



HAL
open science

Modulation de la qualité du lait par l'amidon de la ration

Stefan Jurjanz

► **To cite this version:**

Stefan Jurjanz. Modulation de la qualité du lait par l'amidon de la ration. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001. Français. NNT : 2001INPL590N . tel-01749829

HAL Id: tel-01749829

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749829>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

136030 9714

01 INPL 590W

Institut National Polytechnique de Lorraine

Ecole Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

Ecole Doctorale

Sciences et Ingénieries des Ressources, Procédés, Produits et Environnement

(F) 2001 JURJANZ, S.

THESE

présentée en vue d'obtention du titre de
Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Spécialité Sciences Agronomiques

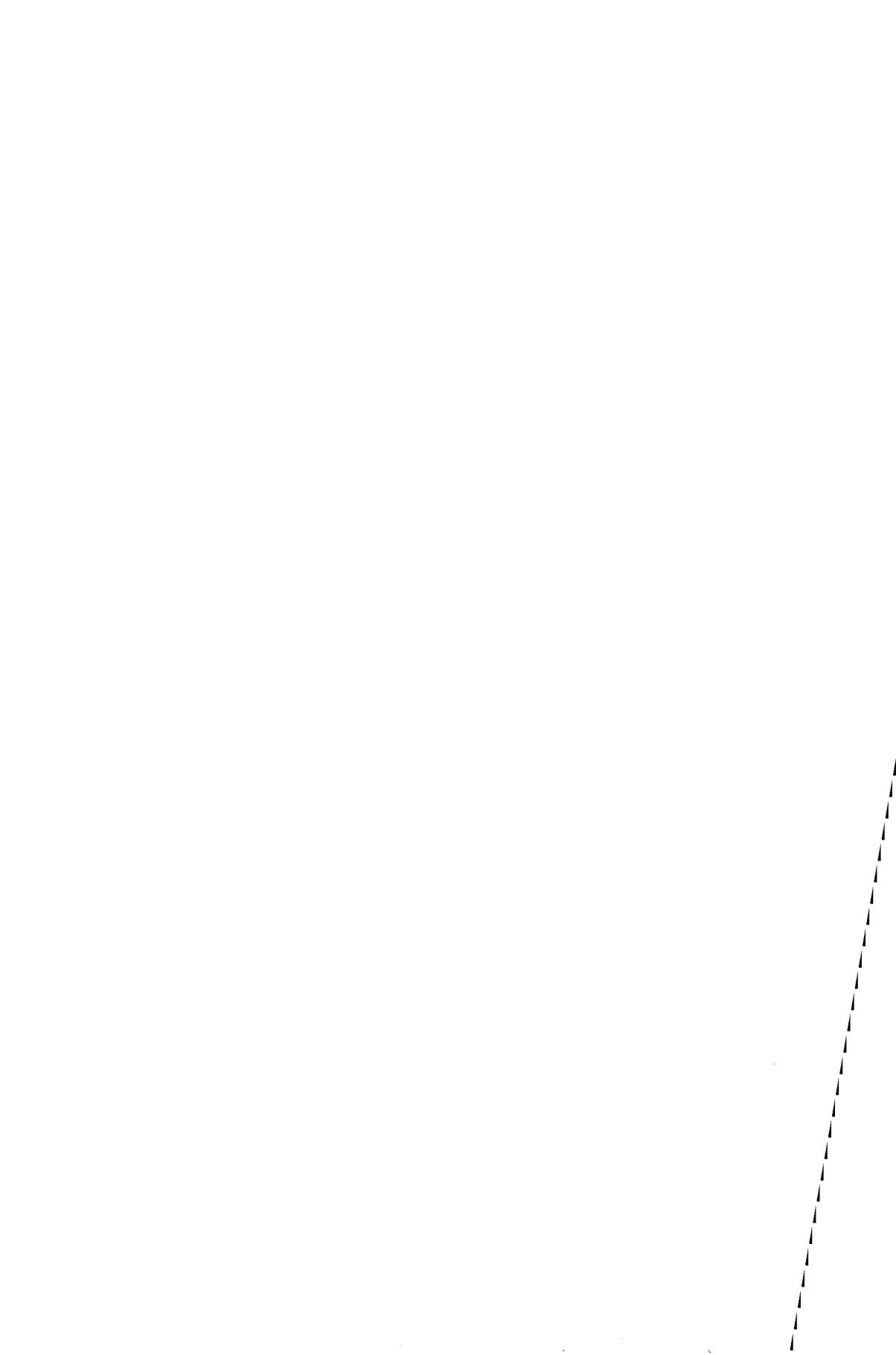
par
Stefan JURJANZ

le 27 novembre 2001 devant la Commission d'Examen

**Modulation de la qualité du lait
par l'amidon de la ration**

Membres du Jury :

J.M. CHARDIGNY	Chargé de Recherche à l'INRA de Dijon	Rapporteur
R. DACCORD	Directeur de Recherche (Posieux/Suisse)	Examineur
F. LAURENT	Professeur à l'INPL	Examineur
D. SAUVANT	Professeur à l'INA-Paris Grignon	Rapporteur
B. VIGNON	Professeur émérite à l'INPL	Examineur



**MODULATION DE LA QUALITE DU
LAIT PAR L'AMIDON DE LA RATION**

REMERCIEMENTS

Une thèse en Agronomie est aujourd'hui un travail d'équipe et en avant propos je souhaite exprimer ma reconnaissance envers tous ceux et celles qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

Tout d'abord je remercie les personnes ayant accepté d'évaluer ce travail comme membre du jury :

- Bernard VIGNON, Professeur émérite à l'INPL
- François LAURENT, Professeur à l'INPL
- Daniel SAUVANT, Professeur à l'INA-PG
- Roger DACCORD, Directeur de la Station Fédérale de Recherche en Production Animale à Posieux (Suisse)
- Jean-Michel CHARDIGNY, Chargé de Recherche à l'Unité de Nutrition Lipidique de l'INRA de Dijon

Je tiens à remercier mon directeur de thèse François LAURENT pour sa confiance et la liberté qu'il m'a accordé tout au long des protocoles mis en place et pour sa patience lors de la rédaction du document.

Je remercie également les gars de la Bouzule, surtout François DUGNY et Patrice REGNIERE de leur présence lors de 5 longs hivers pour réaliser tous ces essais dans des conditions climatiques bien lorraines et avec des horaires peu habituels de la Fonction Publique.

Merci à l'ensemble du personnel technique du laboratoire de Sciences Animales, notamment Claire HOGNON, Christine GRANDCLAUDON, Mauricette SENEAL et Karine BAYARD pour leur aide et leur compréhension lors des nombreuses analyses à réaliser.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à l'équipe de l'INRA de Dijon, Unité de Nutrition Lipidique et en particulier Pierre JUANEDA pour l'accueil et les conseils lors des analyses de la matière grasse du lait mais également pour la liberté avec laquelle j'ai pu travailler chez eux.

Que l'ensemble de mes collègues - permanents ou de passage - du laboratoire de Sciences Animales soit remercié de m'avoir accepté avec ma façon de faire. J'ai apprécié votre patience envers ma façon bien germanique (et non prussienne !) de travailler.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Odile COLIN-SCHOELLEN et Valérie MONTEILS qui m'ont souvent accordé de leur temps pour des discussions en marge de leur travail afin de me permettre de tester la pertinence de mes hypothèses (ou recoller les cheveux que j'avais coupé en quatre auparavant). Merci aussi à Odile qui est en quelque sorte à l'origine du sujet de cette thèse et à Valérie pour les nombreux coups de main lors des essais et des analyses. Je vous en suis très reconnaissant.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement Yves LE ROUX pour les longues et fréquentes discussions qui ont permis d'affiner mes dépouillements statistiques.

Le dernier de mes remerciements, mais pas le moindre, est pour mes amis du club VYLCK et pour leur précieux soutien dans les moments difficiles. Si j'ai mené cette thèse au bout vous y êtes pour quelque chose.

SOMMAIRE

Liste des tableaux.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des annexes.....	V
Liste des abbréviations.....	VI
I. INTRODUCTION GENERALE.....	3
II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
1. Amidon et sa structure.....	5
1.1. Composition.....	5
1.2. Caractéristiques.....	7
1.2.1. Morphologie des grains.....	7
1.2.2. Localisation dans les végétaux.....	8
1.2.3. Susceptibilité enzymatique.....	9
1.3. Différences entre natures d'amidon.....	10
1.3.1. Différences liées à la nature des grains.....	10
1.3.2. Différences en fonction des composants naturellement liés à l'amidon.....	12
2. Digestion de l'amidon par les ruminants.....	13
2.1. Dégradation dans le réticulo-rumen.....	13
2.1.1. Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur la dégradation ruminale.....	13
2.1.2. Interactions entre la dégradation d'amidon et le pH du jus du rumen.....	15
2.1.3. Dégradation de l'azote et protéosynthèse microbienne.....	16
2.2. Digestion intestinale.....	18
2.2.1. Digestion dans l'intestin grêle.....	18
2.2.2. Effet de la nature de l'amidon sur la vitesse de digestion intestinale.....	20
2.3. Digestibilité totale.....	20
2.3.1. Effet des traitements technologiques sur la digestion de l'amidon.....	21
2.3.2. Interactions entre la digestion de l'amidon et d'autres constituants de la ration.....	22
2.3.2.1. Matière organique.....	22
2.3.2.2. Fibres.....	23
3. Effet de l'amidon sur les produits terminaux de la digestion.....	25
3.1. Acides gras volatils.....	25
3.2. Métabolites sanguins.....	27
4. Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur les performances zootechniques.....	30
4.1. Ingestion.....	30
4.2. Production de lait et lactose.....	32
4.3. Matière protéique.....	34
4.4. Matière grasse.....	35
III PARTIE EXPERIMENTALE.....	43
1. Objectif.....	43
2. Présentation générale des expérimentations.....	44
2.1. Alimentation.....	45
2.2. Mesures et analyses.....	47
2.3. Traitement des données.....	48
3. Dégradabilité ruminale in sacco des amidons.....	49
3.1. Matériel et méthodes.....	49
3.2. Résultats.....	50
4. Digestibilité apparente de l'amidon.....	54
4.1. Matériel et méthodes.....	54
4.2. Résultats.....	55
5. Profils fermentaires.....	55
5.1. Prélèvements.....	55
5.2. Analyses.....	56
5.3. Résultats.....	56

5.3.1. pH.....	56
5.3.2. Lactate.....	59
5.3.3. AGV totaux.....	61
5.3.4. Proportions relatives des différents AGV.....	61
6. Métabolites sanguins.....	67
6.1. Prélèvements.....	67
6.2. Analyses.....	67
6.3. Résultats.....	67
7. Réponses zootechniques.....	70
7.1. Ingestion.....	70
7.2. Production de lait brut.....	71
7.3. Composition du lait.....	72
7.3.1. Matière protéique.....	72
7.3.2. Matière grasse.....	73
7.3.3. Production de lait à 4% de matière grasse.....	75
7.3.4. Teneur en lactose.....	75
7.3.5. Concentration cellulaire.....	76
7.4. Variations du poids vif.....	76
8. Composition de la matière grasse.....	77
8.1. Matériel et méthodes.....	77
8.2. Résultats.....	79
9. Composition du C 18:1 en isomères trans.....	81
9.1. Matériel et méthodes.....	81
9.2. Résultats.....	82
IV DISCUSSION GENERALE.....	83
1. Dégradabilité in sacco.....	83
2. Digestibilité apparente.....	84
3. Ingestion.....	84
4. Profil fermentaire.....	87
5. Métabolites sanguins.....	91
6. Production laitière et teneur en lactose.....	94
7. Protéines du lait et variations du poids vif.....	96
8. Matière grasse du lait.....	98
8.1. Taux butyreux et quantité de matière grasse.....	98
8.2. Composition de la matière grasse du lait.....	100
V. CONCLUSIONS GENERALES.....	105
VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	108

Liste des tableaux

	page
Tableau 1 : Caractéristiques de l'amidon de différentes origines (SWINKELS, 1985 ; COLONNA et al., 1995 ; SIVAK et PREISS, 1998)	11
Tableau 2 : Niveau de dégradation de différents types d'amidon	14
Tableau 3 : Effet de la vitesse de dégradation de l'amidon sur l'ingestion chez la vache laitière	31
Tableau 4 : Effet de l'interaction quantité et nature de l'amidon sur l'ingestion et sur la production de lait brut	33
Tableau 5 : Effet de l'apport d'amidon dans les comparaisons amidon lent - amidon rapide sur la matière grasse et la production de lait	37
Tableau 6 : Présentation générale des essais	45
Tableau 7 : Composition chimique des concentrés amidon utilisés au cours des différents essais	46
Tableau 8 : Composition et valeurs nutritives calculées des rations	46
Tableau 9 : Mesures réalisées	47
Tableau 10 : Traitement statistique des données des différents essais	48
Tableau 11 : Composition des aliments mis à incuber (en % de la MS)	49
Tableau 12 : Paramètres de la disparition <i>in sacco</i> de la fraction d'amidon des aliments	50
Tableau 13a : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la MS des concentrés (essai 1)	52
Tableau 13b : Effet de la nature de l'amidon du concentré sur le taux de disparition de la MS des concentrés (essai 2)	53
Tableau 14 : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la fraction NDF des concentrés (essai 1)	53
Tableau 15 : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la fraction MAT des concentrés (essai 1)	54
Tableau 16 : Prélèvement du jus de rumen pour les essais 1 et 2	55
Tableau 17 : Effet de la nature du concentré amidon sur les variations du pH moyen au cours de la cinétique	56
Tableau 18 : Effet de l'interaction entre la quantité et la nature de l'amidon ingéré sur la chute du pH lors de la cinétique (essai 2)	59
Tableau 19 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration moyenne en lactate (mmol/L)	59
Tableau 20 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration moyenne en AGV (mmol/L)	61

	page
Tableau 21 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des proportions relatives des AGV majeurs	62
Tableau 22 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des proportions relatives des AGV mineurs	62
Tableau 23 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des rapports entre les AGV majeurs	63
Tableau 24: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion d'acétate (mol%) dans le jus de rumen	63
Tableau 25: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion de propionate (mol%) dans le jus de rumen	64
Tableau 26: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion de butyrate (mol%) dans le jus de rumen	64
Tableau 27: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport acétate/propionate dans le jus de rumen	65
Tableau 28: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport (acétate+butyrate)/propionate dans le jus de rumen	65
Tableau 29: Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport butyrate/propionate dans le jus de rumen	66
Tableau 30 : Temps de prélèvements du sang pour les essais 1 et 2	67
Tableau 31 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur en AGNE et sur la glycémie	68
Tableau 32 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en acétate et en β -OH-butyrate	68
Tableau 33 : Effet de la nature du concentré amidon sur la matière sèche ingérée (kg/jour)	70
Tableau 34 : Effet de la nature du concentré amidon sur les quantités totales d'amidon ingérées (kg/jour)	71
Tableau 35 : Effet de la nature du concentré amidon sur la production de lait brut (kg/jour)	71
Tableau 36 : Effet de la nature du concentré amidon sur le taux protéique (g/kg)	72
Tableau 37 : Effet de la nature du concentré amidon sur la quantité de matière protéique produite (g/jour)	73
Tableau 38 : Effet de la nature du concentré amidon sur le taux butyreux (g/kg)	74
Tableau 39 : Effet de la nature du concentré amidon sur la quantité de matière grasse produite (g/jour)	74

	page
Tableau 40 : Effet de la nature du concentré amidon sur la production de lait à 4% de matière grasse (kg/jour)	75
Tableau 41 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur en lactose (g/kg)	76
Tableau 42 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration cellulaire (10^3 /mL)	76
Tableau 43 : Effet de la nature du concentré amidon sur le gain moyen quotidien (g/jour)	77
Tableau 44 : Effet de la nature du concentré amidon sur la composition de la matière grasse du lait (% de la MG)	79
Tableau 45 : Effet de la nature du concentré amidon sur le profil de la matière grasse du lait (% de la MG)	80
Tableau 46 : Effet de la nature du concentré amidon de la ration sur les rapports des acides gras saturés / acides gras monoinsaturés du lait	81
Tableau 47 : Distribution des différents isomères <i>trans</i> de l'acide gras C18:1 en fonction de la nature du concentré amidon de la ration (% d'isomère C18:1 <i>trans</i> dans la somme des EM)	82
Tableau 48 : Quantité d'amidon ingéré pour les différentes rations (ingestion moyenne recalculée en kg/jour)	87
Tableau 49 : Quantités d'amidon et de la fraction NDF ingérées pour les différentes rations (ingestion moyenne recalculée en kg/jour)	90
Tableau 50 : Evolution de la glycémie (g/L) en fonction de la nature du concentré amidon pour les rations à base d'ensilage d'herbe	91
Tableau 51 : Composition moyenne des lipides du blé et des pommes de terre en acides gras longs (% de la somme des EM)	101

Liste des figures

	page
Figure 1 : Structure biochimique de l'amylose (COLONNA et al., 1995)	5
Figure 2 : Structure biochimique de l'amylopectine (COLONNA et al., 1995)	6
Figure 3 : Structure d'un modèle d'amylopectine d'après ROBIN et al. (1975)	6
Figure 4 : Structure d'un grain d'amidon (CALVERT, 1997)	7
Figure 5 : Apparence microscopique de différents amidons (SWINKELS, 1985)	10
Figure 6 : Dégradation des acides gras polyinsaturés à l'exemple de l'acide linoléique (GRILINARI, 1999)	39
Figure 7 : Taux de disparition <i>in sacco</i> des amidons de blé et de pommes de terre	51
Figure 8 : Taux de disparition <i>in sacco</i> de l'amidon de maïs ensilage	52
Figure 9 : Effet de la nature du concentré amidon sur les variations du pH ruminal	57
Figure 10 : Effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon ingéré sur la chute du pH lors de la cinétique	58/86
Figure 11 : Effet de la nature du concentré amidon sur la cinétique des concentrations en AGV totaux	60
Figure 12 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en acétoacétate	69/93
Figure 13 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en bêtahydroxybutyrate	69/93
Figure 14 : Effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon ingéré sur la concentration en AGV totaux	88
Figure 15 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la production de lait brut	95
Figure 16 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le taux protéique	97
Figure 17 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la quantité de matière protéique	97
Figure 18 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le gain moyen quotidien	95
Figure 19 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le taux butyreux	99
Figure 20 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la quantité de matière grasse	99
Figure 21 : Effet de la nature du concentré amidon de la ration sur la répartition des isomères <i>trans</i> du C18:1 de la MG du lait	103

Liste des annexes

Annexe 1 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur le profil fermentaire et la production de lait - synthèse bibliographique

Annexe 2 : publication de l'essai 1

Monteils V., Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Blanchart G., Laurent F. (2002) : Kinetics of ruminal degradation of wheat and potato starches in total mixed rations. J. Anim. Sci. 80, 235-241

Annexe 3 : publication de l'essai 3

Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Laurent F. (1996) : Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques de vaches laitières. Ann. Zootech. 45, 467-476

Annexe 4 : publication de l'essai 4

Colin-Schoellen O., Jurjanz S., Laurent F. (1997) : Influence de l'apport de blé ou de pommes de terre dans une ration complète pour vaches laitières : interaction avec la nature du fourrage. Ann. Zootech. 46, 269-280

Annexe 5 : publication d'une synthèse des essais 3 à 5

Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Gardeur J.N., Laurent F. (1998) : Alteration of milk fat by variation in the source and amount of starch in a total mixed diet fed to dairy cows. J. Dairy Sci. 81, 2924-2933

Liste des abréviations

ADF	: acid detergent fiber
AG	: acides gras
AGPI	: acides gras polyinsaturés
AGV	: acides gras volatils
AGNE	: acides gras non estérifiés
CB	: cellulose brute
CLA	: conjugated linoleic acid
DT	: dégradabilité théorique
C₂	: acide acétique
C₃	: acide propionique
C₄	: acide butyrique
dAMr	: digestibilité de l'amidon dans le rumen
dAMtot	: digestibilité de l'amidon dans la totalité du tube digestif
dMO	: digestibilité de la matière organique
EIP	: esters isopropyliques
EM	: esters méthyliques
ENSAIA	: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
ESB	: encéphalopathie spongiforme bovine
ETR	: Ecart-type résiduel
GMQ	: gain moyen quotidien
HPLC	: High Performance Liquid Chromatography
MAT	: matières azotées totales
MG	: matière grasse
MOD	: matière organique digestible
MOF	: matière organique fermentescible
MS	: matière sèche
NDF	: neutral detergent fiber
NNH₃	: azote ammoniacal
NS	: non significatif ($P > 0,05$)
PDIM	: protéines digestibles intestinales d'origine microbienne
PDIME	: PDIM dans une ration où l'énergie est le facteur limitant de la synthèse microbienne
Pdt	: pommes de terre
PV	: poids vif
S	: significatif ($P < 0,05$)
TB	: taux butyreux
TD	: taux de disparition
TP	: taux protéique
UFL	: unité fourragère lait

INTRODUCTION GENERALE

I. INTRODUCTION GENERALE

La programmation de la baisse du prix des céréales poursuivie dans l'agenda 2000 pérennise la question du niveau d'incorporation des céréales dans les rations pour vaches laitières à haut potentiel génétique. En effet l'expression de ces niveaux de production nécessite une optimisation quantitative et qualitative de l'apport d'énergie. Néanmoins, certains co-produits de l'industrie alimentaire (notamment les résidus de pommes de terre) peu coûteux pourraient être une alternative grâce à leur teneur en amidon proche de celles des céréales comme le blé.

Cependant le choix du concentré énergétique de la ration ne peut pas être uniquement guidé par des réflexions économiques. Les exigences du consommateur prennent une place de plus en plus grande dans les décisions de gestion de la production. Un premier aspect concerne le bien-être animal vis à vis duquel le consommateur est aujourd'hui de plus en plus sensible. En effet des apports élevés d'énergie fermentescible augmentent le risque de troubles sanitaires liés au dysfonctionnement du rumen. Si l'acidose, au moins sous sa forme clinique, est rarement manifestée, des signes de formes subcliniques comme les chutes d'ingestion, de la production et du taux butyreux liées à ces apports élevés sont souvent constatés (VALLET, 1991). Un autre aspect du choix entre l'incorporation plus importante de céréales ou l'utilisation de co-produits concernent les conséquences de ces nouveaux choix sur la production et la composition du lait. La perte de confiance du consommateur dans les produits animaux illustrée par la crise d'ESB démontre l'importance d'études préalables sur les conséquences de ces choix quant à la qualité des produits. A ce titre l'image du lait comme aliment sain de référence est à préserver.

L'utilité des céréales dans l'alimentation des vaches laitières a été largement étudiée. La quantité de concentré apporté à l'animal joue un rôle déterminant sur le taux protéique qui dépend surtout du niveau énergétique de la ration. Par contre, le taux butyreux est classiquement influencé par la proportion et la structure des fourrages (HODEN et al., 1988). La revue bibliographique de SAUVANT (1997) indique que des variations dans la nature de l'amidon de la ration détermineraient la teneur et la composition en matière grasse du lait en relation avec des modifications des fermentations dans le rumen. Une modulation du TB du troupeau par contrôle des apports alimentaires pourrait en découler. Par ailleurs l'utilisation croissante de la ration complète change les conditions de l'incorporation des concentrés énergétiques, ces conditions peu étudiées restant mal définies.

L'objectif de cette étude est donc d'élucider les conséquences de l'incorporation d'amidon de différentes natures et en proportions variables sur la production et la composition du lait afin de

préciser les bases de la formulation de la ration complète pour la vache laitière, en particulier pour l'incorporation de résidus de pommes de terre concernés par une quasi-absence de référence.

Ce travail a consisté dans un premier temps à établir pour différentes natures d'amidon l'état des connaissances sur la dégradation dans le rumen, le profil fermentaire engendré et l'effet sur les performances zootechniques notamment la matière grasse du lait. La caractérisation de la vitesse de dégradation et du profil fermentaire des rations comportant de l'amidon sont des étapes nécessaires pour expliquer leurs effets sur les variations de la teneur en différents constituants du lait. C'est l'objectif de l'analyse bibliographique.

Dans la partie expérimentale après avoir vérifié l'impact d'une incorporation de résidus de pommes de terre comparativement aux céréales sur la dégradation ruminale et le profil fermentaire, les modalités de réponse concernant la production et la composition du lait suite à l'utilisation de ces aliments en proportions variables seront établies. Avec l'utilisation de la ration complète, les interactions fourrage - concentré, le comportement des différents types de concentrés dans le rumen apportés en proportions variables et les conséquences sur la composition du lait seront l'originalité de cette approche.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Amidon et sa structure

1.1. Composition

L'amidon est un homopolymère de D-glucose (98-99%) présenté en chaînes hautement organisées et densément compactées qui forment des grains blancs de 2 à 150 μm de diamètre (SIVAK et PREISS, 1998). Les unités monomériques sont liées majoritairement (95-96%) par des liaisons de type α -(1,4) et dans une moindre mesure (4-5%) par des liaisons de type α -(1,6). La fraction glucidique est un mélange de 2 polymères : l'amylose, molécule essentiellement linéaire et l'amylopectine, molécule ramifiée (SCHOCH, 1945) qui sont liés entre eux par des ponts hydrogènes. Il y a cependant des molécules intermédiaires (5 à 7% pour l'amidon de maïs) entre les polymères strictement linéaires et ceux fortement ramifiés (SHANNON et GARWOOD, 1984).

L'amylose est un polymère linéaire associant jusqu'à 6000 molécules de D-glucose par des liaisons α -(1,4). De courtes branches de 3 à 20 molécules de glucose fixées par une liaison α -(1,6) sont parfois présentes (COLONNA et al., 1995). La part de l'amylose dans l'amidon augmente avec l'âge du tissu végétal et la taille des grains d'amidon (SHANNON et GARWOOD, 1984). L'amylose représente normalement jusqu'à 20% (KOTARSKI et al., 1992) voire 30% (SWINKELS, 1985) de l'amidon des céréales.

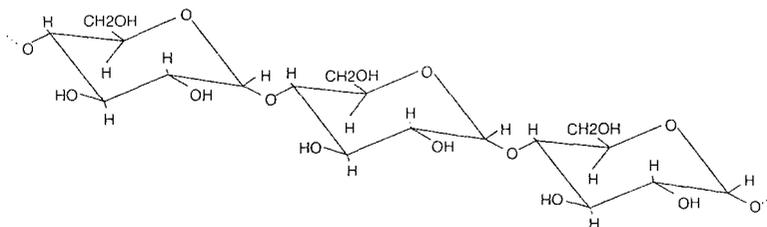


Figure 1 : Structure biochimique de l'amylose (COLONNA et al., 1995)

L'amylopectine est un polymère ramifié de D-glucose avec des chaînes principales courtes d'amylose (10 - 60 molécules de glucose) et de nombreuses branches secondaires reliées par des liaisons α -(1,6). Ces ramifications représentent environ 4 à 5% des liaisons et se situent sur la chaîne principale à intervalle régulier de 20 à 25 molécules de glucose (FRENCH, 1973). D'après SHANNON et GARWOOD (1984) il s'agit d'amylose ramifié.

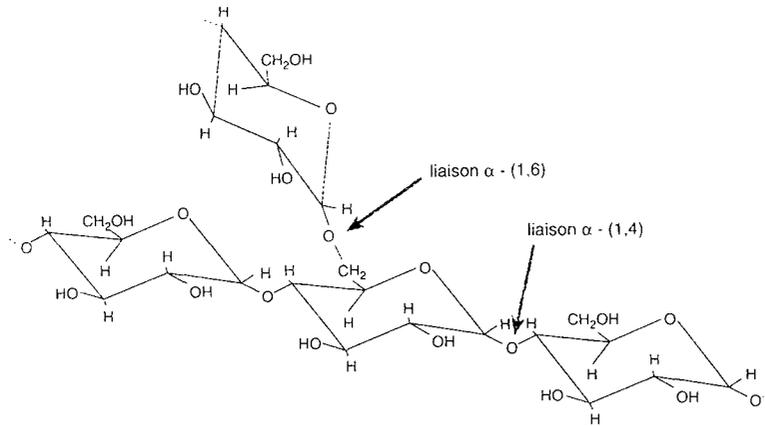


Figure 2 : Structure biochimique de l'amylopectine (COLONNA et al., 1995)

Le poids moléculaire de l'amylopectine ($>200 \times 10^6$ g/mol) est 1000 fois supérieur à celui de l'amylose. La structure d'une molécule - une des plus grandes dans la nature - est décrite comme une grappe (ROBIN et al., 1975) avec des chaînes courtes qui sont reliées entre elles par des chaînes plus longues. Il existe probablement des zones de branchement intensif (figure 3).

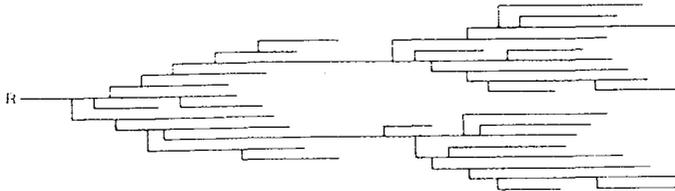


Figure 3 : La structure d'une modèle d'amylopectine d'après ROBIN et al. (1975)

1.2. Caractéristiques

1.2.1. Morphologie des grains

L'amylose et l'amylopectine sont disposées en entités granulaires qui ont des zones amorphes et des zones cristallines (ROONEY et PFLUGFELDER, 1986). D'après CALVERT (1997) les grains d'amidon se forment autour d'un hile avec en alternance des anneaux d'amylose amorphe et d'amylopectine cristallisée (figure 4).

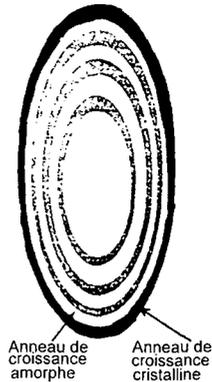


Figure 4 : Structure d'un grain d'amidon (CALVERT, 1997)

La zone cristalline est composée d'amylopectine et est résistante à l'eau et aux attaques enzymatiques. La zone amorphe présente des concentrations élevées en amylose et une densité inférieure à la zone cristalline (MILLS et al., 1999a). La structure moléculaire organisée de l'amylopectine est constituée de doubles hélices de 2x6 unités glucosyles par tour. L'amylose ne forme pas d'hélice. Les liaisons hydrogène intermoléculaires contribuent à la formation des zones cristallines (5 à 10 nm) de l'amylopectine (COLONNA et al., 1995 ; CALVERT, 1997). La nature linéaire de l'amylose lui permet de former des complexes avec des acides gras et des alcools à faible poids moléculaire ce qui renforce la structure cristalline de l'amylopectine. Les grains présentent une cohésion radiale due à l'axe longitudinal des macromolécules ainsi qu'une cohésion tangentielle grâce à des liaisons hydrogène intermoléculaires (COLONNA, 1995).

La structure cristalline liée essentiellement à la présence d'amylopectine a été étudiée par diffraction aux rayons X. Trois types ont été identifiés en fonction de la longueur de la chaîne du pilier d'amylopectine, de la densité de la granule d'amidon et de la présence d'eau (WU et SARKO, 1978) :

- un type « A », rencontré dans des amidons de céréales, est caractérisé par une longueur de chaîne de 23 à 29 molécules de glucose avec des structures cristallines disséminées.

- un type « B », caractéristique des amidons de tubercules et de céréales riches en amylose (>40%), est caractérisé par une longueur de chaîne de 30 à 44 molécules de glucose avec des molécules d'eau disséminées.

- un type intermédiaire « C » caractérisé par une longueur de chaîne de 26 à 29 molécules de glucose est typique des légumineuses.

De plus, la maille cristalline des doubles hélices du polymorphe "B" a une symétrie hexagonale à priori plus stable que la maille du type "A" qui est organisé suivant une forme monoclinique (COLONNA et al., 1995).

Les zones amorphes du grain d'amidon ont été peu étudiées. Il n'existe pas dans le grain de limite bien marquée entre phase cristalline et phase amorphe, et les molécules traversent alternativement ces deux phases.

L'absorption d'eau se manifeste par un gonflement réversible de la phase amorphe et la formation de liaisons hydrogène interchaînes. Lorsque toutes les liaisons interchaînes possibles ont été formées, l'eau agit comme un plastifiant, permettant l'alignement des phases amorphes intercrystallines par extension. A l'intérieur des grains hydratés, 25 à 30% d'eau sont intimement liés à la structure et participent probablement aux structures cristallines. L'eau restante est échangeable.

1.2.2. Localisation dans les végétaux

L'amidon est le glucide principal de réserve des plantes supérieures. Il est stocké essentiellement sous forme de grains dans des organites de la cellule végétale (SHANNON et GARWOOD, 1984).

Dans les céréales, l'amidon se concentre essentiellement dans l'endosperme (ou albumen) des grains (85% d'amidon). Le grain de blé (comme l'orge et l'avoine) a une particularité par rapport au maïs, riz et sorgho : l'ensemble des couches histologiques externes périphériques constituent un sillon protégeant l'intérieur du grain. Dans la couche extérieure de l'endosperme (périphérique ou corné), les grains d'amidon sont enveloppés par une matrice protéique, ce qui n'est pas le cas pour la couche intérieure ou endosperme farineux. L'albumen amylicé est protégé par les couches du péricarpe ainsi que le tégument, l'épiderme et la couche à aleurones, le péricarpe et l'aleurone étant particulièrement riches en enzymes et en inhibiteurs d'enzymes (HUNTINGTON, 1997).

Les tubercules comme la pomme de terre stockent l'amidon essentiellement dans le parenchyme cellulosique et dans une moindre mesure dans le parenchyme cortical (COLONNA et al., 1995). En effet les cellules du parenchyme plus matures contiennent plus d'amidon que les cellules jeunes (SIVAK et PREISS, 1998)

1.2.3. Susceptibilité enzymatique

L'amidon est dégradé sous l'effet d'acides ou d'enzymes mais il résiste bien en conditions alcalines. ROBYT (1984) classe les enzymes amylolytiques en 3 groupes :

→ Les α -amylases sont en général des endoglycosidases qui hydrolysent les liaisons α -(1,4) même en milieu de la chaîne en omettant les liaisons α -(1,6). Les résultats de cette hydrolyse sont des oligosaccharides, souvent du maltose ou du maltotriose qui sont ensuite hydrolysés en glucose par la maltase des cellules en brosse dans le duodénum. Les α -amylases ont été trouvées dans des cellules animales, végétales (supérieures), bactériennes et même dans certains champignons (STRABBURGER, 1991). L'amylopectine n'est que partiellement hydrolysée par ces enzymes car les α -dextrines (une liaison α -(1,6) et jusqu'à 5 unités glucosyliques) y résistent. Par contre, l' α -dextrinase permet d'hydrolyser ces oligosaccharides. Les α -amylases sont capables d'hydrolyser complètement les amidons de céréales (blé, maïs sauf variétés cireuses, riz) et de légumineuses. Certains amidons sont toutefois plus résistants (sorgho, avoine, manioc), voire très résistants à l'hydrolyse (pomme de terre, céréales riches en amylose).

→ Les β -amylases hydrolysent l'amidon en β -maltose par élimination séquentielle d'unités disaccharidiques en configuration β -D à partir des extrémités non réductrices. L'action de ces enzymes est bloquée au niveau des ramifications α -(1,6) ni omises ni contournées d'où l'apparition de dextrines à poids moléculaires élevées. La β -amylase hydrolyse 70 à 100% de l'amylose. Par contre la part de β -amylolyse dans l'hydrolyse de l'amylopectine est plus faible (55 à 60%) et peu variable en fonction des origines botaniques. La β -amylase a été trouvée dans des plantes (STRABBURGER, 1991) et dans au moins une espèce bactérienne (ROBYT, 1984).

→ Les glucoamylases hydrolysent l'amidon également à partir des extrémités non réductrices mais sans produire de dextrines. Elles catalysent l'hydrolyse complète de toutes les liaisons (α -(1,4) et α -(1,6)), ce qui explique leur capacité de convertir l'amidon intégralement en glucose. Les glucoamylases ont été identifiées dans des bactéries du tube digestif.

Les isoamylases ou enzymes déramifiantes permettent d'hydrolyser les liaisons α -(1,6) sans par contre attaquer les liaisons α -(1,4). L'enzyme R d'origine végétale et la pullulanase d'origine microbienne sont des représentants de ce groupe (ROBYT, 1984 ; STRABBURGER, 1991).

