ainsi, la CF est plutôt utilisée afin de donner une idée du contenu en fibre d'un aliment, mais nécessite souvent une caractérisation plus approfondie.

### **1.2.2.3 Fibres NDF et ADF**

Lors de l'analyse de la composition d'une ration alimentaire, les fractions NDF et ADF des fibres alimentaires sont analysées de routine. Plus précisément, les fibres NDF et ADF correspondent aux fibres alimentaires insolubles aux détergents neutres et insolubles aux détergents acides respectivement. Ces résultats sont obtenus par la méthode d'analyse des fibres de Van Soest qui consiste en extractions successives des échantillons avec un détergent neutre puis un détergent acide (Goering et Van Soest, 1970; Van Soest et al., 1991). L'analyse de la NDF et de l'ADF peut aussi se faire par sacs filtrants selon le système ANKOM et produit des résultats similaires à la méthode conventionnelle malgré sa simplicité d'exécution (NRC, 2007).

La fraction NDF comprend notamment les polysaccharides complexes à fermentation lente provenant des parois cellulaires, c'est-à-dire l'hémicellulose, la cellulose et la lignine, mais exclut les polysaccharides à fermentations rapides tels les pectines et fructanes (*Figure 1.1*). Cependant, certains types d'hémicelluloses peuvent être solubles aux détergents neutres et donc, la fraction NDF des résultats d'analyses a tendance à être quelque peu sous-estimée (NRC, 2007). La fraction NDF occupe beaucoup de place dans le tractus digestif comparativement à la fraction

complémentaire (TDF – NDF) qui est plus facilement dégradée et accapare peu d'espace en raison de sa solubilisation rapide (Ampuero, 2008).

La fraction ADF quant à elle, comprend la cellulose et la lignine. Lorsque l'on procède par différence entre NDF et ADF, il en résulte une estimation de la part d'hémicellulose de l'échantillon. Il s'agit en effet d'une estimation grossière puisque la valeur en NDF sous-estime la part d'hémicellulose et cumule les risques d'erreurs des deux fractions. Le résultat obtenu offre tout de même un aperçu approximatif du profil de la fibre (NRC, 2007; Ampuero, 2008). Par ailleurs, il est également possible de déterminer la part des lignines (ADL ; *acid-detergent lignin*) dans l'ADF avec un traitement à l'acide fort (Goering et Van Soest, 1970). Ainsi, à l'aide de ces deux procédures analytiques, un dosage approximation d'hémicellulose, de cellulose ainsi que de lignine d'un échantillon est envisageable (NRC, 2007).

Les résultats pour les fibres NDF, ADF et ADL correspondent à des analyses de laboratoire couramment réalisées. D'ailleurs, les différentes fractions des fibres obtenues avec ces méthodes cadrent relativement bien avec les définitions nutritionnelles et avec la composition chimique des hémicelluloses, celluloses et lignines.

#### ***1.2.2.4 Lignines***

Comme il a été mentionné précédemment, la lignine n'est pas un glucide, mais elle est incluse dans les fibres alimentaires en raison de son lien intrinsèque avec cette dernière. Plus précisément, les lignines sont un complexe de polymères aromatiques dont les trois monomères principaux sont l'alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique (Vanholme et al., 2010). Dans la fibre alimentaire, la fraction ligneuse assure une rigidité aux cellules en maintenant les polymères en place dans les complexes lignocellulosiques, ce qui la rend difficile à dégrader (Knudsen, 2014). Comme les lignines sont essentiellement indigestes pour les porcs et très peu dégradées par le microbiote, les aliments qui leur sont servis en contiennent généralement peu (Dreher, 1999).

La fraction ligneuse peut être dosée à partir de l'ADF de la fibre par dissolution de la cellulose avec un acide fort ou encore par traitement avec du permanganate (Ampuero, 2008). Il résulte de cette analyse la fraction ADL de la fibre alimentaire. Toutefois, cette fraction ne représente pas le total des lignines puisqu'elle exclut les lignines solubles dans l'acide, ce qui tend à sous-estimer la

fraction ligneuse de la fibre alimentaire (van Kuijk et al., 2016). Ainsi, on observe de nouveau une différence entre la composition chimique et les résultats d'analyses de laboratoire (*Figure 1.1*).

#### ***1.2.2.5 Polysaccharides non amylacés***

Les polysaccharides non amylacés, aussi connus sous le nom de NSP (*Nonstarch polysaccharides* en anglais) sont une autre fraction de la TDF couramment utilisée. Selon la perspective nutritionnelle, les NSP désignent tous les polysaccharides complexes des fibres alimentaires, excluant l'amidon, les oligosaccharides et les lignines (Englyst et Cummings, 1990 ; cité par NRC, 2007). Ainsi, les NSP comprennent les celluloses, hémicelluloses, gommages, pectines,  $\beta$ -glucanes et fructanes (Grieshop et al., 2000; Montagne et al., 2003). Conformément aux méthodes d'analyses actuelles, les résultats de NSP obtenus en laboratoire n'incluent qu'une partie variable des fructanes, ce qui tend à sous-estimer sa valeur (NRC, 2007).

Comme il en sera question ultérieurement, les propriétés physicochimiques des fibres jouent un rôle important sur le fonctionnement du système digestif. Ainsi, les NSP peuvent être divisés selon une de leurs principales propriétés physicochimiques, c'est-à-dire leur solubilité en solution aqueuse. De façon globale, les NSP solubles englobent les pectines,  $\beta$ -glucanes et mucilages et les hémicelluloses solubles (incluant la majorité des arabinoxylanes), alors que les NSP insolubles comprennent plutôt, les hémicelluloses insolubles, les celluloses et les lignines. Les NSP peuvent aussi être liés aux lignines et à de la subérine, ce qui leur procure une surface hydrophobe (Knudsen, 2014). Ces deux différentes fractions montrent des effets assez différents sur le système digestif ainsi que sur la digestibilité des constituants alimentaires et c'est pourquoi leur distinction est importante (Chutkan et al., 2012) (*section 1.3.3.1 Propriétés physicochimiques des fibres*). Par ailleurs, parmi tous les polysaccharides qui composent les NSP, l'un des principaux concernant cet ouvrage est les arabinoxylanes.

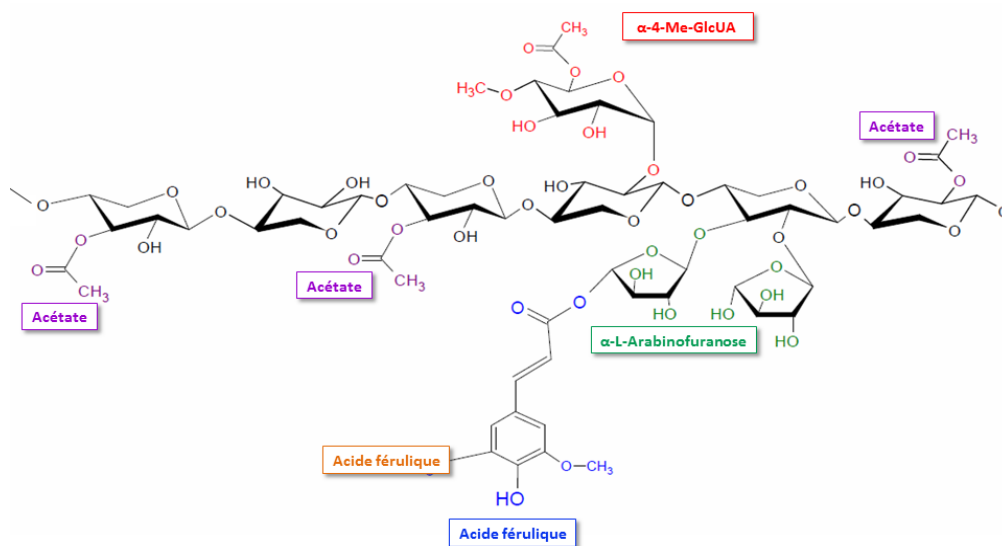
#### **Arabinoxylanes**

Les xylanes sont des polysaccharides structuraux majeurs dans les cellules végétales. Ils sont en fait des chaînes linéaires de xyloses jointes entre elles par des liens glycosidiques  $\beta(1-4)$  et combinées à différents types et nombre de groupements fonctionnels. Principal constituant de l'hémicellulose (Motta et al., 2013), le xylane interagit avec les trois principales composantes lignocellulosiques, c'est-à-dire l'hémicellulose, la cellulose et la lignine, afin d'assurer l'intégrité de la fibre des parois

cellulaires (Beg et al., 2001). Il est le deuxième polysaccharide le plus abondant dans la nature, ce qui représente environ le tiers de tout le carbone organique renouvelable sur la planète (Prade, 1995). Dû à leur présence importante dans les cellules végétales, les xylanes font partie des composantes majeures de l'alimentation des animaux d'élevage.

