

Relation entre la dégradation *in sacco* et la digestion ruminale de l'amidon

P. NOZIERE, B. MICHALET-DOREAU, D. REMOND, I. FERNANDEZ, C. PHILIPPEAU, C. PONCET
INRA, Unité de Recherche sur les Herbivores, 63122 St Genès Champanelle

RESUME - L'objectif de cette étude était de déterminer les relations entre dégradation *in sacco* et digestion ruminale de l'amidon à partir de résultats obtenus essentiellement sur maïs grain ou maïs ensilage et couvrant une large plage de variation de digestion ruminale de l'amidon. Nous avons regroupé 5 essais pour lesquels nous disposions du flux duodécal d'amidon et de la cinétique de dégradation *in sacco* de l'amidon des aliments riches en amidon, 4 ensilages de maïs et 10 céréales-grains matures. La présentation des aliments distribués aux animaux était conservée pour les incubations *in sacco*. La digestion ruminale de l'amidon variait dans de larges proportions, de 35 % à 95 %. La dégradabilité *in sacco* de l'amidon variait de 18 % à 89 %, et était fortement liée à la digestion ruminale ($N = 14$; $R = 0,96$). La pente de la relation était similaire entre essais ; elle était de 0,83, indiquant qu'une augmentation de la dégradabilité *in sacco* de l'amidon de 20 points correspondait à une augmentation de la digestion ruminale de l'amidon de 16,5 points. La large plage de variation de digestion ruminale étudiée, ainsi que le choix d'une méthodologie *in sacco* permettant de conserver le mode de présentation de l'aliment, permettent d'apporter des éléments nouveaux de validation de la technique *in sacco* pour prédire la digestion ruminale de l'amidon.

Relationship between *in sacco* degradation and ruminal digestion of starch

P. NOZIERE, B. MICHALET-DOREAU, D. REMOND, I. FERNANDEZ, C. PHILIPPEAU, C. PONCET
INRA, Unité de Recherche sur les Herbivores, 63122 St Genès Champanelle

SUMMARY - The aim of the present study was to assess the relationships between *in sacco* degradation and ruminal digestion of starch among a large extent of variation of ruminal starch digestion. We pooled five digestion trials, all realised in our laboratory, in which both duodenal starch fluxes and *in sacco* degradation kinetics were measured on the same starchy feed. The presentation of feeds into bags was similar to the one fed by animals for duodenal fluxes measurements. Four whole plant corn silages and 10 mature cereals were studied. Starch ruminal digestion varied in large proportions, from 35% to 95%. Starch *in sacco* degradability varied between 18% and 89%, and was strongly related to ruminal starch digestion. The slope of the relationship was similar among trials. The overall slope of the relationship was 0.827, indicating that a 20 units increase in starch *in sacco* degradability corresponded to a 16.5 points increase in ruminal starch digestion. The large extent of variation of ruminal starch digestion and the choice of *in sacco* methodology conserving the feed grinding fineness provided advances in validation of the *in sacco* technique for predicting starch escape.

INTRODUCTION

Bien que l'amidon des céréales soit presque totalement digéré dans l'ensemble du tube digestif, la vitesse et l'importance des fermentations ruminales varient fortement en fonction de la nature de la céréale, de son génotype et de son mode de présentation (Huntington, 1997; Michalet-Doreau et Doreau, 1999). Le site de digestion de l'amidon a un impact sur la nature et la quantité de nutriments disponibles pour l'animal, sur l'incidence de l'acidose ruminale, et sur les quantités ingérées, d'où le besoin d'évaluer la quantité d'amidon échappant à la dégradation ruminale. La technique *in sacco* est classiquement utilisée, et des tables incluant la dégradabilité ruminale de l'amidon de différentes matières premières ont été publiées (Sauvant *et al.*, 2002). Les relations entre dégradation *in sacco* et digestion ruminale de l'amidon sont encore imprécises, en raison d'une part de la variabilité importante des mesures entre laboratoires, et d'autre part du manque de comparaisons *in vivo* / *in sacco* sur les mêmes aliments. De plus, la granulométrie des aliments qui affecte fortement la digestion ruminale (Galyean *et al.*, 1979) et la dégradabilité *in sacco* (Cerneau et Michalet-Doreau, 1991) de l'amidon, n'est pas prise en compte lorsque les mesures *in sacco* sont réalisées avec une méthodologie de broyage standardisée. L'objectif de cette étude était d'étudier les relations entre dégradation *in sacco* et digestion ruminale de l'amidon mesurées sur les mêmes aliments et avec une granulométrie identique pour les deux types de mesure.