L'observation de l'amylolyse en microscopie électronique montre une pénétration initiale de l'enzyme dans le grain par formation de puits, d'entonnoirs ou encore de fissures. Après pénétration, l'enzyme hydrolyse préférentiellement les parties amorphes du grain, dégageant au fur et à mesure les structures les plus résistantes. Aucune explication physico-chimique (structure micellaire, association moléculaire, type et degré de cristallinité) ne permet d'expliquer de manière

satisfaisante cette progression.

Il semble qu'une hydrolyse complète d'amidon nécessite plusieurs enzymes amylolytiques (CONE, 1991 ; STRAßBURGER, 1991). D'après CONE (1991) la dégradation par l' α -amylase ou la pancréatine reste incomplète, même après ajout d'enzymes non-amylolytiques comme des lipases, protéases, pectinases, cellulases et xylanases. Par contre si le jus de rumen d'un animal qui a ingéré une ration riche en concentré est utilisé comme source d'enzymes, la dégradation *in vitro* aboutit à une dégradation assez complète de l'amidon, ce qui prouve que le jus du rumen contient la majeure partie des enzymes amylolytiques et non-amylolytiques nécessaires (CONE, 1991). L'effet favorable des amylases d'origine microbienne sur le rendement de l'hydrolyse peut s'expliquer par l'hydrolyse des ramifications de type α -(1,6).

La solubilité et le gonflement dans l'eau sont en lien étroit avec la sensibilité enzymatique de l'amidon. La solubilité et le gonflement de l'amidon de la pomme de terre dans l'eau augmentent en fonction de la température de manière linéaire et de manière beaucoup plus importante que pour les céréales. Le complexe lipide - amidon des céréales est responsable d'une solubilité en deux temps dans de l'eau avec une relative stagnation dans la plage 60 - 90°C.

1.3. Différences entre natures d'amidon

1.3.1. Différences liées à la nature des grains

Selon leur origine les grains d'amidon ont de grandes différences de taille et de forme (figure 5 et tableau 1). Chez les Triticeae (blé, orge, seigle et triticale) on observe une population de gros grains lenticulaires dans l'endosperme (diamètre 20 à 30 μm) représentant environ 90% du volume des grains et une population de petits grains sphériques (moins de 10 μm de diamètre) qui se situent hors des amyloplastes. Ce dernier type représente 30% de la masse de l'amidon total. Les deux types ne diffèrent pas quant à la teneur en amylose ou la distribution des zones d'amylose et d'amylopectine (SHANNON et GARWOOD, 1984).

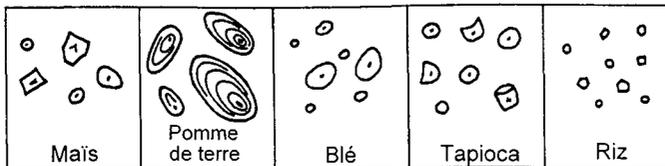


Figure 5 : Apparence microscopique de différents amidons (SWINKELS, 1985)

Par ailleurs, le nombre de grain par amyloplaste varie en fonction de l'origine botanique. La pomme de terre, le blé, l'orge, le maïs et le pois stockent un seul grain par amyloplaste. Pour le riz, l'orge et

le manioc plusieurs grains de forme anguleuse et compacté sont présents (SHANNON et GARWOOD, 1984).

Enfin la structure varie en fonction de sa nature. Le poids moléculaire de l'amylose de pomme de terre est nettement supérieur à celui du blé ou du maïs car il contient 1000-6000 unités de glucose contre 200 -1200 pour le maïs. De plus, le rapport des chaînes longues / chaînes courtes est de 5 pour les tubercules mais de 8 à 10 pour les céréales (COLONNA et al., 1995).

Pour ces auteurs la teneur en amylose des amidons varie en fonction des familles botaniques : 17 - 20% pour les tubercules, 22 - 27% pour les céréales et 30 - 33% pour les légumineuses. De plus la proportion d'amylose dans l'amidon augmente avec la maturation des grains. Néanmoins les variations de la teneur en amylose intraespèce dépassent souvent les variations entre espèces (SHANNON et GARWOOD, 1984). Le poids moléculaire de l'amylopectine n'est pas différent selon l'origine botanique mais la digestibilité de l'amidon est inversement proportionnelle à la teneur en amylopectine (ROONEY et PFLUGFELDER, 1986) : chez le maïs (mais également pour l'orge, le riz et la pomme de terre) l'amidon d'un génotype cireux est exclusivement sous forme d'amylopectine. Ce type est caractérisé par un amidon qui gonfle plus rapidement et est plus rapidement dégradé *in vitro* et *in vivo* que les génotypes non-cireux ou mixtes (HUNTINGTON 1997).

Tableau 1 : Caractéristiques de l'amidon de différentes origines (SWINKELS, 1985 ; COLONNA et al., 1995 ; SIVAK et PREISS, 1998)

	maïs « normal »	maïs cireux	maïs riche en amylose	blé	riz	orge (vétue)	pommes de terre
Teneur en amidon (% MS)	71 à 74	71 à 74		59 à 75	75 à 88	55 à 59	65 à 85
Granules :							
diamètre (µm)	5 à 25	2 à 30	5 à 25	2 à 38	3 à 8	2 à 5	15 à 120
Forme	polyédrique	polyédrique	filamenteux	lenticulaire	polyédrique	lenticulaire	ellipsoïdale
Type cristallin	A	A	B	A	A	A	B
Amylose (% w/w)	28	1	52 à 80	28	< 1 à 45	22	19 à 21
Amylopectine (% w/w)	72	proche 100	20 à 48	72	55 à 100	78	79
DP ¹ de l'amylose	800 à 900	-		800 à 1300			3000 à 5000
DP ¹ de l'amylopectine	2 000 000	2 000 000		2 000 000			2 000 000

¹ degré de polymérisation

1.3.2. Différences en fonction des composants naturellement liés à l'amidon

L'organe de stockage de l'amidon dans la plante et la structure des grains d'amidon peuvent expliquer des digestibilités différentes comme KIENZLE et al. (1997) l'ont montré chez le cheval. Pour le maïs grain, par exemple, les liens serrés entre les grains réduisent la digestibilité de son amidon. Une destruction - même partielle - de ces structures permet d'améliorer la digestibilité de l'amidon. D'autres composants naturellement liés à l'amidon comme les matrices protéiques (le «ciment des granules»), les tannins et/ou les enveloppes épaisses ainsi que la présence de lectines et de phytates (OWENS et al., 1986 ; ROONEY et PFLUGFELDER, 1986) peuvent limiter l'attaque microbienne ou enzymatique de l'amidon.

L'endosperme périphérique des céréales est une couche riche en protéines (glutélines) qui protège les zones amyloacées sous-jacentes. Cette couche est plus résistante pour le maïs et le sorgho par rapport aux triticeae et l'avoine (LAURENT, 1988).

L'inhibition de l'hydrolyse enzymatique peut être provoquée par des substances protéiques, essentiellement d'origine végétale ou par une modification naturelle ou chimique des saccharides (ROBYT, 1984). Pour l'amidon de blé ces inhibiteurs sont efficaces sur l' α -amylase salivaire (plutôt que celle du pancréas), pour l'avoine sur les α et β amylases. Pour le sorgho et la pomme de terre, des tannins résistant à la chaleur contribuent à une inhibition non spécifique.

Un autre aspect concerne les obstacles physiques à l'accessibilité de l'amidon. Après une dégradation microbienne *in vitro* l'observation en microscopie électronique révèle que la surface des grains d'amidon est moins susceptible à la dégradation que les parties intérieures (CONE, 1991). En effet la surface des grains contient des lipides qui contribuent à former un complexe stable et non digestible (MORRISON et COVENTRY, 1989 cités par CONE, 1991). Néanmoins ce complexe ne couvre pas toute la surface, ce qui permet aux microbes de pénétrer dans les grains entre les mailles de ce filet. La dégradation de l'amidon se traduit alors par des images de surface montrant des trous ressemblant à des impacts de balles.

Pour KIENZLE et al. (1997) les amidons rapidement dégradables comme l'avoine sont caractérisés par une dégradation qui commence par la surface extérieure (exocorrosion). Par contre les amidons lents sont dégradés par endocorrosion c'est-à-dire de l'intérieur du grain d'amidon via des impacts à la surface dans des zones privilégiées.

Cette analyse des différences entre natures d'amidon permettra d'éclairer la variabilité de la digestion abordée ultérieurement.

En conclusion la taille et la forme, le regroupement dans les amyloplastés, la structure moléculaire du grain, la répartition des matrices protéiques, des tannins ou des enveloppes

et la formation de liaisons complexes présentent de fortes disparités en fonction de la nature de l'amidon. Ces facteurs déterminent une modification du comportement dans l'eau et de l'hydrolyse de l'amidon.

En particulier l'amidon de la pomme de terre se distingue clairement des amidons des céréales par sa forme sphérique, sa taille très élevée et son grand nombre de chaînes courtes par rapport aux chaînes longues dans l'amylose favorisant un degré élevé de polymérisation.

2. Digestion de l'amidon par les ruminants

2.1. Dégradation dans le réticulo-rumen

L'amidon isolé est, indépendamment de sa nature, rapidement dégradé par les micro-organismes du rumen. KOTARSKI et al. (1992) identifient 15 souches bactériennes qui interviennent au moins partiellement dans la dégradation de l'amidon grâce à 8 enzymes différentes qui ne sont pas toutes produites par chaque souche. Par ailleurs, les protozoaires ingèrent et digèrent les granules d'amidon (MENDOZA et al., 1993) : il en résulte une disponibilité ruminale d'amidon plus faible pour la dégradation bactérienne surtout pour des rations riches en amidon (MILLS et al, 1999a).

Si le pH du rumen est tamponné, la capacité de fermenter l'amidon peut même dépasser la capacité d'utilisation des acides gras volatils libérés chez les ovins. Ce phénomène n'a pas été démontré pour les bovins ce qui pourrait être lié au différentiel de la vitesse de transit entre les deux espèces (ØRSKOV, 1986).

Des facteurs comme la variation du taux de passage des particules qui est fonction de l'ingestion (TAMMINGA et al., 1990), la teneur en amidon ou en concentré du régime (CONE, 1991 ; ARCHIMEDE et al., 1997), la taille des particules (CERNEAU et MICHALET-DOREAU, 1991), le taux azoté du régime (ARCHIMEDE et al., 1996) ainsi qu'un effet individuel (ØRSKOV, 1986) sont connus pour faire varier la dégradation ruminale de l'amidon.

2.1.1. Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur la dégradation ruminale

Dans un modèle dynamique et complexe, MILLS et al. (1999a) calcule une dégradabilité ruminale de l'amidon qui varie de 27% à 92% en fonction de sa nature. L'amidon des céréales est en général plus facilement dégradé dans le rumen que l'amidon des racines ou des tubercules (HERRERA-SALDANA et al., 1990). Pour la plupart des auteurs, les amidons de blé, orge et avoine sont rapidement dégradables dans le réticulo-rumen. Par contre, les amidons de pommes de terre, riz, maïs et sorgho sont lentement dégradables, surtout s'ils n'ont pas fait l'objet de traitements technologiques (tableau 2).

TAMMINGA et al. (1990) rapportent une solubilité de l'amidon dans l'eau très élevée pour l'avoine et le lupin (plus de 90%), moyennement élevée pour le blé et l'orge (respectivement 69 et 64%) et faible pour les amidons de pomme de terre, de maïs grain et de riz (respectivement 34, 28 et 26%). Cependant ils n'observent pas de relation significative entre la solubilité instantanée de l'amidon et son taux de dégradation *in sacco*.

La fraction rapidement dégradabile est supérieure à 82% pour l'orge, l'avoine et le son de blé contre 26% pour le maïs (CERNEAU et MICHALET-DOREAU, 1991). Cette hiérarchie entre l'orge et le maïs grain est confirmée *in vivo* par OVERTON et al. (1995) et NOCEK et TAMMINGA (1991). Le taux horaire de dégradation varie entre 5% (pomme de terre et maïs grain) et 20-25% (orge, blé, avoine) pour TAMMINGA et al. (1990) et entre 5% (maïs grain) et 57% (orge) pour CERNEAU et MICHALET-DOREAU (1991). ALERT et POPPE (1994) observent une vitesse de dégradation de l'amidon de pommes de terre intermédiaire entre les amidons "rapides" (blé et orge) et l'amidon "lent" (maïs grain). Dans cet essai il est à souligner que la disparition de la pomme de terre et du maïs grain suivent plutôt une courbe linéaire et non le modèle proposé par ØRSKOV et McDONALD (1979).

Tableau 2 : Niveau de dégradation de différents types d'amidon

Aliment	Dégradation ruminale					
	HERRERA-SALDANA et al. (1990)	NOCEK et TAMMINGA (1991)	CERNEAU et MICHALET-DOREAU (1991)	SAUVANT et al. (1994)	ALERT et POPPE (1994)	CONE (1991)
Méthode	Disparition <i>in sacco</i>					Incubation <i>in vitro</i>
	(TD 48 h)	(TD 12 h)	(DT)	(TD 6 h)	(DT)	(TD 6 h)
Animal	Taurillon	Vaches laitières	Vaches tarées	Bovins et Caprins	Bœufs	Jus de rumen de vache
Sorgho	n.d. ¹	54,2	n.d. ¹	52,5	n.d. ¹	16,7 1,1
Maïs grain	61,9	62,6 ²	57,8	57,9	34,4 à 47,8	19,6 1,1
Riz	n.d. ¹	68,0	n.d. ¹	67,4	n.d. ¹	19,8 2,7
Pomme de terre	n.d. ¹	69,7	n.d. ¹	59,3	64,1 à 72,4	31,2 2,2
Orge	90,2	89,9	98,3	93,6	76,6 à 83,3	37,5 2,9
Blé	94,8	90,5	96,4	93,1	84,3 à 88,3	45,6 2,6
Avoine	98,4	94,3	97,4	98,5	n.d. ¹	53,2 2,5

¹ non déterminé

² mesuré *in vivo*

TD taux de disparition en %

DT dégradabilité théorique en %

Pour CONE (1991) *in vitro* les amidons les plus rapides proviennent du blé, de l'avoine et du

manioc suivi d'un groupe intermédiaire (pois, pomme de terre, orge) et les dégradations les plus lentes pour le maïs grain, le riz et le sorgho. La hiérarchie des différentes natures est similaire entre les systèmes *in vitro* et *in vivo* même si *in vitro* l'accumulation des produits de dégradation limite la dégradation d'amidon.

La dégradabilité ruminale des amidons lents (maïs, sorgho : 63,2% ($\pm 12,7$) est beaucoup plus variable que celle des amidons rapides (blé, orge, maïs traité, sorgho traité : 84,1% ($\pm 7,6$).

L'importance et la dégradabilité des globulines - élément essentiel de la matrice englobant les grains d'amidons - peut expliquer des différences d'accessibilité de l'amidon dans les céréales (HERRERA-SALDANA et al., 1990). La dégradation lente de l'amidon de pommes de terre pourrait être due à la structure cristalline et la présence d'un inhibiteur de type tannin (part de l'amylopectine et taille des cristaux).

Cependant la différence de vitesse de dégradation s'atténue avec le temps d'incubation (DOREAU, 1988).

La dégradation de l'amidon est dépendante de la vitesse de transit liée à la taille des particules. Les particules de moins de 1,2 mm peuvent quitter le rumen et une taille supérieure à 4 mm ralentit significativement leur dégradation (MILLS et al, 1999a).

D'après ROBINSON et al. (1985) le niveau d'ingestion fait varier la dégradabilité de l'amidon dans le rumen. Cette idée est approfondie par les travaux sur bœufs de BEYER et al. (1993a) qui soulignent l'effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon sur la dégradation ruminale. En particulier, la dégradabilité ruminale de l'amidon de maïs diminue de 92 à 81% quand la part d'amidon dans la ration augmente de 6 à 25%. La dégradabilité est similaire (91 à 95%) pour des niveaux d'amidon compris entre 8 à 30% de la MS pour l'orge et les pommes de terre. Cependant ces valeurs ne correspondent qu'à une ingestion de moins de 3 kg d'amidon/jour chez le bœuf.

2.1.2. Interactions entre la dégradation d'amidon et le pH du jus du rumen

La dégradation d'un amidon lent par rapport à un amidon rapide ralentit la chute postprandiale du pH : cet effet est plus faible pour l'ingestion d'une ration complète (De VISSER, 1997).

La captation d'amidon par les protozoaires diminue avec des pH < 6,0 laissant plus d'amidon résiduel (MILLS et al., 1999a). *In vitro*, un pH très bas (< 6,0) limite la dégradation de l'amidon (CONE, 1991) : si le pH est maintenu à 6,5 tout l'amidon est dégradé en 24h contre 70% si le pH chute à 5,2. Cette observation est valable pour l'amidon de pomme de terre comme pour un amidon synthétique très rapidement dégradable. DIJKSTRA (1994) exprime l'effet amidon sur le pH et de cette manière sur la dégradation ruminale, en temps inférieur à une valeur critique, alors que MILLS et al. (1999a) préfèrent l'expression du pH minimal quotidien. Pour SAUVANT (1997), à pH < 6,0 la chute est nettement accentuée lors de l'apport d'amidons rapides par rapport aux

amidons lents. Pour des pH de 6,5 environ, il n'y a pas d'influence de la vitesse de dégradation de l'amidon. ALDRICH et al. (1993) notent également un pH plus variable pour des rations riches en "glucides non structuraux et rapidement dégradables" 1,5 et 6 heures après le repas. Ce résultat souligne l'importance de la prise en compte de la cinétique postprandiale.

Il semble donc qu'un amidon rapide puisse accentuer la chute postprandiale du pH contrairement aux amidons lents. Le pH optimal pour les enzymes bactériennes et des protozoaires se situe à environ 6,0. La réponse du pH à un amidon rapide varierait en fonction de la quantité d'amidon apporté ainsi que de la fibrosité de la ration.

2.1.3. Dégradation de l'azote et protéosynthèse microbienne

La disponibilité en énergie pour les bactéries du rumen peut interférer fortement avec l'intensité de la protéolyse ruminale. Pour MAHADEVAN et al. (1982) une ration riche en glucides solubles fournirait plus d'acide α -cétonique permettant ainsi une fixation plus importante d'ammoniac. Plusieurs auteurs (ONWUBUEMELI et al., 1985 ; CASPER et SCHINGOETHE, 1989 ; CASPER et al., 1990 ; ALDRICH et al., 1993 ; OVERTON et al. 1995 ; KNOWLTON et al., 1998a) notent une teneur en N_{NH_3} du jus de rumen plus faible pour une ration contenant des glucides de type amidon rapide que pour des amidons lents. Les variations de la concentration en N_{NH_3} sont parfois faibles et l'urémie n'est pas toujours affectée par le type de ration.

Par contre, RODE et SATTER (1988) et SAUVANT (1997) ne démontrent pas d'influence systématique de la vitesse de dégradation ruminale de l'amidon sur l'ammoniogénèse. L'absence d'un tel effet pourrait être due à une fraction azotée potentiellement plus dégradable pour les régimes riches en amidon rapide que pour des amidons lents. De plus DELGADO-ELORDUY et al. (1996) ont montré qu'une augmentation de la dégradation ruminale de l'amidon induisait un accroissement significatif du recyclage d'urée dans le réticulo-rumen, favorisant sans doute la protéosynthèse ruminale. Un accroissement de la protéosynthèse est observé avec les régimes de type amidon rapide par rapport aux amidons lents et contribue ainsi à expliquer la teneur en ammoniac similaire pour les deux types d'amidon (SAUVANT, 1997).

Pour l'orge et la pomme de terre une efficacité énergétique croissante (azote microbien synthétisé/matière organique fermentée) est enregistrée avec une part de concentré croissante dans la ration. C'est l'inverse pour le maïs grain : cette différence découlerait de la moindre disponibilité de l'amidon dans le rumen, ce qui limiterait son utilisation comme source énergétique par les bactéries (VOIGT et al., 1993).

Pour SAUVANT (1997), le flux de matières azotées microbiennes est significativement et positivement influencé par la vitesse de digestion de l'amidon. Le rendement moyen de la

protéosynthèse est de 20-25g pour 100g d'amidon dégradé ou de MOF. SAUVANT (1997) calcule une protéosynthèse inférieure de 14,3 g/kg MOD pour les rations contenant un amidon lent par rapport aux amidons rapides. En prenant une proportion d'acides aminés dans les protéines de 80% et une digestibilité réelle de ces protéines de 0,8 (VERITE et al., 1987) les rations contenant un amidon de type lent fournissent 9,2g PDIM/kg MS de moins que les rations avec un concentré du type d'amidon rapide. Le système néerlandais (OEB/DVE) d'évaluation protéique des aliments (TAMMINGA et al., 1994) propose d'ailleurs une correction de la MOF en fonction de la nature de l'amidon.

Par contre, RODE et SATTER (1988), McCARTHY et al. (1989), KUNG et al. (1992) et OVERTON et al. (1995) n'observent aucune variation significative de la quantité d'N microbien arrivant au duodénum dans les comparaisons orge - maïs grain. Aucun effet significatif de la nature des glucides de la ration (à dégradation plutôt ruminale ou plutôt duodénale) n'a été observé sur le flux d'acides aminés au niveau de l'intestin grêle par ALDRICH et al. (1993).

Ainsi une synchronisation de la vitesse de dégradation de l'énergie et de l'azote dans le rumen pourrait sembler souhaitable, mais les avis sont controversés. La non-synchronisation de la vitesse de dégradation de l'énergie et de l'azote limite l'utilisation de l'azote disponible par les micro-organismes (HUNTINGTON, 1997). Une augmentation de l'énergie facilement disponible suite à la dégradation d'amidon rapide augmente le flux de protéines microbiennes à la sortie du rumen (SPICER et al., 1986 ; HERRERA-SALDANA et HUBER, 1989 ; HERRERA-SALDANA et al., 1990 ; ALDRICH et al., 1993 ; POORE et al., 1993). Cependant McCARTHY et al. (1989) et KHORASANI et al. (1994) n'observent pas d'effet de la synchronisation de la vitesse de dégradation de l'énergie et de l'azote, même si les différences d'ingestion dans l'essai de McCARTHY et al. (1989) peuvent masquer la réponse. Il n'y a pas d'interaction significative entre la vitesse de dégradation des glucides et de l'azote pour les 9 essais compilés par SAUVANT (1997). MILLS et al. (1999a) rapportent une influence de plus en plus faible de la synchronisation avec une fréquence croissante d'alimentation.

Il semble qu'un amidon à dégradation ruminale rapide augmente souvent l'ammoniogénèse et améliore le rendement de la protéosynthèse. Une ingestion plus élevée pour les amidons lents (voir 4.1.) explique sans doute que ce rendement supérieur ne se traduise pas systématiquement par une quantité de protéines microbienne digestibles plus élevées.

2.2. Digestion intestinale

2.2.1. Digestion dans l'intestin grêle

Les fractions d'amidon qui échappent à la dégradation ruminale sont dégradées par l' α -amylase pancréatique (HARMON, 1993) et les oligosaccharidases de la membrane des cellules en brosse de l'intestin grêle. La dernière étape de cette hydrolyse aboutit à des molécules de glucose facilement absorbables (HARMON, 1992). La régulation de la sécrétion de l'amylase pancréatique semble être influencée par le niveau d'ingestion, la composition de la ration et la concentration en protéines (NOCEK et TAMMINGA, 1991). Il semble également qu'un apport azoté plus libéral aiderait à mieux digérer l'amidon dans l'intestin (TANIGUCHI et al., 1995 ; HUNTINGTON, 1997). MILLS et al. (1999b) proposent un modèle dynamique et complexe de la digestion intestinale de l'amidon.

Les fractions d'amidon qui échappent à la dégradation ruminale varient en fonction de la nature de l'amidon, du type d'animal et de la ration. Une dégradation inachevée des macromolécules au niveau du rumen facilite ensuite leur digestion intestinale (OWENS et al., 1986). Si la quantité d'amidon non dégradé dans le rumen augmente, la quantité dégradée dans les intestins augmente en même temps, sans rencontrer de limite apparente de la capacité de digestion (NOCEK et TAMMINGA, 1991). Cependant l'efficacité de cette digestion intestinale traduite par la part relative d'amidon digéré dans l'intestin diminue quand la quantité d'amidon échappant à la dégradation ruminale augmente.

Quatre mécanismes susceptibles de limiter la capacité amylolytique de l'intestin grêle sont proposés par OWENS et al. (1986) :

Le **temps de séjour** du chyme ainsi que sa consistance devraient modifier l'accessibilité de l'amidon pour les enzymes. Un autre facteur évoqué par ces auteurs est l'**accessibilité des grains** d'amidon qui dépend essentiellement de la taille des particules. Ces deux facteurs peuvent expliquer des variations de réponse pour une même matière première en fonction des conditions expérimentales. Si HUNTINGTON (1997) doute que la sécrétion amylasique intestinale soit suffisamment importante pour hydrolyser un flux amylacé important, REMILLARD et JOHNSON (1984), OWENS et al. (1986) et KREIKEMEIER et al. (1990) ne constatent aucun plafond de la capacité digestive du à la **sécrétion et l'activité enzymatique** de l'intestin grêle dans des conditions réelles d'alimentation. Une activité accrue des enzymes pourrait même contrebalancer certains facteurs limitants potentiels (OWENS et al., 1984). Ces auteurs constatent cependant que l'apparition de glucose dans la veine porte correspond à seulement 54% (OWENS et al., 1986) et 65% (HUNTINGTON et REYNOLDS, 1985) de la quantité de glucose perfusée dans l'intestin grêle. Pour l'amidon perfusé à quantité égale (27,2 g/h), ce rendement n'est que de 35% dans le sang portal (HUNTINGTON et REYNOLDS, 1985). Ils expliquent ces pertes par une amyolyse

incomplète dans l'intestin et une fermentation des sucres solubles issus de l'hydrolyse de l'amidon par la flore intestinale. Pour KREIKEMEIER et al. (1991) la limitation de la digestion intestinale du glucose serait plutôt due aux **mécanismes de transport** (max. 20g/h) qu'à la capacité d'hydrolyse. En effet la diffusion passive ou le passage paracellulaire nécessitent un gradient de concentration mais ont un faible coût énergétique contrairement aux transporteurs actifs GLUT2 et SGLT2 (MILLS et al., 1999b). Ces auteurs évoquent également un feed-back négatif de l'absorption de glucose dans les parties distales de l'intestin sur l'activité de disaccharidases. **L'autoconsommation forte** du glucose par les tissus du tube digestif est une autre piste d'explication de l'écart entre disparition intestinale et apparition portale. Il existerait une dépense minimale qui serait couverte prioritairement avant de fournir du glucose à l'organisme (NOCEK et TAMMINGA, 1991 ; SAUVANT et al., 1994). Un modèle dans lequel l'absorption nette de glucose augmente quand l'apport en énergie digestible ingérée dépasse, pour la vache laitière, un seuil de 23 Mcal par jour ce qui correspondrait aux besoins propres des tissus digestifs, est proposé par NOCEK et TAMMINGA (1991). Au-dessous de ce seuil un apport en énergie n'entraînerait pas d'absorption décelable de glucose. Mais le faible nombre de données fragilise la précision de ce modèle. D'après HUNTINGTON (1997), la digestion intestinale de l'amidon fournit 80% du glucose absorbé dans l'intestin par la vache laitière mais seulement 28% de l'apport total en glucose. L'hypothèse d'une absorption incomplète du glucose est soutenue par la découverte de micro-organismes dans l'intestin grêle qui sont susceptibles de fermenter des sucres solubles (OWENS et al., 1986 ; KREIKEMEIER et al. 1991).

Le rendement énergétique estimé de la digestion de l'amidon est plus élevé si cette digestion a lieu dans le rumen (43%) plutôt que dans l'intestin grêle (25%) (OWENS et al., 1986). De cette raison TANIGUCHI et al. (1995) proposent d'exprimer la quantité de glucides digérés en énergie digestible ingérée. Ils observent un rendement en énergie disponible pour les tissus périphériques plus élevé après digestion duodénale que pour la dégradation ruminale accompagnée d'une utilisation d'oxygène plus importante de l'intestin. La consommation d'énergie pour assurer les fonctions biologiques de l'intestin grêle serait donc également plus élevée ce qui pourrait expliquer le faible rendement énergétique par rapport à une dégradation ruminale observé par OWENS et al. (1986).

La capacité intestinale à digérer et absorber l'amidon *in vivo* ne semble pas avoir de limite pour des apports habituels (De VISSER, 1997). HUNTINGTON (1997) rapporte une capacité maximale de digestion intestinale de 3 kg d'amidon par jour pour une vache adaptée (0,46 kg d'amidon/100 kg PV) mais McCARTHY et al. (1989) ne rencontrent pas de limite de la capacité intestinale de digérer l'amidon résiduel de la fermentation ruminale même à 5,1 kg/jour (0,80 kg d'amidon/100 kg PV). TANIGUCHI et al. (1995) rapportent une limite de la digestion duodénale pour des taurillons (250

kg PV) à environ 800 g d'amidon par jour (0,32 kg d'amidon/100 kg PV). ØRSKOV (1986) définit la limite de la capacité de dégradation enzymatique dans l'intestin grêle pour un mouton à 200g d'amidon/jour (0,40 kg d'amidon/100 kg PV) et la capacité d'absorption du glucose entre 300 et 400 g/jour. Si ces données sont extrapolées pour une vache laitière adulte ingérant au maximum 8 kg d'amidon, la quantité d'amidon ayant échappé à la fermentation ruminale peut être estimée à <2 kg (DTamidon > 80%, cf. tableau 2) sauf dans le cas d'une fourniture exclusive en amidon lent.

La limite de la capacité amylolytique de l'intestin et de l'absorption de glucose qui en résulte semble donc rarement atteinte dans les conditions habituelles d'alimentation.

2.2.2. Effet de la nature de l'amidon sur la vitesse de digestion intestinale

La capacité de l'intestin à digérer les amidons lentement dégradés dans le rumen est très variable, cette variabilité étant en partie liée à l'importance de la dégradation ruminale de l'amidon (SAUVANT, 1997). Si la digestibilité de l'amidon dans le duodénum est rapportée à la quantité d'amidon arrivant au duodénum, OVERTON et al. (1995) n'observent pas de différence significative entre des rations contenant de l'orge ou du maïs grain.

En moyenne un quart de l'amidon non-dégradé dans le rumen se retrouve rejeté par voie fécale (SAUVANT, 1997) ce qui signifie que la digestibilité totale de l'amidon est une fonction de la dégradation ruminale. Il y aurait donc une baisse systématique de la teneur en énergie du régime lorsque sa teneur en amidon lent s'accroît. SAUVANT (1997) chiffre cette baisse à 0,018 UFL/kg MS pour une diminution de 10% de la dégradabilité ruminale de l'amidon de la ration. Cette valeur pourrait être plus importante pour les animaux à transit digestif plus rapide, comme les vaches hautes productrices (ROBINSON, 1987).

2.3. Digestibilité totale

Malgré un temps de séjour des digesta dans le gros intestin plus important que dans l'intestin grêle, la digestibilité de l'amidon dans la partie distale y est inférieure (SAUVANT, 1997). Peu de données sont disponibles pour la vache laitière, mais MILLS et al. (1999b) estiment la contribution moyenne à la digestion totale à 6%. OWENS et al. (1986) observent que 30 à 60% de l'amidon qui quitte l'intestin grêle est fermenté dans le gros intestin. ØRSKOV (1986) rapporte une fermentation quotidienne de 100g d'amidon dans le gros intestin chez l'ovine adulte même si les bovins présentent une digestibilité totale de l'amidon qui est sensiblement inférieure à celle des ovins (OWENS et al., 1986).

Dans un essai de modélisation SAUVANT (1997) calcule une digestibilité intestinale (intestin grêle

et gros intestin cumulés) plus élevée pour les amidons rapidement dégradés dans le rumen par rapport à ceux lentement dégradés (respectivement 76 et 61% de l'amidon qui quitte le rumen). Dans cette simulation la digestion des amidons dans le gros intestin ne représente que 1,7% (amidons rapides) à 2,5% (amidons lents) de l'amidon ingéré, ce qui correspond à seulement 10% de la dégradation ruminale pour les amidons lents.

La digestibilité totale de l'amidon dans le tractus digestif est supérieure à 90% (OWENS et al. 1986 ; BERGE et DULPHY, 1991 ; SAUVANT, 1997) et souvent complète (MILLS et al, 1999b). McCARTHY et al. (1989) rapportent une digestion totale de plus de 10 kg d'amidon par jour. SAUVANT (1997) donne une relation significative entre la digestion de l'amidon dans l'ensemble du tube digestif et dans le rumen ce qui souligne l'effet primordial de la dégradation ruminale :

$$dAM_{tot} = 0,242 \times dAM_r + 75,7 \quad (r^2 = 0,79, n=66)$$

BERGE et DULPHY (1991) ne constatent aucun effet significatif des interactions digestives (proportion de concentré, distribution ad libitum ou limitée de la ration) sur la digestibilité totale de l'amidon. Cependant seuls des amidons rapides sont comparés dans cette étude.

En confirmation des résultats de McCARTHY et al. (1989) et de SEOANE et al. (1990), OVERTON et al. (1995) observent une digestibilité totale de l'amidon plus élevée dans des rations contenant de l'orge que dans des rations contenant de maïs grain (96% contre 91%). Par contre SPICER et al. (1986) et KUNG et al. (1992) avec des niveaux d'ingestion plus faibles ne constatent pas de différence significative entre orge et maïs grain.

La digestion postruminale complète donc la dégradation ruminale ce qui fait que les écarts de digestibilité totale entre différentes natures d'amidon restent marginaux.

2.3.1. Effet des traitements technologiques sur la digestion de l'amidon

Le but des différents traitements technologiques est surtout d'améliorer la dégradabilité ruminale des amidons lents et plus rarement de déplacer la digestion de l'amidon du rumen vers l'intestin.

Le grain entier des céréales avec un péricarpe intact est largement ou totalement résistant aux attaques bactériennes (BEAUCHEMIN et al., 1994). La destruction des parois par aplatissement ou broyage augmente la surface d'attaque. La mastication et la rumination permettent ce broyage du péricarpe (HUNTINGTON, 1997), similaire à un broyage mécanique (OWENS et al., 1986). Leurs effets sont limités par l'ingestion rapide d'une quantité élevée d'aliment, ce qui réduit la digestion des particules contenant de l'amidon pendant le passage dans le tractus digestif.

Le maïs et le sorgho présentent une susceptibilité variable à l' α -amylase en fonction de la taille des particules avec un optimum pour la fermentation ruminale et la digestion intestinale qui se situe entre 0,25 et 1 mm (KIM et OWENS, 1985).

Un aspect plus méthodologique concerne l'interaction entre la taille des particules et la dégradabilité de l'amidon. CERNEAU et MICHALET-DOREAU (1991) observent une diminution de la solubilité avec une taille croissante des particules qui est plus importante pour les amidons lents (maïs) que pour les amidons rapides (orge, avoine, son de blé) sans affecter la fraction progressivement dégradable. Ils expliquent ces observations par le fait qu'il y a plus de particules fines (< 50 µm) pour les amidons réputés à dégradation rapide qui s'échappent à travers des pores du sachet (10,4 contre 41,3 % pour maïs grain et orge respectivement), ce qui laisse supposer une certaine surestimation de la dégradabilité réelle des amidons réputés rapides.

Les traitements hydrothermiques diminuent la cristallinité et augmentent surtout la capacité d'absorption d'eau, ce qui induit une meilleure accessibilité aux enzymes et permet d'hydrolyser plus efficacement la matrice protéique de l'endosperme. Le blé et l'orge sont très sensibles à ce type de traitements qui conduit à la dépolymérisation des molécules d'amidon. L'amidon de maïs présente une susceptibilité plus variable.

Les graines de céréales moulues ou extrudées sont en général mieux dégradées dans le rumen que celles aplaties ou concassées (OWENS et al., 1986 ; POORE et al., 1989). Les amidons lents ensilés sont mieux dégradés dans le rumen que les amidons des mêmes matières premières sous forme de grain sec (dégradabilité théorique de 86% contre 59% et de 86% contre 68% respectivement pour le maïs et le sorgho ; OWENS et al., 1986).

Par contre, l'ajout de matière grasse dans le concentré, les traitements aux ionophores, phénols ou formaldéhydes peuvent diminuer la dégradation ruminale et déplacer la digestion de l'amidon vers l'intestin (HUNTINGTON, 1997 ; MICHALET-DOREAU et al., 1997).