Les arabinoxylyanes, quant à eux, sont un complexe d'hétéropolysaccharides de xylanes et d'arabinoses hautement ramifié qui se retrouve sous différentes formes en fonction de l'espèce de plante et de sa maturité ainsi que du tissu végétal dont il est question (Kulkarni et al., 1999, cité par Motta et al., 2013). Divers groupements de substituants (ou groupement fonctionnel) sont attachés à la chaîne principale de xyloses (*Figure 1.2*). Ces groupements fonctionnels déterminent certains paramètres physicochimiques telles la solubilité, la viscosité, la conformation et la réactivité de la molécule d'arabinoxylane avec les constituants lignocellulosiques (Kulkarni et al., 1999; Bedford et Partridge, 2010). Par ailleurs, les arabinoxylyanes, tout comme les  $\beta$ -glucanes, sont des polymères qui contribuent souvent à la viscosité du bolus alimentaire dans le tractus digestif.

Compte tenu de cette hétérogénéité et de la complexité de la nature chimique des arabinoxylyanes, leur dégradation nécessite l'action hydrolytique de plusieurs enzymes aux différents modes d'action, propriétés physicochimiques et structures (Motta et al., 2013). Les arabinoxylyanes sont donc des molécules complexes qui sont assez résistantes à la dégradation (Feoli et al., 2006; Knudsen, 2014). Par ailleurs, les enzymes à effets xylanolytiques les plus souvent rencontrées sont souvent regroupées sous le terme de *xylanase*.



**Figure 1.2** : Exemple de structure générale d'un segment d'arabinoxylane contenant divers groupements fonctionnels (ChemSketch 12.0).

## 1.3 Digestion des constituants alimentaires

Le processus de digestion de l'espèce porcine se distingue de celui des polygastriques et même de celui des monogastriques d'espèces différentes. Avant de discuter de l'effet de la consommation de fibres chez le porc, il faut bien comprendre quelques définitions et concepts de base en lien avec le processus de digestion propre à l'espèce.

### 1.3.1 Concepts et définitions de la digestibilité

Tout d'abord, le système digestif peut être divisé en deux grandes parties, soit la partie supérieure qui comprend la bouche, l'estomac et le petit intestin, et la partie inférieure qui inclut les différentes sections du gros intestin (caecum, colon et rectum). Le concept de **digestibilité totale** se définit comme la différence entre ce qui est ingéré par l'animal et ce qui est excrété dans les fèces, le tout divisé par la quantité totale ingérée (Sauer et Ozimek, 1986). En multipliant cette valeur par 100, on obtient le pourcentage de digestibilité d'un composant nutritionnel donné. Parallèlement, la **digestibilité iléale** se définit comme la différence entre les composants alimentaires ingérés par l'animal et ceux qui sont retrouvés dans le digesta iléal, le tout divisé par la quantité totale ingérée (Stein, 2003). Par ces concepts, il est sous-entendu que la valeur de l'ingéré d'un composant nutritionnel moins ce qui reste à la fin de l'iléon mesure, du moins en apparence, ce qui est disparu du système digestif et donc, ce qui a été absorbé par l'animal.

L'intérêt de la valeur de la digestibilité iléale chez le porc réside dans le fait que la microflore présente dans le gros intestin, principal site de fermentation microbienne, métabolise pour son propre développement une partie des composants alimentaires non absorbés par l'animal, ce qui en transforme le profil retrouvé dans les fèces (Stein, 2003). Les modifications subies par les AA illustrent bien ce concept. Les protéines alimentaires sont majoritairement digérées dans l'intestin grêle en différents peptides et AA qui sont absorbés à ce niveau du système digestif, alors que leur absorption dans le gros intestin est pratiquement nulle. La microflore présente dans le gros intestin métabolise alors une partie de ces matières azotées pour son propre développement, les transformant ainsi en protéines microbiennes (principalement par transamination) qui, faute d'être absorbées par l'animal, seront retrouvées dans les fèces. Les microorganismes peuvent aussi désaminer certains AA ce qui résulte en la production et l'absorption d'ammoniac qui sera éventuellement excrété dans l'urine de l'animal (Wünsche et al., 1982 : Tirés de Stein, 2003). Ainsi,

la composition des matières azotées totales non digérées est altérée dans le gros intestin, ce qui invalide l'évaluation de leur digestibilité à partir du profil retrouvé dans les fèces, donc de la digestibilité du système digestif total (ATTD).

Par conséquent, en mesurant la part des composants nutritionnels restant à l'extrémité de l'intestin grêle, il est possible d'estimer avec plus de précision leur absorption dans l'organisme pour la partie supérieure du tube digestif et de mieux comprendre les changements induits par la microflore du tractus digestif inférieur. Il est alors question de la **digestibilité iléale apparente (DIA)** des composants alimentaires, comme le présente l'équation [ 1 ] (Stein et al., 2007).

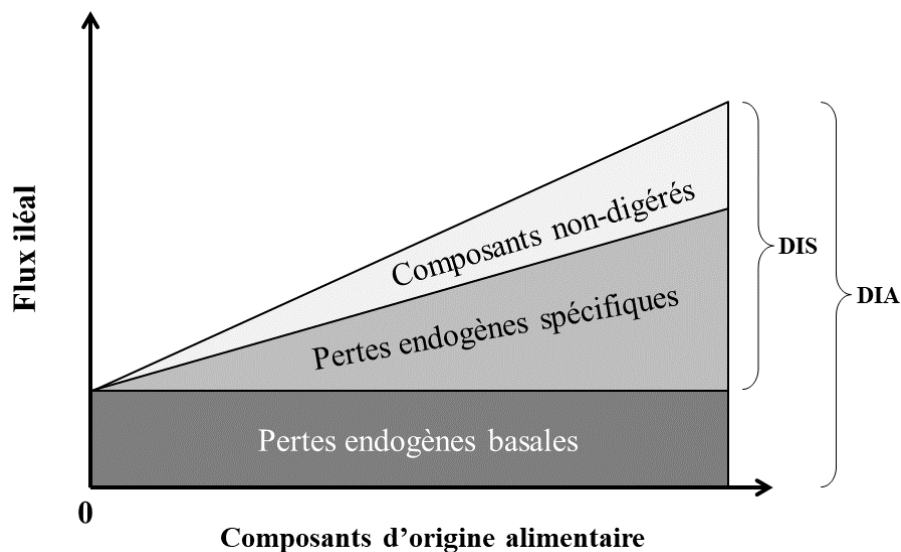
$$DIA, \% = \frac{\text{composants ingérés} - \text{composants iléon distal}}{\text{composants ingérés}} \times 100 \quad [ 1 ]$$

Ce principe n'est toutefois applicable que pour certains éléments dont l'essentiel de la digestion et absorption se déroule dans le petit intestin. La digestibilité totale demeure la valeur de digestibilité à privilégier pour certains vitamines et minéraux pour lesquels le gros intestin est un site important d'absorption, comme c'est le cas pour le sodium, le calcium, le potassium et le magnésium. Il s'agit donc de cas par cas selon le composant nutritionnel en question.

Par ailleurs, le profil en nutriments à l'extrémité du petit intestin n'est pas seulement le reflet de ce qui a été absorbé par l'animal, il comprend aussi les pertes d'origine endogène. En effet, le processus de digestion nécessite la sécrétion de produits, entre autres, d'enzymes, de mucus et de cellules desquamées, dont les particules se mêlent à celles d'origine alimentaire dans l'intestin. D'ailleurs, même si les protéines microbiennes ne sont pas des protéines endogènes à proprement dit, elles entrent tout de même dans cette catégorie (Stein et al., 2007). Les pertes endogènes, tout comme les composants d'origine alimentaire, sont soumises aux processus de digestion et d'absorption. Bien qu'il soit estimé que 70 à 80 % des pertes endogènes en AA soient hydrolysées et réabsorbées par le petit intestin (Fan et Sauer, 2002; Krawielitzki et al., 1994 : cité par Stein et Nyachoti, 2003), les pertes de nutriments provenant de cette source sont non négligeables (Le Floch et Sève, 2000). Afin d'obtenir une valeur plus représentative de la véritable digestibilité des aliments, les quantités des différents composants alimentaires présents à la fin de l'iléon doivent être divisées en fraction alimentaire non digérée et en fraction d'origine endogène.