1. MATERIEL ET METHODES

Nous avons synthétisé les résultats de 5 essais de digestion réalisés dans notre laboratoire, pour lesquels les flux duodénaux d'amidon et les cinétiques de dégradation *in sacco* étaient mesurés sur les mêmes aliments amyliacés, afin de bâtir une base de données homogène (14 lignes). Les essais ont été réalisés sur des taurillons ou des vaches équipés de canules permanentes du rumen et du duodénum. Les animaux ont reçu en 2 repas par jour, à 90 % de l'*ad libitum*, des régimes contenant au moins 37 % de l'aliment étudié.

1.1. ALIMENTS ETUDIÉS

Nous avons étudié 14 aliments (Tableau 1) : 4 ensilages de maïs plante entière différant par le stade de maturité

(24 / 32 % MS) et la finesse de hachage (4,2 / 12,0 mm), et 10 céréales-grains matures, différant par la nature du grain (blé / maïs), sa variété (maïs denté / maïs corné-denté), le mode de conservation (sec / inerté), et la granulométrie (aplatissage / broyage). Pour chacun des aliments étudiés, la taille moyenne des particules (TMP) a été mesurée par tamisage et calculée suivant la méthode de Waldo *et al.* (1971). Les autres composants des régimes étaient soit du foin seul (essais 1 et 5) ou associé à de l'ensilage d'herbe et du tourteau de soja (essais 2 et 3), soit du concentré dans le cas de l'essai sur ensilage de maïs plante entière (essai 4).

1.2. MESURE DES FLUX DUODÉNAUX

Les quantités d'aliments offerts et les refus ont été pesés individuellement, et des échantillons représentatifs collectés pour chaque période de mesure. Les flux duodénaux ont été déterminés par dilution d'un marqueur de phase solide (Yb-acétate, Yb-chlorure ou ADL) associé ou non à un marqueur de phase liquide (Cr-EDTA ou PEG) (Tableau 1). Les marqueurs externes étaient infusés pendant 7 jours par la canule ruminale avec une pompe péristaltique. Les échantillons de contenu duodéal ont été collectés sur 2 ou 3 jours afin de fournir des échantillons représentatifs prélevés avec des intervalles de 2 heures. L'Yb et le Cr ont été déterminés par spectrophotométrie d'absorption atomique (Siddons *et al.*, 1985 ; Binnerts *et al.*, 1968), l'ADL par la méthode de Van Soest et Robertson (1980) et le PEG par turbidimétrie (Hyden, 1955). L'amidon des aliments, des refus et des échantillons duodénaux ont été analysés par la méthode de Faisant *et al.* (1995).

1.3. MESURE DE LA DEGRADABILITE IN SACCO

La dégradabilité *in sacco* a été mesurée sur les 14 aliments riches en amidon. Les aliments ont été introduits dans des sachets de nylon (taille des pores 53 µm, Ankom Co, Fairport, NY, USA), avec 3 g de grain mature dans des sachets de 5x10 cm, et 15 g d'ensilage de maïs plante entière dans des sachets de 10x16 cm. La présentation des aliments dans les sachets était similaire à celle utilisée pour les mesures de flux duodéal. Les incubations ont été réalisées en double sur 3 animaux pendant 3, 6, 9, 15, 24 et 48 h.

Tableau 1 : Description des essais et des aliments riches en amidon étudiés

Essai	Animaux	Marqueurs	Aliments riches en amidon étudiés				Proportion dans la ration (%)	Teneur en amidon de la ration (% MS)
			Nature	Traitement	TMP* (mm)			
1	6 taurillons (320 kg)	ADL + PEG	1	Blé	aplatis grossier	2,29	75	50
			2	Maïs denté 1	aplatis grossier	2,97	67	47
			3	Maïs corné-denté 1	aplatis grossier	3,39	67	46
2	6 vaches laitières (633 kg)	Yb-acetate + Cr-EDTA	4	Maïs corné-denté 2	aplatis grossier	4,78	37	27
			5	"	aplatis fin	2,46	37	27
			6	"	broyé 3 mm	0,85	37	27
3	4 vaches laitières (647 kg)	Yb-acetate + Cr-EDTA	7	Maïs denté 2	aplatis grossier	4,26	37	26
			8	"	broyé 3 mm	0,65	37	26
4	4 vaches laitières (602 kg)	Yb-acetate	9	Ensilage maïs 24%MS	brin court	4,08	79	23
			10	"	brin long	4,43	79	22
			11	Ensilage maïs 32%MS	brin court	3,50	79	27
			12	"	brin long	6,76	79	29
5	3 taurillons (330 kg)	Yb-chlorure	13	Maïs denté 3	sec, aplatis grossier	3,07	53	35
			14	"	inerté, aplatis fin	1,21	53	35