2.3.2. Interactions entre la digestion de l'amidon et d'autres constituants de la ration

2.3.2.1. Matière organique

L'amidon étant le composant principal de la matière organique des grains une relation forte entre la dégradation de l'amidon et celle de la MO dans le rumen est calculée par SAUVANT (1997) :

$$dMO = 0,4 \times dAMIDON + 30,4 \quad (n=62, r=0,98, \text{etr}=2,6\%).$$

La proportion de MO dégradée dans le rumen est plus élevée pour les amidons rapides (orge) que pour les amidons lents (maïs grain), même si cette tendance n'est pas systématiquement significative (SPICER et al., 1986 ; RODE et SATTER, 1988 ; McCARTHY et al., 1989 ; KUNG et al. 1992 ; OVERTON et al., 1995). La dégradabilité de la MOF ou de la MO étant largement influencée par la vitesse de dégradation de l'amidon, SAUVANT (1997) a proposé de soustraire l'amidon non-digestible dans le rumen de la MOF avant de calculer les PDIME. Pourtant la quantité de MO digérée dans le rumen entre les deux types d'amidon devrait être similaire, suite à une ingestion inférieure pour les rations contenant des amidons rapides. Pour HARMISON et al. (1997),

la digestibilité de la matière organique dans le tractus total dépend plus de la nature et de la quantité d'amidon que de la teneur en NDF du fourrage.

Une légère augmentation de la digestibilité apparente de la MO dans le tractus total par l'incorporation d'amidon à différents niveaux dans la ration est notée par BEYER et al. (1993a). Cette augmentation est plus élevée pour l'orge et la pomme de terre (respectivement de +5,1 et +6,5) que pour le maïs grain (+3%) et provient essentiellement du rumen. A l'inverse, la ration contenant 6% d'amidon de maïs grain présente une digestibilité apparente de la matière organique dans le rumen plus élevée que les rations contenant 12 ou 25%. Les auteurs expliquent l'effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon sur la digestibilité de la MO par la fermentescibilité plus faible de l'amidon de maïs dans le rumen par rapport aux 2 autres concentrés. Cependant la modification du rendement énergétique pour l'animal, issue du déplacement de la digestion de l'amidon de maïs du rumen vers le duodénum, reste négligeable (BEYER et al., 1993a).

Il semble donc que pour les aliments riches en amidon il y ait une grande dépendance de la dégradabilité ruminale de la MO vis à vis de la nature de l'amidon. Par contre, la digestibilité apparente de la MO dans le tractus total ne serait pas affectée par la vitesse de dégradation de l'amidon.

2.3.2.2. Fibres

Des quantités élevées de "glucides non structuraux" peuvent inhiber la dégradation des fibres au niveau du rumen soit directement car ce sont des substrats plus faciles à dégrader soit indirectement via une baisse du pH ruminal (OWENS et al., 1986 ; TAMMINGA et al., 1990 ; TANIGUCHI et al., 1995 ; De VISSER, 1997).

La dégradabilité totale et ruminale de la fraction NDF est significativement plus élevée pour les rations contenant des amidons lents par rapport aux amidons rapides. Ainsi HARMISON et al. (1997) notent une digestion totale de fibres (NDF) plus élevée en ajoutant du maïs grain à une ration témoin contre aucune variation significative après l'ajout de blé. La dégradation ruminale de la fraction NDF est plus faible pour une ration contenant 75% de blé contre une ration contenant 67% de maïs grain (MARTIN et al., 1999). Avec des temps de rétention des particules similaires pour les deux rations, l'activité fibrolytique des micro-organismes du rumen est néanmoins significativement plus faible pour la ration blé. De plus la forte acidité du milieu ruminal diminue le nombre de protozoaires présent. L'absence de variations de la digestibilité totale de la fraction NDF serait expliquée par une compensation postruminale (MARTIN et al., 1999).

Cette baisse de dégradabilité pourrait être liée au fait que les constituants pariétaux des grains de

maïs et de sorgho sont plus digestibles que ceux du blé, de l'orge ou de l'avoine plutôt qu'à un effet propre de la nature de l'amidon (SAUVANT, 1997). En effet, les études *in vitro* menées avec différents types d'amidon mais avec le même type de fibres ne permettent pas de conclure (CAREY et al., 1993 ; ARCHIMEDE et al., 1996). Une diminution de la dégradation des fibres (NDF) des fourrages *in vivo* après une complémentation avec des amidons rapides par rapport à une complémentation avec des amidons lents est rapportée par SCHWARZ et al. (1996) et HARMISON et al. (1997).

De même, De PETERS et TAYLOR (1985), McCARTHY et al. (1989) ainsi qu'OVERTON et al. (1995) notent une diminution de la proportion des fibres (ADF et NDF) dégradées dans le rumen pour des rations supplémentées en orge (amidon de type rapide) par rapport aux rations contenant du maïs grain. BERGE et DULPHY (1991) observent une forte diminution de la dégradabilité de la cellulose brute avec l'augmentation de la part d'orge dans la ration, ce qui est lié à la richesse en amidon de ce concentré et à la chute du pH ruminal induite par l'apport d'amidon. Les résultats d'OVERTON et al. (1995) semblent confirmer cette hypothèse, même si dans leur essai la dégradation des fibres est maximale pour un mélange orge-maïs (25:75). Il est possible que ce rapport amidon rapide-amidon lent améliore l'amorce de la digestion des fibres par rapport au régime maïs grain seul.

D'autres travaux (KUNG et al., 1992 ; RODE et SATTER, 1988 ; SEOANE et al., 1990) ne montrent pas de différence de la digestion des fibres en fonction de la nature de l'amidon de l'aliment concentré.

La variation du taux de passage des particules qui est liée à la vitesse de la dégradation de l'amidon et donc à la nature de l'amidon fait également varier la dégradabilité (MOULD et al., 1983).

En conclusion, pour la plupart des auteurs, l'augmentation de la part d'amidon et notamment d'amidon rapidement dégradable dans la ration diminue la dégradabilité des fibres dans le rumen.

3. Effet de l'amidon sur les produits terminaux de la digestion

3.1. Acides gras volatils

Les teneurs en AGV du jus de rumen sont la résultante des écarts entre leur production et l'absorption. Chez le mouton les taux d'apparition dans la veine porte sont indépendants de la quantité perfusée pour l'acétate et le propionate, contrairement au butyrate dont le flux augmente de 21 à 32% avec une perfusion croissante (KRISTENSEN et al., 2000). La capacité limitée de synthèse du β -OH-butyrate par l'épithélium du rumen pourrait expliquer la variabilité observée pour le butyrate.

ONWUBUEMELI et al. (1985) observent moins d'AGV pour du maïs grain humide que pour une ration contenant des pommes de terre avec un niveau d'AGV faible (inférieur à 80 mM/L). Dans 13 des comparaisons amidon rapide - amidon lent chez la vache laitière que nous avons répertoriées (annexe 1), aucune différence significative concernant la teneur totale en AGV du jus du rumen n'a été signalée. Dans sa compilation bibliographique SAUVANT (1997) rapporte un léger accroissement de la teneur moyenne en AGV (+ 4 mM/L). Il la lie à la dégradabilité ruminale plus élevée des amidons rapides. L'éventuel effet sur la concentration en AGV est encore atténué dans les conditions d'une ration complète (ROHR et SCHLUNSEN, 1986). McCARTHY et al. (1989) observent plus d'AGV pour l'orge que pour le maïs grain si la source d'azote est peu dégradable. Une interaction avec la disponibilité ruminale d'azote n'est pas confirmée par ALDRICH et al. (1993) et KHORASANI et al. (1994).

La fermentation d'une quantité élevée d'amidon engendre une proportion élevée en AGV glyco-géniques contre un profil d'AGV plutôt lipogénique avec une fermentation douce - typique des rations riches en fourrage (MILLS et al., 1999a).

Les concentrations des différents AGV ne sont pas clairement modifiées dans les comparaisons amidons rapides - amidons lents (NOCEK et TAMMINGA (1991).

Ces comparaisons ne montrent pas systématiquement de différences significatives dans les proportions des différents AGV dans le profil fermentaire. Les données de la bibliographie (annexe 1) rapportent des proportions d'acétate au moins équivalentes mais bien souvent plus élevées (McCARTHY et al., 1989 ; HERRERA-SALDANA et al., 1989 ; OVERTON et al., 1995 ; PLASCENIA et ZINN, 1996) pour les rations contenant un concentré de type amidon lent par rapport aux rations apportant un amidon rapide. La proportion de butyrate est également plus élevée pour les amidons lents dans les travaux de CASPER et SCHINGOETHE (1989), CASPER et al. (1990), ALDRICH et al. (1993), OVERTON et al. (1995) et HARMISON (1997). Dans les autres essais les proportions ne sont pas statistiquement différentes sauf pour YANG et al. (1997a) qui notent une proportion légèrement plus élevée pour la ration contenant de l'amidon rapide. La

proportion du propionate suit une tendance inverse : elle est soit équivalente soit plus faible (OMWUBUEMELI et al., 1985 ; WEISS et al., 1989 ; CASPER et SCHINGOETHE, 1989 ; CASPER et al., 1990 ; OVERTON et al., 1995 ; PLACENIA et ZINN, 1996 ; HARMISON et al., 1997) pour les rations contenant des amidons lents.

L'absence de variation significative dans des comparaisons maïs grain - orge pour De PETERS et TAYLOR (1985) ainsi que De VISSER et al. (1990) peut s'expliquer par l'apport modéré d'amidon (inférieur à 6 kg/jour). En effet, LAURENT (1988) rapporte des modifications du mélange des AGV si le maïs grain représente 60% de la ration contre seulement 45% pour l'orge. De même BEYER et al. (1993b) constatent des variations de la proportion des AGV (diminution de l'acétate, augmentation du butyrate et peu de variations du propionate) avec des apports croissants d'amidon, indépendamment de la nature d'amidon. Il semblerait donc que l'équilibre acétate/propionate dépende plutôt de la vitesse de dégradation. L'augmentation du butyrate et l'équilibre acétate/butyrate correspond souvent à une population active de protozoaires dans le rumen qui sont de gros consommateurs d'amidon. En effet CHILLIARD et al. (2000) rapportent une proportion relativement élevée de butyrate de 15 à 20% dans les AGV pour des apports d'amidon lent (maïs grain).

SAUVANT et al. (1994) proposent de caractériser le profil fermentaire par les rapports entre les AG lipogéniques et glucogéniques. En général les rapports C_2/C_3 et $(C_2+C_4)/C_3$ ont tendance à être plus élevés pour les rations contenant de l'amidon lent par rapport aux rations de type amidon rapide (SAUVANT et al., 1994 ; MILLS et al., 1999a). L'analyse des 18 comparaisons amidon lent - amidon rapide de la littérature (annexe 1) montre une différence significative. En moyenne, les amidons lents ont des rapports C_2/C_3 (2,7 contre 2,4 ; $P < 0,01$) et $(C_2+C_4)/C_3$ (3,1 contre 2,8 ; $P < 0,01$) plus élevés que les amidons rapides confirmant les conclusions de SAUVANT et al. (1994). Le profil fermentaire des rations "amidon lent" est donc relativement plus riche en précurseurs lipogéniques que glyco-géniques.

Cependant l'analyse de ces données est complexe. Un niveau d'ingestion différent entre les deux types de rations brouille souvent la comparaison des deux natures d'amidon. L'écart d'ingestion en amidon dépasse 1,5 kg dans les travaux de McCARTHY et al. (1989) et de WEISS et al. (1989). De VISSER et al. (1990) et KHORASANI et al. (1994) observent même des rapports plus faibles pour les rations "amidon lent" que pour les rations "amidon rapide".

Un autre facteur de variation est l'interaction entre les apports en amidon et en fibres de la ration. Si les ingestions en amidon, en fibres totales (NDF), en glucides ainsi que la part de l'amidon dans les glucides ingérés ne sont que faiblement corrélées aux rapports des teneurs en AGV ($r < 0,25$), les écarts de ces mêmes variables intra-couple (amidon rapide - amidon lent) le sont déjà beaucoup plus : Les variations du rapport C_2/C_3 est positivement corrélé avec les variations de

l'ingestion de fibres (NDF) :

$$dC_2/C_3 = - 0,26 + 0,27 \text{ dNDF} \quad (r=0,60, \text{etr}=0,26, n=13)$$

$$d(C_2+C_4)/C_3 = - 0,3 + 0,38 \text{ dNDF} \quad (r=0,67, \text{etr}=0,31, n=13)$$

Une comparaison rigoureuse de différents types d'amidon nécessiterait donc des rations assurant une ingestion similaire de fibres.

Une autre source de variation est l'équilibre initial dans le rumen. En effet le rumen semble très tamponné et insensible aux variations de vitesse de digestion de l'amidon quand la fermentation est dans une zone «normale» (65-67% C_2 , 18-20% C_3 et $C_2/C_3 = 3,2-3,5$) (SAUVANT et al., 1994). Il semble donc que le niveau d'ingestion d'amidon et de fibres, les éventuels traitements technologiques des matières premières et la taille des particules de fourrages interfèrent fortement sur le type de réponse (OVERTON et al., 1995).

En conclusion, la concentration en AGV n'est pas systématiquement modifiée en fonction de la nature d'amidon. Par contre, le profil des AGV varie en fonction de la vitesse de dégradation ruminale de l'amidon pour les essais avec des apports élevés en amidon (>7 kg/jour). Dans ces cas, la dégradation des amidons rapides induit une augmentation de la part molaire du propionate et une diminution de l'acétate et/ou du butyrate. Ces changements entraînent une baisse des rapports C_2/C_3 ou $(C_2+C_4)/C_3$ pour les rations contenant des amidons rapides. Cependant ces rapports varient également en fonction d'autres paramètres de la ration comme le niveau d'ingestion, la teneur en NDF ainsi que le profil fermentaire initial.

3.2. Métabolites sanguins

Parmi les métabolites énergétiques, le glucose a été le plus étudié, cependant les résultats des essais zootechniques ne permettent pas de conclure. En effet KHORASANI et al. (1994) ainsi que SCHMIDELY et al. (1996) n'observent pas de différence de glycémie et d'insulinémie entre les amidons lents et rapides ce qui pourrait être lié à la courte durée des expérimentations (3 semaines). D'après HUNTINGTON (1997) l'apport d'un amidon rapidement fermentescible permettrait un bénéfice énergétique plus élevé que l'apport d'une source d'amidon échappant en plus grande partie aux fermentations ruminales. Pour SAUVANT (1997), l'effet insulinothéropique d'une fermentation d'amidon rapide est plus marqué que celui de l'absorption intestinale de glucose accrue pour un amidon à dégradation ruminale lente. Les résultats de GRINGS et al. (1992) et de LANDAU et al. (1995) vont dans le même sens. Par contre DELGADO-ELOURDY et al. (1996) rapportent qu'un apport accru d'amidon lent augmente le flux de glucose absorbé par rapport à un apport en amidon rapide.

La perfusion de précurseurs glucidiques, soit au niveau du rumen pour simuler un apport d'amidon rapide, soit au niveau de l'intestin grêle en simulant un apport accru d'amidon lent constitue une autre approche. En général une perfusion d'amidon augmente l'insulinémie indépendamment du lieu de la perfusion (KNOWLTON et al., 1998b), entraînant une diminution des concentrations sanguines de glucose, urée, acides aminés, acides gras non-estérifiés et corps cétoniques. En effet HURTAUD et al. (1998) observent une augmentation significative de la glycémie au niveau de la veine jugulaire de vaches en lactation suite à la perfusion d'un mélange d'AGV ou de propionate dans le rumen mais également après une perfusion de glucose dans l'abomasum, en comparaison à un régime de base ne couvrant que 88% des besoins énergétiques. Une insulinémie accrue ralentit également la néoglucogenèse et augmente l'utilisation du glucose par les tissus périphériques (GUERINO et al., 1991 ; NOCEK et TAMMINGA, 1991 ; KNOWLTON et al., 1998b), sauf pour la glande mammaire (LAARVELD et al., 1981 ; McGUIRE et al., 1995). En effet, la glande mammaire ne possède pas de transporteur de glucose sensible à l'insulinémie ce qui lui permet de s'approvisionner en glucose indépendamment de la glycémie (ZHAO et al., 1993). L'entrée brutale de propionate dans l'organisme après une dégradation très rapide d'amidon produit un effet particulièrement insulinothrompe (ISTASSE et ØRSKOV, 1984). Si la capacité hépatique d'utilisation du propionate est dépassée par la concentration portale, une sécrétion accrue d'insuline stoppe la lipolyse, accroît la lipogenèse, ce qui diminue la production de matières grasses dans la glande mammaire (ØRSKOV et al., 1986). Les précurseurs lipogéniques (acétate et β -OH-butyrates) diminuent logiquement après une perfusion de propionate ou de glucose mais augmentent après perfusion d'un mélange d'AGV (HURTAUD et al., 1998).

L'efficacité énergétique de la digestion intestinale de l'amidon serait deux fois plus forte que la fermentation dans le rumen ou le gros intestin. L'absorption de glucose est aussi plus efficace que l'absorption d'AGV (SAUVANT et al., 1994) suite aux pertes de méthane et de chaleur. Cependant les interactions métaboliques semblent tamponner ce gain d'énergie et un profit énergétique par le déplacement de la digestion de l'amidon du rumen vers l'intestin n'est pas décelable (NOCEK et TAMMINGA, 1991). Ainsi la glycémie périphérique n'est pas modifiée significativement chez la vache (HURTAUD et al., 1998 ; KNOWLTON et al., 1998b).

Par contre l'apport d'amidon lent semble plutôt avoir un effet sur les précurseurs sanguins lipidiques. Chez le taurillon, une perfusion ruminale d'un amidon de maïs augmente les flux d'acétate et de β -OH-butyrates en accord avec l'augmentation du C_4 du jus du rumen par rapport à une perfusion abomasale (TANIGUCHI et al., 1995). HASSELMANN et al. (1997) observent également une augmentation de la teneur plasmatique en β -OH-butyrates avec un niveau croissant d'amidon rapide de la ration complète. Chez des vaches en lactation, nourries avec une ration contenant 50% de concentré, si la perfusion ruminale contient exclusivement du C_4 , les teneurs sanguines en

acétoacétate et en β -OH-butyrate augmentent de manière linéaire avec la teneur ruminale en butyrate, sans changer le rapport entre ces corps cétoniques (MIETTINEN et HUHTANEN, 1996) et la glycémie diminue en même temps. L'effet de ces métabolites est par contre relativement faible pour des perfusions respectant le rapport habituel C_3 / C_4 de $\geq 1,5$.

Les variations de la glycémie périphérique, théoriquement plus élevées lors de la digestion intestinale de l'amidon, sont donc souvent peu importantes voir indécélables. Les raisons peuvent être multiples : les tissus du tube digestif ont de forts besoins en glucose, une apparition portale accrue de glucose ne se traduit pas forcément par une glycémie périphérique plus élevée, il y a des interactions avec le métabolisme lipidique. La mise en évidence d'une variation d'absorption de glucose ou de ses précurseurs pose aussi un problème méthodologique. L'absorption ruminale est canalisée par la veine splénique et par la veine mésentérique pour l'absorption intestinale. Ces deux veines débouchent dans la veine porte qui amène le sang au foie. Le glucose formé par néoglucogénèse quitte le foie par la veine hépatique, puis gagne le sang périphérique. Toute étude voulant distinguer la réponse glycémique issue de l'absorption intestinale de celle de l'absorption ruminale nécessite au moins des cathéters dans la veine porte, ce qui est une technique lourde à mettre en œuvre. La majorité des études se contentent alors de l'effet cumulé de l'absorption intestinale et de la néoglucogénèse sur la glycémie périphérique, d'où l'imprécision des observations.

Les acides gras non-esterifiés (AGNE) sont issus de la mobilisation des tissus adipeux ce qui interfère avec la disponibilité du glucose. Ils reflètent plutôt l'état nutritionnel énergétique, sans lien spécifique avec la forme d'apport énergétique.

L'urémie reflète assez fidèlement les variations d'N ammoniacal du jus de rumen, qui dépendent surtout de la teneur en matières azotées totales des rations et de leur dégradabilité (CASPER et al. 1989 ; CASPER et SCHINGOETHE 1990 ; GRINGS et al., 1992 ; ALDRICH et al., 1993). L'effet de la nature d'amidon sur l'urémie doit être étudié avec des rations isoazotées et avec des sources d'azote d'une dégradabilité similaire. HURTAUD et al. (1998) ne rapportent aucune variation significative de l'urémie en fonction du précurseur énergétique et de son lieu d'absorption. Mais pour HURTAUD et RULQUIN (1999) une infusion intestinale de glucose ou d'amidon diminue l'urémie par rapport à une infusion ruminale de propionate ou d'un mélange d'AGV : ils expliquent cette urémie plus faible par un catabolisme ralenti des acides aminés via un apport de précurseurs glucoformateurs. Dans sa synthèse, SAUVANT (1997) rapporte une urémie supérieure pour les amidons rapides par rapport aux rations contenant des amidons lents, sans mentionner d'éventuelles différences des niveaux d'apports azotés.

L'effet de la vitesse de dégradation de l'amidon n'est pas observé systématiquement sur les

variations de la glycémie. La régulation très complexe de ce paramètre en interaction avec le métabolisme lipidique, la nécessité d'une méthodologie lourde ainsi que des connaissances incomplètes de l'autoconsommation des tissus digestifs expliquent les grandes variations de réponse de la glycémie.

Cependant l'apport d'amidon lent semble favoriser les précurseurs lipidiques acétoacétate et β -OH-butyrate. La compétition dans leur utilisation entre les tissus adipeux et la glande mammaire est régulée en bonne partie par l'insulinémie qui dépend de la fourniture de glucose par l'intestin et le foie.

4. Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur les performances zootechniques

4.1. Ingestion

Dans les comparaisons orge - maïs grain de la littérature, l'ingestion de matière sèche est plus élevée pour le maïs grain, mais cette différence n'est pas toujours significative (tableau 3). Seuls PLASCENIA et ZINN (1996) observent une différence inverse en comparant du maïs grain à du maïs grain humide avec de très faibles niveaux d'amidon. Il n'y a pas d'écart d'ingestion de matière sèche quand la quantité d'amidon ingéré reste relativement faible (6 kg/jour) et quand l'apport d'amidon lent est inférieur de plus de 0,5 kg/jour à l'apport d'amidon rapide.

OVERTON et al. (1995) notent également un seuil d'ingestion d'amidon pour l'effet sur la matière sèche. Pour d'autres natures d'amidon (résidus de pomme de terre, sorgho, maïs grain humide) ONWUBUEMELI et al. (1985) ainsi que POORE et al. (1993) confirment qu'il n'y a aucune différence significative dans les quantités ingérées. Le faible niveau d'ingestion d'amidon pourrait au moins partiellement expliquer l'absence d'un effet significatif.

La synthèse de SAUVANT (1997) confirme que la matière sèche ingérée est significativement plus élevée (+0,43 kg/jour) pour les amidons lents par rapport aux amidons rapides. Cet effet est particulièrement net pour les vaches produisant plus de 30kg de lait par jour. Ceci laisse supposer qu'il y aurait une rétroaction d'homéostasie plus intense sur l'ingestion pour les amidons rapides, en raison de fermentations ruminales et d'absorption d'AGV plus brutales. Pour McCARTHY et al. (1989), l'ingestion plus faible pour les rations de type amidon rapide pourrait être due à une chute plus brutale du pH ou une palatabilité inférieure de l'aliment apportant l'amidon rapide (orge) par rapport au maïs grain.

Cependant, MIETTINEN et HUHTANEN (1996) n'observent pas d'effet significatif sur l'ingestion après une perfusion ruminale de butyrate ou de propionate malgré un léger écart (16.9 et 16.1 kg MS respectivement).

Tableau 3 : Effet de la vitesse de dégradation de l'amidon sur l'ingestion chez la vache laitière

Référence	Ingestion (kg MS/jour)		Différence	Amidon ingéré (kg) lent-rapide
	amidon rapide	amidon lent (maïs grain)		
McCarthy et al. (1989), tourteau de soja	20.9 ²	24.2	S	11.0 - 8.6
McCarthy et al. (1989), farine de poisson	20.5 ²	23.3	S	10.3 - 8.2
Casper et Schingoethe (1989)	19.1 ²	20.0	S	7.8 - 7.5
Casper et al. (1990)	19.8 ²	20.4	S	10.1 - 9.9
Aldrich et al. (1993), tourteau de colza	25.0 ^{3a}	26.7	S	9.3 - 8.9
Khorasani et al. (1994), tourteau de soja	21.2 ²	22.7	S	7.5 - 6.5
Overton et al. (1995)	19.6 ²	22.8	S	7.5 - 6.7
Yang et al. (1997b)	16.9 ²	17.9	S	8.3 - 6.2
Nalsen et al. (1987)	23.0 ¹	24.3	? ⁴	
Faldet et al. (1986a), foin de luzerne	17.8 ¹	20.1	NS	6.3 - 5.7
Faldet et al. (1986b), ensilage de sorgho	24.6 ¹	25.2	NS	8.8 - 9.7
Grings et al. (1992)	26.1 ²	27.3	NS	9.7 - 10.1
Aldrich et al. (1993), farine de sang	24.9 ³	25.3	NS	8.8 - 9.4
Khorasani et al. (1994), farine de poisson	22.3 ²	22.1	NS	8.0 - 7.9
Yang et al. (1997a)	22.6 ²	22.4	NS	9.0 - 7.1
De Visser et al. (1992)	24.0 ²	23.1	NS	< 5.5
Harmison et al. (1997)	17.4 ¹	17.5	NS	6
De Peters et Taylor (1985)	18.3 ²	18.5	NS	< 5
Rode et Satter (1988)	16.3 ²	16.7	NS	(< 6.5)
Weiss et al. (1989)	20.7 ²	21.2	NS	5.9 - 7.4
Herrera-Saldana et Huber (1989), drêches	23.7 ²	23.8	NS	7.1 - 5.8
Herrera-Saldana et Huber (1989), farine de coton	25.3 ²	24.3	NS	8.3 - 7.4
De Visser et al. (1990)	24.7 ²	24.4	NS	< 6
Plascenia et Zinn (1996)	17.8 ³	16.5	S	< 5

1 blé

2 orge

3 maïs grain humide (CCM : corn cob mix)

4 pas d'analyse statistique

En conclusion, avec un amidon lent apporté en quantité importante (au-delà de 6-7 kg/jour) l'ingestion de matière sèche est souvent plus élevée que celle engendrée par la même quantité d'un amidon rapide. Cette observation a été validée essentiellement pour les comparaisons maïs grain - orge. Elle reste cependant à confirmer pour des comparaisons amidon rapide comme le blé et amidon lent comme le sorgho, le riz et la pomme de terre.

4.2. Production de lait et lactose

La production de lait brut est déterminée par l'absorption de précurseurs énergétiques par la glande mammaire (KRONFELD, 1976). La nature de l'amidon peut donc entraîner un effet sur la production laitière à condition de modifier significativement la disponibilité en glucose pour la glande mammaire. KNOWLTON et al. (1998b) notent une production laitière et de lactose plus élevée après une infusion d'amidon (dans le rumen ou dans l'abomasum) par rapport à une ration témoin, malgré une ingestion plus faible. Un apport d'énergie inférieur découlant d'un apport équivalent d'amidon de type lent peu digestible (cas du sorgho non traité) peut cependant limiter la fourniture de glucose pour la glande mammaire, comme le montrent POORE et al. (1993).

Compte tenu de l'effet positif de la nature de l'amidon sur l'ingestion de matière sèche, les rations apportant un amidon lent devraient se caractériser par une production laitière plus élevée que les rations apportant de l'amidon rapide avec une réponse proportionnelle à l'écart d'ingestion.

SAUVANT (1997) n'observe pas d'influence significative de la nature de l'amidon sur la production de lait brut et de la teneur en lactose, qui sont pourtant significativement et positivement liées au niveau d'ingestion. Il explique cette absence de réponse par des teneurs en énergie des rations différentes, qui tamponnent les effets observés sur l'ingestion. En effet, les travaux de McCARTHY et al. (1989), YANG et al. (1997b), CASPER et SCHINGOETHE (1989) ainsi que CASPER et al. (1990) montrent le lien de l'effet de la nature d'amidon sur l'ingestion et sur la production laitière (tableau 4).

Un éventuel déplacement de la digestion de l'amidon du rumen vers l'intestin par un apport plus élevé en amidon lent peut augmenter la glycémie, sans pour autant améliorer la production laitière (SAUVANT et al., 1994). HURTAUD et al. (1998) ne constatent pas de modification de la production de lait brut suite à une infusion duodénale de glucose mais une infusion ruminale d'un mélange d'AGV ou de propionate augmente bien la production laitière.

La quantité de lactose sécrétée dans le lait est étroitement liée à la quantité de lait produit comme les deux dépendent directement de la fourniture de glucose par la néoglucogénèse à partir du propionate ou du glucose absorbé au niveau du duodénum. Des perfusions d'AGV permettent donc une approche intéressante des effets des différents métabolites. Une proportion accrue d'acides gras glucogéniques (lactate et surtout propionate) par rapport aux lipogéniques (acétate et butyrate) dans les AGV du rumen peut augmenter la production de glucose dans le foie et l'approvisionnement de la glande mammaire et stimuler ainsi la synthèse de lactose et donc la quantité de lait produite (NOCEK et TAMMINGA, 1991 ; MIETTINEN et HUHTANEN, 1996). Une perfusion abomasale de propionate augmente la production de lait brut par rapport à la perfusion de butyrate sans effet significatif sur l'ingestion (MIETTINEN et HUHTANEN, 1996).

Tableau 4 : Effet de l'interaction quantité et nature de l'amidon sur l'ingestion et sur la production de lait brut.

Référence	Amidon ing. (kg/jour) : lent-rapide	Différence pour l'ingestion de la MS	Production laitière (kg/jour)	
			Ecart (Moy.) lent-rapide	Différence
Overton et al. (1995)	7.5 - 6.7	S	4.3 (25)	S
McCarthy et al. (1989), farine de poisson	10.3 - 8.2	S	3.5 (34)	S
McCarthy et al. (1989), tourteau de soja	11.0 - 8.6	S	2.6 (34)	S
Faldet et al. (1986b), ensilage de sorgho	8.8 - 9.7	NS	1.6 (28)	S
Faldet et al. (1986a), foin de luzerne	6.3 - 5.7	NS	1.4 (30)	S
Yang et al. (1997b)	8.3 - 6.2	S	1.3 (30)	S
Casper et Schingoethe (1989)	7.8 - 7.5	S	0.8 (32)	S
Casper et al. (1990)	10.1 - 9.9	S	0.4 (32)	S
Khorasani et al. (1994), tourteau de soja	7.5 - 6.5	S	1.5 (29)	NS
De Visser et al. (1990)	< 6	NS	1.1 (38)	NS
Aldrich et al. (1993), farine de sang	8.8 - 9.4	NS	0.8 (39)	NS
De Peters et Taylor (1985)	< 5	NS	0.6 (28)	NS
Weiss et al. (1989)	5.9 - 7.4	NS	0.4 (23)	NS
Harmison et al. (1997)	6.0	NS	0.5 (21)	NS
Yang et al. (1997a)	9.0 - 7.1	NS	0.5 (24)	NS
Aldrich et al. (1993), tourteau de colza	9.3 - 8.9	S	0.2 (39)	NS
Khorasani et al. (1994), farine de poisson	8.0 - 7.9	NS	0 (30)	NS
Grings et al. (1992)	9.7 - 10.1	NS	-0.7 (41)	NS
Poore et al. (1993), paille de blé	7.2 - 6.8	NS	-1.0 (19)	NS
Poore et al. (1993), foin de luzerne	6.2 - 6.1	NS	-1.0 (19)	NS
Plascenia et Zinn (1996)	3.9 - 4.8	S	- 1.6 (24)	S

1 signification de la différence non spécifiée

Comme la synthèse de lactose augmente en même temps, la limitation de la synthèse par un profil trop pauvre en propionate peut être supposée. HURTAUD et al. (1993) confortent cette hypothèse en rapportant une teneur en lactose plus élevée après une perfusion de propionate que pour la perfusion d'un mélange d'AGV dans le rumen. En même temps AIELLO et al. (1989) soulignent l'effet inhibiteur du butyrate sur la glycémie, ce qui limite la synthèse de lactose. MIETTINEN et HUHTANEN (1996) émettent l'hypothèse que la vache laitière ne peut tamponner un déficit en glucose (fourniture de propionate par le rumen par rapport aux besoins) que sur un temps relativement court (moins de 14 jours). Si la disponibilité en glucose reste déficitaire au-delà de ce délai, la vache réagit par une baisse de la synthèse du lactose. Cependant MILLER et al. (1991)

ainsi que CANT et al. (1993) considèrent que les variations de la glycémie périphérique ne sont pas limitantes pour la synthèse du lait. SAUVANT et al. (1994) rapportent une "marge de sécurité" de capacité néoglucogénique importante chez la vache.

L'hypothèse de la détermination de l'effet sur la production laitière par une plus grande fourniture de glucose pour la mamelle semble être confirmée par les comparaisons amidon - paille : le remplacement de concentrés riches en amidon (orge ou blé) par des concentrés riches en fibres facilement dégradables (pulpes de betteraves) dans des rations à base d'ensilage d'herbe permet d'augmenter la production de lait (HUHTANEN, 1993), ce qui n'est pas vrai pour les rations à base d'ensilage de maïs (COLIN-SCHOELLEN et al., 1995). Comme l'ingestion ne varie pas significativement, une amélioration de la dégradation ruminale des fibres de l'ensilage d'herbe par l'apport de concentré pourrait expliquer un gain supplémentaire en énergie disponible moins évident pour les rations à base d'ensilage de maïs.

La comparaison de deux natures d'amidon à dégradation ruminale différente ne révèle pas systématiquement des écarts de production de lait brut et quasiment jamais de la teneur en lactose. La réponse de la production laitière est souvent en lien étroit avec celle de l'ingestion.

4.3. Matière protéique

Les protéines du lait sont essentiellement synthétisées à partir du pool sanguin d'acides aminés libres. Cependant il y a des liens avec le métabolisme énergétique : cette synthèse nécessite une disponibilité d'énergie suffisante et le catabolisme des acides aminés peut également diminuer le pool sanguin.

La variation du taux protéique est souvent dépendante des variations de la production de lait brut. OLIVEIRA et al. (1990), ALDRICH et al. (1993) et POORE et al. (1993) observent un TP significativement plus élevé pour des vaches nourries avec une ration de type amidon rapide par rapport à un amidon lent, sans que la production laitière ne soit affectée. Ils expliquent ce TP plus élevé par la théorie glucogénique (voir plus bas). Pour OVERTON et al. (1995) alors que le TP est plus fort, la quantité de matière protéique diminue significativement quand la part de maïs grain dans la ration est remplacée par de l'orge, suite à une chute de la production de lait brut. L'augmentation du TP observée peut donc correspondre à un effet concentration pour les amidons rapides. SAUVANT (1997) conclut à un taux protéique significativement plus élevé pour les régimes amidon rapide par rapport aux amidons lents, sans modification de la quantité de matière protéique produite. ONWUBUEMELI et al. (1985), FALDET et al. (1986a et b), NALSEN et al.

(1987), WEISS et al. (1989), McCARTHY et al. (1989) ainsi que HARMISON et al. (1997) n'observent pas d'effet significatif de la nature de l'amidon sur le TP. MORAN (1986) ainsi que MARTIN et THOMAS (1988) constatent des TP plus faibles et des productions de lait brut plus élevées pour des rations contenant de l'avoine (amidon très rapide) par rapport aux rations contenant de l'orge ou du blé.

Une augmentation du TP après infusion duodénale de glucose (HURTAUD et al., 1998) et de glucose et d'amidon (HURTAUD et RULQUIN, 1999) a été rapportée. Cependant ces augmentations du TP sont accompagnées d'une diminution de la production laitière, d'où une stabilité de la production de protéines du lait. Une perfusion isocalorique de propionate dans le rumen induit un TP légèrement plus élevé et une production stable de lait brut, et par suite, une augmentation significative de la quantité de protéines du lait. Pour ces auteurs l'incidence de la source métabolique d'énergie sur le TP est faible et s'exprime plutôt par un effet indirect, à partir des variations de la production laitière.