Le contenu d'origine endogène peut à son tour être subdivisé en pertes endogènes basales et pertes endogènes spécifiques. Tout d'abord, les **pertes endogènes basales** représentent les nutriments qui

seront toujours perdus, peu importe les caractéristiques de l'aliment (Stein et al., 2007). Il s'agit d'un processus continu qui persiste même lors des périodes de jeûne (Le Floch et Sève, 2000) et qui est influencé par l'animal (poids vifs, le statut protéique corporel, etc.) (Stein et Nyachoti, 2003; Stein et al., 2007). Lorsque l'on soustrait les pertes endogènes basales à la fraction totale collectée à la fin de l'iléon, on obtient alors le coefficient de **digestibilité iléale standardisée (DIS)**. Pour ce qui est des **pertes endogènes spécifiques**, elles sont plutôt modulées par la composition de la diète, ses valeurs nutritionnelles et le niveau d'ingestion. Entre autres, le taux de fibres alimentaires ainsi que le niveau de facteurs antinutritionnels sont responsables d'une grande part des pertes endogènes spécifiques (Leterme et al., 1997; Stein et Nyachoti, 2003; Stein et al., 2007). Ainsi, la DIA ne distingue pas les pertes endogènes basales des pertes endogènes spécifiques et donc, tous les nutriments qui sont collectés à la sortie de l'iléon sont considérés comme des matières non digérées. À l'inverse, la SID soustrait les pertes endogènes basales des pertes totales de nutriments collectées à la fin de l'iléon (*Figure 1.3*).



**Figure 1.3** : Représentation des différentes sources de nutriments utilisées pour calculer la digestibilité iléale standardisée et de la digestibilité iléale apparente (adapté de Stein et al., 2007).

Comme les pertes endogènes basales sont fonction de l'animal et donc variable dans le temps entre les individus, il peut être assez complexe de les déterminer avec précision. C'est entre autres pour cette raison que la valeur de la DIA est la plus souvent utilisée, bien que la DIS serait à préconiser (Stein et al., 2007). D'ailleurs, ces méthodes comportent un défi technique assez important chez les animaux vivants, c'est-à-dire la collecte de digesta iléal pour laquelle plusieurs techniques ont été développées chez le porc.

### ***1.3.1.1 Méthode de collecte de digesta iléal***

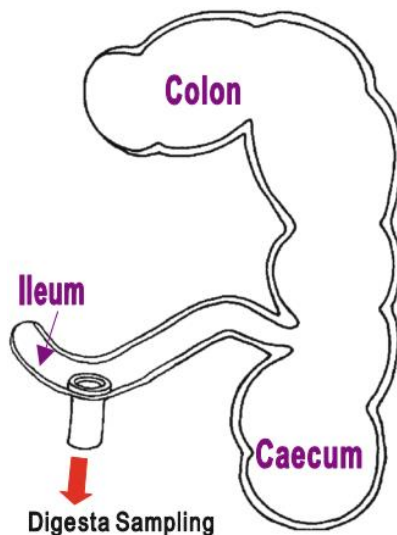
Il existe deux méthodes principales permettant de mesurer la digestibilité iléale chez le porc vivant. D'abord, il est possible de procéder par une collecte totale du flux iléal chez l'animal ayant subi une anastomose iléo-rectale ou encore, par une collecte totale ou partielle du digesta iléal chez les animaux porteurs d'une canule. Lorsqu'il s'agit d'une collecte partielle de digesta, l'utilisation d'un marqueur indigeste est nécessaire. Ces méthodes sont préférables à l'euthanasie, car elles réduisent le nombre d'animaux nécessaires à l'étude en permettant d'obtenir plusieurs observations sur le même animal, réduisant du même coup la variation due aux individus (Wubben et al., 2001).

La première méthode, l'anastomose iléo-rectale, consiste en l'abouchement de l'iléon terminal avec le rectum, de façon à contourner le caecum et le colon (AFZ et al., 2000; Yin et al., 2000a; Vulgaris Médical, 2015). Pour l'anastomose iléo-rectale, l'utilisation d'un marqueur alimentaire indigeste n'est pas nécessaire puisque la totalité du matériel iléal, expulsé par le rectum, peut facilement être recueillie (Yin et al., 2000a). Toutefois, le fait que le bol alimentaire soit détourné du colon cause une situation non métabolique chez l'animal et peut créer des problèmes pour l'absorption de l'eau et de certains éléments (Yin et al., 2000a; Stein, 2003). De plus, les pertes endogènes basales d'AA après l'intervention chirurgicale pour les porcs ayant subi une anastomose iléo-rectale sont significativement plus importantes (Hess et Sève, 1999) et ces animaux obtiennent un gain moyen quotidien (GMQ) inférieur aux porcs intacts (Köhler et al., 1992 a et b). Par le fait même, l'utilisation de cette méthode exclut la possibilité d'obtenir simultanément des valeurs de la DIA et de l'ATTD.

La seconde méthode permettant de mesurer la digestibilité iléale consiste en une collecte totale ou partielle d'un échantillon de digesta iléal chez les porcs canulés, suivi de la détermination d'un marqueur indigeste (AFZ et al., 2000). Il existe plusieurs types de canules qui peuvent être installées à plusieurs niveaux du tractus digestif. Les principaux types de canules utilisées chez le porc sont la canule de type « re-rentrante », décrite à l'origine par Cunningham et al. (1962), la canule PVTC (*post-valvule iléo-caecale*) (Köhler et al., 1990; van Leeuwen et al., 1991; Yin et al., 2000a) ainsi que la canule simple en T. Cette dernière est la méthode la plus fréquemment utilisée actuellement chez le porc (Stein, 2003). La canule en T est insérée dans l'iléon terminal à environ 10-15 cm de la valvule iléo-caecale (Stein et al., 1998; Wubben et al., 2001; Stein, 2003). En comparaison aux autres méthodes de canulation, celle-ci est peu invasive puisqu'elle conserve toutes les parties du système digestif et ne nécessite pas la coupe complète de l'intestin, laissant



ainsi le complexe myoélectrique intacte (Sauer et Ozimek, 1986; Yin et al., 2000a; Stein, 2003) (Figure 1.4). Toutefois, ce type de canule peut occasionner un échantillonnage inégal entre les fractions liquide et solide du digesta, cette dernière étant plus difficile à collecter.



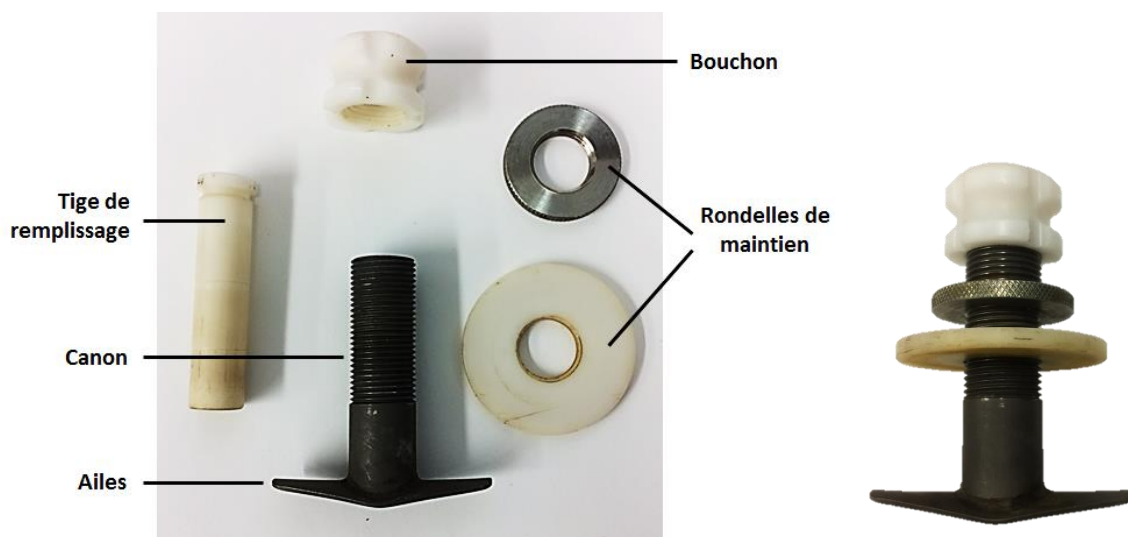
**Figure 1.4 :** Position de la canule iléale simple en T.