* TMP : taille moyenne des particules

L'amidon a été analysé dans les aliments et les résidus *in sacco* (Faisant *et al.*, 1995). La dégradabilité théorique de l'amidon a été calculée avec un taux de passage des particules fixé à 0,06 h⁻¹. La relation entre la dégradabilité *in sacco* et la digestion ruminale *in vivo* a été déterminée par régression linéaire avec un modèle incluant l'essai en facteur, et au sein des maïs-grains, la variété (SAS, 1996).

2. RESULTATS

La quantité d'amidon ingéré variait entre 5,3 et 10,7 g / kg poids métabolique / jour chez les taurillons (essais 1 et 5), et entre 5,4 et 7,3 g / kg poids vif / jour chez les vaches (essais 2, 3, 4) (Tableau 2). La digestibilité de l'amidon dans l'ensemble du tube digestif variait de 70 % avec le maïs corné-denté aplati grossièrement (aliment 4) à 99 % avec les régimes à base d'ensilage de maïs (aliments 9-10). La digestion ruminale de l'amidon variait dans de larges proportions, de 35 % avec le maïs corné-denté aplati grossièrement (aliment 3) à 95 % avec le régime à base d'ensilage de maïs récolté à un stade précoce et avec un hachage fin (aliment 9). La digestion ruminale de l'amidon représentait entre 43 % (aliment 3) et 96 % (aliment 9) de la digestibilité dans l'ensemble du tube digestif. La dégradabilité *in sacco* de l'amidon variait entre 18 % avec le maïs denté aplati grossièrement (aliment 13) et 88 % avec les ensilages de maïs récoltés à un stade précoce (aliments 9-10). La dégradabilité de l'amidon était étroitement liée à sa digestion ruminale (N = 14, R = 0,96, ETR = 9,7) par l'équation suivante (Figure 1) :

$$\text{digestion ruminale} = 23,6 \text{ (SE} = 12,7 \text{ ; P} = 0,136) + 0,827 \text{ (SE} = 0,242 \text{ ; P} = 0,027) \times \text{dégradabilité } in \text{ sacco}$$

3. DISCUSSION

Les relations entre dégradation *in sacco* et digestion ruminale de l'amidon ont classiquement été abordées par comparaison de données *in vivo* et *in sacco* obtenues séparément (Nocek et Tamminga, 1991 (N = 9) ; Sauvart *et al.*, 1994 (N=20) ; Offner *et al.*, 2001 (N = 148)). En complément de cette approche globale qui permet de travailler sur un nombre important de données de la littérature, l'originalité de notre étude consistait à comparer les flux duodénaux d'amidon et les cinétiques de dégradation

in sacco mesurés sur les mêmes aliments, avec une méthodologie *in sacco* permettant de conserver le mode de présentation de l'aliment. Dans cette étude, l'étendue de la variation de la digestion ruminale de l'amidon (35 à 95 %) était comparable à celle rapportée dans la synthèse de Offner *et al.* (2001), et plus importante que celle (60 to 100 %) des synthèses de Nocek et Tamminga (1991) et de Sauvart *et al.* (1994). La relation obtenue dans notre étude, comme celle obtenue par Offner *et al.* (2001) par une approche plus globale, est donc valable sur une plage de variation importante, incluant des aliments riches en amidon lentement dégradables. Or ces aliments sont particulièrement intéressants pour manipuler la quantité d'amidon échappant à la digestion ruminale (Huntington, 1997).