L'effet de la nature de l'amidon sur le TP serait donc plutôt tributaire de la diminution importante de la production laitière qu'à un effet direct lié à une disponibilité différente d'acides aminés pour la glande mammaire suite à un catabolisme réduit.

La synthèse des protéines du lait est en lien étroit avec le métabolisme énergétique de l'animal. Quand une ration contient beaucoup de concentré, l'augmentation de la synthèse de protéines du lait proviendrait d'un apport accru d'acides aminés et d'un taux d'extraction plus élevé par la glande mammaire (GAYNOR et al. 1995). Ces observations permettent de proposer un effet similaire des concentrés de type amidon rapide entraînant par leur effet insulinothopie un catabolisme hépatique plus faible des acides aminés.

4.4. Matière grasse

Les modifications les plus importantes suite à l'apport de différentes natures d'amidon concernent la matière grasse du lait (NOCEK et TAMMINGA, 1991). Les précurseurs de la matière grasse sont l'acétate et le β -OH-butyrate issus de la fermentation ruminale ainsi que les acides gras longs des tissus adipeux ou d'origine alimentaire.

Dans la littérature, la réponse du TB à l'apport d'amidons lents comparativement à un amidon rapide est cependant variable (tableau 5).

Pour les seuls DeVISSER et al. (1992) la ration « amidon rapide » est caractérisé par un TB plus élevé. Dans 8 des 26 comparaisons le TB est plus élevé pour l'amidon lent. Cependant dans 2 cas l'ingestion d'amidon est nettement plus faible pour cette même ration (HERRERA-SALDANA et al., 1989, rations « drêches » ; WEISS et al., 1996) et dans 2 autres cas cette hausse du TB est

accompagnée d'une diminution significative de la production (HERRERA-SALDANA et al., 1989, rations « farine de coton » ; PLASCENIA et ZINN, 1996). POORE et al. (1993, rations « paille de blé ») et DePETERS et TAYLOR (1985) confirment l'augmentation du TB en tendance. Dans 3 autres comparaisons la quantité de matière grasse est significativement plus élevée pour l'amidon lent (ALDRICH et al., 1993, rations « tourteau de colza » ; KHORASANI et al., 1994, rations « farine de poisson » ; OVERTON et al., 1995). Parmi les 12 comparaisons montrant l'absence de réponse de la matière grasse en faveur du régime « amidon lent » une production laitière significativement plus élevée et donc un effet dilution peut l'expliquer dans les travaux de FALDET et al. (1986b) et McCARTHY et al. (1989). En effet, les résultats de MIETTINEN et HUHTANEN (1996) laissent supposer qu'une ration produisant un profil d'AGV pauvre en propionate et riche en butyrate limiterait la synthèse de lactose et donc indirectement de lait et entraînerait ainsi une augmentation du TB via l'effet concentration.

La quantité d'amidon ingéré semble également interférer. Un TB plus faible caractériserait souvent les rations à amidon rapide par rapport aux rations à amidon lent surtout quand le TB initial est déjà relativement faible (inférieur ou égal à 38 g/kg ; SAUVANT, 1997) ce qui laisse supposer des rations riches en amidon. Même si l'absence de réponse de la matière grasse dans les travaux de YANG et al. (1997a et b), KHORASANI et al. (1994, rations « tourteau de soja ») et McCARTHY et al. (1989) pouvait être liée à une ingestion d'amidon supérieure pour les rations « amidon lent », l'analyse du tableau 5 ne permet pas de conclure clairement. Il est possible qu'il y ait un seuil de sensibilité spécifique pour chaque nature d'amidon.

Les travaux de KHORASANI et al. (1994) laissent supposer une interaction entre la vitesse de dégradation ruminale de l'amidon et de l'azote. Cependant McCARTHY et al. (1989), HERRERA-SALDANA et al. (1989) et ALDRICH et al. (1993) n'observent aucun effet significatif d'une interaction entre la vitesse de dégradation ruminale de l'amidon et de l'azote sur la réponse de la matière grasse du lait.

L'absence de réponse du TB dans les travaux de GRINGS et al. (1992), POORE et al. (1993, rations « foin de luzerne ») et HARMISON et al. (1997) reste inexpiquée.

Malgré de très forts effets "essai", le traitement statistique des 26 couples amidon lent - amidon rapide de la littérature (tableau 5) confirme globalement un TB légèrement plus élevé pour les amidons lent (35,1 contre 34,2, $P < 0,10$). La matière grasse produite est significativement plus élevée pour les amidons lents (1045 contre 997 g/jour, $P < 0,01$).

Tableau 5 : Effet de l'apport d'amidon dans les comparaisons amidon lent – amidon rapide sur la matière grasse et la production de lait

	TB	MG	Amidon ingéré	Prod. laitière
	(g/kg)	(g/jour)	(kg/jour)	(kg/jour)
	Ecart/signification		Ecart/niveau	Ecart/signification
Herrera-Saldana et al. (1989), drêches	+ 7,0 S	+ 230 ^B	- 1,3 / 6,5	- 0,3 NS
Herrera-Saldana et al. (1989), farine de coton	+ 3,0 S	0	- 0,9 / 7	- 3,2 S
Faldet et al. (1986a)	+ 2,6 S	+ 116 ^A	+ 0,4 / 6	+ 0,4 NS
Casper et al. (1990)	+ 1,4 S	+ 58 ^A	+ 0,2 / 10	+ 0,4 NS
Weiss et al. (1989)	+ 3,4 P<0,10	+ 93 ^A	- 1,5 / 6,5	+ 0,4 NS
Plascenia et Zinn (1996)	+ 3,4 P<0,10	0	< 5	- 3,6 S
Omwubuemeli et al. (1985)	+ 3,0 P<0,10	+ 75 ^A	+ 0,5 / 6,5	- 0,2 NS
Hasselmann (1997)	+ 4,0 ^B	+ 192 ^B	< 6	+ 1,7 ^A
Overton et al. (1995)	- 3,3 NS	+ 110 S	+ 0,8 / 7	+ 4,3 S
Aldrich et al. (1993), tourteau de colza	+ 2,0 NS	+ 100 S	+ 0,4 / 9	+ 0,2 NS
Khorasani et al. (1994), farine de poisson	+ 2,1 NS	+ 70 S	+ 0,1 / 8	0
Poore et al. (1993), paille de blé	+ 2,8 NS	+ 10 NS	+ 0,4 / 7	- 1,0 NS
De Peters et Taylor (1985)	+ 2,0 NS	+ 75 NS	< 5	+ 0,6 NS
Harmison et al. (1997)	+ 0,8 NS	+ 40 ^A	0 / 6	+ 0,5 NS
Casper et Schingoethe (1989)	+ 0,5 NS	+ 43 ^A	+ 0,2 / 10	+ 0,8 NS
Grings et al. (1992)	+ 0,1 NS	- 30 NS	- 0,4 / 10	- 0,7 NS
Aldrich et al. (1993), farine de sang	- 0,2 NS	+ 30 NS	- 0,6 / 9	+ 0,8 NS
Poore et al. (1993), foin de luzerne	- 0,3 NS	- 50 NS	+ 0,1 / 6	- 1,0 NS
Yang et al. (1997b)	- 0,3 NS	+ 40 NS	+ 2,1 / 7	+ 1,7 NS
Nalsen et al. (1987)	- 0,4 ^B	+ 38 ^A		+ 1,6 ^B
Khorasani et al. (1994), tourteau de soja	- 0,7 NS	+ 20 ^B	+ 1,0 / 7	+ 1,5 NS
Faldet et al. (1986b)	- 1,3 NS	+ 24 ^A	- 0,2 / 5,5	+ 1,6 S
Yang et al. (1997a)	- 1,7 NS	- 16 NS	+ 1,9 / 7	- 0,5 NS
McCarthy et al. (1989), farine de poisson	- 1,7 NS	+ 40 NS	+ 2,4 / >8	+ 3,5 S
McCarthy et al. (1989), tourteau de soja	- 3,1 NS	+ 60 NS	+ 2,4 / >8	+ 2,6 S
De Visser et al. (1990)	- 0,9 S	+ 21 NS	+ 0,6 / <5,5	+ 1,1 NS

A valeurs calculées

B signification de la différence non spécifiée

Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer les chutes du TB lors d'une alimentation riche en concentrés source potentielle d'amidon rapide.

La **théorie glucogénique** (McCLYMONT et VALLANCE, 1962) explique la chute de la teneur en

matière grasse du lait après ingestion d'une ration riche en concentrés par la modification du profil fermentaire et des changements métaboliques engendrés dans la fourniture de précurseurs lipidiques. L'augmentation du propionate pour les rations de type amidon rapide par rapport aux amidons lents est confirmée dans la littérature. De plus, les teneurs en acétate (DePETERS et TAYLOR, 1985 ; McCARTHY et al., 1989 ; CASPER et al., 1990 ; OVERTON et al., 1996) et en butyrate (CASPER et SCHINGOETHE, 1989 ; CASPER et al., 1990 ; ALDRICH et al., 1993 ; KHORASANI et al., 1994 ; OVERTON et al., 1996 ; HARMISON et al., 1997) ont tendance à diminuer pour les rations de type amidon rapide. Prônant l'utilisation des rapports C_2/C_3 ou $(C_2+C_4)/C_3$ SAUVANT et al. (1994) considèrent les valeurs seuil pour l'effet sur la matière grasse de ce dernier rapport voisin de 3, SUTTON (1980) et HUHTANEN et MIETTINEN (1996) proposent des seuils critiques plutôt à 3,5 (C_2/C_3) et supérieurs à 4 [$(C_2+C_4)/C_3$].

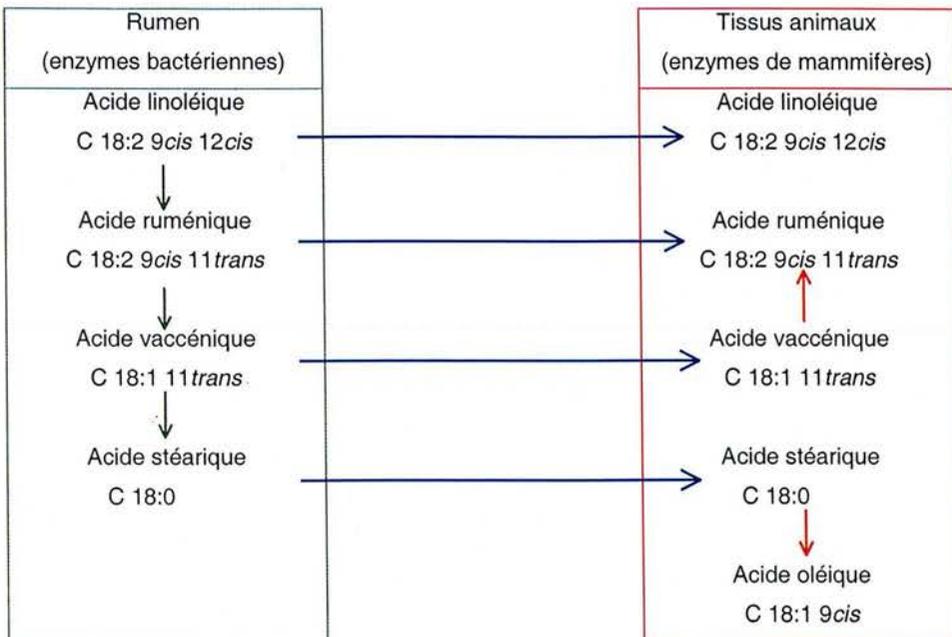
Pour les rations à amidon rapide, le partage des sources énergétiques entre glande mammaire et tissus adipeux est modifié via une insulinémie plus élevée et une diminution de la teneur sanguine en hormone de croissance : l'activité de la lipoprotéine lipase augmente dans les tissus adipeux mais diminue dans la glande mammaire (EMERY, 1973). La mobilisation des réserves lipidiques est fortement réduite et la compétition entre glande mammaire et tissus adipeux pour l'utilisation du glucose, des acides gras non-estérifiés et du β -OH-butyrate augmente (GAYNOR et al., 1995). Cet effet est d'autant plus marqué qu'il est accompagné d'un excès d'énergie par rapport aux besoins métaboliques (ISTASSE et ØRSKOV, 1984 ; CASPER et SCHINGOETHE, 1989 ; CASPER et al., 1990).

Le lien étroit entre le profil des AGV absorbés au niveau du rumen et le métabolisme lipidique peut rompre de plusieurs façons l'équilibre entre les acides gras courts, moyens et longs disponibles pour la glande mammaire. Une absorption élevée d'acides gras longs (> 16C) par la glande mammaire inhibe l'acétyl-CoA-carboxylase et de cette manière la synthèse *de novo* d'acides gras courts (CHILLIARD et al., 2000). Ces acides gras longs peuvent provenir soit de l'alimentation - avec un effet dépressur sur l'ingestion et donc une disponibilité moindre des précurseurs acétoacétate et β -OH-butyrate soit d'une mobilisation accrue des réserves corporelles. Un apport de précurseurs glucogéniques (propionate dans le rumen ou glucose dans le duodénum) à une ration déficiente en énergie diminue le TB suite à une mobilisation plus faible des acides gras longs du tissu adipeux (HURTAUD et al., 1998). HURTAUD et RULQUIN (1999) confirment la chute du TB par une disponibilité plus faible d'acides gras longs après des perfusions intestinales de glucose et d'amidon. A l'inverse, une très faible proportion de propionate (< 20% des AGV) peut provoquer une mobilisation accrue des réserves corporelles, entraînant un enrichissement du lait en acides gras longs (HUHTANEN et MIETTINEN, 1996). HURTAUD et al. (1998) montrent une disponibilité insuffisante en acides gras courts après perfusion duodénale de glucose, suite à un processus

d'élongation de ces acides gras dans la glande mammaire (apparition accrue d'acides gras moyens). Ce déficit d'acides gras courts peut inhiber la synthèse de la matière grasse du lait (PALMQUIST et al., 1993). Une perfusion de butyrate augmente la production d'acides gras courts dans la glande mammaire (MOORE et CHRISTIE, 1981 ; MIETTINEN et HUHTANEN, 1996). Ces essais montrent la complexité des interactions entre la production des précurseurs et le métabolisme lipidique. GAYNOR et al. (1995) comparent des vaches qui répondent à une augmentation de la proportion de concentré de 40 à 80% par une diminution du TB et des animaux qui maintiennent leur TB ; ils observent une diminution des teneurs sanguines en acides gras non-estérifiés et en triacylglycérides pour les animaux qui présentent une diminution du TB. Ces animaux orienteraient le surplus d'énergie plutôt vers la synthèse lipidique dans les tissus adipeux.

L'autre hypothèse pour expliquer les chutes du TB se base sur l'**effet inhibiteur des isomères trans** des acides gras insaturés sur la synthèse de la matière grasse du lait.

Figure 6 : Métabolisme des acides gras polyinsaturés à l'exemple de l'acide linoléique (GRIINARI, 1999)



Les isomères *trans* - structurellement similaires aux acides gras saturés - pourraient inhiber la synthèse des acides gras et leur estérification dans la glande mammaire (STORRY, 1970 ;

GAYNOR et al., 1995), contrairement à la forme *cis* (ROMO et al. 1996). L'acide vaccénique (C18:1 11*trans*) représente la moitié des AG *trans* dans le lait (GNÄDIG et al., 2001). Cet acide gras est un maillon central dans le métabolisme des AG polyinsaturés (AGPI) ce qui est illustré par la figure 6.

Les mammifères ne semblent pas synthétiser des AG *trans* et leur présence dans le lait a pour principale origine le métabolisme de la flore ruminale (BICKERSTAFFE et al., 1972). En effet les AGPI sont isomérisés et ensuite hydrogénés lors d'une cascade de réactions avec une apparition de liaisons *trans*. Ainsi 80% du C18:2 et 92% du C18:3 sont biohydrogénés entre la bouche et le duodénum et ce phénomène n'est pas clairement lié à la quantité ou la nature des lipides ingérés. Cette biohydrogénation ne pouvant avoir lieu que sur des AG libres diminue d'un tiers si la ration contient 70% de concentré induisant une chute du pH ruminal qui inhibe la lipolyse (CHILLIARD et al., 2000). KUCUK et al. (2001) confirment le lien proportion accrue de concentré dans la ration - chute plus prononcée du pH ruminal - flux accru des AG *trans* au duodénum chez la brebis. Les résultats de JIANG et al. (1996) confirment ces observations : en augmentant la part de concentré dans la ration de 50 à 65% les concentrations en acides vaccénique et ruménique doublent dans la MG du lait. SAUVANT et BAS (2000) cités par LEDOUX et al. (2000) prédisent dans une compilation bibliographique le C18:1 *trans* duodéal par les ingestions du C18:1 *trans* et 40% du C18:2. La réduction de l'acide vaccénique en acide stéarique (C18:0) est souvent l'étape limitante de l'hydrogénation des AGPI ce qui se traduit par une accumulation ruminale de l'acide vaccénique (CHILLIARD et al., 2000). Environ 33% de l'acide vaccénique absorbé par la glande mammaire sont désaturés en acide ruménique (CLA 9*cis* 11*trans*) - le CLA majeur du lait (GRILINARI et al., 1999).

GAYNOR et al. (1995) observent une chute du TB après une perfusion du C18:1*trans* dans l'abomasum sans cependant influencer l'activité de la lipoprotéine lipase dans la glande mammaire. L'impact métabolique de la double liaison de type *trans* semble dépendre de sa position sur la chaîne carbonée. Les proportions entre **les différents isomères** de position **du C18:1 *trans*** varient très peu entre les périodes de stabulation et de pâturage (PRECHT et MOLKETIN, 1997), mais LEDOUX et al. (2000) observent, chez la chèvre, une augmentation surtout de l'isomère $\Delta 10$ du C18:1 *trans* pour les rations riches en concentré (70% dont 30% de céréales) même si l'acide vaccénique ($\Delta 11$) reste toujours largement majoritaire.

BAUMGARD et al. (1999 et 2000) constatent l'impact de l'isomère pour des CLA perfusés chez la vache : l'isomère 10*trans* 12*cis* fait chuter la matière grasse du lait de 40 à 45% contrairement à l'isomère 9*cis* 11*trans*. Ce premier isomère réduit très nettement la synthèse *de novo* sans modifier notablement les concentrations plasmatiques d'AGNE ou d'insuline. Les auteurs expliquent la synthèse diminuée par l'inhibition des enzymes indispensables comme acétyl-CoA-carboxylase et

l'acyl-transferase. De plus, l'augmentation des rapports C14:0/14:1, C18:0/18:1 et en tandance également C16:0/16:1 indique une diminution de l'activité de la $\Delta 9$ -désaturase dans la glande mammaire (BAUMGARD et al., 2000).

L'inhibition de la $\Delta 9$ -désaturase par des double liaisons *trans* en position $\Delta 10$, démontrée avec des CLA par BRETILLON et al. (1999) et CORL et al. (1999), bloque également la synthèse de l'acide ruménique et entraîne de cette manière une accumulation de l'acide vaccénique dans la matière grasse du lait. Un effet similaire peut être supposé pour le C 18:1 10*trans*. Par ailleurs aucun effet des isomères $\Delta 11$ *trans* du CLA sur cette enzyme n'a été démontré (BRETILLON et al. (1999). HURTAUD et al. (1993) observent une diminution du rapport C18:0/C18:1 après une perfusion ruminale de propionate. Le pH ruminal ne varie pas et reste relativement élevé (> 6,3). Ces auteurs ne précisent pas l'importance des isomères *trans* et supposent une activité plus élevée des désaturases mammaires. CHOUINARD et al. (1999) confirment la forte chute du TB (50%!) après une perfusion d'un mélange de différents isomères de CLA.

Les observations de GRIINARI et al. (1999) confortent l'hypothèse de rôles spécifiques des différents isomères : la diminution de l'acide ruménique dans la MG du lait est liée à une diminution parallèle de l'acide vaccénique ($r^2=0,7$) mais une augmentation du C18:1 10*trans*.

L'impact de l'alimentation glucidique sur l'apparition des isomères *trans* a été peu étudié. GAYNOR et al. (1995) ne constatent pas de différences significatives de glycémie ou d'insulinémie entre les animaux qui répondent par une diminution du TB à une augmentation de la part d'orge (amidon rapide) et ceux qui maintiennent leur TB. Par contre l'apparition du C18:1 *trans* est significativement corrélée à la diminution du TB.

L'importance de l'effet de l'amidon semble dépendre de la fourniture de la ration en AGPI. TB et MG diminuent pour une ration contenant 59% de maïs comparativement à une autre contenant 36%. La diminution est plus prononcée quand la ration apporte beaucoup d'AGinsaturés. La teneur en amidon n'a que peu d'effet sur la concentration des C18:1 *trans* dans le lait mais l'ajout d'une source d'AGinsaturés l'augmente, surtout l'isomère $\Delta 10$. La combinaison amidon haut-AGinsaturés est fortement liée à la chute de la synthèse de la MG du lait. Les rations plus riches en amidon augmentent l'isomère 10*trans* du C18:1 (et non 11*trans*) ainsi que le CLA correspondant (10*trans* 12*cis*). Par contre il n'y a pas de diminution du TB avec l'isomère 9*cis* 11*trans* des CLA (GRIINARI et al., 1998).

Par ailleurs chez l'homme l'ingestion de C18:1 9*trans* issu de l'hydrogénation catalytique d'huiles végétales est corrélée à l'augmentation des risques cardio-vasculaires (KRIS-ETHERTON et al. 1995) et du cholestérol sanguin (JUDD et al., 1994). L'effet sur la santé humaine des isomères *trans* de cet acide gras en provenance de la matière grasse du lait reste à élucider. De plus un apport d'AG essentiel sous forme d'isomères *trans* ne permet pas de couvrir les besoins car le

métabolisme les confond avec des AGsaturés (LEDOUX et al., 2000).

En conclusion, le TB d'une ration à base d'amidon rapide est en général plus faible que celui d'une ration amidon lent. Deux hypothèses peuvent expliquer la chute du TB après une ingestion importante de concentré, surtout rapidement dégradable dans le rumen : soit une disponibilité plus élevée en glucose oriente le métabolisme vers une lipogénèse accrue dans les tissus adipeux et diminue la disponibilité des précurseurs pour la synthèse de la matière grasse du lait, soit la biohydrogénation incomplète des acides gras longs d'origine alimentaire diminue la synthèse *de novo* et inhibe la désaturation dans la glande mammaire via l'apparition accrue des isomères *trans* du C18:1. Dans les deux cas la synthèse de la matière grasse du lait diminue.

Cependant l'observation de cette réponse sur le TB est sensible à un certain nombre de conditions comme les variations de l'ingestion et de la production laitière. L'effet de l'interaction entre la quantité d'amidon ingérée et sa nature pourrait être lié à un seuil d'apport, spécifique à chaque nature d'amidon.

PARTIE EXPERIMENTALE

III PARTIE EXPERIMENTALE

1. Objectif

L'amidon est un constituant largement répandu dans de nombreuses familles du règne végétal. Il est habituel de distinguer les diverses origines de l'amidon en fonction de la taille et de la forme, de la structure de leurs grains mais aussi par la nature des composants qui sont naturellement liés à ces grains. L'ensemble de ces facteurs explique les variations dans la dégradabilité des différentes sources d'amidon ce qui permet de les classer en amidons rapidement ou lentement dégradables. Chez les ruminants la digestion a lieu principalement par la fermentation microbienne dans le rumen et une accessibilité variable aux enzymes de la flore ruminale devrait avoir des répercussions sur la vitesse et l'intensité de la dégradation des amidons et l'orientation de la population du rumen, générant ainsi des quantités de produits de fermentation et des profils d'acides gras volatils différents. Les modalités d'absorption de ces AGV conduiraient finalement à un passage au niveau sanguin de métabolites en proportions variables.

Pour illustrer ces conséquences de l'origine des amidons, dans le corps de ce travail, nous avons retenu le blé, céréale très fréquemment utilisée en alimentation animale, dont l'amidon est caractérisé par une fermentation rapide. D'autre part compte tenu de la disponibilité de ce type de co-produits et de l'absence de références le concernant, l'amidon de la pomme de terre a été choisi comme référence d'amidon à fermentation lente.

Dans la première partie de ce travail nous avons donc réalisé la comparaison de la vitesse de fermentation des deux amidons par la méthode *in sacco* largement utilisée dans les études de dégradabilité chez les ruminants. Pour la confirmation d'une vitesse de fermentation différente nous avons caractérisé *in vivo* l'apparition des produits de fermentation et de certains métabolites sanguins en fonction de la nature de l'amidon et de sa vitesse de dégradation dans des cinétiques de 12 heures.

L'ensemble de ces essais a été réalisé pour analyser les réponses des performances des animaux aux apports nutritionnels, en particulier la répercussion des différences de nutriments fournis en quantité et/ou en qualité sur les variations éventuelles de la production laitière et de la composition du lait. L'effet principal attendu concerne la modulation de la synthèse de la matière grasse comme les données de la bibliographie mettent en relief les liaisons entre vitesse de fermentation, profils d'AGV et teneur en matière grasse du lait. Cet effet n'est pas uniquement lié à la vitesse de dégradation de la nature de l'amidon mais il dépend également de la quantité apportée à l'animal. L'étude des lois de réponse des animaux nécessite alors des variations dans la nature des amidons apportés en quantités variables par la ration.

La distribution de la ration sous forme de ration complète - qui correspond à une pratique agricole de plus en plus répandue - permet une formulation assurant des niveaux élevés d'ingestion par des vaches à haut potentiel génétique tout en apportant des quantités variables d'amidon.

En résumé cette démarche doit permettre d'établir les lois de réponses des animaux à l'apport de natures d'amidon à vitesse de dégradation variable en différentes proportions. La composition du lait étant une des principales interrogations dans ce travail, nous avons vérifié si d'éventuelles variations de la teneur en matière grasse du lait étaient accompagnées par une composition en acides gras du lait également différente.

2. Présentation générale des expérimentations

Pour vérifier cet enchaînement dans les réponses nous avons réalisé une série de 5 expérimentations. Pour un souci de présentation synthétique des résultats, ceux-ci sont regroupés par thèmes, chacun correspondant à une étape du raisonnement. Cependant les publications valorisant individuellement les différentes expérimentations sont jointes en annexes 2 à 5.

Deux essais ont été menés pour comparer les vitesses de disparition des deux natures d'amidon (essais 1 et 2). Dans un schéma expérimental en carré latin 4 vaches fistulées ont été utilisées pour tester :

- soit la dégradation ruminale des amidons *in sacco*
- soit pour caractériser les profils fermentaires engendrés par la fermentation de la ration complète ainsi que l'apparition parallèle des métabolites sanguins.

Trois essais complémentaires (dispositif en carré latin) ont été réalisés pour établir les lois de réponses de vaches ingérant des natures d'amidon dont le comportement ruminal a été caractérisé au préalable. La présentation générale de l'ensemble des essais fait l'objet du tableau 6.

Tous ces essais ont été menés au Domaine expérimental de l'ENSAIA avec des vaches logées en stabulation libre. Les traitements sont appliqués par période et le traitement alloué aux vaches en première période est déterminé par un tirage aléatoire. Chaque période comporte une transition alimentaire suivie d'une semaine adaptation et une semaine pour la réalisation des mesures. Pour les essais comportant des apports élevés d'amidon dans la ration (essais 2 et 3) l'expérimentation débute avec une période de transition initiale de deux semaines. Pour les essais 1, 4 et 5 compte tenu des fortes variations des proportions d'amidon d'une période à l'autre, une transition de deux semaines est ménagée permettant ainsi aux animaux de stabiliser le milieu ruminal avant les mesures.

Tableau 6 : Présentation des essais

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Objectif principal	Fermentation ruminale		Réponses zootechniques		
Nombre de vaches	4	4	12	24	18
	fistulées	fistulées			
dont primipares	0	0	4	8	6
Caractéristiques préexpérimentales					
Stade de lactation moyen à la mise en essai (jours)	83 (± 14)	45 (± 15)	54 (± 3)	71 (± 34)	100 (± 29)
Prod. laitière (kg/jour)	26,0 (± 9,0)	26,4 (± 3,8)	29,7 (± 5,6)	31,7 (± 6,9)	32,2 (± 7,7)
TB (g/kg)	43,3 (± 3,6)	45,4 (± 4,0)	n.d. ¹	40,6 (± 5,5)	37,6 (± 5,6)
TP (g/kg)	31,8 (± 2,2)	28,1 (± 2,0)	29,3 (± 2,3)	32,4 (± 3,2)	32,5 (± 3,2)
Schéma expérimental	Carré latin	Carré latin	Carré latin	Carré latin	Carré latin
	4 x 4	2 x 2	4 x 4	4 x 4	3 x 3

¹ non déterminé

Dans les essais 1 et 2, des vaches multipares sont équipées d'une canule ruminale (réf. #3, Bar Diamond, Parma ID, USA). Les vaches entrent en essai au plus tôt 5 semaines post-vêlage ou 5 semaines après l'intervention pour poser la canule.

2.1. Alimentation

Les vaches ont été nourries avec une ration complète contenant soit du blé concassé, soit des résidus de découpe de pommes de terre (« screening »). La composition de ces aliments fait l'objet du tableau 7.

A travers le choix du fourrage dans les différents essais il est possible de moduler la proportion d'amidon de la ration et ainsi d'étudier l'interaction nature / quantité pour les amidons apportés à l'animal. Avec les rations à base d'ensilage d'herbe l'effet du seul apport d'amidon par le concentré blé ou pommes de terre est mesuré : dans ces conditions l'apport d'amidon est modéré (environ 4 kg d'amidon/jour pour une ingestion de 20 kg MS). Les rations à base d'ensilage de maïs permettent d'étudier l'effet d'apports plus élevés en amidon (7 à 8 kg d'amidon/jour). Avec le blé, 2 amidons rapides sont cumulés et avec la pomme de terre on associe l'amidon rapide de l'ensilage de maïs avec l'amidon lent des pommes de terre. Enfin la combinaison des deux ensilages permet d'obtenir des rations ayant une richesse intermédiaire en amidon (5 à 6 kg d'amidon/jour).

Tableau 7 : Composition chimique des concentrés amidon utilisés lors des différents essais

	Blé concassé					« Screening » de pommes de terre					
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	
Fournisseur	Récolte du Domaine expérimental					McCAIN, Harnes	FarmFrites, Montigny-le-Roi	McCAIN, Harnes			
MS (%)	87,7	87,9	85,2	89,0	86,7	28 à 35	26 à 32	31 à 39	24 à 32	24 à 35	
(en % de la MS)											
MAT	12,6	13,4	13,7	13,6	11,6	6,5	6,3	5,9	6,7	7,0	
Amidon	67,8	67,4	69,0	67,0	68,2	71,1	72,0	67,7	61,5	62,2	
CB	1,9	2,6	2,0	2,7	3,7	2,2	2,6	2,7	3,8	3,5	
NDF	13,6	n.d. ¹	12,0	n.d. ¹	n.d. ¹	9,1	7,5	8,3	11,7	10,8	
Cendres	1,9	1,8	2,0	1,9	1,8	2,3	2,5	1,9	3,0	2,5	

¹ non déterminé

La composition des différentes rations et leurs valeurs nutritives sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Composition et valeurs nutritives calculées des rations.

Aliment (% de la MS)	Rations « blé »							Rations « pdt »						
	Essai 1a	Essai 1b	Essai 2	Essai 3	Essai 4a	Essai 4b	Essai 5	Essai 1a	Essai 1b	Essai 2	Essai 3	Essai 4a	Essai 4b	Essai 5
Ens. de maïs	0	56,8	55,3	56,8	0	58,5	47,0	0	50,8	52,2	52,5	0	59,2	45,5
Ens. d'herbe	63,8	0	0	0	53,2	0	13,2	61,9	0	0	0	54,7	0	9,8
Paille de blé	0	7,1	2,9	5,0	0	6,5	1,5	0	6,4	2,7	5,0	0	6,3	1,8
Blé	30,5	22,0	29,9	17,5	33,1	18,7	19,7	0	0	0	0	0	0	0
Pdt	0	0	0	0	0	0	0	27,6	25,5	28,8	21,0	28,0	16,4	20,9
Tourteau de soja	3,0	12,4	10,4	11,9	0	12,1	14,4	0	10,6	14,4	13,6	2,8	14,4	20,3
Tourteaux tannés ¹	2,1	0	0	5,9	13,0	2,8	2,9	9,4	4,9	0	5,8	13,6	2,1	0
Urée (g/kg MS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38	0	0	0	0
Minéraux	0,6	1,7	1,6	2,9	0,7	1,5	1,3	1,1	1,8	2,0	2,1	0,9	1,6	1,6
Amidon	21,1	31,1	41,0	34,5	24,0	35,1	30,9	20,1	32,1	40,4	35,2	18,4	32,6	30,0
UFL ²	0,88	0,93	0,93	0,91	0,87	0,90	0,91	0,88	0,94	0,89	0,91	0,85	0,89	0,92
PDIN ³	92	92	88	109	118	103	109	91	92	85	104	113	98	110
PDIE ³	92	97	98	112	117	105	105	101	103	98	113	118	104	105

¹ mélange de tourteau de soja et de tourteau de colza (80%/20%) traité au formaldéhyde et à 65°C² corrigées des interactions alimentaires d'après FAVERDIN et al. (1987)³ calculées d'après Vérité et al. (1987)

2.2. Mesures et analyses

Les mesures retenues adaptées en fonction de l'objectif de l'essai sont présentées dans le tableau 9. Nous en présentons les modalités pour celles qui sont communes à tous les essais

Ingestion

L'ingestion individuelle est enregistrée pendant 5 jours par semaine et tous les jours de la semaine de mesures. Chaque vache accède individuellement à un portillon (SEFER, Neuville de Poitou, France) à l'aide d'un collier électronique. La ration distribuée et les refus correspondants sont pesés et la MS (48h à 105°C) est déterminée sur un échantillon représentatif. Le traitement des données ne tient compte que des enregistrements de la semaine de mesures, excluant les périodes de transition et d'adaptation.

Tableau 9 : Mesures réalisées

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Mesures	(en gras mesures particulièrement ciblées dans cet essai)				
Ingestion	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Dégradabilité <i>in sacco</i>	Oui	Oui	Non	Non	Non
Digestibilité apparente	Non	Oui	Non	Non	Non
Profil fermentaire	Oui	Oui	Non	Non	Non
Métabolites sanguins	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Perf. zootechniques	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Composition de la MG	Non	Oui	Non	Non	Non

Analyses des aliments

Un échantillon de chaque aliment est prélevé pendant chaque période de mesures, et à chaque changement de silo pour les ensilages, excepté la paille de blé qui n'est pas analysée. Les aliments prélevés sont séchés 48h à 80°C puis broyés sur une grille de 1,5 mm. L'analyse chimique effectuée sur ces échantillons comprend le dosage de la MAT (méthode de Kjeldahl), de la cellulose brute (méthode de Weende), des cendres totales (incinération à 550°C pendant 6h) et de l'amidon (norme AFNOR V 18-121, 1997). De plus la fraction NDF (VanSOEST et WINE, 1967) est analysée pour les ensilages et les pommes de terre. Comme ces aliments sont riches en amidon, le dosage de cette fraction est précédé d'une hydrolyse de l'amidon par l'ajout de 250 µL d' α -amylase et une incubation de 2h au bain-marie à 80°C.

Paramètres zootechniques

La production laitière est mesurée à chaque traite par enregistrement automatique (ISALAIT 2045, Boumatic, Paris, France).

Des échantillons de lait sont prélevés lors des semaines de mesures sur 4 (essais 2 à 5) ou 6 (essai 1) traites consécutives pour mesurer les taux butyreux et protéique ainsi que la teneur en lactose (essais 1 à 4) par analyse infrarouge (analyseur IRMA ou MILKOSCAN 605, Foss Electric, Hillerød, Denmark). La concentration cellulaire a été déterminée sur ces mêmes échantillons par comptage des noyaux après coloration (appareil FOSSOMATIC 360, Foss Electric, Hillerød, Denmark). La concentration cellulaire reflétant des épisodes inflammatoires de la glande mammaire sans lien direct avec l'alimentation, les épisodes de mammites cliniques ont été exclues du traitement des données.

Les taux moyens pondérés sur 24h ont été calculés à l'aide de la production laitière correspondante. Ensuite les données ont été moyennées par animal et pour la semaine de mesures de chacune des périodes.