Springer Nutritional and Physiological Functions of Amino Acids in Pigs, Chapter 17 - Determination of protein digestibility in growing pig, 2013, pages 251-271, Moughan, Paul J. and Warren Miner-Williams, © Springer-Verlag Wien 2013. With permission of Springer.

La canule iléale simple en T est formée d'un canon qui permet la communication entre la lumière intestinale et l'extérieur de l'abdomen. L'extrémité interne est maintenue à l'intérieur de l'iléon grâce aux ailes de la canule. Une rondelle de maintien (ou deux) est vissée sur le pourtour extérieur du canon de manière à maintenir les ailes appuyées sur les parois internes de l'abdomen et ainsi, conserver l'instrument en place. Enfin, un bouchon à l'extrémité externe de la canule sert à refermer le tube entre les collectes de digesta (Figure 1.5).

Lorsque la canule en T est bien installée, les porcs ne développent pas de problème de santé et leur l'appétit, leur activité intestinale ainsi que leurs taux de croissance demeurent inchangés. L'instrument peut être conservé pour toute la durée de croissance du porc et même durant plusieurs cycles de reproduction chez la truie (Jorgensen et al., 1985; Stein et al., 1998; Stein, 2003; Moughan et Miner-Williams, 2013). C'est pour tous ces avantages que la canule en T a été choisie

pour l'essai de digestibilité présenté au **Chapitre 2**. Le protocole chirurgical de la pose de canule est présenté à l'*ANNEXE I – Procédure chirurgicale de canulation iléale*.



**Figure 1.5** : Modèle de canule en T utilisé dans le **Chapitre 2**.

### 1.3.1.2 Marqueurs indigestes

Lors de l'emploi d'une canule simple en T, il est impossible de récupérer la totalité du flux iléal ce qui rend nécessaire l'utilisation d'un marqueur indigeste. Les marqueurs indigestes les plus couramment utilisés sont l'oxyde de chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) et le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) (Yin et al., 2000a; Stein et al., 2007). Comme la valeur de la DIA des composants nutritionnels est déterminée sur la présomption d'une récupération complète du marqueur, le choix de celui-ci devient un élément important pour la validité des résultats (Stein et al., 2007). Le calcul de la DIA des nutriments se fait selon l'équation [ 2 ] suivante :

$$\text{DIA nutriment} = 1 - \{ (\% \text{Marqueur}_{\text{aliment}} \times \% \text{Nutriment}_{\text{Digesta}}) \div (\% \text{Marqueur}_{\text{Digesta}} \times \% \text{Nutriment}_{\text{Aliment}}) \}$$

Bien que l'oxyde de chrome et le dioxyde de titane soient indigestes et non absorbés dans le tractus digestif, il est tout de même difficile, avec les méthodes de dosage actuelles, d'en récupérer la totalité, et ce, même pour une méthode de collecte totale du flux iléal. L'une des raisons qui expliquent les résultats variables de la récupération des marqueurs indigestes est le problème

d'analyse découlant des interférences avec d'autres minéraux présents dans l'échantillon (Sahaz et Gilbreathg, 1991). Parallèlement, le niveau de récupération de ces mêmes marqueurs diminue de manière importante avec l'augmentation du taux de fibres dans les échantillons (Köhler et al., 1990; Yin et al., 2000a). Ainsi, les valeurs de digestibilité iléale obtenues avec des aliments riches en fibres sont quelque peu sous-estimées en raison de l'interaction lors du dosage ainsi que par la séparation inégale du marqueur entre les phases solide et liquide du digesta fibreux. De plus, l'utilisation du  $TiO_2$  est à privilégier au  $Cr_2O_3$  dont le taux de récupération est plus faible (Mroz et al., 1996; Yin et al., 2000a).

### **1.3.2 Dégradation des fibres alimentaires dans le tractus digestif**

Comme mentionné dans la définition de l'AACC (2001), les fibres alimentaires ne sont pas digestibles par les enzymes endogènes des animaux monogastriques. Toutefois, le fait que les enzymes endogènes soient inefficaces dans l'altération des matériaux fibreux n'exclut pas leur dégradation par d'autres mécanismes. En effet, les matériaux fibreux non lignifiés demeurent sensibles à la dégradation et la fermentation par les microorganismes se trouvant dans le tractus digestif et représentent une source d'énergie et de nutriments non négligeable pour l'animal. La fermentation des fibres est un processus complexe qui est influencé par l'animal, sa microflore ainsi que les interactions entre eux.

Les composants nutritionnels les plus disponibles, c'est-à-dire les protéines, les glucides simples, les vitamines et les minéraux, sont en grande partie absorbés par le petit intestin. Les composants alimentaires ainsi que les sécrétions endogènes résiduelles qui n'y sont pas digérés ou réabsorbés, principalement les fibres alimentaires, les lipides saturés et les protéines insolubles, se retrouvent alors au niveau du gros intestin où ils sont fermentés par les microorganismes. Les principaux métabolites issus de la fermentation sont les acides gras volatils (AGV), notamment l'acétate, le propionate et le butyrate, ainsi que certains gaz, tels le méthane, le dioxyde de carbone et l'hydrogène (Wenk, 2001).

Le profil en AGV retrouvé dans le tractus digestif dépend principalement du niveau de fibres et de leur composition, mais l'acétate est généralement le plus abondant avec plus de la moitié des AGV totaux (Jha et Berrococo, 2015). Au niveau inférieur du système digestif, les AGV à courtes chaînes qui sont libérés peuvent être absorbés par diffusion passive et contribuer à l'apport énergétique de

l'animal (Wenk, 2001) ainsi qu'au maintien de sa santé (Grieshop et al., 2000). Il est considéré qu'environ 90 % des AGV produits sont absorbés par le tractus digestif, alors que le restant est utilisé pour le métabolisme du microbiote ou encore excrété dans les fèces (Jha et Berrococo, 2015). Selon le cas, les AGV peuvent représenter entre 5 et 15 % des besoins d'entretien en énergie chez le porc en croissance et jusqu'à 30 % chez la truie en gestation (Grieshop et al., 2001; Jha et Berrococo, 2015). Cependant, bien qu'ils soient une source d'énergie pour l'animal, la production de méthane, d'hydrogène et de chaleur découlant de la fermentation représente des pertes importantes d'énergie comparativement à la digestion de type hydrolytique des enzymes digestives (Noblet et al., 1994; Grieshop et al., 2000). Les pertes en gaz, principalement modulées par la quantité et le profil des fibres alimentaires, sont évaluées à environ 0,1 à 3,0 % de l'énergie métabolisable de la ration (Shi et Noblet, 1993). Ainsi, on considère la digestion par les enzymes endogènes plus avantageuse pour le bilan énergétique et nutritif de l'animal que la fermentation microbienne.

Les propriétés physicochimiques des différents types de fibres alimentaires peuvent induire des changements dans l'environnement des différentes sections du tube digestif et, par conséquent, moduler la croissance de la microflore et leur efficacité relative (Jha et Berrococo, 2015). Les types de microorganismes présents ainsi que leur croissance dépendent de plusieurs facteurs. Tout d'abord, le profil du microbiote est influencé par le type et la quantité de substrat, ainsi que la fréquence à laquelle il est ingéré. Le substrat disponible est fonction, entre autres, du nombre de repas servis à l'animal, de sa composition et des traitements technologiques qui lui sont appliqués (Wenk, 2001; Kerr et Shurson, 2013). Ainsi, l'augmentation de la fraction fibreuse de l'aliment augmente généralement la croissance microbienne du tube digestif, puisqu'elle fournit un substrat de qualité en quantité (Wenk, 2001). Comme le microbiote a une bonne capacité d'adaptation au matériel fibreux à court (quelques jours), mais qui peut se prolonger à moyen terme (jusqu'à 5 semaines). La digestibilité de l'énergie d'un aliment fibreux peut donc évoluer dans le temps, puisque la fermentation microbienne devient plus efficace et engendre une plus grande production d'AGV et absorption d'énergie provenant des fibres (Castillo et al., 2007; Urriola et Stein, 2012).