L'ordonnée à l'origine de la relation était positive (23,6) bien que non significativement différente de zéro (P = 0,136), et était proche de celle (24,4) rapportée par Offner *et al.* (2001). Ce résultat confirme que la dégradabilité *in sacco* tend à sous-estimer la digestion ruminale des aliments à amidon lentement dégradables (Sauvart *et al.*, 1994). Ceci pourrait être relié à une accessibilité réduite de l'amidon aux microorganismes et donc à une plus faible expression de l'activité amylolytique à l'intérieur des sachets (Nozière et Michalet-Doreau, 1997), où les grains ne sont pas soumis à la mastication. Au sein des maïs-grains, l'écart entre les mesures *in sacco* et les mesures *in vivo* était plus marqué (P = 0,10) pour les variétés dentées (-25 points) que pour les variétés cornées-dentées (+1 point). La limitation de l'activité amylolytique à l'intérieur des sachets aurait donc un effet plus marqué sur les maïs les plus dégradables.

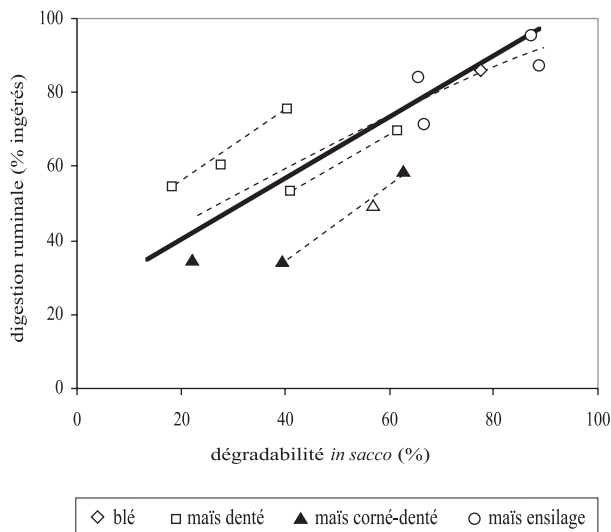
La pente de la relation (0,83) était proche de 1, et entre essais les pentes étaient comparables (P = 0,978). Ces résultats suggèrent que la prévision de la digestion ruminale de l'amidon des ensilages de maïs à partir des mesures *in sacco* ne se distingue pas significativement de celle des céréales récoltées à maturité. Une augmentation de 20 points de la dégradabilité *in sacco* correspondait à une augmentation de 16,5 points de la digestion ruminale de l'amidon. Cette pente était supérieure à celle rapportée dans les études précédentes, 0,50, 0,48 et 0,66 respectivement pour Nocek et Tamminga (1991), Sauvart *et al.* (1994) et Offner *et al.* (2001).

Tableau 2 : Ingestion, digestibilité, digestion ruminale et dégradabilité *in sacco* de l'amidon

Essai	Aliment	ingéré (g/kg PV/j)	digestibilité tube digestif total (% de l'ingéré)	digestion ruminale		dégradabilité <i>in sacco</i> (%)
				% de l'ingéré	% de la digestibilité tube digestif total	
1	1	10,7	95,9	86,6	90,3	77,5
	2	9,8	84,2	60,8	72,2	27,5
	3	9,4	81,7	34,8	42,6	22,1
2	4	6,7	69,5	35,5	51,1	40,6
	5	6,7	86,0	49,8	57,9	56,9
	6	6,8	91,4	58,6	64,1	62,5
3	7	7,3	89,2	53,5	60,0	41,0
	8	7,2	97,3	69,8	71,7	61,3
4	9	5,7	99,4	95,4	96,0	87,2
	10	5,4	99,4	87,2	87,7	88,6
	11	6,6	96,0	84,0	87,5	65,7
	12	7,0	94,0	71,3	75,9	66,7
5	13	5,4	90,8	54,7	60,2	18,3
	14	5,3	96,0	75,4	78,5	40,2

Dans notre étude, la digestion ruminale de l'amidon était comparée à la dégradabilité *in sacco* mesurée sur les mêmes aliments, avec une méthodologie permettant de conserver leur granulométrie, facteur déterminant pour faire varier la digestion ruminale (Galyean *et al.*, 1979) et la dégradabilité *in sacco* (Cerneau et Michalet-Doreau, 1991) de l'amidon. Une diminution de 1 mm de la TMP du maïs-grain conduisait en moyenne, dans notre étude, à une augmentation de digestion ruminale et de dégradabilité *in sacco* de l'amidon comparables, 6,5 et 6,0 points, respectivement. Ceci pourrait expliquer une meilleure adéquation entre la dégradabilité *in sacco* et la digestion ruminale de l'amidon que dans les synthèses précédentes.