Tous les animaux sont pesés avant la mise en essai et à la fin de l'essai (semaine de mesures de la dernière période) par double pesée. De plus les vaches sont pesées par simple pesée après chaque semaine de mesures pendant les périodes intermédiaires. Toutes les pesées ont lieu un jour donné à une heure fixe.

2.3. Traitement des données

Les valeurs individuelles sont moyennées pour la semaine de mesures de chaque période. Ces données sont traitées avec une analyse de variance par la procédure MIXED de SAS (SAS Inst., Inc., Cary, NC, USA). Le modèle tient compte du facteur "concentré amidon" et le cas échéant du facteur fourrage et de l'interaction fourrage / concentré (essais 1 et 4). Les facteurs vache et période sont contrôlés dans tous les essais, le facteur bloc dans les essais 3 à 5 (tableau 10).

Tableau 10 : Traitement statistique des données des différents essais

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Facteurs étudiés :	amidon rapide : blé ; amidon lent : pommes de terre				
1 – nature d'amidon					
2 ^{ème} facteur :	Fourrage (ens. d'herbe ens. de maïs)	Nature d'amidon répété deux fois	Supplémentation en méthionine (0 ou 19 g)	Fourrage (ens. d'herbe ens. de maïs)	Apport d'amidon (5 ou 6 kg/j)
Facteurs contrôlés					
Période	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Bloc	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Vache	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Les variables mesurées en cinétique (profil fermentaire et métabolites sanguins) sont analysées en mesures répétées : le modèle statistique inclut le facteur temps de prélèvement et l'interaction temps / nature du concentré amidon. La structure de la covariance entre les différents temps de

prélèvements a été définie comme auto-régressive après vérification des critères d'Akaike et de Schwarz-Bayesian (LITTELL et al., 1996). L'effet du traitement est testé avec la somme des carrés des écarts de type III et la comparaison des modalités est réalisée à l'aide des moyennes ajustées avec un test de *t* de Student.

3. Dégradabilité ruminale *in sacco* des amidons

3.1. Matériel et méthodes

Pour caractériser la vitesse de disparition, des cinétiques de disparition en sachets sont réalisées pour les concentrés riches en amidon dans les essais 1 et 2 et pour les fourrages de la ration (essai 1). Pour tester une éventuelle interaction fourrage / concentré dans l'essai 1, la dégradabilité *in sacco* du concentré et du fourrage contenus dans chaque ration a été mesurée pour chaque aliment séparément. Six répétitions pour chaque vache et chaque temps d'incubation à chaque période ont été réalisées. De cette manière, pour chaque vache seuls les aliments apportés par la ration dans une période donnée ont été mis à incuber.

Pour les analyses, les répétitions sont poolées par vache, par période et par temps de la cinétique. Dans l'essai 2 les mesures sur les deux concentrés ont été réalisées en fin de dernière période et les 6 répétitions par aliment et par temps d'incubation sont poolés comme pour l'essai 1.

Tous les aliments sont séchés à 55°C et broyés sur une grille de 1,5 mm. Pour chaque aliment 4g sont mis en sachets (BLUTEX 120, surface intérieur 14 x 9 cm) afin de respecter le rapport 12 - 20 mg/cm² (CHAPOUTOT, 1998). Ces sachets sont incubés 1, 3, 6 et 12h dans le rumen après l'accès à l'alimentation. Après incubation, les sachets sont lavés 2 x 5 min. à l'eau froide pour stopper les réactions enzymatiques puis égouttés, congelés et lyophilisés.

La disparition instantanée est mesurée par un lavage 2 x 5 min à l'eau froide sur quatre répétitions de chaque aliment.

Tableau 11 : Composition des échantillons d'aliments mis à incuber (en % de la MS)

	blé		pommes de terre		ensilage de maïs	ensilage d'herbe
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 1
Amidon	64,5	67,0	69,0	77,5	27,8	< 1
NDF	15,7	n.d. ¹	10,7	7,6	42,3	52,0
MAT	12,6	13,5	6,8	6,2	7,7	13,0
Cendres	2,0	2,0	2,5	3,1	4,0	9,7

1 non déterminé

Le dosage d'amidon sur les résidus de sachets a été simplifié par rapport à la norme AFNOR (V18-121, 1997) : les sachets étant rincés après incubation, l'étape de lavage des sucres est supprimée. Le dosage des fractions NDF, MAT et cendres totales est réalisé comme décrit précédemment. Le tableau 11 présente la composition chimique des aliments avant incubation.

Les "concentrés amidon" utilisés lors de l'essai 2 sont légèrement plus riches en amidon et un peu moins fibreux.

3.2. Résultats

La figure 7 montre que la fraction soluble est significativement plus élevée pour le blé que pour la pomme de terre (essai 1 : 63% contre 38%, essai 2 : 67 contre 45% respectivement). La vitesse de disparition de l'amidon de blé est très élevée dans la première heure, alors que celle de l'amidon de la pomme de terre est plus faible mais régulière.

Après 1h d'incubation, au moins 80% de l'amidon de blé a disparu contre moins de 50% pour l'amidon de pommes de terre. Après 12h d'incubation les taux de disparition de l'amidon des deux concentrés sont très proches (96 et 100% respectivement pour pommes de terre et blé) même si la disparition de l'amidon de pommes de terre est variable entre les essais (figure 7).

Tableau 12 : Paramètres de la disparition *in sacco* de la fraction amidon des aliments

	Fraction soluble (%)	Fraction progressivement dégradable (%)
Blé (essai 1)	63	37
Blé (essai 5)	67	33
Pommes de terre (essai 1)	36	62
Pommes de terre (essai 5)	45	55
Ensilage de maïs (essai 1)	86	14

Le taux de disparition de l'amidon *in sacco* des deux concentrés n'est pas affecté par le fourrage qui lui est associé dans la ration (figure 7).

Figure 7 : Taux de disparition *in sacco* des amidons de blé et de pommes de terre

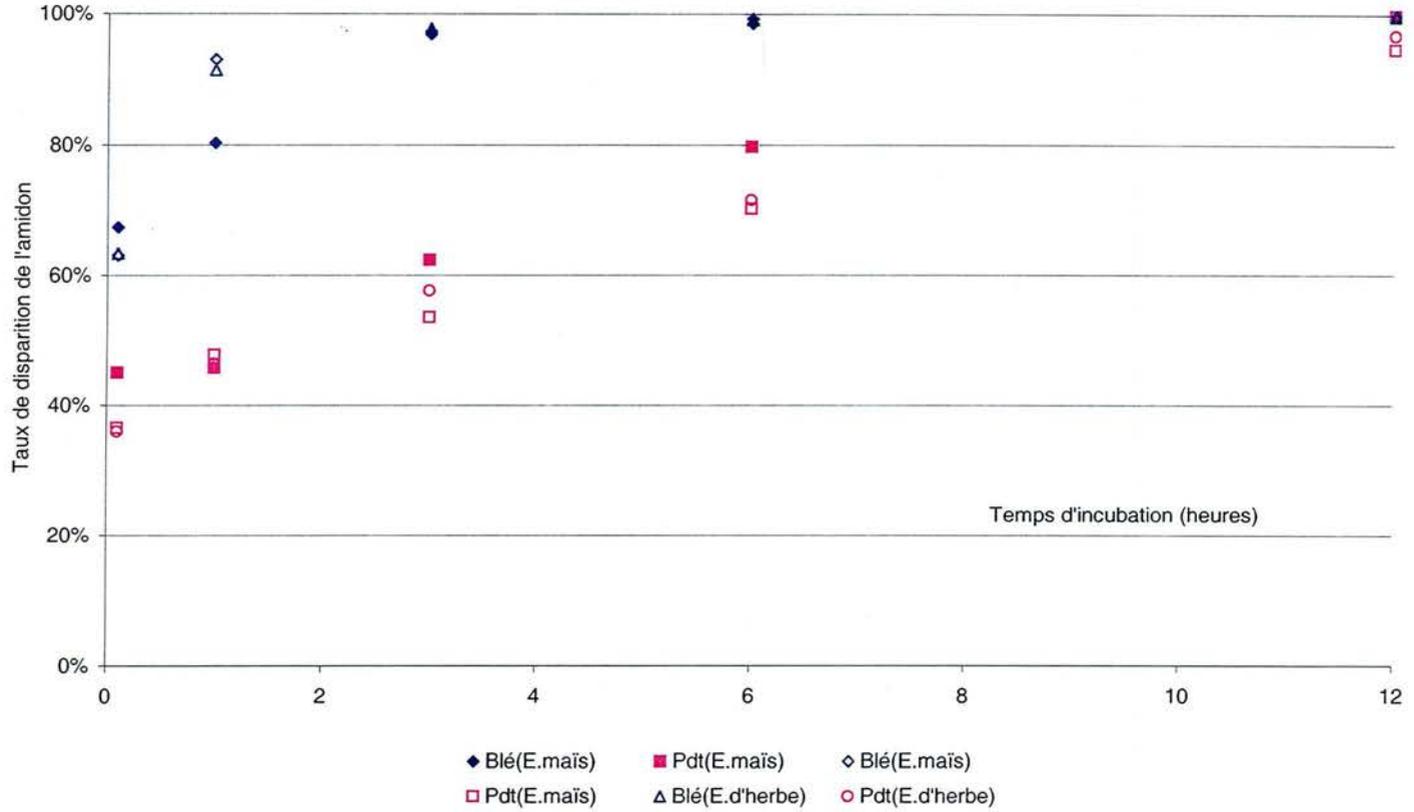
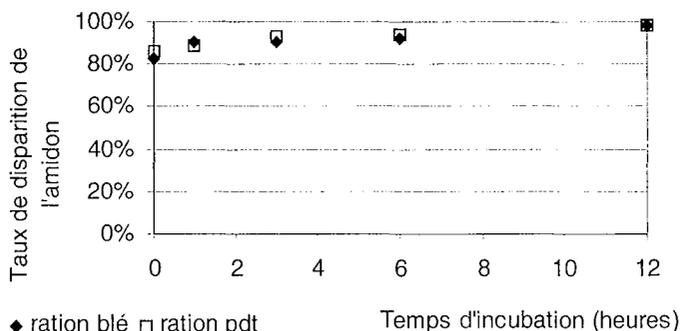


Figure 8 : Taux de disparition *in sacco* de l'amidon de maïs ensilage (essai 1)

L'amidon du maïs ensilage a une disparition très rapide (figure 8). La fraction soluble est particulièrement élevée (tableau 12) dépassant même celle de l'amidon de blé. La fraction progressivement dégradable a quasiment disparu après 12h d'incubation. Cette vitesse de dégradation *in sacco* très élevée de l'amidon de maïs ensilage est indépendante du concentré associé dans la ration ingérée (figure 8).

La disparition *in sacco* de la matière sèche est présentée dans les tableaux 13a (essai 1) et 13b (essai 2). L'amidon étant le constituant majeur de la matière sèche, la cinétique de disparition de ces deux fractions est très similaire.

Tableau 13a : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la MS des concentrés (essai 1)

Temps d'incubation	Blé		Effet fourrage	Pdt		Effet fourrage	Effet concentré
	Ens. d'herbe	Ens. de maïs		Ens. d'herbe	Ens. de maïs		
0	54,1			39,2			$P < 0,01$
1	74,8	74,6	NS	45,2	45,9	NS	$P < 0,01$
3	81,8	83,6	NS	55,4	57,1	NS	$P < 0,01$
6	89,8	88,2	NS	70,2	68,5	NS	$P < 0,01$
12	94,0	93,3	NS	91,6	89,0	NS	$P < 0,01$

Tableau 13b : Effet de la nature de l'amidon du concentré sur le taux de disparition de la MS des concentrés (essai 2)

Temps d'incubation	Blé	Pdt	Effet
0	66,5	49,5	$P < 0,01$
1	72,2	47,5	$P < 0,01$
3	86,7	63,6	$P < 0,01$
6	89,9	76,8	$P < 0,01$
12	96,0	98,8	NS

La solubilisation instantanée de la MS (essai 1 : 53 et 41%, $P < 0,01$, essai 2 : 66 et 50%, $P < 0,01$ respectivement pour le blé et la pomme de terre) et la disparition jusqu'à 6h d'incubation sont plus élevées pour le blé que pour la pomme de terre. Le taux de disparition de la MS des deux concentrés après 12h d'incubation est proche et dépasse 90% : essai 1 : 93% et 90%, $P < 0,01$ et essai 2 : 96% et 99%, NS respectivement pour le blé et la pomme de terre. Il n'y a pas d'interaction significative entre la disparition *in sacco* de la MS du concentré et le fourrage associé au concentré dans la ration (tableau 13a).

La matière sèche de pomme de terre est plus pauvre en NDF que le blé (tableau 11). La solubilisation instantanée de la fraction NDF de la pomme de terre est quasi double par rapport au blé (25 contre 13%, $P < 0,01$) avec une disparition plus forte jusqu'à 6h d'incubation puis les taux de disparition de cette fraction des deux concentrés se rapprochent (65 contre 58%, NS). Les cinétiques de disparition ne sont pas affectées par le fourrage de la ration (tableau 14).

Tableau 14 : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la fraction NDF des concentrés (essai 1)

Temps d'incubation	Blé		Effet fourrage	Pdt		Effet fourrage	Effet concentré
	Ens. d'herbe	Ens. de maïs		Ens. d'herbe	Ens. de maïs		
0	12,6			24,8			$P < 0,01$
1	20,2	20,8	NS	35,0	39,9	NS	$P < 0,01$
3	31,3	35,6	NS	48,6	49,5	NS	$P < 0,01$
6	46,9	51,1	NS	63,0	55,0	NS	$P < 0,01$
12	61,8	67,3	NS	59,6	56,4	NS	NS

La matière sèche de la pomme de terre contient initialement moitié moins d'azote que le blé (tableau 11). La solubilisation instantanée de la fraction MAT n'est pas différente entre les deux concentrés (41%, NS) mais le taux de disparition de la fraction MAT du blé est tout au long de la cinétique significativement supérieur. Cette différence s'illustre par une disparition exponentielle et après 12h d'incubation la quasi totalité de la MAT du blé a disparu.

Tableau 15 : Effet de la nature de l'amidon du concentré et du fourrage associé sur le taux de disparition de la fraction MAT des concentrés (essai 1)

Temps d'incubation	Blé		Effet fourrage	Pdt		Effet fourrage	Effet concentré
	Ens. d'herbe	Ens. de maïs		Ens. d'herbe	Ens. de maïs		
0	41,1			40,8			NS
1	60,4	57,0	NS	35,9	35,5	NS	$P < 0,01$
3	73,8	72,1	NS	54,3	36,3	NS	$P < 0,01$
6	86,6	90,4	NS	63,3	69,6	NS	$P < 0,01$
12	94,4	95,8	NS	87,5	83,3	NS	$P < 0,01$

A l'opposé la disparition de la fraction MAT de la pomme de terre est caractérisée par un délai de latence jusqu'à 3h. Par la suite le taux de disparition présente une augmentation exponentielle typique (tableau 15). Aucune interaction significative avec le fourrage de la ration n'est observée pour le taux de disparition de la MAT. La différence observée après 3h d'incubation pour la pomme de terre provient d'une grande variabilité individuelle pour la ration à base d'ensilage de maïs.

4. Digestibilité apparente de l'amidon

4.1. Matériel et méthodes

La digestibilité apparente de l'amidon a été déterminée lors de l'essai 2. Pendant chaque période de mesures des échantillons individuels de bouses sont prélevés un soir et le lendemain matin. Ces échantillons sont congelés puis lyophilisés et broyés sur une grille de 1,5 mm. Sont déterminées sur un échantillon poolé (moitié soir/moitié matin) la teneur en cendres insolubles à HCl (**cendres HCl**) (Van Keulen et Young, 1977) ainsi que la teneur en amidon résiduel (AFNOR V18-121, 1997). Les cendres HCl sont considérées comme marqueur interne et servent à calculer la quantité de matière sèche de bouses excrétée par jour à l'aide du rapport entre les teneurs dans les bouses et dans la ration. La digestibilité apparente de l'amidon (%) est obtenue par :

$$\frac{\text{Amidon ingéré} - \text{Amidon excrété}}{\text{Amidon ingéré}}$$

4.2. Résultats

La digestibilité apparente de l'amidon n'est pas affectée par la nature du concentré amidon. Elle est de 93,3% et de 93,8% (NS) pour les rations contenant respectivement du blé et des pommes de terre ce qui correspond à des rejets dans les fèces proches de 0,5 kg d'amidon/jour.

5. Profils fermentaires

5.1. Prélèvements

Pendant la semaine de mesures des essais 1 et 2, une cinétique de la composition postprandiale du jus du rumen est réalisée. Les prélèvements pour la cinétique de l'essai 1 débutent à la distribution du repas principal et celle de l'essai 2 à la première prise alimentaire après la traite du matin. Les prélèvements sont réalisés à chaque heure pendant les prises alimentaires principales de la journée (après la traite du matin, après la distribution du repas principal et après la traite du soir). Sinon les prélèvements sont espacés de 2 heures dans la journée. La prise alimentaire nocturne étant très faible, la cinétique a été arrêtée vers 20h. La distribution des temps de prélèvements dans les deux essais est présentée dans le tableau 16.

Pour l'essai 2, la quantité de matière sèche ingérée a été mesurée entre chaque prélèvement de jus de rumen.

Tableau 16 : Prélèvements du jus de rumen pour les essais 1 et 2.

Evenement de la journée	Heure	Essai 1	Essai 2
Accès à l'alimentation après la traite du matin	6		0
	7		1
Pesée des refus de la veille (pas d'alimentation)	8		2
Distribution du repas principal	10	4	4
	11	5	5
	12	6	6
	14	8	8
	16	10	10
Traite du soir (pas d'alimentation)	16h30		
	18	12	12
	20	14	

5.2. Analyses

Les prélèvements de jus de rumen (essai 1 et 2) sont réalisés par une sonde rigide via la canule du rumen. Un prélèvement d'environ 20 mL de jus de rumen est obtenu par aspiration avec une seringue. Après mesure du pH (Knick Portamess 751 avec une électrode Xerolyt Ingold M6-DXK S7/25), les bactéries et les particules solides sont séparées par centrifugation (20 min à 4000 g) et le surnageant est immédiatement congelé. Sont analysées sur ces échantillons les teneurs en acides gras volatils par chromatographie phase gazeuse (JOUANY, 1982) et pour l'essai 1 également les concentrations en acide lactique (KIT 139 084, Boehringer, Mannheim, Allemagne).

5.3. Résultats

5.3.1. pH

Le pH moyen du jus au cours de la cinétique ruminale est plus faible pour les rations contenant du blé que pour les rations pommes de terre dans l'essai 2. Dans l'essai 1 la même observation peut être faite pour les rations à base d'ensilage d'herbe mais l'effet de la nature du concentré "amidon" sur le pH moyen pour les rations à base d'ensilage de maïs n'est pas significatif (tableau 17).

Tableau 17 : Effet de la nature du concentré amidon sur les variations du pH moyen au cours de la cinétique

Essai	Fourrage	Blé	Pdt	Effet	ETR
2	ensilage de maïs	6,19	6,36	$P < 0,05$	0,30
1	ensilage de maïs	5,96	6,03	NS	0,30
1	ensilage d'herbe	6,06	6,25	$P < 0,10$	0,30

Les courbes montrent une première chute du pH après le début de l'ingestion (T0) et une deuxième chute après la distribution du repas principal (T4) indépendamment de la nature du concentré amidon (figure 9). Le pH chez les animaux ingérant du blé est alors plus faible que pour les vaches ingérant des pommes de terre. L'écart entre les deux concentrés varie en fonction du temps et mais aussi d'un essai à l'autre. La baisse du pH se prolonge pour le blé contrairement aux pommes de terre dans les rations à base d'ensilage d'herbe jusqu'à T10, le pH atteignant alors un niveau très bas (5,5).

De ce fait le pH pour les rations blé est entre T5 et T12 au-dessous de la limite de 6,0 alors que celui des rations pommes de terre n'est inférieur à ce seuil que sporadiquement.

Figure 9 : Effet de la nature du concentré amidon sur les variations du pH ruminal

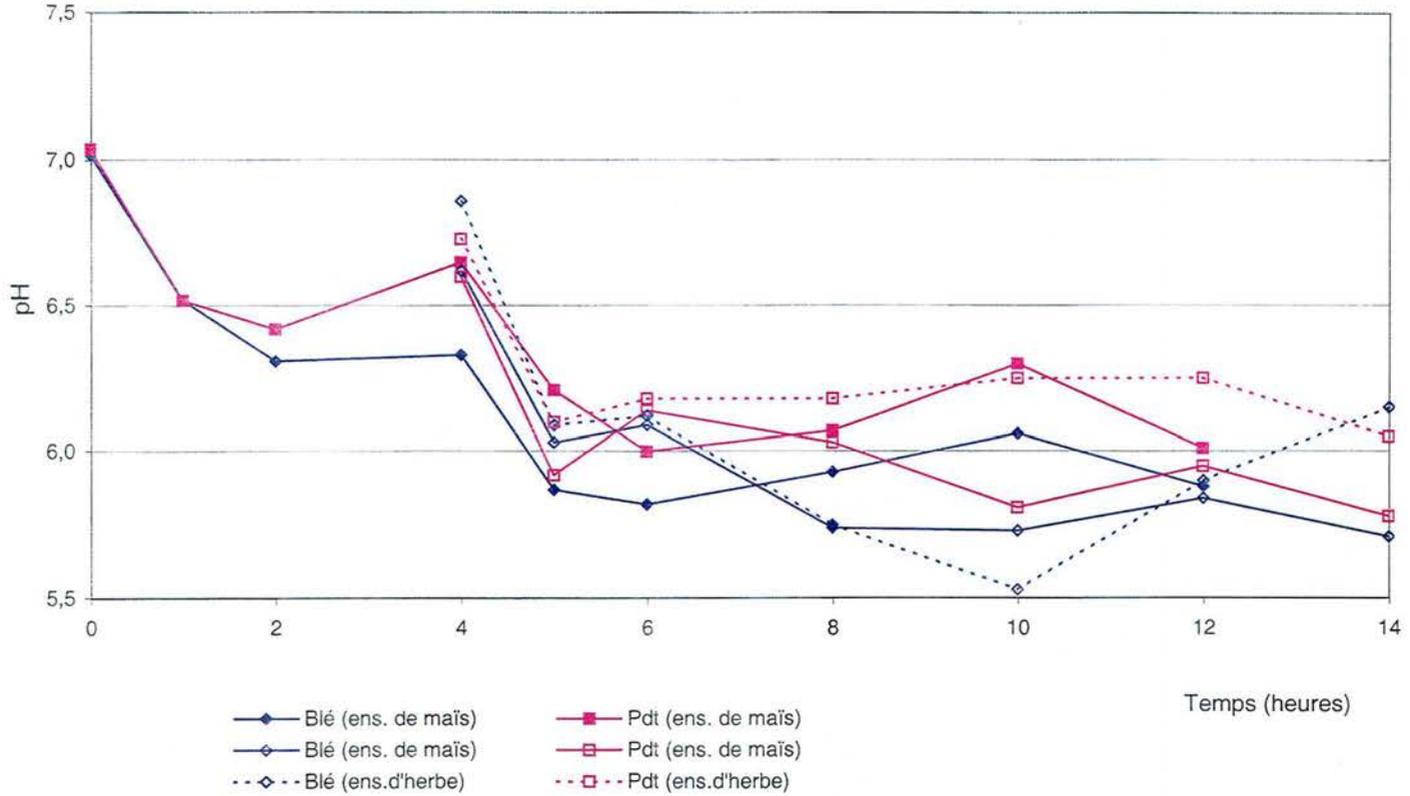
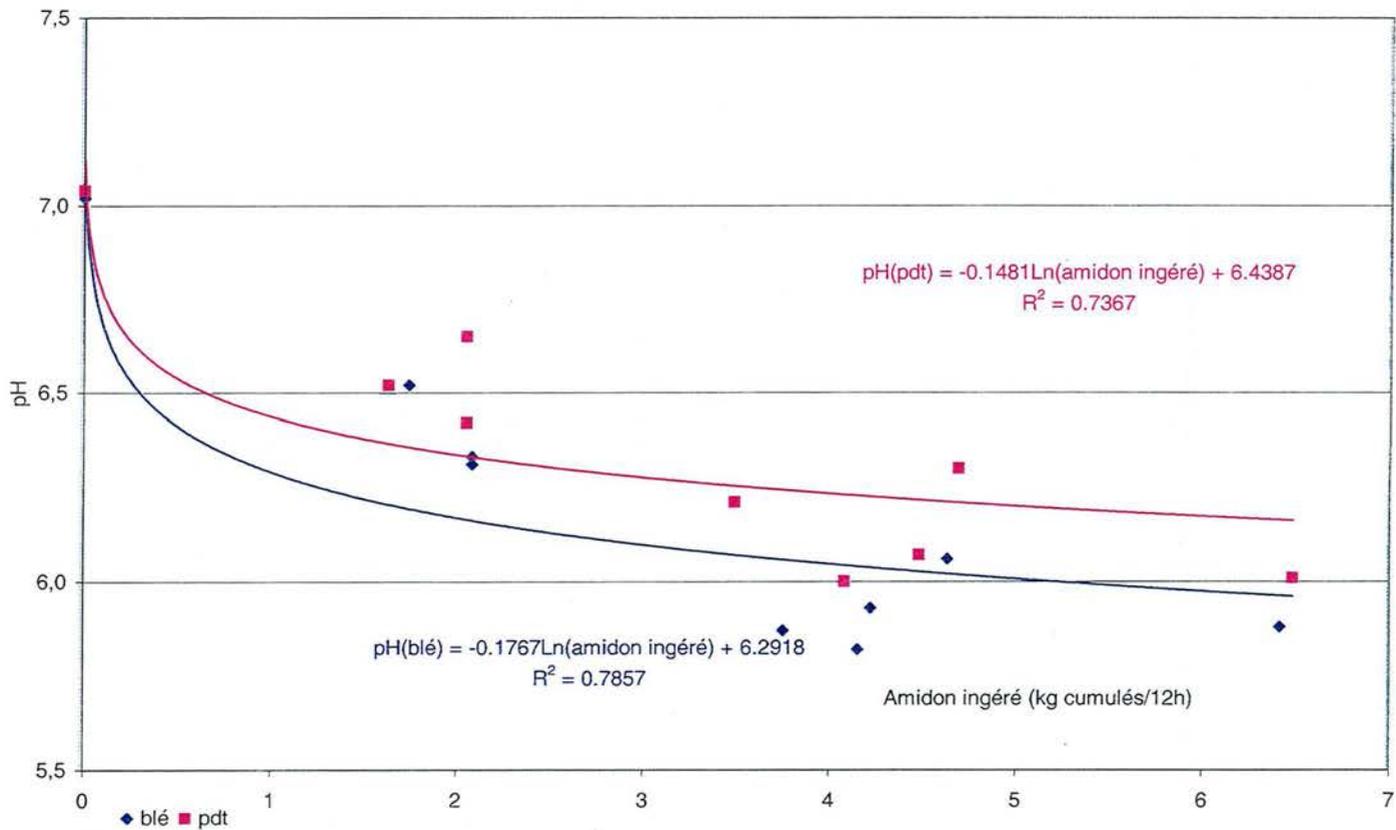


Figure 10 : Effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon ingéré sur la chute du pH lors de la cinétique



L'effet de l'interaction entre la quantité et la nature de l'amidon ingéré sur l'évolution du pH du jus de rumen est illustré par la figure 10. Pour les deux rations la quantité d'amidon ingéré et le pH initial sont très voisins (tableau 18). En effet les animaux ingèrent en moyenne 6,4 kg (blé) ou 6,5 kg (pommes de terre) d'amidon et la cinétique débute avec un pH de 7,0. La chute du pH est fortement liée à l'ingestion d'amidon ($r^2 = 0,7$) : la diminution du pH par kg supplémentaire d'amidon ingéré est plus élevée avec le blé qu'avec la ration contenant des pommes de terre.

Tableau 18 : Effet de l'interaction entre la quantité et la nature de l'amidon ingéré sur la chute du pH lors de la cinétique (essai 2).

	Blé	Pdt
Quantité d'amidon ingéré (kg/12h)	6,42 (0,8)	6,49 (1,3)
pH initial (T0)	7,02	7,04
pH par kg d'amidon ingérée	= 6,29 - 0,18 ln(amidon ing.)	= 6,44 - 0,15 ln(amidon ing.)
n	8	8
R ²	0,79	0,74

5.3.2. Lactate

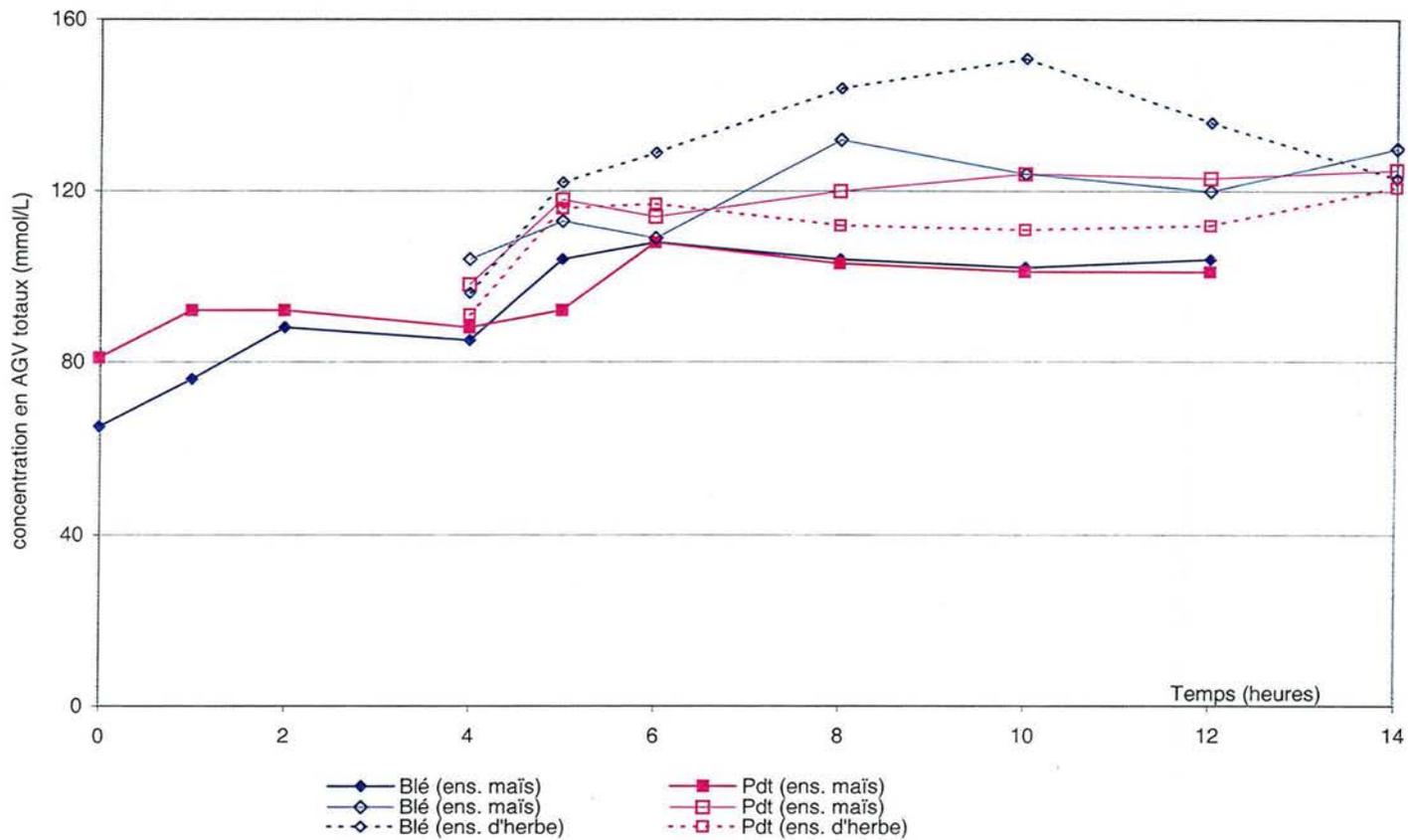
La concentration de lactate du jus de rumen n'est globalement pas affectée par la nature du concentré amidon quelle que soit la nature du fourrage de la ration (tableau 19). Les valeurs restent faibles et stables exceptées un pic à T5 concomitant à la chute du pH.

Tableau 19 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration moyenne en lactate (mmol/L)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt	Effet	ETR
1	ensilage de maïs	2,71	3,56	NS	3,6
1	ensilage d'herbe	3,55	2,57	NS	3,3

La cinétique de la concentration de lactate est caractérisée par des valeurs faibles (<4 mmol/L)

Figure 11 : Effet de la nature du concentré amidon sur la cinétique des concentrations en AGV totaux



5.3.3. AGV totaux

La concentration moyenne en AGV totaux dans le jus de rumen n'est pas significativement affectée par la nature du concentré amidon si le fourrage de la ration est l'ensilage de maïs. Pour les rations à base d'ensilage d'herbe l'apport de blé engendre des concentrations globalement plus élevées que l'apport de pommes de terre (tableau 20).

La cinétique des concentrations en AGV totaux (figure 11) montre une augmentation en deux paliers, le premier au début du repas du matin (T0) et le second après la distribution de la ration (T4). Pour les rations à base d'ensilage de maïs il n'y a pas d'effet de la nature du concentré comme pour les concentrations moyennes. Les cinétiques au sein d'une comparaison dans le même essai sont très similaires pour les rations à base d'ensilage de maïs. Les augmentations dans les deux paliers ne dépassent pas 20 mmol/L et atteignent le niveau supérieur entre T6 et T8. Les concentrations sont ensuite relativement constantes.

Tableau 20 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration moyenne en AGV (mmol/L)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt	Effet	ETR
2	ensilage de maïs	93	95	NS	19
1	ensilage de maïs	119	117	NS	18
1	ensilage d'herbe	129	111	$P < 0,01$	17

Pour les rations à base d'ensilage d'herbe, les cinétiques diffèrent en fonction de la nature du concentré (figure 11). La concentration en AGV pour la ration contenant du blé augmente jusqu'à T10 alors qu'elle est quasi-stable avec l'apport de pommes de terre entre T5 et T12. Cette évolution explique la différence entre les concentrations moyennes soulignée auparavant.

5.3.4. Proportions relatives des différents AGV

La nature du concentré amidon n'affecte pas significativement les proportions moyennes d'acétate, de propionate et de butyrate dans les rations à base d'ensilage de maïs. Dans les rations à base d'ensilage d'herbe, le profil fermentaire de la ration contenant du blé est caractérisé par une proportion plus faible de propionate et plus élevée en butyrate (tableau 21).

Tableau 21 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des proportions relatives des AGV majeurs

Essai	Fourrage	Acétate (mol%)				Propionate (mol%)				Butyrate (mol%)			
		Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR
1	E.d'herbe	50,9	51,2	NS	3,1	25,7	28,0	P<0,05	2,6	18,6	16,1	P<0,01	2,1
1	E. de maïs	48,3	49,7	NS	3,1	26,2	25,7	NS	2,6	19,7	19,6	NS	2,1
2	E. de maïs	46,0	47,2	NS	5,2	27,3	27,2	NS	5,6	18,9	19,0	NS	5,0

L'effet de la nature du concentré sur les proportions d'isobutyrate est très variable d'un essai à l'autre. Dans l'essai 1 pour les rations à base d'ensilage d'herbe et dans l'essai 2 avec l'ensilage de maïs comme fourrage, les AGV sont caractérisés par des proportions plus élevées en isobutyrate pour les pommes de terre que pour le blé. Par contre dans l'essai 1 quand le fourrage est l'ensilage de maïs la nature du concentré n'affecte pas la proportion d'isobutyrate (tableau 22).

Tableau 22 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des proportions relatives des AGV mineurs

Essai	Fourrage	Iso butyrate (mol%)				Iso valérate (mol%)				Valérate (mol%)			
		Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR
1	E.d'herbe	0,66	0,82	P<0,05	0,14	2,0	2,0	NS	0,5	2,2	1,8	NS	0,6
1	E. de maïs	0,76	0,76	NS	0,14	2,2	2,3	NS	0,5	2,6	2,1	P<0,05	0,6
2	E. de maïs	1,38	1,72	P<0,01	0,4	2,3	2,2	NS	0,8	4,3	2,9	P<0,01	1,2

Les proportions d'isovalérate et de valérate ne diffèrent pas en fonction de la nature du concentré pour les rations à base d'ensilage d'herbe. L'isovalérate n'est pas affecté quand le concentré est associé à l'ensilage de maïs, mais dans ces conditions la teneur en valérate est plus élevée avec le blé qu'avec les pommes de terre dans les deux essais (tableau 22).