Par ailleurs, même si la fermentation des fibres a lieu de 48 à 95 % au niveau du gros intestin chez le porc, l'activité de fermentation des fibres alimentaires est aussi présente au niveau du petit intestin et de l'estomac (Jha et al., 2010; Urriola et Stein, 2010). Toutefois, comme les temps de séjour des aliments à l'intérieur de l'estomac (<1 à 6 h) et du petit intestin (<1 à 4 h) sont relativement courts en comparaison aux segments du gros intestin (20 à 38 h), le développement des

microorganismes y est limité (Low et Zebrowska, 1989; Wilfart et al., 2007a). Somme toute, la microflore établie dans le petit intestin peut tout de même permettre une certaine dégradation de la fibre et ainsi, libérer une quantité variable de composants nutritionnels (Jha et Berrococo, 2015). À cet égard, dans des conditions normales et courantes chez le porc en croissance, la digestibilité des NSP est très variable et se situe environ entre 3 et 32 % à la fin de l'iléon (Kerr et Shurson, 2013; Lærke et al., 2015; Pedersen et al., 2015b). Ce sont principalement les constituants solubles des NSP, notamment des  $\beta$ -glucanes, des arabinoxyanes et des pectines, qui sont dégradés à ce niveau puisqu'ils sont plus rapidement fermentescibles que la fraction insoluble. Cette dernière est dégradée plus lentement dans la partie terminale du tractus digestif (Jha et Berrococo, 2015).

D'autre part, la digestion et l'absorption des nutriments sont influencées par plusieurs facteurs qui interagissent les uns avec les autres. Ainsi, la digestibilité varie en fonction des caractéristiques physicochimiques de l'aliment, des traitements technologiques qui y sont appliqués, comme le cubage (Rosenfelder et al., 2013) et de la présence d'additifs (enzymes, antioxydants, stabilisateurs, conservateurs, etc.) (Mireles-Arriaga et al., 2015). De plus, les caractéristiques propres aux animaux tels le poids vif, le sexe, la génétique, l'âge, le statut physiologique et pathologique ainsi que leur niveau d'alimentation ont aussi un impact considérable sur la digestibilité (Wilfart et al., 2006).

L'âge de l'animal est un facteur d'importance pour la dégradation des fibres puisqu'elle évolue dans le temps. En effet, il a été montré que les fibres alimentaires sont plus digestibles chez la truie adulte et qu'elles apportent en moyenne 0,6 MJ/kg de matière sèche de plus à l'animal comparativement au porc à l'engraissement (Diebold et al., 2004; Emiola et al., 2009). Le système digestif des porcs plus âgés comprend un système enzymatique plus mature et une plus grande population de microorganismes apte à hydrolyser les fibres, particulièrement dans le gros intestin (Diebold et al., 2004; Olukosi et al., 2007; Jha et Berrococo, 2015). Le même principe est applicable chez le porcelet qui a un système digestif immature comparativement au porc en finition. Selon Le Goff et al. (2002), la faible digestibilité des nutriments et de la fraction fibreuse de l'aliment proviendrait notamment d'un temps de transit intestinal accéléré chez le porc en croissance comparativement aux individus plus âgés. Ainsi, les effets négatifs de haut niveau de fibres dans l'alimentation des jeunes porcs seraient plus importants que chez les individus plus lourds (Azain, 2000; Diebold et al., 2004; Olukosi et al., 2007).

D'autre part, il est également reconnu que la capacité de dégradation des fibres diffère en fonction de la génétique des animaux (Urriola et Stein, 2012). Par exemple, les races porcines modernes ont

une capacité restreinte à digérer la fibre, comparativement à des races plus indigènes comme le Alentejano du Portugal (Freire et al., 1998) et le Mong-Cai du Viêt Nam (Len et al., 2007). Évidemment, il existe aussi des variations entre les individus d'une même race puisque chacun n'a pas la même habileté à utiliser tous les types de fibres (Chutkan et al., 2012).

Le processus de digestion est un phénomène complexe pour lequel l'animal et son microbiote ont chacun un rôle important à jouer. Par ailleurs, un changement dans l'alimentation de l'animal a une influence directe sur les microorganismes qu'il abrite. Ces mêmes changements peuvent avoir des effets au niveau digestif et métabolique sans que la digestibilité totale ne semble affectée (Wilfart et al., 2006). Ce phénomène peut se produire lors d'un changement abrupt du niveau de fibres alimentaires servi à un animal.

### **1.3.3 Propriétés des fibres alimentaires**

Les fibres alimentaires ont des impacts physiologiques bénéfiques tels un effet laxatif ou encore une diminution du cholestérol et du glucose sanguin chez l'humain (AACC, 2001). Toutefois, en production porcine, une présence accrue de fibres n'apporte pas que des effets favorables. Tout d'abord, la fibre alimentaire a généralement un faible contenu en énergie métabolisable pour les monogastriques, ce qui induit un effet de dilution de l'énergie de l'aliment (Wenk, 2001). En effet, l'énergie digestible d'une ration est négativement et linéairement corrélée avec le niveau de fibre. Selon Le Goff et Noblet (2001), une augmentation de 1 % de la fibre NDF à l'aliment correspond à une réduction de 0,9 % de la digestibilité de l'énergie. Cette diminution de la digestibilité et de la concentration énergétique n'est pas souhaitable en production porcine puisque la consommation volontaire chez le jeune porc est parfois un élément limitant la croissance (Ellis et Augspurger, 2000). Cependant, il est possible de partiellement contrer ce problème lors de la formulation de l'aliment en ajoutant des ingrédients riches en énergie pour compenser l'effet de dilution énergétique des fibres. Néanmoins, d'autres effets néfastes des fibres sur la disponibilité des nutriments peuvent survenir selon le niveau et les propriétés physicochimiques des fibres en question.

### ***1.3.3.1 Propriétés physicochimiques des fibres***

Les avantages et inconvénients de la consommation de fibres reposent en grande partie sur leurs propriétés physicochimiques, principalement leur solubilité en solution aqueuse et leur viscosité, qui est la mesure de la résistance d'un liquide à l'écoulement (Chutkan et al., 2012). L'unité de mesure de la viscosité est le Pascal seconde ou Pa·s. Un fluide qui a une viscosité faible s'écoule rapidement, par exemple l'eau (environ 1 Pa·s à température pièce), alors qu'au contraire, un fluide qui a une viscosité élevée s'écoule lentement, par exemple le miel (environ 10 Pa·s) (Libois, 1999).

Les fibres alimentaires peuvent être classées en deux grandes catégories fonctionnelles majeures, c'est-à-dire les fibres visqueuses et non visqueuses. La viscosité est le plus souvent causée par le contenu en NSP solubles, principalement les arabinoxylanes, pectines, mucilages et  $\beta$ -glucanes solubles, qui sont présents dans les parois cellulaires des grains et qui forment des gels visqueux au contact de l'eau (Dervilly et al., 2002; Barrera et al., 2004; Diebold et al., 2004; Nortey et al., 2008; Bedford et Partridge, 2010). Par ailleurs, la viscosité des polymères en solution est directement reliée à leur concentration ainsi qu'à la structure fondamentale des molécules, c'est-à-dire la conformation, le poids moléculaire et la distribution de ce poids (Knudsen, 2014). Selon leur contenu en NSP solubles, les diverses céréales peuvent également être classées selon leur viscosité. Le blé, l'orge, le seigle, l'avoine et le triticale sont considérés comme des céréales visqueuses, alors que le maïs, le sorgho, le millet et le riz sont dans la catégorie non visqueuse (Choct, 2006). Comparativement aux céréales non visqueuses, les céréales visqueuses (et certains de leurs coproduits) montrent plus d'effets antinutritionnels associés à l'augmentation de la viscosité du bolus alimentaire au niveau du petit intestin.

Cette viscosité du bolus alimentaire limite le déplacement des composants alimentaires et la diffusion des enzymes digestives dans le digesta, ce qui diminue l'efficacité du processus de digestion (Bedford et Classen, 1992; Bedford, 2002). De plus, l'augmentation de la viscosité du bolus forme une couche aqueuse non remuée à la surface de l'épithélium intestinal, laquelle crée une barrière physique qui réduit l'absorption des nutriments (Johansen et al., 1997; Wenk, 2001). Ainsi, il est établi que l'augmentation de la viscosité du contenu intestinal est directement liée à une diminution de la digestibilité des composants alimentaires chez la majorité des monogastriques (Choct et Annison, 1992; Beg et al., 2001; Barrera et al., 2004).