Figure 1 : Relation entre dégradabilité *in sacco* et digestion ruminale de l'amidon (---- relations intra-essai)



Une approche similaire à la nôtre a été utilisée pour estimer la quantité d'azote alimentaire échappant à la dégradation ruminale, et la pente de l'équation liant les mesures *in vivo* et les mesures *in sacco* ne différait pas de 1 (Poncet *et al.*, 1995). Or les variations de dégradation *in sacco* entre céréales (McAllister *et al.*, 1993) et au sein d'une même céréale comme le maïs (Philippeau *et al.*, 1999), dépendent étroitement de la distribution des protéines dans l'endosperme du grain, qui détermine également la dégradabilité *in sacco* de l'azote. Il est donc probable que pour ce type d'aliments, les lois de réponse soient comparables pour l'amidon et l'azote. Ceci tendrait à justifier la pente proche de 1 que nous avons observé pour l'amidon dans ce travail.

CONCLUSION

La validation de la technique *in sacco* pour prévoir la dégradation ruminale de l'azote alimentaire a été bien établie, mais une approche similaire pour prévoir la quantité d'amidon échappant à la dégradation ruminale était encore difficile en raison du manque de comparaisons directes *in vivo* / *in sacco*. Par rapport à une approche globale, le choix d'une méthodologie *in sacco* permettant de conserver le mode de présentation de l'aliment, a permis d'apporter des éléments nouveaux de validation de la technique *in sacco* pour prévoir la digestion ruminale de l'amidon, en prenant en compte le mode de présentation de l'aliment.

Binnerts, W.T., Van't Klooster, A.Th., Frens, A.M. 1968. Vet. Rec. 82, 470

Cerneau, P., Michalet-Doreau, B. 1991. Reprod. Nutr. Dev. 31:65-72

Faisant, N., Planchot, V., Kozlowski, F., Pacouret, M.P., Colonna, P., Champ, M. 1995. Sci. Alim. 15, 83-89

Galyean, M.L., Wagner, D.G., Owens, F.N. 1979. J. Anim. Sci. 49, 204-210

Huntington, G.B. 1997. J. Anim. Sci. 75, 852-867

Hyden, S., 1955. Kung. Lantbrukshögsk. Ann. 22, 139-145.

McAllister, T.A., Philippe, R.C., Rode, L.M., Cheng, K.J. 1993. J. Anim. Sci. 71, 205-212.

Michalet-Doreau, B., Doreau, M. 1999. Sci. Aliments 19:349-365

Nocek, J.E., Tammimga, S. 1991. J. Dairy Sci. 74, 3598-3629

Nozière, P., Michalet-Doreau, B., 1997. J. Sci. Food Agric. 73, 471-476

Offner, A., Sauvant, D., Van Eys, J., Bach, A., 2001. Renc. Rech. Ruminants 8, 313

Philippeau, C., Le Deschault de Montredon, F., Michalet-Doreau, B. 1999. J. Anim. Sci. 77, 1587-1596

Poncet, C., Michalet-Doreau, B., McAllister, T., Rémond, D., 1995. In: Journet, M., Grenet, E., Farce, M.H., Thériez, M., Demarquilly, C. (eds.), Proc. IVth Int. Symp. Nutr. Herbivores, INRA Editions, Paris, France, pp. 167-204

SAS. 1996. Guide for personal computers, version 6 ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.

Sauvant, D., Chapoutot, P., Archimède, H. 1994. INRA Prod. Anim. 7, 115-124

Sauvant, D., Perez, J.M., Tran, G. 2002. Tables AFZ-INRA, INRA Editions, Paris, France.

Siddons, R.C., Paradine, J., Beever, D.E., Cornell, P.R. 1985. Br. J. Nutr. 54, 509-519.

Van Soest, P.J., Robertson, J.B., 1980. In : Pigden, W.J., Balch, C.C., Graham, M. (eds.), Standardization of Analytical Methodology for Feeds, Ottawa, Canada. pp. 49-60.

Waldo, D.R., Smith, L.W., Cox, E.L., Lucas, H.L., 1971. J. Dairy Sci. 54, 1465-1469.