La nature du concentré amidon n'a pas d'effet sur les variations du rapport C_2/C_3 . Le rapport C_4/C_3 pour les rations ensilage de maïs de l'essai 1 est supérieur pour les pommes de terre à celui enregistré avec le blé mais cet effet n'est pas reproduit dans l'essai 2. L'effet significatif observé pour les rations à base d'ensilage d'herbe se traduit par des rapports $(C_2+C_4)/C_3$ et C_4/C_3 plus élevés pour le blé que pour les pommes de terre (tableau 23).

Tableau 23 : Effet de la nature du concentré amidon sur la moyenne des rapports entre les AGV majeurs

Essai	Fourrage	C ₂ /C ₃				(C ₂ +C ₄)/C ₃				C ₄ /C ₃			
		Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR	Blé	Pdt	Effet	ETR
1	E.d'herbe	2,0	1,88	NS	0,27	2,69	2,47	P<0,05	0,34	0,69	0,59	P<0,01	0,10
1	E. de maïs	1,91	1,97	NS	0,31	2,67	2,79	NS	0,41	0,72	0,86	P<0,01	0,22
2	E. de maïs	1,81	1,78	NS	0,46	2,60	2,50	NS	0,75	0,79	0,72	NS	0,38

Les cinétiques des proportions des différents AGV majeurs sont présentées dans les tableaux 24 à 26 et leurs rapports dans les tableaux 27 à 29.

Tableau 24 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion d'acétate (mol%) dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							46,7	47,5	NS
1							50,8	47,6	NS
2							48,1	46,5	NS
4	56,6	53,2	P<0,05	50,6	50,1	NS	44,7	46,3	NS
5	55,4	51,5	P<0,05	50,6	50,8	NS	48,4	51,2	NS
6	50,1	50,7	NS	48,0	50,2	NS	45,5	47,1	NS
8	50,3	51,4	NS	46,8	49,7	P<0,10	42,3	45,5	NS
10	50,5	49,8	NS	47,5	50,0	NS	43,6	46,8	NS
12	50,3	52,1	NS	47,5	48,7	NS	43,8	46,4	NS
14	46,2	50,3	P<0,05	47,7	48,6	NS			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de t de Student

Tableau 25 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion de propionate (mol%) dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							30,2	28,1	NS
1							26,6	28,0	NS
2							27,2	27,5	NS
4	25,4	25,6	NS	25,7	24,8	NS	28,1	27,9	NS
5	26,9	29,4	$P < 0,10$	26,6	25,6	NS	26,0	26,0	NS
6	30,1	29,0	NS	26,6	25,2	NS	26,8	26,8	NS
8	26,9	27,9	NS	26,9	25,6	NS	27,3	26,8	NS
10	24,7	28,2	$P < 0,05$	26,2	25,3	NS	27,3	26,5	NS
12	23,1	26,9	$P < 0,01$	26,2	25,5	NS	26,5	27,3	NS
14	25,7	28,2	$P < 0,10$	26,3	25,3	NS			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de *t* de Student

Tableau 26 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution de la proportion de butyrate (mol%) dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							15,0	16,6	NS
1							15,6	17,8	NS
2							17,2	19,2	NS
4	13,8	16,2	$P < 0,05$	17,2	19,3	$P < 0,10$	18,5	18,8	NS
5	14,0	14,9	NS	17,0	19,2	$P < 0,10$	18,6	17,5	NS
6	15,4	15,7	NS	19,0	20,0	NS	20,2	20,1	NS
8	18,1	16,3	$P < 0,10$	20,1	20,0	NS	22,3	21,1	NS
10	20,2	17,4	$P < 0,01$	20,4	20,0	NS	21,0	19,8	NS
12	21,6	16,6	$P < 0,01$	20,5	21,1	NS	21,5	20,0	NS
14	22,4	17,0	$P < 0,01$	20,6	21,5	NS			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de *t* de Student

Tableau 27 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport acétate/propionate dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							1,64	1,73	NS
1							2,03	1,76	NS
2							1,86	1,75	NS
4	2,25	2,14	NS	2,06	2,02	NS	1,70	1,69	NS
5	2,08	1,78	$P < 0,05$	1,96	2,00	NS	1,98	1,99	NS
6	1,70	1,78	NS	1,84	2,01	NS	1,83	1,79	NS
8	1,89	1,87	NS	1,79	1,95	NS	1,72	1,75	NS
10	2,07	1,81	$P < 0,10$	1,86	2,00	NS	1,80	1,81	NS
12	2,19	1,96	NS	1,88	1,91	NS	1,76	1,75	NS
14	1,82	1,81	NS	1,95	1,92	NS			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de *t* de Student

Tableau 28 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport (acétate+butyrate)/propionate dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							2,16	2,33	NS
1							2,63	2,41	NS
2							2,53	2,46	NS
4	2,78	2,79	NS	2,75	2,82	NS	2,43	2,38	NS
5	2,60	2,29	$P < 0,10$	2,61	2,78	NS	2,74	2,68	NS
6	2,20	2,32	NS	2,57	2,82	NS	2,66	2,56	NS
8	2,56	2,46	NS	2,56	2,74	NS	2,70	2,57	NS
10	2,88	2,44	$P < 0,05$	2,67	2,81	NS	2,80	2,59	NS
12	3,12	2,58	$P < 0,01$	2,70	2,75	NS	2,71	2,51	NS
14	2,69	2,42	NS	2,79	2,78	NS			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de *t* de Student

Tableau 29 : Effet de la nature du concentré amidon sur l'évolution du rapport butyrate/propionate dans le jus de rumen

Essai	1			1			2		
	Ration ensilage d'herbe			Ration ensilage de maïs			Ration ensilage de maïs		
Temps (h)	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹	Blé	Pdt	Effet ¹
0							0,53	0,60	NS
1							0,61	0,65	NS
2							0,68	0,72	NS
4	0,54	0,65	$P < 0,05$	0,65	0,83	$P < 0,01$	0,73	0,69	NS
5	0,52	0,51	NS	0,61	0,81	$P < 0,01$	0,77	0,68	NS
6	0,51	0,55	NS	0,69	0,86	$P < 0,05$	0,82	0,77	NS
8	0,66	0,59	NS	0,73	0,85	$P < 0,10$	0,98	0,82	NS
10	0,82	0,63	$P < 0,01$	0,77	0,87	NS	0,99	0,78	NS
12	0,93	0,62	$P < 0,01$	0,79	0,90	NS	0,96	0,76	NS
14	0,87	0,61	$P < 0,01$	0,82	0,92	$P < 0,10$			

¹ comparaison des moyennes ajustées par un test de *t* de Student

Pour les rations à base d'ensilage de maïs il n'y a aucune interaction significative ($P > 0,10$) entre la nature du concentré amidon et le temps pour les proportions des acides gras volatils ou les rapports entre AGV. Avec l'apport de pommes de terre la tendance à engendrer des proportions plus élevées en acétate (dans les deux essais) et plus faible en butyrate (essai 2) après le repas principal de la journée ($>T4$) n'atteint pas le seuil de signification.

Pour les rations à base d'ensilage d'herbe il y a une interaction significative entre la nature du concentré amidon et le temps de la cinétique. La proportion d'acétate initialement plus élevée avec l'apport de blé chute après le début du repas principal (T4 à T6) plus fortement qu'avec l'apport de pommes de terre (-6,5 contre -2,5 mol%). Les proportions de C₂ évoluent ensuite à des niveaux semblables pour les deux aliments (tableau 24). La ration contenant du blé est également caractérisée par une chute de la proportion du propionate et une augmentation parallèle du butyrate à partir de T6 atteignant des amplitudes maximales à T12 (-3,8 et +5,0 mol% en faveur du blé respectivement pour le propionate et le butyrate) (tableaux 25 et 26). Ces résultats se traduisent par une augmentation plus forte des rapports (C₂+C₄)/C₃ et C₄/C₃ pour le blé entre T6 et T12 (tableaux 28 et 29) que pour les pommes de terre.

6. Métabolites sanguins

6.1. Prélèvements

Pendant la semaine de mesures des essais 1 et 2, les métabolites sanguins sont analysés en cinétique. La cinétique de l'essai 1 débute au repas principal et celle de l'essai 2 à la première prise alimentaire du matin. La distribution des temps de prélèvements dans les deux essais est présentée dans le tableau 30.

Tableau 30 : Temps des prélèvements du sang pour les essais 1 et 2.

Evénement de la journée	Heure	Essai 1	Essai 2
Accès à l'alimentation après la traite du matin	6		0
Pesée des refus de la veille (pas d'alimentation)	8		2
Distribution du repas principal	10	4	4
	13	7	7
	16	10	

Pour les essais 3 et 4 un seul prélèvement sanguin a été réalisé sur tous les animaux juste après la distribution du repas principal correspondant au temps 7h des cinétiques.

6.2. Analyses

Des échantillons de 20 mL de sang sont prélevés dans des tubes héparinés (vacutainer® réf. 368484, Preanalytical Solutions, Plymouth, Grande Bretagne) par ponction dans la veine caudale en parallèle avec la cinétique du profil fermentaire. Le plasma est séparé par centrifugation (3000 tours/min pendant 10 min.) et les échantillons sont immédiatement congelés. Sont déterminés après décongélation les teneurs en β -OH-butyrates et acétates (formation de NADH et mesure sur spectrophotomètre à 340 nm), acides gras non-estérifiés (KIT 46551, Unipath) et glucose (KIT 06GL8, Biolabo, Fismes, France).

6.3. Résultats

La teneur du plasma périphérique en acides gras non estérifiés n'est pas affectée par la nature du concentré amidon de la ration quel que soit le fourrage (tableau 31). Dans l'essai 1 les concentrations sont significativement ($P < 0,01$) plus élevées avec les rations à base d'ensilage d'herbe qu'avec l'ensilage de maïs.

La glycémie n'a pas varié selon la nature du concentré amidon pour les rations à base d'ensilage de maïs (essais 1, 3 et 4). Par contre dans certains essais elle est significativement plus faible pour

les rations à base d'ensilage d'herbe quand le blé y est incorporé (essai 1 : - 0.06 g/L, $P < 0.05$) mais l'interaction entre le fourrage et le concentré amidon n'est pas systématique (NS, essai 4) (tableau 31). Il n'y a pas d'interaction significative entre la nature du concentré et le temps de prélèvement pour les variations des teneurs plasmatiques en AGNE et la glycémie.

Tableau 31 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur en AGNE et sur la glycémie

Métabolite	Essai	Fourrage	Blé	Pdt	ETR	Effets	
						concentré	interaction conc. x fourrage
AGNE ($\mu\text{mol/L}$)	1	E. de maïs	59	52	64	NS	NS
	1	E. d'herbe	104	116			
	3	E. de maïs	55	76	43	NS	
Glycémie (g/L)	1	E. de maïs	0.64 a	0.62 a	0.06	$P < 0.10$	$P < 0,01$
	1	E. d'herbe	0.58 b	0.64 a			
	3	E. de maïs	0,60	0,64	0,08	NS	
	4	E. de maïs	0,65	0,67	0,05	NS	NS
	4	E. d'herbe	0,66	0,66			

Avec la différence de nature du concentré les variations de la teneur moyenne du plasma périphérique en acétoacétate sont faibles (tableau 32). En absence d'un effet nature d'amidon pour les rations à base d'ensilage d'herbe pour les rations ensilage de maïs le blé a tendance à provoquer des teneurs supérieures pour l'essai 2 en limite de signification.

Tableau 32 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en acétate et β -OH-butyrates

	Essai	Fourrage	Blé	Pdt	ETR	Effets		
						nature du concentré	interactions	
							conc. x fourrage	conc. x temps
acétate ($\mu\text{mol/L}$)	1	E. d'herbe	67	66	31	NS	NS	$P < 0.01$
	1	E. de maïs	84	75				
	2	E. de maïs	89 A	52 B	53	$P < 0.10$		NS
β -OH-butyrates ($\mu\text{mol/L}$)	1	E. d'herbe	1017 a	645 b	404	$P < 0.10$	$P < 0.01$	$P < 0.01$
	1	E. de maïs	1020	1098				
	2	E. de maïs	1077	835	664	NS		NS

Figure 12 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en acétoacétate

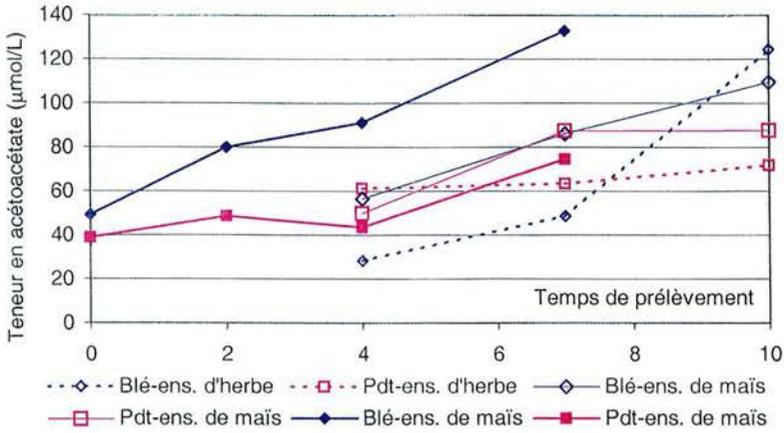
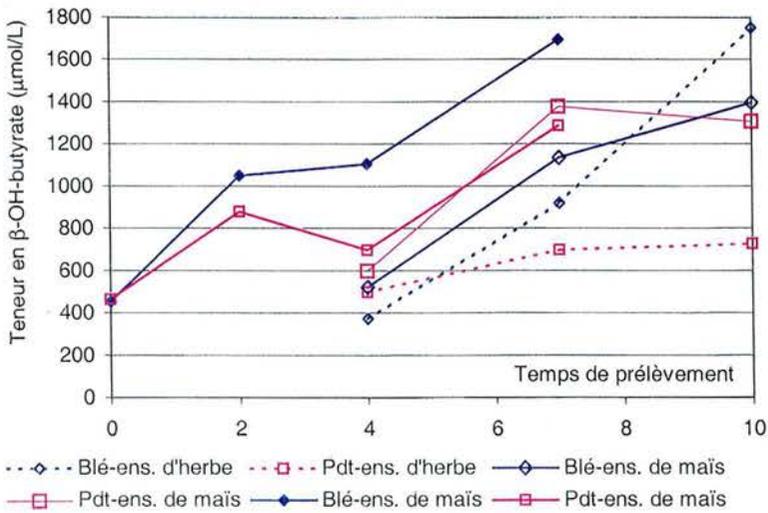


Figure 13 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en bêtahydroxybutyrate



Pour la teneur moyenne en β -OH-butyrates il n'y a pas d'effet du concentré pour les rations à base d'ensilage de maïs. Pour les rations à base d'ensilage d'herbe la teneur en β -OH-butyrates est significativement plus élevée pour les vaches ingérant du blé (tableau 32).

Dans l'essai 2, il n'y a pas d'interaction significative entre la nature du concentré et le temps de prélèvement. L'utilisation du blé induit des teneurs supérieures pour les deux métabolites tout au long de la cinétique (figures 12 et 13).

Dans l'essai 1, l'interaction concentré / temps est traduite par la progression des teneurs au cours du temps (sauf pour la ration à base d'ensilage d'herbe - pommes de terre). Dans les deux essais l'évolution des teneurs est plus forte pour les rations contenant du blé que pour celles contenant des pommes de terre pour les deux natures de fourrage (figures 12 et 13).

7. Réponses zootechniques

7.1. Ingestion

Les quantités de matière sèche ingérée avec les deux natures de concentré amidon ne sont pas significativement différentes pour 6 comparaisons sur 7 (tableau 33). L'écart enregistré dans l'essai 4, +1,8 kg/jour en faveur des pommes de terre associées à l'ensilage de maïs fait figure d'exception.

Un effet fourrage est observé dans les essais 1 et 4 : les ingestions avec l'ensilage de maïs sont toujours supérieures à celles avec l'ensilage d'herbe. L'interaction fourrage - nature du concentré amidon sur la matière sèche ingérée n'est pas significative.

Tableau 33 : Effet de la nature du concentré amidon sur la matière sèche ingérée (kg/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effet		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	17,3 b	15,9 b	NS	NS	1,6
1	ensilage de maïs	19,7 ab	20,5 a			
2	ensilage de maïs	19,6	19,2	NS		1,4
3	ensilage de maïs	22,2	21,9	NS		1,2
4	ensilage d'herbe	19,1 c	19,9 bc	$P < 0,01$	NS	1,7
4	ensilage de maïs	20,7 b	22,5 a			
5	mélange d'ensilages	19,9	20,5	NS		1,6

¹ screening de pommes de terre

Pour l'ensemble des rations à base d'ensilage de maïs, l'ingestion d'amidon n'est pas significativement affectée par la nature du concentré amidon sauf dans l'essai 4 où les vaches ingérant du blé consomment 0,9 kg d'amidon de plus par jour que celles ingérant des pommes de terre (sans doute en relation avec une teneur en amidon de la ration "blé" plus élevée que celle de la ration "pommes de terre" : + 6%, tableau 8, page 42).

Tableau 34 : Effet de la nature du concentré amidon sur les quantités totales d'amidon ingérées (kg/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effet concentré
1	ensilage d'herbe	3,6	3,2	NS
1	ensilage de maïs	6,1	6,6	NS
2	ensilage de maïs	8,0	7,7	NS
3	ensilage de maïs	7,7	7,7	NS
4	ensilage d'herbe	4,5	3,6	$P < 0,01$
4	ensilage de maïs	7,3	7,3	NS
5	mélange d'ensilages	6,2	6,1	NS

¹ screening de pommes de terre

7.2. Production de lait brut

La production laitière n'est jamais significativement affectée par la nature du concentré amidon de la ration (tableau 35).

Tableau 35 : Effet du concentré amidon sur la production de lait brut (kg/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	interaction concentré x fourrage	
1	ensilage d'herbe	23,4 ab	21,0 b	NS	$P < 0,05$	2,0
1	ensilage de maïs	21,6 ab	24,4 a			
2	ensilage de maïs	32,1	32,3	NS		0,9
3	ensilage de maïs	27,2	26,6	NS		1,4
4	ensilage d'herbe	27,0 ab	26,7 b	NS	NS	1,9
4	ensilage de maïs	27,0 ab	27,8 a			
5	mélange d'ensilages	25,4	24,1	NS		2,3

¹ screening de pommes de terre

Cependant les résultats des essais 1 et 4 montrent un effet du fourrage sur la réponse des animaux. Mais l'interaction globale fourrage - concentré n'est significative que pour l'essai 1 : l'apport de pommes de terre avec une ration à base d'ensilage de maïs engendre une production laitière significativement plus élevée que le même concentré amidon dans une ration à base d'ensilage d'herbe (essai 1 : + 3,4 kg/jour, $P < 0,05$; essai 4 : + 1,1 kg/jour, $P < 0,05$). Pour le blé aucune interaction avec la nature du fourrage n'a été mise en évidence.

7.3. Composition du lait

7.3.1. Matière protéique

Le taux protéique et la quantité de matière protéique produite ne sont pas affectés par la nature du concentré amidon (tableaux 36 et 37). Seul dans l'essai 4 un effet en faveur du blé sur le TP (en limite de signification) est constaté.

Pour le TP l'effet de l'interaction fourrage - concentré n'est pas significative. En effet l'augmentation du TP par la substitution de l'ensilage d'herbe par l'ensilage de maïs pour un concentré amidon donné est significative pour le blé dans l'essai 1 (+3,2 g/kg ; $P < 0,05$). Cependant dans l'essai 4 l'effet de la substitution est significatif pour les pommes de terre (+1,3 g/kg ; $P < 0,05$). Dans ces mêmes essais, le TP ne varie pas significativement avec l'autre nature du concentré (tableau 36).

Tableau 36 : Effet de la nature du concentré amidon sur le taux protéique (g/kg)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction concentré x fourrage	
1	ensilage d'herbe	33,7 b	33,9 b			
1	ensilage de maïs	36,9 a	35,6 ab	NS	NS	1,5
2	ensilage de maïs	29,9	30,1	NS		1,3
3	ensilage de maïs	32,5	32,0	NS		0,9
4	ensilage d'herbe	33,3 a	32,5 b			
4	ensilage de maïs	33,8 a	33,8 a	$P < 0,10$	NS	1,1
5	mélange d'ensilages	35,7	36,0	NS		0,7

¹ screening de pommes de terre

Tableau 37 : Effet de la nature du concentré amidon sur la quantité de matière protéique produite (g/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	788 ab	701 b	NS	$P < 0,10$	72
1	ensilage de maïs	802 ab	862 a			
2	ensilage de maïs	942	983	NS		99
3	ensilage de maïs	914	888	NS		55
4	ensilage d'herbe	874 bc	846 c	NS	$P < 0,10$	63
4	ensilage de maïs	893 ab	914 a			
5	mélange d'ensilages	882	853	NS		90

¹ screening de pommes de terre

Comme pour la production de lait brut les résultats des essais 1 et 4 montrent une interaction (en limite de signification) entre la nature du fourrage et celle du concentré amidon : pour les pommes de terre la quantité de protéines est plus élevée avec une ration à base d'ensilage de maïs que pour une ration d'ensilage d'herbe (essai 1 : + 161 g/jour, $P < 0,05$; essai 4 : + 68 g/jour, $P < 0,05$). Pour les rations contenant du blé aucune interaction avec le fourrage n'a été mise en évidence.

7.3.2. Matière grasse

La réponse à la nature du concentré amidon de la ration est variable (tableaux 38 et 39).

Dans les essais 2 à 4, les TB des rations à base d'ensilage de maïs sont significativement plus faibles pour le concentré blé que pour les pommes de terre (tableau 38). Pour les rations à base d'ensilage d'herbe aucune différence significative n'a été mise en évidence. L'interaction fourrage - concentré est significative pour l'essai 4 ($P < 0,01$). Avec le mélange des deux fourrages dans l'essai 5 les TB ne sont pas différents selon la nature du concentré amidon.

Tableau 38 : Effet de la nature du concentré amidon sur le taux butyreux (g/kg)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	41,0	45,7	NS	NS	3,6
1	ensilage de maïs	44,6	42,4			
2	ensilage de maïs	31,4 b	34,7 a	$P < 0,05$		2,7
3	ensilage de maïs	34,7 b	38,0 a	$P < 0,01$		2,9
4	ensilage d'herbe	41,4 a	40,3 a	NS	$P < 0,01$	2,4
4	ensilage de maïs	38,8 b	41,4 a			
5	mélange d'ensilages	43,0	42,4	NS		1,9

¹ screening de pommes de terre

Les variations de la quantité de matière grasse produite par les vaches sont analogues à celles du TB avec une interaction nature du concentré amidon - nature du fourrage de la ration. Dans les essais 2 à 4 la quantité de matière grasse produite est plus élevée pour les rations contenant des pommes de terre si la ration complète est à base d'ensilage de maïs (tableau 39). Pour les rations à base d'ensilage d'herbe ou d'un mélange ensilage d'herbe/ensilage de maïs il n'y a aucune différence significative.

Tableau 39 : Effet de la nature du concentré amidon sur la quantité de matière grasse produite (g/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	971	963	NS	NS	146
1	ensilage de maïs	988	1040			
2	ensilage de maïs	1022 b	1144 a	$P < 0,05$		98
3	ensilage de maïs	979 b	1050 a	$P < 0,01$		103
4	ensilage d'herbe	1083 ab	1047 bc	$P < 0,05$	$P < 0,01$	78
4	ensilage de maïs	1021 c	1124 a			
5	mélange d'ensilages	1066	1015	NS		113

¹ screening de pommes de terre

La diversité des réponses illustre bien les conséquences de grandes variations de réponses individuelles en terme de production laitière, de taux butyreux et de quantité de matière grasse produite. Cette observation est également soulignée par les écart-types résiduels élevés.

7.3.3. Production de lait à 4% de matière grasse

Les résultats pour la production de lait à 4% de matière grasse (lait standard) suivent les tendances observées précédemment pour la matière grasse. Les rations à base d'ensilage de maïs et contenant des pommes de terre ont une production de lait standard supérieur à celles contenant du blé dans l'essai 4, et au moins en tendance dans les essais 2 et 3.

Aucune différence significative n'existe pour les rations à base d'ensilage d'herbe ou à base du mélange des deux ensilages (tableau 40). L'interaction significative entre la nature du fourrage et du concentré amidon pour l'essai 4 illustre bien ce fait. L'absence de cette interaction dans l'essai 1 et la faiblesse statistique de la réponse des animaux dans les essais 2 et 3 proviennent du cumul des variations de la production et de la matière grasse du lait.

Tableau 40 : Effet de la nature du concentré amidon sur la production de lait à 4% de matière grasse (kg/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	24,0	22,8	NS	NS	3,1
1	ensilage de maïs	23,5	25,3			
2	ensilage de maïs	27,9	30,2	NS		3,0
3	ensilage de maïs	25,8	26,6	$P < 0,10$		1,9
4	ensilage d'herbe	26,9 b	26,3 b	$P < 0,10$	$P < 0,01$	1,7
4	ensilage de maïs	26,1 b	27,8 a			
5	mélange d'ensilages	26,0	24,8	NS		2,6

¹ screening de pommes de terre

7.3.4. Teneur en lactose

La teneur en lactose n'est affectée ni par la nature du concentré amidon (tableau 41) ni par une interaction fourrage - concentré amidon.

Tableau 41 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur en lactose (g/kg)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	49,6	49,3	NS	NS	1,0
1	ensilage de maïs	49,0	50,2			
3	ensilage de maïs	50,4	50,3	NS		0,9
4	ensilage d'herbe	49,8	49,9	NS	NS	0,6
4	ensilage de maïs	49,6	49,7			
5	mélange d'ensilages	50,7	50,7	NS		1,7

¹ screening de pommes de terre

7.3.5. Concentration cellulaire

Les variations de la concentration cellulaire reflètent plutôt des épisodes inflammatoires subcliniques (les mammites cliniques ayant été exclues des données) et sporadiques sans lien apparent avec la nature du concentré amidon ou une interaction entre le fourrage et le concentré de la ration complète.

Tableau 42 : Effet de la nature du concentré amidon sur la concentration cellulaire (10³/mL)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	179	46	NS	NS	178
1	ensilage de maïs	176	41			
3	ensilage de maïs	30	66	NS		73
4	ensilage d'herbe	204	142	NS	NS	204
4	ensilage de maïs	140	211			
5	mélange d'ensilages	175	604	NS		725

¹ screening de pommes de terre

7.4. Variations du poids vif

La nature du concentré amidon de la ration n'affecte pas significativement le gain moyen quotidien (GMQ) dans les rations à base d'ensilage de maïs (tableau 43).

Tableau 43 : Effet de la nature du concentré amidon sur les variations du gain moyen quotidien (g/jour)

Essai	Fourrage	Blé	Pdt ¹	Effets		ETR
				concentré	Interaction conc. x fourrage	
1	ensilage d'herbe	701 a	- 264 b	$P < 0,05$	$P < 0,10$	321
1	ensilage de maïs	533 a	358 a			
2	ensilage de maïs	410	388	NS		757
3	ensilage de maïs	252	384	NS		607
4	ensilage d'herbe	- 82 b	- 30 b	NS	NS	559
4	ensilage de maïs	216 ab	326 a			

¹ screening de pommes de terre

Pour l'essai 1 il y a une interaction (en limite de signification) entre la nature du fourrage et la nature du concentré amidon. En effet pour les rations à base d'ensilage d'herbe les vaches perdent du poids avec les pommes de terre contre un gain considérable avec le blé. Dans ce même essai il n'y a pas de variations significatives entre les deux concentrés pour les rations à base d'ensilage de maïs.

L'effet de la nature du fourrage sur le GMQ est significatif pour les essais 1 et 4. Dans l'essai 4 cet effet est indépendant de la nature du concentré et de l'interaction entre le fourrage et le concentré (tableau 43).

8. Composition de la matière grasse

8.1. Matériel et méthodes

Pendant la semaine de mesures de chaque période de l'essai 2, un échantillon de lait est prélevé sur deux traites consécutives. La matière grasse de ces laits a été séparée par centrifugation (45 min. à 6000 tours/min) puis dissoute dans l'hexane (réf 052048, SDS) (dilution finale : environ 5mg de MG/mL). Chaque échantillon est ensuite analysé en double. L'analyse des acides gras est réalisée par deux estérifications différentes : les acides gras courts et moyens (jusqu'au C18:0) sont analysés après estérification isopropylique (**EIP**), les acides gras longs (à partir du C18:0) par estérification méthylique (**EM**).

Acides gras courts et moyens (WOLFF et FABIEN, 1989). Une prise d'essai correspondant à environ 5 mg de matière grasse est séchée sous courant d'azote, ensuite diluée avec 0,5 mL

d'hexane. Les échantillons sont incubés pendant 1h à 100°C après ajout de 3,5 mL d'isopropanol (réf. 0950516, purex) et 0,5 mL d'acide sulfurique (réf. 1030515, SDS). Après refroidissement et ajout de 0,5 mL de NaCl 5% (réf. S 9888, Sigma, France), 1,5 mL d'hexane et 5 mL d'eau distillée, les échantillons sont centrifugés (3 min à 3000 min⁻¹) et le surnageant est récupéré. Le culot est lavé (2 mL d'hexane) et centrifugé une deuxième fois. Les deux surnageants sont alors cumulés. Les esters isopropyliques sont analysés en chromatographie en phase gazeuse sur une colonne BPX70 de 120m (SGE, Melbourne, Australie) avec l'hydrogène comme gaz vecteur et un détecteur d'ionisation de flamme. Le programme de température est le suivant : 5 min à 50°C, augmentation de 5°C/min jusqu'à 190°C, palier de 15 min à 190°C, augmentation de 20°C/min jusqu'à 210°C et palier de 10 min à 210°C.

Acides gras longs. Une prise d'essai correspondant à environ 5 mg de matière grasse est séchée sous courant d'azote puis diluée dans 1 mL de toluène (réf. 0710516, SDS). Les échantillons sont incubés pendant 5 min. à 50°C après ajout de 2 mL de méthanolate de sodium 0,5 N (réf. 16,499-2, Aldrich, France). Après refroidissement et ajout de 0,1 mL d'acide acétique (réf. 070515, SDS, France), 5 mL d'hexane et 5 mL d'eau distillée, les échantillons sont centrifugés (3 min à 3000 tours/min⁻¹) et le surnageant est récupéré. Le culot est lavé (4 mL d'hexane) et centrifugé une deuxième fois et les deux surnageants sont cumulés. Les esters méthyliques sont analysés en chromatographie en phase gazeuse sur une colonne CPSIL88 de 100m (Variant) avec l'hydrogène comme gaz vecteur et un détecteur d'ionisation de flamme. Le programme de température est le suivant : 1 min à 60°C, augmentation de 20°C/min jusqu'à 200°C, palier de 55 min à 200°C, augmentation de 20°C/min jusqu'à 220°C et palier de 5 min à 220°C.

L'intégration des chromatogrammes est faite par rapport à des standards :

- 1 mélange des différents acides gras courts et moyens (Sigma, St Quentin Fallavier, France)
- 1 mélange d'acides gras à partir d'huile de soja enrichie en CLA (Laboratoire de Nutrition Lipidique, INRA Dijon)
- réf. I 9405 (Sigma, St Quentin Fallavier, France)
- Lipid standard 189-19 (Sigma, St Quentin Fallavier, France).

Les surfaces des chromatogrammes des esters isopropyliques (EIP) sont transformées en surfaces esters méthyliques (EM) par le rapport EIP/EM du C 18:0 et la part des différents acides gras est exprimée par rapport à la somme des EM.

Analyse statistique

En plus des proportions de chaque acide gras ont été calculées les parts cumulées des acides gras courts (<11 C) moyens (11 à 16 C) et longs (>17 C), la somme des acides gras C 18:1, C18:2 et C18:3 ainsi que les rapports C10:0/C10:1, C14:0/C14:1, C15:0/C15:1, C16:0/C16:1, C17:0/C17:1,

C18:0/C18:1 et C20:0/C20:1. Les acides gras ayant une proportion moyenne de moins de 0,05% de la somme des EM considérés comme traces ne sont pas analysés statistiquement.

Les données sont traitées avec une analyse de variance par la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Inst., Inc., Cary, NC) dont le modèle comporte le facteur étudié concentré amidon et la vache comme facteur contrôlé. L'effet a été testé en utilisant la somme des carrés des écarts de type III. Les valeurs sont exprimées sous forme de moyennes ajustées (ajustées par rapport aux autres facteurs du modèle) et comparées par un test de t de Student.

8.2. Résultats

La composition de la matière grasse du lait en acides gras présents à plus de 0,05% de la somme des esters méthyliques est présentée dans le tableau 44. Les acides gras décelés en traces (< 0,05%) sont : C 13:0antéiso, C 13:0iso, C 14:0antéiso, C 14:0iso, C 15:1, C 16:0iso, C 17:1, C 18:2 9*cis* 11*cis*, C 18:3(n-6), C 20:5(n-3), C 22:0 et C 24:0.

Globalement la matière grasse du lait des vaches ingérant des pommes de terre est plus riche en acides gras courts et moyens (< 17 carbones) et plus pauvre en acides gras longs. (tableau 44).

Tableau 44 : Effet du concentré amidon sur la composition de la matière grasse du lait (% de la MG)

	Blé	Pdt	ETR	Effet
AG courts	10,2	11,4	1,0	$P < 0,01$
AG moyens	56,3	58,8	2,2	$P < 0,01$
AG longs	33,5	29,9	2,5	$P < 0,01$

Les observations faites sur les différents acides gras confirment les résultats enregistrés pour les différents groupes d'acides gras : la matière grasse des vaches ingérant des pommes de terre contient significativement plus d'acides gras courts et moyens et surtout plus d'acides gras saturés de ce groupe. La matière grasse des laits des vaches ingérant du blé est plus riche en acides gras longs et insaturés même si cet effet n'est pas systématique pour tous les acides gras (tableau 45). Par ailleurs la proportion plus élevée pour les acides gras insaturés dans la matière grasse des vaches ingérant du blé est indifférente de la nature des isomères *cis* ou *trans*.

Tableau 45 : Effet de la nature du concentré amidon sur le profil de la matière grasse du lait (% de la MG)

Acide gras	Blé	Pdt	ETR	Effet
C 4:0	3,05	3,36	0,35	$P < 0,05$
C 6:0	2,18	2,46	0,28	$P < 0,01$
C 8:0	1,22	1,46	0,14	$P < 0,01$
C 10:0	3,4	3,7	0,4	$P < 0,05$
C 10:1	0,30	0,37	0,05	$P < 0,01$
C 11:0	0,16	0,15	0,03	NS
C 12:0	4,1	4,4	0,45	NS
C 13:0	0,2	0,2	0,04	NS
C 14:0 antéiso	0,04	0,06	0,01	$P < 0,01$
C 14:0	11,6	12,2	0,4	$P < 0,01$
C 14:1	1,45	1,49	0,18	NS
C 15:0 iso	0,46	0,51	0,08	NS
C 15:0	1,64	1,56	0,29	NS
C 16:0	31,9	33,8	1,76	$P < 0,01$
C 16:1	2,27	2,14	0,23	NS
C 17:0 antéiso	0,40	0,44	0,05	$P < 0,05$
C 17:0 iso	0,79	0,78	0,09	NS
C 17:0	0,79	0,72	0,14	NS
C 18:0	5,94	5,95	0,6	NS
C 18:1 <i>trans</i>	4,4	2,7	0,9	$P < 0,01$
C 18:1 <i>cis</i> (n-9)	17,7	16,4	1,2	$P < 0,01$
C 18:1 <i>cis</i> (n-7)	1,37	1,25	0,2	$P < 0,10$
Somme C 18:1 <i>cis</i>	19,0	17,7	1,3	$P < 0,01$
Somme C 18:1	23,4	20,4	2,0	$P < 0,01$
C 18:2 9 <i>cis</i> 12 <i>trans</i>	0,25	0,24	0,03	NS
C 18:2 9 <i>cis</i> 11 <i>trans</i>	0,55	0,61	0,1	$P < 0,10$
C 18:2 9 <i>cis</i> 12 <i>cis</i>	2,5	2,0	0,3	$P < 0,01$
C 18:2 9 <i>trans</i> 12 <i>cis</i>	0,10	0,09	0,02	NS
Somme C 18:2	3,6	3,1	0,3	$P < 0,01$
C 18:3 (n-3)	0,24	0,19	0,04	$P < 0,01$
Somme C 18:3	0,28	0,23	0,04	$P < 0,01$
C 20:0	0,07	0,07	0,01	NS
C 20:1 (n-9)	0,07	0,04	0,02	$P < 0,01$
C 20:3 (n-6)	0,08	0,06	0,017	$P < 0,01$

Tableau 46 : Effet de la nature du concentré amidon de la ration sur les rapports des acides gras saturés / acides gras monoinsaturés du lait

Rapport	Blé	Pdt	ETR	Effet
10:0 / 10:1	11,2	10,0	1,1	$P < 0,01$
14:0 / 14:1	8,2	8,3	0,7	NS
15:0 / 15:1	154	64	137	$P < 0,10$
16:0 / 16:1	14,5	16,6	1,6	$P < 0,01$
17:0 / 17:1	5,6	6,1	0,8	$P < 0,10$
18:0 / 18:1	0,26	0,30	0,03	$P < 0,01$
20:0 / 20:1	1,2	2,8	1,9	$P < 0,05$

La richesse de la matière grasse du lait en acides gras longs insaturés des vaches ingérant du blé est illustrée par le rapport saturé / monoinsaturé (tableau 46) systématiquement plus faible pour les acides gras à plus de 15 carbones.