Toutefois, l'augmentation du niveau de viscosité du digesta a des effets différents selon les espèces de monogastriques. Chez le poulet, il est reconnu qu'une viscosité élevée du digesta a un effet néfaste important sur la digestibilité des aliments, les performances de croissances, la santé des oiseaux ainsi que la diffusion des nutriments au travers de l'épithélium intestinal (Fengler et Marquardt, 1988; Bedford et Classen, 1992; Cowieson et al., 2005). Les effets néfastes d'une haute viscosité du digesta chez les espèces aviaires sont particulièrement marqués en raison de la quantité restreinte d'eau dans le tractus digestif et au temps de transit intestinal plus court comparativement aux autres monogastriques types tel le porc. En effet, pour un même aliment, la teneur en eau naturellement présente dans le digesta des porcs (80-84% d'eau) est environ 10 unités de pourcentage plus élevées comparativement au digesta de poulet (93-90% d'eau), ce qui tend à diluer l'effet de la viscosité intestinale chez le porc (Bedford et al., 1991; Bedford et Schulze, 1998; Danicke et al., 1999 : cité par Partridge, 2000; Montagne et al., 2003). On en revient donc au concept de Kundsén et al. (2014) selon lequel la viscosité des polymères en solution est directement reliée à leur concentration. De plus, le taux de passage du digesta chez le poulet est plus rapide que chez le porc, approximativement 2-4 h comparativement à 12-24 h respectivement (Entringer et al. 1975; Mateos et al. 1982; Johansen et al. 1993 : Cités de Bedford et Schulze, 1998). La digestibilité des composants alimentaires est fortement reliée au temps de rétention du digesta dans les différents segments du système digestif. En effet, plus le temps de transit est long, meilleur est le contact entre le substrat et les enzymes digestives et plus la digestion des composants et l'absorption des nutriments sont efficaces (Metzler et Mosenthin, 2008). De ce fait, il en découle une moins grande sensibilité des porcs à une consommation élevée de NSP comparativement aux espèces aviaires.

D'ailleurs, de petits changements dans le niveau de viscosité du digesta peuvent avoir une influence importante sur les effets antinutritionnels engendrés (Fengler et Marquardt, 1988; Bedford, 2002). À titre d'exemple, bien que ce soit dans un système *in vitro*, Bedford (2002) a montré que la diffusion de protéine (la bradykinine dans ce cas-ci) peut diminuer de 25 % lorsque la viscosité du substrat augmente de seulement 4 mPa·s. De plus, la diffusion pourrait être amoindrie davantage pour des nutriments aux poids moléculaires plus élevés, comme c'est le cas pour certains lipides saturés.

D'autre part, les différents polysaccharides visqueux, par exemple les  $\beta$ -glucanes et les arabinoxylanes, réagissent différemment dans le tractus digestif. Les  $\beta$ -glucanes ont un poids moléculaire plus important que les arabinoxylanes, ce qui leur confère une viscosité intrinsèque plus grande en solution. Toutefois, comme les  $\beta$ -glucanes sont plus sensibles à l'hydrolyse enzymatique



et aux traitements de chaleur (réduction du poids moléculaire) que les arabinoxylanes, la viscosité du substrat diminue plus rapidement (Kasprzak et al., 2012). De ce fait, les  $\beta$ -glucanes ont un impact négatif moindre sur la digestibilité en comparaison aux arabinoxylanes (Knudsen, 2014).

Ainsi, connaître le niveau des fibres alimentaires totales dans un aliment n'est pas suffisant puisque leurs propriétés physicochimiques modulent leurs effets sur la physiologie du système digestif, le taux de passage et la DIA des nutriments et de l'énergie (Chutkan et al., 2012); ces aspects seront traités dans les sections suivantes.

### ***1.3.3.2 Impact des fibres sur la physiologie du système digestif***

Tout d'abord, l'augmentation de la teneur en fibres d'un aliment induit une augmentation du volume du chyme, principalement due à leur faible dégradation et à leur forte capacité de rétention d'eau (Low, 1989; Wenk, 2001; Wilfart et al., 2006). Lorsque ce matériel volumineux se déplace le long du tractus digestif, il cause un effet abrasif sur la muqueuse intestinale, ce qui stimule le développement du système digestif (Mariscal-Landín et al., 1995; Le Floch et Sève, 2000). Plus précisément, la consommation d'aliments fibreux peut augmenter la taille et la longueur des intestins, du caecum et du colon et ainsi que le poids total des viscères (Jin et al., 1994; Jorgensen et al., 1996). Il est également possible d'observer une modification de la morphologie de l'épithélium intestinal, comme la largeur des villosités et la profondeur des cryptes qui s'accroissent (Jin et al., 1994), suivi d'une amélioration de l'absorption d'eau et des vitamines et minéraux, principalement au niveau inférieur du tractus (Montagne et al., 2003). Toutefois, l'augmentation du poids total des viscères causée par les fibres peut faire diminuer le rendement de la carcasse à l'abattoir de 0,6 à 2,0 points de pourcentage (Libao-Mercado et al., 2004 : cité par Stein et De Lange, 2008).

D'autre part, l'effet abrasif des fibres sur l'épithélium peut affecter l'intégrité de la membrane et y causer quelques lésions superficielles qui stimulent la sécrétion endogène de mucus (Low, 1989; Jin et al., 1994; Souffrant, 2001; Montagne et al., 2003; Ao et al., 2010) et accentuent le renouvellement des cellules épithéliales (Mariscal-Landín et al., 1995; Oryschak et al., 2002; Wilfart et al., 2006; Kerr et Shurson, 2013; Jha et Berrocso, 2015). L'augmentation du volume d'eau dans le chyme stimule aussi la sécrétion d'électrolytes, notamment le sodium, potassium et bicarbonate, afin d'équilibrer les concentrations ioniques de part et d'autre de l'épithélium (Low, 1989; Wilfart et al., 2006). De plus, l'augmentation de la consommation de fibres accentue les sécrétions digestives, tels la salive, les sucs gastriques, la bile, le liquide pancréatique et autres

sécrétions intestinales (Low, 1989; Grieshop et al., 2001; Wenk, 2001; Wilfart et al., 2006; Kerr et Shurson, 2013). L'augmentation de toutes ces sécrétions (mucus, électrolytes, enzymes digestives et autres sécrétions), jumelée au renouvellement cellulaire accéléré, se traduit par une perte endogène plus importante en certains nutriments dans le tube digestif, principalement des acides aminés.

En d'autres termes, l'augmentation de la portion fibreuse des aliments implique des changements au niveau du tractus digestif chez le porc, notamment la taille des viscères, la morphologie de l'épithélium intestinal, la sécrétion de fluides endogènes et le renouvellement des cellules épithéliales. Tous ces changements affectent indirectement à la hausse les besoins d'entretien de l'animal pour le développement et le maintien de son système digestif (Jin et al., 1994; Jorgensen et al., 1996; Grieshop et al., 2000; Wenk, 2001).

### ***1.3.3.3 Impact des fibres sur le taux de passage***

L'ingestion d'aliments riches en fibres offre rapidement à l'animal une sensation de satiété, principalement puisque le plus grand volume du chyme cause une importante élongation des parois de l'estomac (Wenk, 2001; Kerr et Shurson, 2013). De plus, les NSP solubles, à cause de leur propriété de viscosité, ralentissent la vidange gastrique (estomac) et procure ainsi une sensation de satiété plus longtemps à l'animal, ce qui peut faire diminuer sa consommation. Les fibres insolubles, quant à elles, affectent assez peu la satiété (Wenk, 2001). L'ajout d'ingrédients à hauts niveaux de fibres solubles, comme le gru de blé, dans l'alimentation des truies gestantes est d'ailleurs une technique employée pour augmenter la sensation de satiété et réduire le stress du rationnement alimentaire (Sapkota et al., 2016). Inversement, chez le jeune porc, une diète faible en fibres et avec une haute densité énergétique est préférable puisque cela peut augmenter l'ingestion de nutriments requis pour la croissance. Toutefois, en théorie, les porcs ajustent leur niveau de consommation alimentaire de façon à obtenir la quantité nécessaire d'énergie digestible ingérée (Roy et al., 2000).

Dans un autre ordre d'idée, l'augmentation de l'encombrement stérique du tube digestif par les fibres alimentaires stimule la muqueuse intestinale, induit le péristaltisme et augmente la vitesse de transit (Jorgensen et al., 1996; Wenk, 2001; Wilfart et al., 2007a; Chutkan et al., 2012). L'amplitude de la stimulation est reliée au niveau de fibre dans l'aliment, mais dépend également de la taille et de la forme des particules, les particules grossières offrent un meilleur effet stimulant en comparaison aux particules fines (Chutkan et al., 2012; Kerr et Shurson, 2013). D'ailleurs,

l'augmentation de la portion fibreuse de l'aliment est une technique largement employée, chez la truie gestante, afin de contrer la constipation (Oliviero et al., 2009).