9. Composition du C 18:1 en isomères *trans*

9.1. Matériel et méthodes

Les échantillons d'esters méthyliques ont été également utilisés pour l'analyse des différents isomères *trans* du C 18:1. Ils sont séchés sous courant d'azote et dissous dans l'acétone (dilution 2 mg EM/100 μ L environ). La séparation des acides gras C18:1 *cis* et *trans* est réalisée sur HPLC avec un couplage de deux colonnes Kromasil C18 de 5 μ 250mm x 10mm ID (ThermoHypersil, Les Ulis, France) avec un injecteur à boucle Valco. Le liquide vecteur est l'acétonitrile 100% (distillé et filtré) et la pression est de 90 bars le véhicule à 4 mL/min. Le détecteur est un refractomètre différentiel (réf. RI 410, Waters, StQuentin-en-Yvelines, France). Les échantillons collectés manuellement sont ensuite séchés sous courant d'azote et dissous dans l'héxane pour obtenir une concentration finale de 0,3 mg/mL environ.

Les acides gras C18:1 *trans* sont dosés en chromatographie en phase gazeuse sur une colonne BPX70 de 120m, 0,25 mm ID, épaisseur du film 0,25 μ m (réf. 054624, SGE, Melbourne, Australie) avec l'hydrogène comme gaz vecteur et un détecteur d'ionisation de flamme. Le programme de température est le suivant : 1 min à 60°C, augmentation de 20°C/min jusqu'à 160°C et un palier de 29 min à 160°C.

9.2. Résultats

Tableau 47 : Distribution des différents isomères *trans* de l'acide gras C18:1 en fonction de la nature du concentré amidon de la ration (% d'isomère C18:1 *trans* dans la somme des EM)

Isomère du C18:1 <i>trans</i>	Blé	Pdt	ETR	Effet
Δ6 à Δ8	0,31	0,19	0,11	$P < 0,05$
Δ9	0,34	0,21	0,08	$P < 0,01$
Δ10	2,12	0,66	0,95	$P < 0,01$
Δ11	1,20	0,93	0,29	NS
Δ12	0,32	0,28	0,05	NS
Δ13	0,25	0,22	0,08	NS
Δ14	0,23	0,19	0,02	$P < 0,01$
Δ15	0,14	0,12	0,015	$P < 0,01$
Δ16	0,12	0,12	0,04	NS
Δ17	0,04	0,04	0,01	NS

La matière grasse du lait des vaches ingérant du blé contient significativement plus d'isomères *trans* du C18:1 en position Δ6 à Δ10 mais aussi en position Δ14 et Δ15 (tableau 47). L'effet est particulièrement prononcé pour l'isomère C 18:1 10*trans* : la proportion avec le blé est trois fois supérieure à celle avec les pommes de terre.

DISCUSSION GENERALE

IV DISCUSSION GENERALE

1. Dégradabilité *in sacco*

L'amidon du blé se dégrade *in sacco* plus rapidement que l'amidon de la pomme de terre. La fraction soluble du blé est 1,5 fois supérieure que celle de la pomme de terre et la fraction progressivement dégradable dépasse déjà après 1h d'incubation un taux de disparition de 80%. Cette hiérarchie entre les deux natures d'amidon établie chez la vache en lactation confirme les résultats obtenus par NOCEK et TAMMINGA (1991), ALERT et POPPE (1994) sur bœuf et CONE et al. (1991) *in vitro*. Des conditions expérimentales souvent très différentes des nôtres expliquent la dispersion des taux de disparition.

La cinétique du taux de disparition de l'amidon de la pomme de terre s'adapte plutôt à un modèle linéaire contrairement au blé dont la disparition est de type exponentiel suivant le modèle classiquement admis (ØRSKOV et McDDONALD, 1979). La taille énorme des grains d'amidon (jusqu'à 120 μm) et la forte polymérisation de l'amidon de pommes de terre devraient être les causes principales d'une dégradation ruminale plus lente et progressive. Cependant après 12h d'incubation *in sacco* les deux amidons sont quasi complètement dégradés.

L'essai 1 démontre que cette hiérarchie de la dégradation *in sacco* ne varie pas selon la nature du fourrage de la ration et donc qu'il n'y a pas d'incidence de l'apport d'amidon par la ration de base distribuée aux animaux sur la dégradation *in sacco*. L'absence de l'effet fourrage pourrait être partiellement liée à l'incubation séparée des aliments utilisés en outre en faible quantité. Une incubation des rations reconstituées *in sacco* permettrait de vérifier cette hypothèse sans cependant répondre à la question suivante : la technique des sachets nylon reflète-t-elle fidèlement la dégradation dans le rumen de quantités d'amidon 200 fois supérieures.

Les travaux de OWENS et al. (1986), TAMMINGA et al. (1990), DeVISSER (1997) et MARTIN et al. (1999) semblent indiquer une variation de la dégradation des fibres en fonction de la quantité d'amidon présente dans la ration. Les teneurs relatives des rations en amidon et en fibres conduisent à des populations microbiennes plutôt cellulolytiques ou plutôt amylolytiques en relation avec le pH ruminal. Il en découle des disponibilités en enzymes variables. Cette compétition entre ces deux substrats pour l'orientation de la flore ruminale est illustrée par les travaux de CONE et al. (1991). Ils observent *in vitro* une dégradation complète de l'amidon uniquement si cet amidon est incubé dans le jus de rumen d'une vache ingérant une ration riche en concentré. Dans nos essais les taux de disparition de la fraction NDF des deux concentrés évoluent à l'inverse des taux de disparition de l'amidon. Au début de la cinétique, la fraction NDF du blé disparaît plus lentement

que celle des pommes de terre mais les taux sont équivalents en fin de cinétique. La mesure de la part relative de la fraction NDF indégradable des deux concentrés déterminerait s'il s'agit d'un effet nature des fibres ou un effet compétition enzymatique entre amidon et fibres.

Une vérification de ces hypothèses nécessiterait des mesures *in sacco* de la dégradation des rations complètes reconstituées avec différents niveaux de fibres et d'amidon ou des mesures de dégradation *in vivo*.

Seuls OWENS et al. (1986) rapportent la dégradation très rapide de l'amidon du maïs ensilage en opposition avec la dégradation lente du maïs grain. Ainsi les rations à base d'ensilage de maïs apportent des quantités importantes d'amidon de type rapide susceptible d'interférer avec les apports d'un concentré à amidon rapide (blé) ou d'un concentré à amidon lent (pomme de terre).

L'amidon de blé possède donc une vitesse de dégradation ruminale bien supérieure à celle de la pomme de terre confirmant l'hypothèse d'une différence de vitesse de dégradation de l'amidon entre ces deux concentrés.

2. Digestibilité apparente

La mesure de la digestibilité apparente de l'amidon nécessite quelques précautions méthodologiques. D'abord l'élimination des sucres solubles des fèces avant dosage de l'amidon est une étape indispensable pour éviter de surestimer les teneurs en amidon même si JARRIGE (1966) considère leur proportion dans les bouses comme très faible. Ensuite la méthode utilisée permet de mesurer une quantité d'amidon fécale de 500g environ sans préciser la proportion de polysaccharides en provenance de la muqueuse intestinale. En effet il est probable que l'hydrolyse des liaisons α -glucosidiques concerne tous les polysaccharides rencontrés. Enfin l'estimation de la quantité de bouses par la méthode de VanKEULEN et YOUNG (1977) n'est probablement pas assez précise pour dépister des différences dans la digestibilité de l'amidon qui se situe en général entre 90 et 98%.

Notre méthodologie montre une digestibilité apparente très proche pour les deux rations indiquant que la différence de dégradation ruminale entre les deux concentrés est contrebalancée par une digestion intestinale plus efficace de l'amidon résiduel comme SAUVANT et al. (1997) le suggèrent.

3. Ingestion

En moyenne la matière sèche ingérée n'est pas affectée significativement par la nature ou la quantité d'amidon apportée par la ration.

La tendance à une ingestion plus faible pour la ration contenant des pommes de terre dans l'essai 1 est sans doute en lien avec sa teneur inférieure en amidon et en énergie (tableau 8, page 42) associée à un faible niveau d'ingestion en relation avec l'appétence moindre de l'ensilage d'herbe

utilisé dans cet essai. La différence des teneurs en amidon des rations fait que les vaches recevant des pommes de terre ingèrent moins d'amidon que les vaches recevant du blé. Cette absence d'un effet propre de la nature d'amidon est confirmée par la comparaison à base d'ensilage d'herbe de l'essai 3.

L'effet observé pour la comparaison des rations à base d'ensilage de maïs dans l'essai 3 n'est répété dans aucun autre essai.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette absence de réponse pour l'ingestion. Si la littérature indique souvent une augmentation de l'ingestion avec des amidons lents la quasi-totalité de ces études ont utilisé du maïs grain comme source d'amidon lent de référence. Nous ne retrouvons pas ces observations pour la pomme de terre. Pour la vitesse de dégradation l'amidon de pomme de terre est classé par certains auteurs (NOCEK et TAMMINGA, 1991 ; SAUVANT et al., 1994) avec les amidons lents mais par d'autres (CONE, 1991 ; ALERT et POPPE, 1994) parmi les amidons à vitesse de dégradation intermédiaire. Le maïs grain lui est systématiquement classé comme amidon lent.

Il est probable qu'intervient également la quantité d'amidon apportée. La littérature rapporte un effet plus ou moins significatif sur la matière sèche ingérée uniquement dans des conditions où plus de 7kg d'amidon ont été apportés à l'animal. Dans nos conditions nous avons apporté soit des quantités trop faibles d'amidon (rations à base d'ensilage d'herbe) soit nous avons "dilué" l'amidon lent de la pomme de terre avec l'amidon rapide de l'ensilage de maïs. Une vérification de cette hypothèse nécessiterait une ration de base sans apport d'amidon rapidement dégradable et des apports totaux d'amidon supérieurs à 7kg/vache et jour.

Dans la suite de cette discussion nous proposons de distinguer

- des rations apportant différents niveaux d'amidon rapide (rations contenant du blé),
- des rations apportant en quantités modérées de l'amidon uniquement lent (rations ensilage d'herbe - pommes de terre) et
- des rations apportant de l'amidon à vitesse de dégradation mixte (ensilage de maïs - pommes de terre).

Le tableau 48 présente ces trois types d'apport d'amidon.

L'apport en fibres dont l'importance a été discutée précédemment pourrait interférer également avec la nature de l'amidon. Il est cependant difficile de faire varier l'apport d'amidon sans modifier l'apport en fibres de la ration d'où la nécessité de considérer les variations de ces deux fractions en même temps.

Figure 10 : Effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon ingéré sur la chute du pH lors de la cinétique

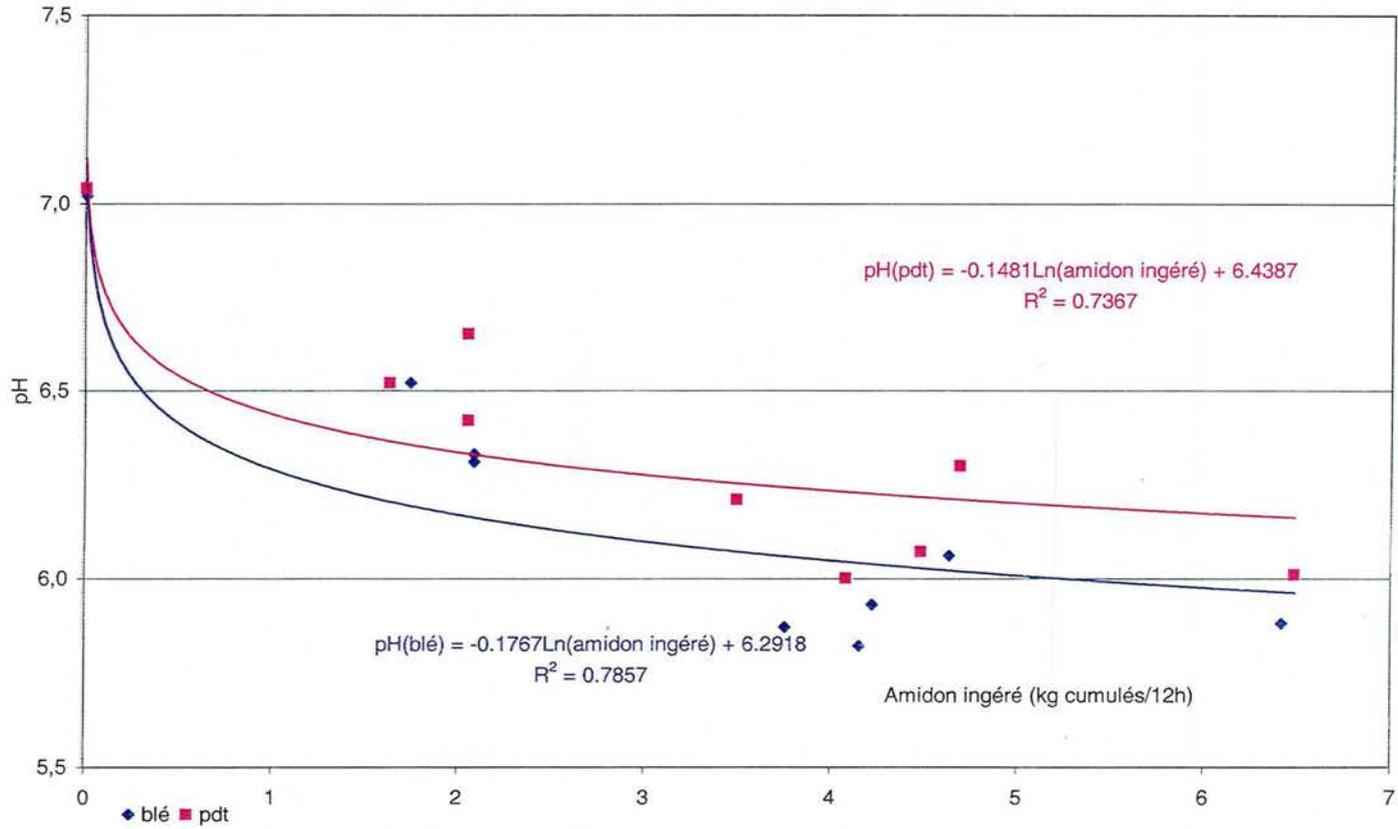


Tableau 48 : Quantités d'amidon ingéré pour les différentes rations (ingestion moyenne recalculée en kg /jour)

Essai	Source d'amidon	Ensilage	Blé	Type	Apport	Ensilage	Pdt	Type	Apport
	Fourrage	rapide	rapide	d'amidon	total	rapide	lent	d'amidon	total
1	ensilage d'herbe	0	3,6	(rapide)	3,6	0	3,2	(lent)	3,2
1	ensilage de maïs	3,2	2,9	(rapide)	6,1	2,9	3,7	(mixte)	6,6
2	ensilage de maïs	4,1	4,0	(rapide)	8,1	3,8	4,0	(mixte)	7,8
3	ensilage de maïs	4,8	2,7	(rapide)	7,5	4,5	3,1	(mixte)	7,6
4	ensilage d'herbe	0	4,5	(rapide)	4,5	0	3,6	(lent)	3,6
4	ensilage de maïs	4,6	2,7	(rapide)	7,3	5,0	2,3	(mixte)	7,3
5	mélange d'ensilages	3,4	2,7	(rapide)	6,1	3,3	2,7	(mixte)	6,0

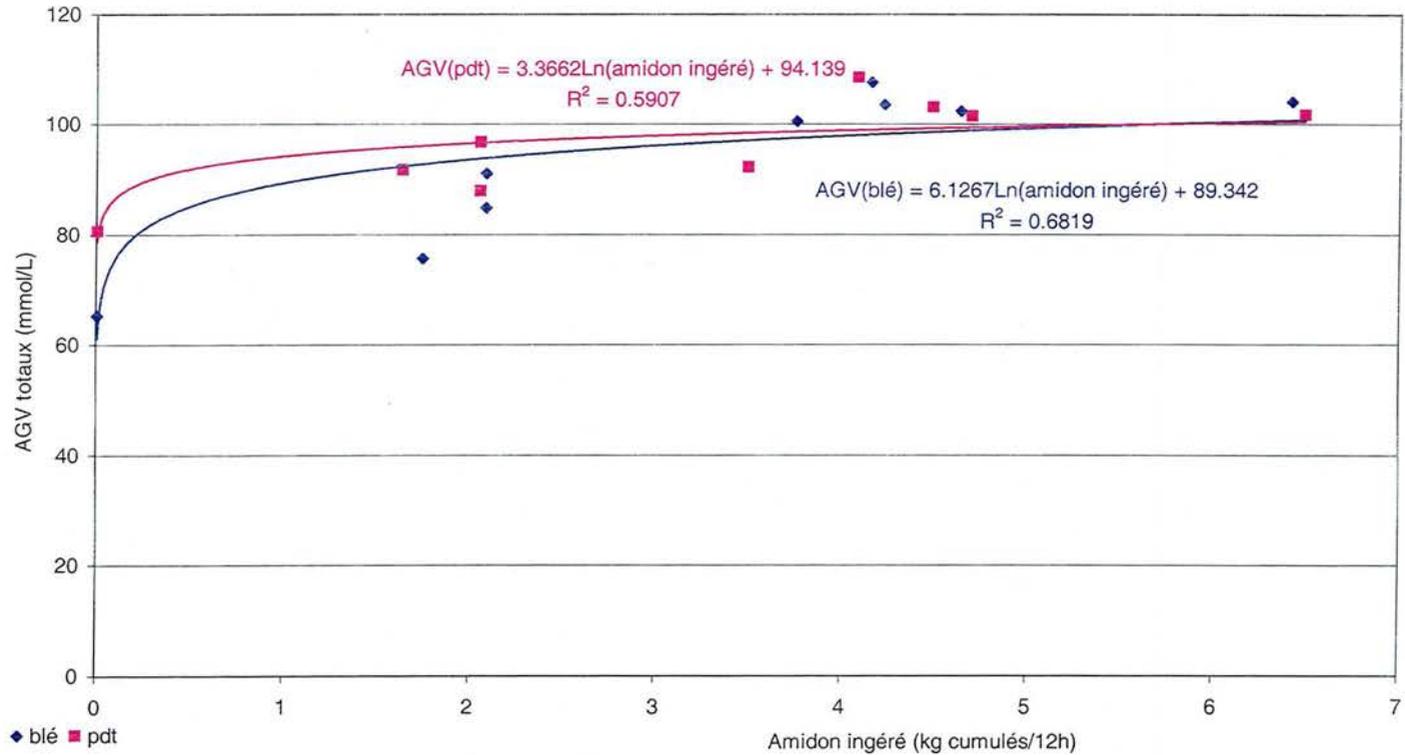
4. Profil fermentaire

L'étude de dégradabilité *in sacco* a été réalisée avec des sachets contenant des aliments isolés alors que les profils de fermentation sont une approche de la fermentation de la ration globale.

Les variations du pH du jus de rumen illustrent la fermentation plus rapide du blé par rapport à la pomme de terre. La chute postprandiale du pH est plus prononcée et plus longue pour les rations contenant du blé que pour celles où des pommes de terre ont été incorporées. Cet effet blé est plus net pour les rations où il n'est pas amorti par de l'ensilage de maïs. Il est possible que le milieu ruminal à orientation plutôt cellulolytique engendré par une ration à base d'ensilage d'herbe soit plus perturbé par un apport d'amidon très fermentescible que le milieu à orientation plutôt amylolytique caractérisant une ration à base d'ensilage de maïs. Cette hypothèse pourrait également être déclinée pour expliquer les faibles variations du pH après l'apport d'un amidon lent (pommes de terre) avec une ration à base d'ensilage d'herbe. La dégradation progressive de cet amidon lent perturberait moins l'équilibre du pH ruminal. En fait si cet amidon lent est apporté avec un fourrage apportant de l'amidon rapide (ensilage de maïs) la diminution est légèrement plus prononcée qu'avec la ration ensilage d'herbe mais l'effet modérateur de l'amidon de pommes de terre dans ces conditions n'est pas très marqué.

L'étude du lien entre l'ingestion et la chute du pH de l'essai 2 permet d'affiner la comparaison des deux natures d'amidon dans des rations à base d'ensilage de maïs (figure 10). Dans tous les cas de figure, malgré la forte dépendance de la chute du pH avec l'ingestion ($r^2 > 0,7$), cette diminution par kg d'amidon ingéré est plus élevée pour la ration blé que pour la ration contenant des pommes de terre.

Figure 14 : Effet de l'interaction entre la nature et la quantité d'amidon ingéré sur la concentration en AGV totaux



L'apport d'un amidon rapide entraîne donc une chute postprandiale du pH plus prononcée que l'apport d'un amidon lent surtout dans des conditions plutôt favorables à la flore cellulolytique.

La concentration du jus de rumen en AGV totaux ne répond pas à la nature de l'amidon pour les rations à base d'ensilage de maïs. Le blé apporté avec de l'ensilage d'herbe engendre une augmentation forte et longue de la concentration en AGV totaux contrairement aux pommes de terre. L'ajout de pommes de terre à une ration à base d'ensilage d'herbe ne fait pas varier la concentration en AGV du jus de rumen par rapport à une ration à base d'ensilage de maïs indépendamment du concentré. La symétrie des réponses avec les évolutions du pH confirme que le milieu amylolytique de la ration ensilage de maïs est moins sensible à l'effet de la vitesse de fermentation du concentré. L'augmentation de la concentration des AGV en fonction de l'amidon ingéré lors de la cinétique de l'essai 2 (figure 14) révèle une concentration initiale plus faible suivie d'un accroissement plus élevé pour le blé que pour la ration pommes de terre. Ainsi les valeurs sont similaires dès l'ingestion de plus de 2 kg d'amidon.

L'effet du concentré sur les proportions relatives d'AGV est surtout observé pour les rations à base d'ensilage d'herbe comme pour le pH et la concentration en AGV totaux : avec le blé le mélange est moins riche en acétate surtout en début de la cinétique. En fin de cinétique une diminution de la proportion de propionate en parallèle avec une augmentation de la proportion de butyrate est observée pour le blé comparativement à la ration contenant des pommes de terre. La fermentation très rapide de l'amidon du blé pourrait masquer la dégradation des fibres au début de la cinétique. Le délai de latence de la dégradation de la fraction NDF du blé par rapport à la fraction NDF des pommes de terre renforce cette proposition même si aucun effet du concentré sur la dégradation des fibres de l'ensilage d'herbe n'a été observé *in sacco* par MONTEILS et al. (2002). Une dégradation ralentie des fibres expliquerait l'appauvrissement relatif en acétate, en parallèle de l'augmentation de la concentration des AGV totaux par rapport à la ration pommes de terre. Une fermentation très rapide du blé pourrait également être à l'origine de la diminution de la proportion de propionate en fin de cinétique par un épuisement précoce du substrat par rapport à la dégradation progressive de l'amidon de la pomme de terre. L'enrichissement des AGV en butyrate à partir de 4h après le début du repas principal surprend, d'autant plus que la différence entre les concentrations en AGV totaux entre les deux régimes est maximale à ce moment de la cinétique. Les effets semblent être tamponnés dans les rations à base d'ensilage de maïs où les proportions des différents AGV majeurs ne varient pas dans le temps en fonction de la nature du concentré. Les caractéristiques du milieu ruminal dans lequel les concentrés sont comparés semblent donc avoir une importance prépondérante. Dans nos conditions le rapport amidon ingéré/NDF ingéré

pourrait être un descripteur indirect des conditions de ce milieu. Ce rapport est d'environ 0,5 pour les rations à base d'ensilage d'herbe qui pourraient être qualifiées de cellulolytiques (tableau 49). Les rations plutôt amylolytiques contenant de l'ensilage de maïs ont un rapport voisin de 1 (0,8 à 1,1) voire 1,4 pour les rations à fortes teneurs en amidon de l'essai 2. Une caractérisation de la dégradabilité des fibres de la fraction NDF permettrait d'affiner ce critère qui nécessite des mesures complémentaires pour asseoir sa pertinence.

Tableau 49 : Quantités d'amidon et de la fraction NDF ingérées pour les différentes rations (ingestion moyenne recalculée en kg /jour)

Essai	Fourrage	Amidon (Type)	NDF	Rapport	Amidon (Type)	NDF	Rapport
1	ensilage d'herbe	3,6 (rapide)	7,1	0,5	3,2 (lent)	6,2	0,5
1	ensilage de maïs	6,1 (rapide)	7,0	0,9	6,6 (mixte)	6,7	1,0
2	ensilage de maïs	8,1 (rapide)	6,0	1,4	7,8 (mixte)	5,3	1,5
3	ensilage de maïs	7,5 (rapide)	7,3	1,0	7,6 (mixte)	6,8	1,1
4	ensilage d'herbe	4,5 (rapide)	7,6	0,6	3,6 (lent)	8,7	0,4
4	ensilage de maïs	7,3 (rapide)	7,8	0,9	7,3 (mixte)	7,6	1,0
5	mélange d'ensilages	6,1 (rapide)	7,2	0,8	6,0 (mixte)	6,8	0,9

Les variations des proportions des différents AGV sont retrouvées dans l'évolution des rapports C_2/C_3 et C_4/C_3 proposés par MIETTINEN et HUHTANEN (1996) ainsi que C_2/C_3 et $(C_2+C_4)/C_3$ utilisés par SAUVANT et al. (1994).

Les rapports C_2/C_3 et $(C_2+C_4)/C_3$ n'évoluent évidemment pas pour les rations à base d'ensilage de maïs contenant soit du blé soit des pommes de terre. Pourtant le rapport C_4/C_3 est significativement plus élevé pendant les 4h suivant le repas principal pour la ration pomme de terre par rapport à la ration contenant du blé avec l'ensilage de maïs dans l'essai 1. Cet effet est cependant spécifique de l'essai 1 car inversé en tendance pour l'essai 2.

Pour les rations à base d'ensilage d'herbe de l'essai 1 les rapports $(C_2+C_4)/C_3$ et C_4/C_3 du jus de rumen sont plus élevés pour la ration blé ce qui découle des proportions inférieures en propionate et de l'enrichissement relatif en butyrate en fin de cinétique. Le rapport C_2/C_3 est plus élevé pour le blé en début de la cinétique. L'atténuation de l'écart par rapport à la ration contenant des pommes de terre reflète l'appauvrissement pour la ration blé de la proportion en acétate. La différence en fin de cinétique en faveur du blé est à nouveau due à l'appauvrissement du mélange des AGV en propionate à ce moment de la cinétique.

La comparaison des deux concentrés amidons montre des différences de fermentation surtout pour des rations à base de l'ensilage d'herbe où la fermentation rapide de l'amidon de blé comparativement à l'amidon de la pomme de terre augmente rapidement la concentration en AGV totaux, avec une teneur relative en acétate plus faible en début de la cinétique. L'épuisement rapide du substrat blé pourrait expliquer la chute relative de la part du propionate simultanée avec l'accroissement de la part du butyrate par rapport au profil engendré par la ration contenant des pommes de terre. Il n'y a pas de différence dans le profil fermentaire entre les deux concentrés pour les rations à base d'ensilage de maïs. Le rapport amidon ingéré/NDF ingéré pourrait être un indicateur potentiel pour classer les rations par rapport à l'importance des variations engendrées par la vitesse de dégradation de l'amidon apporté par le concentré.

5. Métabolites sanguins

Les teneurs plasmatiques en acides gras non estérifiés mesurées dans les essais 1 et 3 reflètent un niveau faible de mobilisation des réserves corporelles en cohérence avec les variations de poids enregistrées. Les teneurs significativement supérieures pour les rations à base d'ensilage d'herbe par rapport aux rations ensilage de maïs de l'essai 1 montrent la différence de fourniture d'énergie par l'apport du fourrage sans interaction avec la nature du concentré amidon.

La glycémie périphérique ne répond pas à la nature du concentré dans les rations à base d'ensilage de maïs (essais 1, 3 et 4), observation à rapprocher de l'absence de variations pour la proportion de propionate. Pour les rations à base d'ensilage d'herbe il n'y a pas de réponse dans l'essai 4, alors que la glycémie est significativement plus faible pour le blé par rapport aux pommes de terre dans l'essai 1 (tableau 50).

Tableau 50 : Evolution de la glycémie (g/L) en fonction de la nature du concentré amidon pour les rations à base d'ensilage d'herbe.

Temps de prélèvement	Rations blé		Rations pdt	
	Essai 1	Essai 4	Essai 1	Essai 4
4	0,63 A	0,66	0,68 B	0,66
7	0,57		0,61	
10	0,54 b		0,63 a	

A, B lettres différentes caractérisent une différence significative au seuil de 10%
a, b lettres différentes caractérisent une différence significative au seuil de 5%

Il faut cependant rappeler que la glycémie a été mesurée au début du repas principal puis 3 et 7 heures plus tard lors de l'essai 1 contre un seul prélèvement lors de l'essai 4 (correspondant au point début du repas de la cinétique de l'essai 1). Les glycémies se distinguent statistiquement surtout en fin de cinétique dans l'essai 1 période présentant les teneurs relatives en propionate plus faibles pour les rations blé par rapport aux rations pommes de terre. Cette dernière observation souligne l'importance de la prise en compte de la dynamique des phénomènes de digestion et d'absorption dans les études de comparaison de fourniture d'énergie par les nutriments.

Les glycémies ont un niveau équivalent dans les essais 3 et 4 ce qui montre l'efficacité des mécanismes de régulation permettant de gommer les différences liées à des teneurs énergétiques variables des rations (tableau 8). Néanmoins si les apports énergétiques sont réduits par une ingestion plus faible (essai 1) la glycémie périphérique baisse.

La nature du concentré amidon n'a pas fait varier les teneurs moyennes en acétoacétate et en β -hydroxy-butyrate mais les rations contenant du blé se caractérisent, indépendamment de la nature du fourrage, par une augmentation plus forte de ces teneurs lors de la cinétique (figures 12 et 13) que les rations contenant des pommes de terre. Cette différence est à relier à la fermentation plus rapide de l'amidon du blé et à l'augmentation de la concentration en AGV totaux surtout pour les rations à base d'ensilage d'herbe. On observe une progression également plus élevée en faveur du blé pour les rations à base d'ensilage de maïs alors que le profil fermentaire ne présentait aucune variation.

Pour les concentrations plasmatiques en acétoacétate les variations peu importantes sont du même ordre de grandeur quand les pommes de terre sont associées à une ration à base d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs. L'apport de cet amidon lent avec une ration ensilage d'herbe ou son mélange avec l'amidon rapide du maïs ensilage est caractérisé par des variations faibles des AGV totaux et de la part relative de l'acétate d'où l'absence de variations notable de l'acétoacétate. Par contre, avec l'apport de pommes de terre la réponse de la teneur en β -hydroxy-butyrate varie en fonction de la nature du fourrage.

La fermentation d'un amidon rapide (blé ou ensilage de maïs) paraît augmenter plus fortement la concentration en β -hydroxy-butyrate que la fermentation d'un amidon lent comme la pomme de terre. Cet effet de l'amidon rapide peut être observé quand il est apporté en quantité modérée avec une ration de type cellulolytique (ensilage d'herbe - blé) ou avec une ration de type amylolytique apportant soit une proportion élevée d'amidon rapide (ensilage de maïs - blé) soit mélangeant l'apport d'amidon rapide avec un amidon lent (ensilage de maïs - pommes de terre).

Figure 12 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en acétoacétate

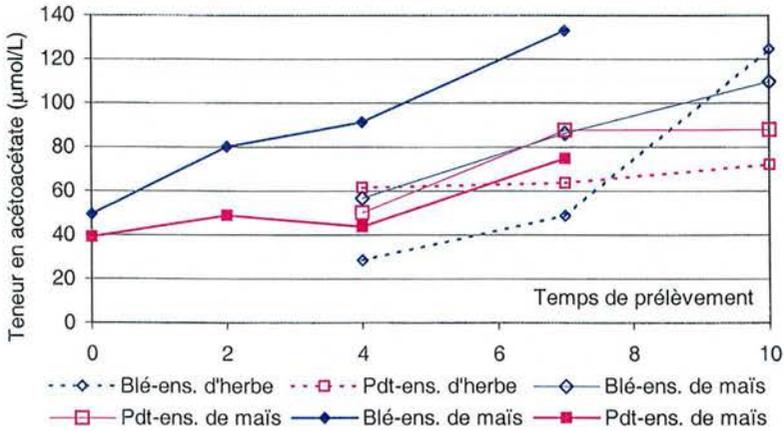
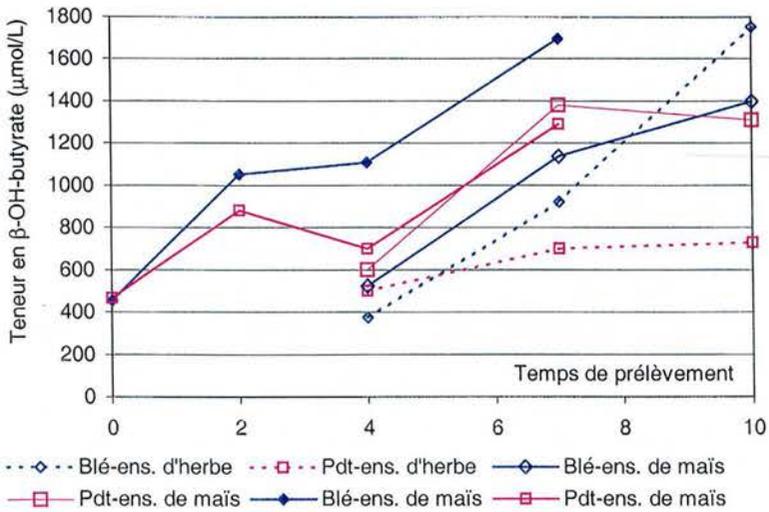


Figure 13 : Effet de la nature du concentré amidon sur la teneur plasmatique en bêtahydroxybutyrate



La variation de la concentration en β -hydroxy-butyrate est la plus élevée quand l'amidon rapide du blé est associé à l'ensilage d'herbe.

En résumé, la glycémie moyenne est plus faible pour les vaches ingérant du blé avec une ration à base d'ensilage d'herbe surtout à la fin de la cinétique dans l'essai 1. Cette observation est en cohérence avec la proportion plus faible en propionate en fin de cinétique et une fermentation rapide de l'amidon du blé.

Les précurseurs des acides gras synthétisés *de novo*, acétoacétate et β -OH-butyrate, augmentent plus fortement lors de la cinétique postprandiale avec le blé qu'avec les pommes de terre, en particulier avec les rations à base d'ensilage d'herbe soulignant la nécessité de tenir compte de la variabilité des métabolites sanguins dans le temps. La réponse de la teneur en β -OH-butyrate semble plus sensible à l'apport d'amidon rapide qu'il provienne du blé ou du maïs ensilage.