Outre le niveau de fibres dans l'alimentation et la taille des particules, l'effet laxatif peut être modulé par la propriété de viscosité des fibres. Les NSP solubles comme les NSP insolubles procurent tous deux un effet stimulant, mais de manières différentes. Tout d'abord, les fibres solubles ont une plus forte capacité de rétention d'eau et d'adsorption de nutriments que les insolubles, ce qui tend à augmenter le temps de rétention au niveau du colon (Knabe et al., 1989; Schulze et al., 1995; Jha et Berrocoso, 2015). Toutefois, comme les polysaccharides solubles réduisent le temps de vidange gastrique et duodéal, le temps de transit total s'en trouve généralement diminué (Wenk, 2001; Kerr et Shurson, 2013). Malgré leur plus faible capacité de rétention d'eau, les fibres insolubles ont un effet laxatif bénéfique en accentuant la masse des matières fécales, ce qui améliore leur circulation dans le tube digestif, augmente les sécrétions de mucus et la fréquence de défécation (Jorgensen et al., 1996; Wilfart et al., 2007b; Chutkan et al., 2012). Ainsi, les fibres solubles agissent principalement sur la vitesse de transit au niveau supérieur du tractus digestif alors que les fibres insolubles influencent plutôt le niveau inférieur. Par ailleurs, la majorité des fibres des aliments pour porcs est insoluble (*Tableau 1.1*). Ainsi, lors de l'augmentation du taux de fibres alimentaires, on observe généralement un temps de transit inchangé ou légèrement à la hausse dans la partie supérieure du tube digestif et à la baisse dans la partie terminale (Potkins et al., 1991; Schulze et al., 1995; Wenk, 2001; Wilfart et al., 2007a).

En d'autres termes, l'augmentation de la portion fibreuse de l'alimentation chez le porc offre généralement une sensation de satiété rapide et augmente peu la vitesse totale du transit, ce qui peut diminuer la digestion des composants et l'absorption de nutriments. De plus, selon certaines hypothèses, la diminution de la viscosité augmenterait la vitesse de passage, ce qui aurait comme effet d'augmenter la CMJ des animaux (Zijlstra et al., 2004). Comme la consommation volontaire chez le porc peut être un élément limitant à la croissance, par exemple lorsque l'énergie de la diète est diluée ou lorsqu'il y a encombrement stérique du tube digestif, une diminution de la viscosité dans le tractus digestif pourrait être une bonne stratégie pour faire augmenter la consommation (Ellis et Augspurger, 2000). Pour ce faire, l'emploi de carbohydrases exogènes pour des aliments riches en fibres est un moyen intéressant à considérer. Ce paramètre sera d'ailleurs étudié plus en profondeur à la section *1.4 Enzymes exogènes : Xylanases*.

#### ***1.3.3.4 Impact des fibres sur la digestibilité des acides aminés***

Les protéines alimentaires sont majoritairement digérées dans l'intestin grêle en différents peptides et AA qui y sont absorbés. L'absorption des AA est assez limitée dans le gros intestin et leur composition est altérée par la microflore présente ce qui invalide l'évaluation de digestibilité des AA à partir du profil retrouvé dans les fèces. Par conséquent, il devient essentiel de comprendre ce qui se passe à chacun des niveaux du tractus digestif afin d'estimer avec précision l'absorption des AA dans l'organisme de l'animal.

Le profil en acides aminés à l'extrémité du petit intestin n'est pas seulement le reflet de l'absorption des AA alimentaires, il comprend aussi les protéines d'origine endogène qui proviennent de la sécrétion d'enzymes, de mucus ainsi de cellules desquamées. Par ailleurs, les protéines d'origine microbienne, même si elles ne sont pas des protéines endogènes à proprement dit, sont comptabilisé comme étant d'origine endogène (Stein et al., 2007). Les protéines endogènes, tout comme celles d'origine alimentaire, sont soumises aux processus de digestion et d'absorption. Les principaux facteurs qui influencent les pertes iléales endogènes des AA sont le poids vif, le statut physiologique et la génétique de l'animal, la quantité de matière sèche ingérée, le contenu en facteurs antinutritionnels, en protéine ainsi que la quantité et les différents types de fibres dans la diète (Souffrant, 2001; Montagne et al., 2003; Stein et Nyachoti, 2003; Urriola et Stein, 2012).

L'apport de fibres alimentaires chez le monogastrique cause une augmentation des pertes endogènes d'AA par plusieurs mécanismes. Notamment, l'effet abrasif de la fibre sur les parois de l'intestin augmente la desquamation cellulaire de l'endothélium ainsi que la stimulation des sécrétions d'enzymes digestives particulièrement riches en azote (Schulze et al., 1995). De plus, comme les AA ne sont pas tous réabsorbés, cette augmentation des pertes endogènes a comme effet de diminuer la DIA des protéines et des AA. Par ailleurs, les NSP dans le tractus digestif peuvent adsorber les enzymes digestives endogènes (Isaksson et al., 1982) et accentuer leur sécrétion par un mécanisme de rétroaction négative (Wang et al., 2005; Woyengo et al., 2008). Cette adsorption cause donc une diminution de la digestion par l'immobilisation des enzymes et augmente les pertes en nutriments provenant des sécrétions enzymatiques.

Toutefois, même si le matériel fibreux agit sur les pertes endogènes, la diminution de la DIA des PB et des AA peut aussi être directement causée par la réduction de la digestibilité de l'azote en raison de la structure physique et chimique des fibres qui réduit l'accès des protéases au substrat par un

effet d'encapsulation (Yin et al., 2000b; Kim et al., 2005). Il est important de souligner que l'effet de la fibre alimentaire sur la digestion des protéines est variable, puisque cela diffère selon la source et la nature de la fibre ainsi que de leurs niveaux dans l'aliment et du statut métabolique l'animal (Wilfart et al., 2006).

#### ***1.3.3.5 Impact des fibres sur la digestibilité du calcium et du phosphore***

Le calcium et le phosphore sont les éléments les plus abondants dans le corps et ils sont principalement emmagasinés dans le squelette qui renferme de 96 à 99 % du Ca et de 60 à 80 % du P corporel (Crenshaw, 2000). Ils sont impliqués dans la composition de plusieurs tissus et dans de nombreuses fonctions biologiques importantes dans lesquelles ils sont interreliés. La digestibilité de ces éléments peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels la source du minéral, l'interaction avec d'autres éléments (notamment la vitamine D), le type d'aliment servi ainsi que le poids vif de l'animal. Le ratio Ca : P module également leur digestibilité, absorption et rétention, et ce, de manière encore plus importante que les quantités totales de ces éléments dans la diète (Crenshaw, 2000; NRC, 2012). Par exemple, chez un porc nourri aux besoins, le ratio Ca : P doit idéalement se situer à environ 2 : 1 à 3 : 1, sur une base de P disponible (Crenshaw, 2000). Dans le tube digestif, l'absorption du Ca se fait principalement par transport actif au niveau supérieur du petit intestin (duodénum et jéjunum), mais également par transport passif au niveau de l'iléon et du gros intestin (Crenshaw, 2000). L'absorption du P se produit majoritairement dans la partie supérieure du petit intestin (Fan et al., 2001), alors que le gros intestin, quant à lui, est peu impliqué dans son absorption et les sécrétions endogènes (NRC, 2012). Ainsi, les valeurs de la DIA et de l'ATTD pour le phosphore sont assez semblables, contrairement à d'autres nutriments comme les AA et le calcium.

Le phosphore et le calcium présents dans la lumière intestinale proviennent de sources différentes, c'est-à-dire exogènes ou endogènes. L'augmentation de la fibre dans l'alimentation des porcs accentue le renouvellement cellulaire ainsi que la sécrétion de mucus par les mêmes mécanismes précédemment expliqués, ce qui en retour, libère du P et du Ca dans le tube digestif. Par ailleurs, il est généralement admis que l'absorption de ces éléments se fait indépendamment de leur origine, alimentaire ou endogène (Létourneau-Montminy, 2009). Ainsi, malgré une réabsorption partielle des nutriments, il demeure que l'apport de fibre à l'alimentation du porc diminue la digestibilité apparente du P et du Ca, principalement par l'augmentation des pertes endogènes spécifiques (Nortey et al., 2008).

D'autre part, les ingrédients alternatifs non fermentés sont souvent plus concentrés en phosphore phytique (PP) que leur produit d'origine, comme c'est le cas pour le gru de blé et le tourteau de canola (NRC, 2012). En effet, ces produits ont souvent une teneur élevée en NSP, dont certaines fractions, comme les arabinoxylanes, renferment une forte proportion du phytate (Maga, 1982) en plus d'être hautement associés au Ca (Frolich et al., 1984). La teneur en NSP des grains peut d'ailleurs être positivement corrélée avec le contenu en phosphore phytique (Kim et al., 2005). Dans les faits, dans la majorité des ingrédients végétaux, le phosphore des plantes est retrouvé principalement sous forme phytique qui est très peu disponible pour les monogastriques, car ils ne possèdent pas ou peu de phytase endogène (Oatway et al., 2001). Ainsi, l'inclusion de haut niveau d'ingrédients alternatifs non fermentés dans l'alimentation des animaux peut induire une augmentation de l'ingestion de PP. Par ailleurs, dans la lumière intestinale, le phosphore phytique et le calcium peuvent interagir pour former de la phytine, immobilisant ainsi le Ca et diminuant son absorption (Oatway et al., 2001). De ce fait, une forte quantité de produits alternatifs dans l'alimentation des porcs peut occasionner une hausse de l'ingestion de PP qui pourrait induire une légère diminution de la digestibilité totale du calcium en modifiant le ratio Ca : P. Toutefois, la fraction du PP diffère entre les coproduits (NRC, 2012), il est donc difficile d'établir un lien direct entre les niveaux de fibres et la diminution de la digestibilité du Ca et du P chez le porc.

#### ***1.3.3.6 Impact des fibres sur la digestibilité des lipides***

L'augmentation du niveau de fibres dans un aliment diminue généralement sa densité énergétique. Afin que l'aliment ait une densité énergétique appropriée, des lipides peuvent être ajoutés aux aliments. L'ATTD des lipides dans un aliment complet pour porc est assez élevée et varie généralement entre 25 et 77 % et peut monter jusqu'à 95 % pour les AG insaturés à moyennes chaînes, qui sont les plus digestibles (NRC, 2012). Toutefois, comme les microorganismes présents dans le gros intestin modifient le profil lipidique et peuvent même synthétiser des lipides, la DIA est généralement préférée à l'ATTD comme mesure de la digestibilité. De plus, la digestibilité des lipides issus d'ingrédients végétaux augmente avec l'âge et le poids du porc (Azain, 2000).

Toutefois, l'absorption et la digestibilité des lipides bruts peuvent être négativement affectées par la présence de fibres alimentaires (Choct et Annison, 1992; Freire et al., 1998; Wilfart et al., 2007b). En effet, la DIA des lipides diminuerait de 1,3-1,5 % pour chaque 1 % de fibre brute supplémentaire dans la diète (Dégen et al., 2007; Just, 1989 a, b et c : cités de NRC, 2012). Cette diminution de la digestibilité peut partiellement être expliquée par l'augmentation du renouvellement cellulaire et de

la sécrétion de mucus due à la présence accrue de fibres. De plus, la viscosité a aussi un effet négatif sur la digestibilité et l'absorption des lipides (Kasprzak et al., 2012) par les mêmes mécanismes que présentés précédemment (diffusion limitée des enzymes et composants nutritionnels, effet d'encapsulation, diminution de l'absorption des nutriments). Les fibres peuvent également adsorber l'acide biliaire et la lipase pancréatique durant le passage dans le petit intestin ce qui diminue leur potentiel d'action (Isaksson et al., 1982; Grieshop et al., 2000; Eswaran et al., 2013) et induit une augmentation de leurs sécrétions due à un mécanisme de rétroaction négative (Wang et al., 2005; Woyengo et al., 2008).

Il est intéressant de noter que contrairement aux fibres, la présence de lipides dans le tractus digestif ralentit la vitesse de transit du digesta. Puisque le taux de passage est réduit, cela permet d'augmenter le temps de contact enzymes-substrat et donc, parfois, d'augmenter l'absorption de certains nutriments (Azain, 2000; Cervantes-Pahm et Stein, 2008; Gutierrez et al., 2013).

Ainsi, tout comme pour les AA, le calcium et le phosphore, la digestibilité et l'absorption des lipides pourraient être négativement affectées par la présence de fibres alimentaires chez le porc. Cette corrélation peut partiellement être induite par l'augmentation de la viscosité et de l'effet d'encapsulation, de l'adsorption des enzymes digestives, du renouvellement cellulaire et des sécrétions de mucus.

#### ***1.3.3.7 Impact des fibres sur l'immunité et leurs effets prébiotiques***

Bien que les fibres alimentaires aient un rôle important à jouer sur la digestion des composants alimentaires, sur l'absorption des nutriments ainsi que sur la physiologie du tractus digestif en général, leurs actions sur le métabolisme sont beaucoup plus larges. En effet, les fibres alimentaires peuvent avoir des effets bénéfiques au niveau du microbiote et du système immunitaire des animaux, aspects qui sont parfois négligés en productions animales comparativement à la nutrition humaine. Bien que les mécanismes d'actions sur le système immunitaire ne soient pas encore tous démystifiés, la ligne directrice suivante est communément acceptée.

Tout d'abord, l'hydrolyse enzymatique des polysaccharides entraîne la libération de métabolites. À titre d'exemple, l'hydrolyse des xylanes libère des oligomères, plus précisément, des xylooligosaccharides (XOS). Ces métabolites ne sont pas entièrement dégradés ni absorbés au niveau supérieur du tractus digestif puisqu'ils sont résistants à l'attaque des enzymes endogènes,

mais ils demeurent toutefois sensibles à l'action enzymatique du microbiote (AGNS et FAO, 2007; Zhenping et al., 2013). La présence de ces métabolites dans le tube digestif inférieur influence l'environnement et crée des conditions avantageuses pour la microflore bénéfique en plus de limiter la prolifération des microorganismes pathogènes, ce qui améliore la santé de l'hôte (Lu et al., 2016). Ce phénomène se nomme « l'effet prébiotique » (Robertfoid, 1997). D'ailleurs, la prolifération et les activités métaboliques des bactéries entériques pathogènes, par exemple *Clostridium difficile* chez le porc, peuvent perturber les fonctions digestives des animaux, mener à des diarrhées et à de faibles performances de croissance en plus d'entraîner des pertes économiques pour les entreprises (Montagne et al., 2003). En effet, grâce à leurs propriétés favorables sur la microflore, la FAO classe les XOS, et donc les xylanes, parmi les prébiotiques<sup>1</sup> émergents en production animale (AGNS et FAO, 2007).

Le potentiel de l'effet des prébiotiques et des effets des fibres sur le système immunitaire a été étudié chez plusieurs espèces de monogastriques. Chez le poulet de chair, il a été montré que l'ajout de XOS à l'alimentation peut augmenter les performances de croissances (Zhenping et al., 2013), le métabolisme endocrinien ainsi qu'améliorer certaines fonctions immunitaires (Spring et al., 2000; Zhenping et al., 2013). Chez l'humain, l'augmentation de la présence de bonnes bactéries dans le gros intestin est associée à une augmentation générale de la santé, une réduction des infections de l'intestin, une meilleure absorption des vitamines et minéraux (Broekaert et al., 2011), une diminution des réactions pro-inflammatoires dans le sang (Lecerf et al., 2012) ainsi qu'une bonne proportion des désordres gastro-intestinaux (Eswaran et al., 2013). Parallèlement, les recherches menées chez la souris ont également montré des effets immunomodulateurs de la fibre alimentaire, telles la stimulation des cellules NK (Kelly-Quagliana et al., 2003) ainsi que la modulation des réponses inflammatoires (Ogawa et al., 2005). Finalement, chez le porc, plusieurs études rapportent le rôle positif de la fibre alimentaire pour le contrôle des infections bactériennes ainsi que sur l'incidence de la diarrhée en post-sevrage (Williams et al., 2001; Molist et al., 2014; Jha et Berrococo, 2015).

---

<sup>1</sup> Par définition, un prébiotique est un ingrédient alimentaire qui octroie un effet bénéfique à l'hôte en sélectionnant simultanément la croissance et/ou l'activité métabolique d'un type ou d'un nombre limité de bactéries bénéfiques dans le tractus intestinal, améliorant ainsi la santé intestinale de l'hôte (traduit de Robertfoid (1997)).