6. Production laitière et teneur en lactose

Nos résultats confirment l'observation de SAUVANT (1997) rapportant l'absence d'effet direct de la nature de l'amidon sur la production de lait brut. Ils montrent de plus qu'il n'y a pas d'interaction entre la nature de l'amidon du concentré et celle du fourrage utilisés dans la ration.

En général les réponses de la production laitière des animaux aux variations des apports qualitatifs d'amidon sont fortement dépendantes des réponses pour la quantité de matière sèche ingérée. Dans ces conditions une ingestion plus élevée fournit de l'énergie supplémentaire qui peut se traduire par une augmentation de la production. Ce phénomène a été montré par McCARTHY et al. (1989), CASPER et SCHINGOETHE (1989), CASPER et al. (1990) et OVERTON et al. (1995). SAUVANT et al. (1994) ont rapporté un effet insulino-trope des amidons rapides qui orienterait les sources énergétiques plutôt vers les tissus adipeux que vers la mamelle. Dans nos essais avec du blé ou des pommes de terre l'ingestion de matière sèche n'est pas différente et il n'est donc pas surprenant de ne pas enregistrer de variations significatives de la production laitière. GRINGS et al. (1992), ALDRICH et al. (1993) ainsi que HARMISON et al. (1997) confirment l'absence de réponses de la production laitière quand il n'y a pas de variations significatives de l'ingestion.

Néanmoins la quantité d'amidon ingéré tend à accroître la production de lait brut et ce indépendamment de la nature de l'apport. En effet la figure 15 montre un niveau de production plus élevé pour les rations apportant plus de 7 kg d'amidon par jour confirmant le rôle primordial de la fourniture d'énergie pour le niveau de production. Le faible niveau de production des vaches dans

Figure 15 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la production de lait brut

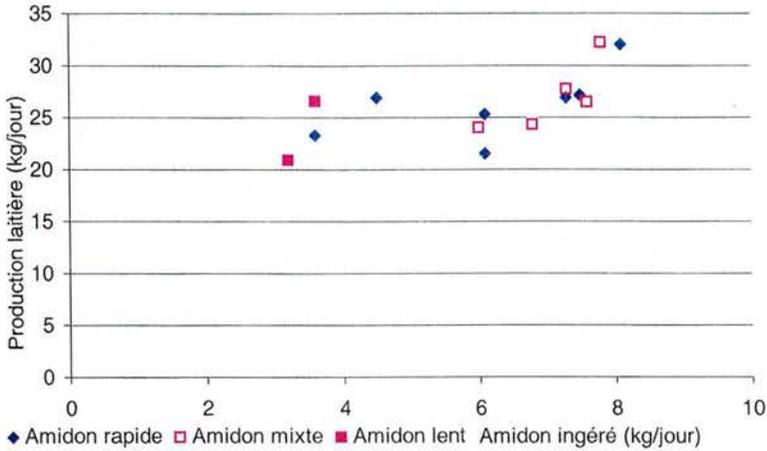
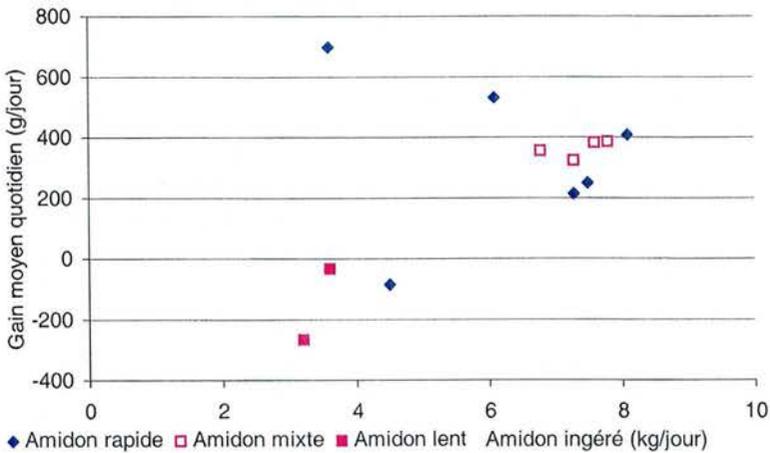


Figure 18 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le gain moyen quotidien



l'essai 1 s'explique par la faible ingestion d'énergie issue des teneurs en UFL (tableau 8) et d'une ingestion de matière sèche faibles (tableau 34).

Une variation significative de la teneur en lactose nécessite de fortes variations des précurseurs glucogéniques, surtout du propionate entraînant la glycémie comme AIELLO et al. (1989), HURTAUD et al. (1993) et MIETTINEN et HUHTANEN (1996) l'ont rapporté. Sans effet de la nature du concentré amidon sur la proportion de propionate dans le mélange des AGV et sur la glycémie la teneur en lactose n'a pas varié dans nos essais. La glycémie plus faible observée avec la ration ensilage d'herbe - blé de l'essai 1 se répercuterait donc plutôt par une baisse de la production que par une variation de la teneur en lactose.

7. Protéines du lait et variations du poids vif

Le taux protéique et la quantité de matière protéique produite n'ont pas répondu à la variation de la nature de l'amidon du concentré. Le gain moyen quotidien n'est également pas affecté par la nature du concentré excepté dans la comparaison des deux amidons associés à l'ensilage d'herbe de l'essai 1. Cependant cette exception est plutôt due à un effet quantité d'énergie disponible qu'un effet propre du concentré.

Pour des apports modérés d'amidon (< 6kg/jour) le taux protéique se situe dans une zone "normale" sans interaction avec la nature de l'amidon apporté (figure 16). La quantité de protéines produites reste relativement faible (figure 17). Les TP atteignent un niveau maximal aux alentours de 6 kg d'amidon ingéré/jour. Au-delà du seuil de 6kg l'effet important sur la production laitière entraîne une hausse de la quantité de protéines produites malgré l'effet dilution caractérisé par la baisse du TP. Ces évolutions sont indépendantes de la nature de l'amidon apporté par la ration.

Le GMQ a varié sensiblement en fonction de la nature du fourrage. Les rations à base d'ensilage de maïs apportant plus de 6 kg d'amidon/jour sont caractérisées par un gain moyen quotidien positif de 200 à 400 g/jour (figure 18). Par contre les vaches ont perdu du poids avec 3 des 4 rations à base d'ensilage d'herbe même si le GMQ très élevé des vaches ingérant la ration ensilage d'herbe - blé dans l'essai 1 échappe à cette règle.

L'orientation privilégiée de l'énergie ingérée vers les tissus adipeux tout en maintenant une production de protéines normale dans la glande mammaire pourraient provenir d'une entrée brutale du propionate entraînant un effet particulièrement insulinothrompe comme SAUVANT et al. (1994) le proposent pour les apports élevés en amidon rapide. Nous n'avons pas observé des phénomènes similaires pour des apports élevés en amidon rapide (rations ensilage de maïs - blé). L'hypothèse d'une orientation privilégiée de l'énergie vers les tissus adipeux par une entrée brutale des AGV via un effet insulinothrompe est appuyée par l'augmentation très importante de la concentration d'AGV

Figure 16 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le taux protéique

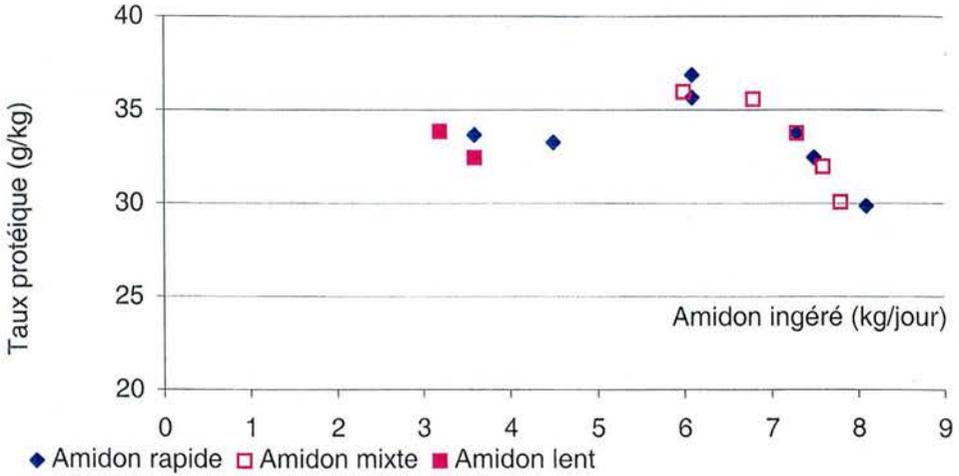
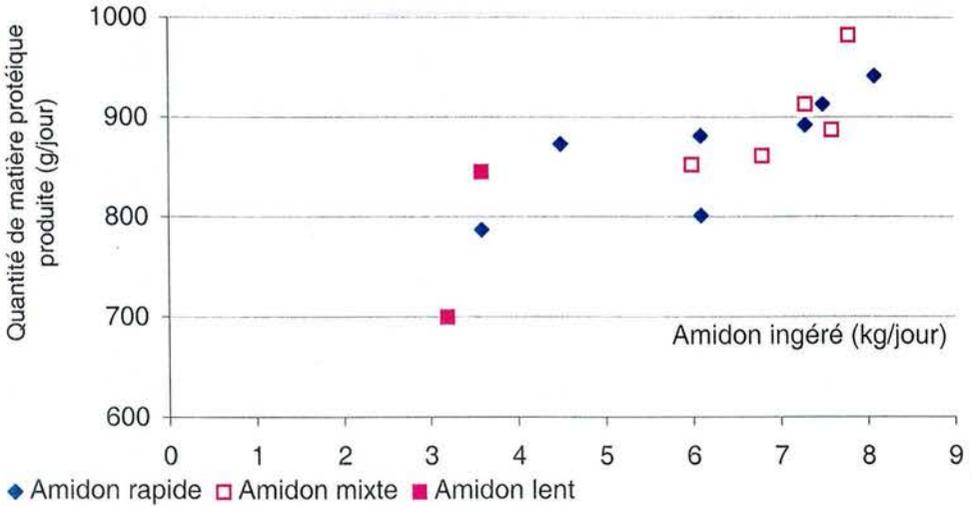


Figure 17 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la quantité de matière protéique



totaux lors de la cinétique du profil fermentaire avec cette ration. Le faible effectif dans cet essai et le GMQ négatif pour la ration très similaire ensilage d'herbe - blé de l'essai 4 soulignent la complexité des mécanismes de régulation qui exige une interprétation prudente.

8. Matière grasse du lait

8.1. Taux butyreux et quantité de matière grasse

L'absence d'effet significatif sur la production laitière se traduit par une réponse homogène de la matière grasse du lait au niveau du taux butyreux et de la quantité de matière grasse produite pour les comparaisons au sein d'un même essai. Pour les rations à base d'ensilage d'herbe sans apport d'amidon par le fourrage ou avec un mélange d'ensilage d'herbe - ensilage de maïs apportant une faible quantité d'amidon il n'y a pas de variations significatives de la quantité de matière grasse produite. Par contre, avec les quantités importantes d'amidon apportées par l'ensilage de maïs en plus du concentré, les vaches ingérant du blé ont une production de matière grasse et un TB inférieur. La seule exception à cette réponse systématique est la comparaison à base d'ensilage de maïs de l'essai 1 où le faible niveau de la production laitière interfère via un phénomène de concentration. Cette observation confirme les travaux de FALDET et al. (1986a), HERRERA-SALDANA et al. (1989) et CASPER et al. (1990) pour qui sans variation de la production de lait brut, la matière grasse du traitement "amidon lent" est souvent plus élevée. La réponse en terme de matière grasse et de TB dépendrait donc de la nature d'amidon mais également de la quantité d'amidon apportée. Cette observation est confirmée par la relation entre la quantité d'amidon ingéré et le TB (figure 19) : le TB baisse quand la quantité d'amidon ingéré dépasse le seuil de 7 kg/jour tant pour l'amidon rapide (rations ensilage de maïs - blé) que pour l'amidon mixte (ensilage de maïs - pommes de terre). Cette baisse est significativement plus importante quand le concentré amidon est le blé que pour les pommes de terre ce qui est démontré par les comparaisons intra-essai.

L'effet global de la quantité d'amidon ingéré sur la matière grasse produite (figure 20) montre qu'au-delà d'un seuil commun l'augmentation de la production (figure 15) est tamponnée par une diminution du TB (figure 19) entraînant une quantité de matière grasse peu variable. Il n'y a pas de variations significatives au-dessous du seuil de 7 kg d'amidon/jour mais la quantité de matière grasse produite est significativement plus faible pour le concentré blé que pour les pommes de terre quand les vaches ingèrent plus de 7 kg d'amidon/jour.

Figure 19 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur le TB

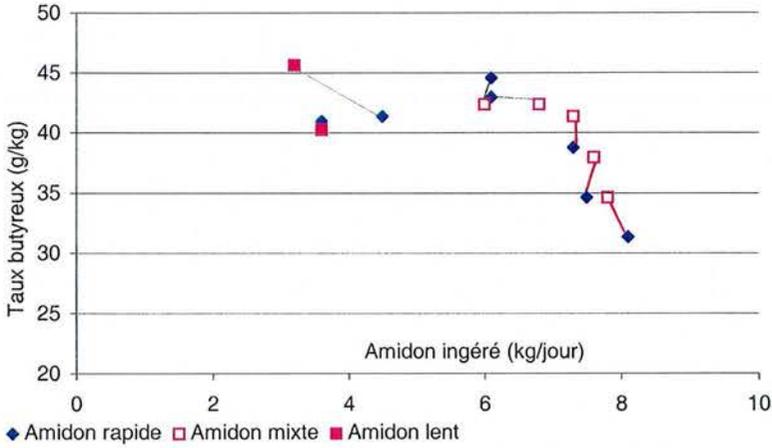
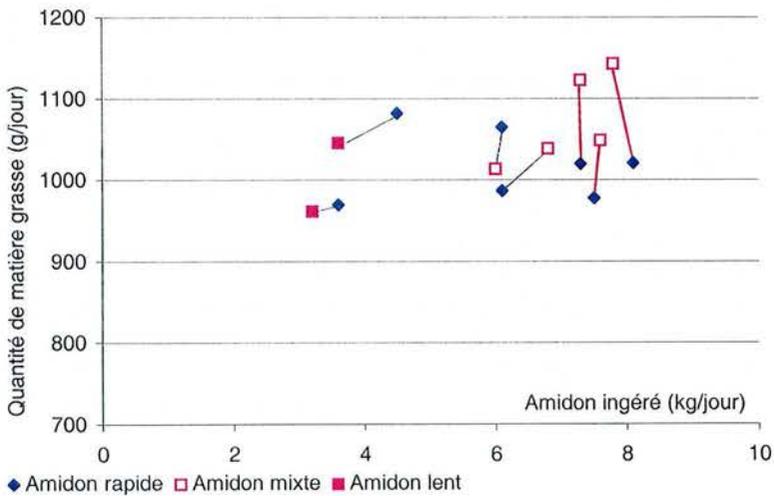


Figure 20 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon apporté par la ration sur la quantité de matière grasse produite



— différence significative ($P < 0,05$)
 - - - différence non significative

En résumé les lois de réponse de la matière grasse du lait dans la comparaison blé / pommes de terre révèlent un seuil se situant aux alentours de 7 kg d'amidon ingéré/jour. Compte tenu de la grande variabilité des réponses relevées lors de l'analyse bibliographique il faut préciser que l'effet amidon est observé dans nos essais pour

- a) un apport supérieur à 7 kg d'amidon ingéré/jour dont la moitié correspond aux apports d'amidon par l'ensilage de maïs qui est plutôt de type "rapide" et
- b) une comparaison amidon rapide = blé et amidon lent = pommes de terre.

Il est probable qu'un apport d'amidon lent par le fourrage (par ex. ensilage de sorgho) ou l'apport d'amidon exclusivement par le concentré ferait varier ce seuil permettant de dissocier la réponse des animaux ingérant soit du blé soit des pommes de terre.

Les variations observées pour le profil fermentaire et les métabolites sanguins avec les rations à base d'ensilage de maïs ne suffisent pas à expliquer cette réponse systématique de la matière grasse du lait.

8.2. Composition de la matière grasse du lait

La composition de la matière grasse du lait a été analysée lors de l'essai 2, la baisse du TB et de la quantité de matière grasse produite attendue avec le blé associé à l'ensilage de maïs s'étant produite.

Pour le régime contenant des pommes de terre, la matière grasse du lait est plus riche en acides gras courts et moyens, surtout pour les acides gras saturés de ces groupes. Les acides gras courts et moyens étant synthétisés par la glande mammaire l'effet observé ne peut donc pas être tributaire directement de la nature de la matière grasse ingérée.

Le régime blé engendre une matière grasse du lait plus riche en acides gras longs et insaturés. Cet effet est particulièrement net pour le C 18:1 qu'il s'agisse des isomères *cis* ou *trans*. Les acides gras longs sont plutôt d'origine alimentaire mais ils sont susceptibles d'être remaniés fortement dans le rumen et/ou le métabolisme de la glande mammaire.

L'analyse du profil des AG longs constituants des lipides du blé et de la pomme de terre révèle des teneurs en lipides totaux supérieures pour le blé (2% de la MS contre seulement 0,5% pour la pomme de terre, AFSSA 2001, communication personnelle) mais des proportions similaires en acides gras longs (tableau 51).

Tableau 51 : Composition moyenne des lipides du blé et des pommes de terre en acides gras longs (% de la somme des EM)

	Blé	Pdt
C 16:0	18,1	17,9
C 18:0	1,9	1,6
C 18:1	12,3	12,1
C 18:2	62,6	63,4
C 18:3	5,1	5,1

Ainsi les différences de profils observées dans le lait ne proviennent sans doute pas majoritairement de la nature des aliments utilisés. La richesse des lipides d'origine végétale en C 18:2 est à souligner. Or cet acide gras est la source principale des acides gras biohydrogénés (plus ou moins complètement) dans le lait. En effet LEDOUX et al. (2000) proposent de prédire la proportion du C 18:1 *trans* dans la matière grasse du lait par son flux duodénal et ce flux peut être expliqué ($r=0,9$) par 40% du C 18:2 ingéré et la totalité du C 18:1 *trans* ingéré (synthèse bibliographique de SAUVANT et BAS, 2000 citée par LEDOUX et al., 2000). Des remaniements ruminiaux et/ou du métabolisme de la glande mammaire pourraient être invoqués.

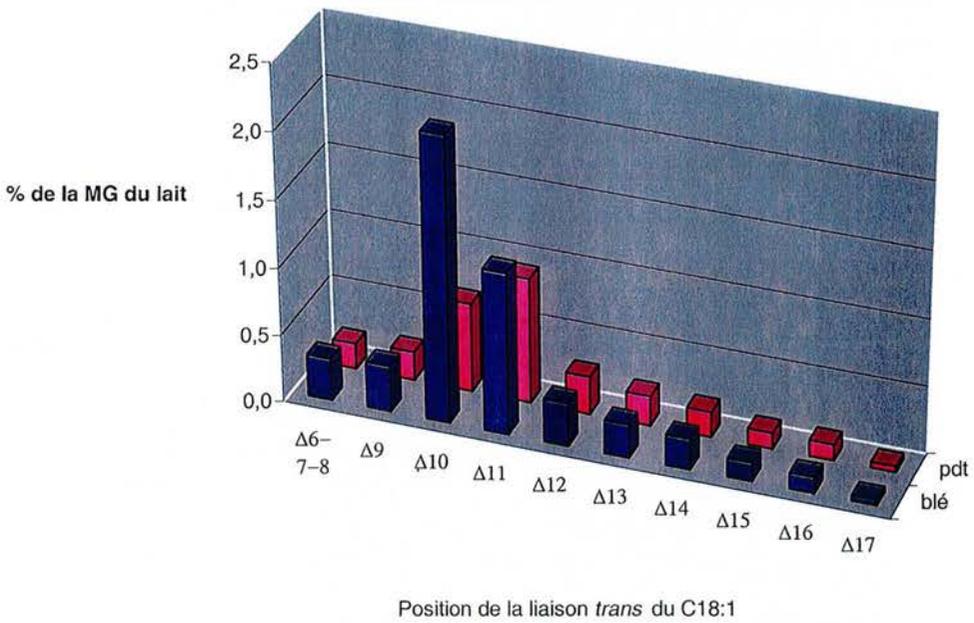
Le rapport des acides gras saturés / insaturés pour un acide gras donné montre que la différence de profil induite par la nature du concentré amidon concerne surtout les acides gras à 16 ou 18 carbones. Ces variations pourraient provenir d'une part de différences dans le processus d'élongation dans la glande mammaire pour les acides gras moyens et d'autre part de remaniements différents des acides gras d'origine alimentaire, surtout du C 18:2 apporté par la ration. La mobilisation des réserves lipidiques peut également être invoquée. Nos résultats ne recoupent pas les travaux de BAUMGARD et al. (1999 et 2000) qui perfont des isomères de CLA. Ces auteurs observent pour les traitements caractérisés par une diminution de la matière grasse du lait (taux et quantité) des augmentations du rapport saturés / insaturés pour les acides gras à 14 et à 18 carbones et en tendance également à 16 carbones. Dans notre cas le traitement caractérisé par une diminution de la quantité de matière grasse du lait (amidon rapide) est accompagné par un rapport saturés / monoinsaturés plus faible pour les acides gras à 16 ou 18 carbones mais le rapport des acides gras à 14 carbones n'est pas affecté.

Le processus d'élongation des acides gras dans la glande mammaire intervient à partir de l'acétate et de β -hydroxy-butyrates synthétisés dans le rumen et apportés à la mamelle par la voie sanguine. Dans les comparaisons des concentrés avec des rations à base d'ensilage de maïs aucune

différence significative n'a été relevée concernant la concentration en AGV totaux ni pour les proportions d'acétate et de butyrate dans le jus de rumen et les teneurs sanguines en acétoacétate et en β -hydroxy-butyrate ont tendance à être plus faibles pour l'apport de pommes de terre. Par ailleurs avec les rations du même type dans l'essai 1 les précurseurs lipidiques dans le rumen et le sang ne sont pas statistiquement différents. Ces observations paraissent aller à l'encontre du profil observé pour la matière grasse plus riche en acides gras courts et moyens. Sans privilégier à tout prix une relation de cause à effet il est très difficile de justifier cette richesse de la matière grasse par une présence d'une quantité supérieure de précurseurs disponibles pour la synthèse *de novo* d'acides gras dans la glande mammaire.

Les acides gras longs et insaturés sont surtout d'origine alimentaire. Dans nos essais les GMQ positifs permettent de considérer comme négligeable l'apport en acides gras par la mobilisation des réserves lipidiques d'autant plus que la mobilisation des réserves corporelles apporte plutôt des isomères *cis* des acides gras insaturés (PRECHT et MOLKETIN, 1997). Dans le rumen les acides gras insaturés d'origine alimentaire subissent un premier remaniement avec déplacement et oxydation des liaisons insaturées (figure 6). Les conditions ruminales de l'essai 2 sont caractérisées par un pH plus faible pour la ration blé en particulier au moment des fortes prises alimentaires. CHILLIARD et al. (2000) rapportent un effet inhibiteur d'une chute du pH engendrée pour une ration riche en concentrés (à quelle teneur en amidon ?) sur la lipolyse qui est une condition préalable à tout processus de biohydrogénation dans le rumen. Le profil de la matière grasse du lait pour la ration ensilage de maïs - blé révèle une proportion doublée de C 18:1 *trans* par rapport au profil de la ration pommes de terre. Or la présence de cet acide gras dans le lait a principalement pour origine le métabolisme de la flore ruminale (BICKERSTAFFE et al., 1972). JIANG et al. (1996) rapportent une augmentation de la teneur en C 18:1 *trans* de la matière grasse de lait de 2,4% à 4,7% quand la teneur en concentrés passe de 50 à 65%. Nos analyses de la matière grasse du lait ont également montré des teneurs très différentes en C 18:1 *trans* entre les rations : 4,4 % avec le blé et 2,7 % pour la ration pommes de terre. De plus les proportions des différents isomères de cet acide gras sont très variables en fonction du concentré amidon utilisé dans la ration (figure 21) : avec le blé la proportion de l'isomère $\Delta 9$ est 3 fois plus élevée qu'avec la pomme de terre. L'effet le plus marqué est enregistré par contre pour l'isomère $\Delta 10$ dont la teneur dans le lait est 6 fois plus forte avec le blé qu'avec les pommes de terre. De plus la teneur en C 18:1 $10trans$ dépasse largement celle de l'acide vaccénique ($\Delta 11$). Par ailleurs les proportions d'acide vaccénique sont similaires pour les deux concentrés et la hiérarchie classique $\Delta 10 < \Delta 11$ (PRECHT et MOLKETIN, 1997 ; GNÄDIG et al., 2001) est respectée avec les pommes de terre.

Figure 21 : Effet de la nature du concentré amidon de la ration sur la répartition des isomères *trans* du C18:1 de la MG du lait



Les différents isomères de position du C 18:1 *trans* ont des actions variables sur les enzymes de la synthèse *de novo* des acides gras dans la glande mammaire mais aussi sur la biohydrogénation des acides gras longs insaturés. Les isomères $\Delta 9$ et $\Delta 10$ ont un effet inhibiteur sur les enzymes indispensables pour la synthèse de la matière grasse dans la glande mammaire. L'isomère $\Delta 9$ *trans* des acides gras polyinsaturés empêche les désaturations et allongements enzymatiques (CHARDIGNY et al., 1996) via une inhibition de la $\Delta 9$ -désaturase (CORL et al., 1999). Ainsi la biohydrogénation des acides gras longs insaturés est ralentie. Les travaux de BAUMGARD (2000) et de LEDOUX et al. (2001) montrent que les isomères $\Delta 10$ *trans* (respectivement du C 18:1 et du C 18:2) ont également un effet inhibiteur sur la synthèse lipidique dans la glande mammaire surtout sur la synthèse *de novo* des acides gras à moins de 17 carbones alors que l'isomère $\Delta 11$ *trans* a un effet peu marqué. La teneur plus élevée des isomères $\Delta 9$ et $\Delta 10$ avec la ration blé pourrait donc expliquer une grande partie de la chute du TB observée, via des inhibitions enzymatiques dans la glande mammaire. Compte tenu de la très forte réponse du C 18:1 10 *trans* avec la ration blé, la chute du TB peut même sembler faible.

La concentration très élevée en isomères 10 *trans* et 9 *trans* du C18 :1 avec le blé peut être liée à la fermentation ruminale. En effet chez le mouton KUCUK et al. (2001) rapportent avec l'accroissement de la part du concentré de la ration une diminution de la biohydrogénation dans le rumen concomitant avec une baisse du pH conduisant à une augmentation du flux duodéal du C 18 :1 11 *trans*. GRIINARI et al. (1998) observent une augmentation de l'isomère $\Delta 10$ (et non du $\Delta 11$) du C 18 :1 *trans* en parallèle avec une chute prononcée du TB pour des rations riches en concentrés.

La fermentation ruminale des deux rations fournit autant de précurseurs pour la synthèse des acides gras *de novo* mais aussi d'acides gras longs. Il est cependant possible que la chute plus prononcée du pH ruminal avec la ration blé soit à l'origine d'une accumulation des isomères $\Delta 9$ et $\Delta 10$ du C 18:1 *trans* - responsables principaux des chutes du TB via des inhibitions enzymatiques de la synthèse *de novo* des acides gras courts et moyens mais aussi via la biohydrogénation incomplète des acides gras longs insaturés conduisant à plus d'acides gras longs et insaturés avec la ration blé.

Une vérification de cette hypothèse nécessiterait de comparer les deux concentrés avec un pH ruminal tamponné.

CONCLUSIONS GENERALES

V. CONCLUSIONS GENERALES

La possibilité de moduler la production et la composition du lait de vaches en fixant les apports d'amidon par la ration a été étudiée dans plusieurs essais. Les apports d'amidon ont varié autant par la nature du concentré (blé ou pommes de terre) que par la quantité apportée. Les variations quantitatives ont été obtenues via les différences de composition de la ration, en particulier en jouant sur la nature du fourrage utilisé (ensilage de maïs ou ensilage d'herbe).

Dans le rumen, l'amidon du blé se dégrade rapidement alors que la dégradation est plus lente et progressive pour l'amidon de la pomme de terre. La dégradation de ces deux amidons est quasi-complète (> 95%) après 12h d'incubation et leurs digestibilités apparentes sont alors très similaires, proches de 93%.

Le maïs ensilage est caractérisé par un amidon très rapidement dégradé. Les combinaisons du concentré amidon avec ce fourrage conduisent ainsi à des rations soit à dominante amidon rapide (ensilage de maïs - blé) soit à dégradation mixte (ensilage de maïs - pommes de terre). Avec l'herbe comme fourrage la vitesse de dégradation des rations dépend principalement du concentré. L'impact de la nature du concentré amidon sur le profil fermentaire et sur les performances zootechniques des vaches dépend alors du fourrage de la ration.

Avec l'**ensilage d'herbe** favorisant une population microbienne ruminale à orientation plutôt cellulolytique la fermentation de la ration contenant du blé est caractérisée par une chute plus prononcée du pH, et la concentration en AGV totaux augmente plus fort et plus vite qu'avec la ration contenant des pommes de terre. Le profil révèle en début de la cinétique une teneur relative en acétate plus faible. Ensuite avec le blé la chute relative du propionate est accompagnée d'une augmentation parallèle de la proportion du butyrate comparativement aux pommes de terre. Un épuisement précoce du substrat blé par sa fermentation très rapide pourrait expliquer cette diminution relative du propionate comparativement à la ration contenant des pommes de terre à dégradation plus lente et progressive.

Dans les rations à base d'ensilage d'herbe ou à base d'un mélange des deux ensilages l'ingestion de la matière sèche se situe entre 17 et 20 kg/jour et n'est pas affectée par la nature du concentré. Avec des apports d'amidon comprises entre 3,5 et 6 kg/jour, la production de lait brut varie entre 21 et 27 kg/jour sans effet de la nature du concentré amidon incorporé.

Les taux protéique et butyreux ne varient pas significativement entre les rations contenant du blé ou des pommes de terre : le TP se situe entre 32 et 36 g/kg et le TB entre 40 et 46 g/kg. Les

quantités produites de matière protéique (700 à 900 g/jour) et de matière grasse (950 à 1100 g/jour) ne sont pas affectées par la nature du concentré amidon dans ces rations apportant moins de 7 kg d'amidon ingéré par jour.

Pour les rations contenant de l'ensilage d'herbe les différences de cinétique de fermentation dans le rumen entre le blé et les pommes de terre ne se répercutent pas de manière significative sur les performances zootechniques des animaux.

Pour les rations à base d'**ensilage de maïs** les différences de concentration en AGV totaux et dans le profil fermentaire du rumen entre les deux concentrés amidon sont très faibles. Dans ces conditions ruminales plus favorables à une flore amylolytique elles se résument à une chute postprandiale du pH ramenée à l'amidon ingéré, plus marquée avec le blé qu'avec les pommes de terre.

Conformément aux données antérieures l'ingestion de matière sèche ne varie pas en fonction de la nature du concentré amidon et se situe aux alentours de 20 kg/jour pour ces rations à base d'ensilage de maïs qui apportent entre 6 et 8 kg d'amidon/jour. La production de lait brut varie entre 22 et 32 kg/jour sans effet de la nature du concentré amidon apporté par la ration à base d'ensilage de maïs. Le niveau de production augmente avec la teneur en amidon de la ration confirmant l'effet prépondérant du niveau d'ingestion d'énergie.

Le taux protéique et la quantité de matière protéique ne sont pas affectés par la nature du concentré amidon de la ration. Indépendamment de la nature, la quantité de matière protéique produite augmente de 800 à 1000 g/jour avec la quantité d'amidon ingéré même quand le taux protéique baisse de 36 à 30 g/kg pour des ingestions dépassant 7kg d'amidon.

Au-delà de 7 kg d'amidon ingéré le taux butyreux et la quantité de matière grasse sont significativement plus élevés pour les rations contenant des pommes de terre qu'avec les rations contenant du blé. Ces variations quantitatives sont accompagnées par des différences qualitatives, avec une matière grasse du lait plus riche en acides gras courts et moyens et plus pauvre en acides gras longs et insaturés pour les apports de pommes de terre que pour les apports de blé.

Sans différence pour les teneurs en précurseurs des acides gras synthétisés *de novo* et avec une composition en acides gras longs similaires pour les deux natures de concentrés, les variations qualitatives de la matière grasse du lait sont plutôt à relier aux activités enzymatiques dans le rumen et dans la mamelle, qu'à la fourniture des produits terminaux de la digestion. En effet la chute plus prononcée du pH ruminal entraîne une apparition accrue des acides gras de type *trans* avec le blé qui peuvent inhiber les enzymes indispensables pour la synthèse *de novo* des acides

gras courts mais également pour la biohydrogénation des acides gras longs insaturés. Les isomères $\Delta 9trans$ et surtout $\Delta 10trans$ du C 18:1 sont caractérisés par leur effet inhibiteur sur les enzymes comme l'acétyl-CoA-carboxylase, l'acyltransférase et la $\Delta 9$ -désaturase. Ces isomères sont rencontrés dans la matière grasse du lait des vaches ingérant du blé avec une concentration nettement plus élevée que dans la matière grasse du lait des vaches ingérant des pommes de terre. Cet effet est encore accentué par l'écart de quantité de matière grasse produite.

La principale réponse zootechnique de vaches ingérant des concentrés amidon à différentes vitesses de dégradation avec une ration à base d'ensilage de maïs consiste donc dans une production inférieure de matière grasse dans le lait avec le blé comparativement à la pomme de terre. Comme il n'y a pas de différence dans les précurseurs lipidiques fournis à la glande mammaire, la chute plus prononcée du pH dans le rumen et l'apparition parallèle d'isomères *trans* conduisent sans doute à l'inhibition des enzymes indispensables pour la synthèse de certains acides gras du lait.

La vérification de l'hypothèse d'une inhibition enzymatique via une chute du pH ruminal plus prononcée avec le blé qu'avec les pommes de terre nécessitera la comparaison des deux natures de concentré amidon dans une ration assurant une ingestion de plus de 7kg d'amidon/jour avec un pH ruminal tamponné. La mesure des acides gras *trans* dans le jus de rumen pourrait conforter cette hypothèse.

Dans ce travail l'interaction nature du concentré - quantité d'amidon apporté par la ration est confondue avec l'interaction fourrage - concentré. Il serait intéressant de vérifier les réponses zootechniques des vaches dans des rations apportant plus de 7 kg d'amidon/jour à base d'ensilage d'herbe avec ces concentrés amidon. De plus la comparaison avec d'autres natures d'amidon comme l'orge ou le maïs grain compléterait le modèle de réponse obtenu.

Le choix du fourrage a un impact majeur sur le type de réponse observé. Les variations du rapport Amidon ingéré/NDF ingéré pourraient être un indicateur pour caractériser l'orientation du milieu ruminal, le type de population microbienne présente dans le rumen et la fermentation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aiello R.J., Armentano L.E., Bertics S.J., Murphy A.T. (1989) : Volatile fatty acid uptake and propionate metabolism in ruminant hepatocytes. *J. Dairy Sci.* 72, 942-949
- Aldrich J.M., Muller L.D., Varga G.A., Griel L.C. (1993) : Nonstructural carbohydrate and protein effects on rumen fermentation, nutrient flow, and performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 76, 1091-1105
- Alert H.J., Poppe S. (1994) : Trockensubstanz- und Nährstoffverlust bei Futtermitteln nach Inkubation im Pansen (Nylonbeutel-Technik). *Arch. Anim. Nutr.* 47, 181-186.
- Archimède H., Sauvant D., Hervieu J., Ternois F., Poncet F. (1996) : Effects of the nature of forage and concentrate and their proportion on ruminal characteristics of non lactating goats, consequences on digestive interactions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 58, 267-282
- Archimède H., Sauvant D., Schmidely P. (1997) : Quantitative review of ruminal and total tract digestion of mixed diet organic matter and carbohydrates. *Reprod. Nutr. Dév.* 37, 173-189
- Baumgard L.H., Corl B.A., Dwyer D.A., Saebo A., Bauman D.E. (1999) : Identification of the CLA isomer responsible for milk fat depression. *J. Dairy Sci.* 77, Supplement 1, 117
- Baumgard L.H., Corl B.A., Dwyer D.A., Saebo A., Bauman D.E. (2000) : Identification of the conjugated linoleic acid isomer that inhibits milk fat synthesis. *Am. J. Physiol. Regulatory Comp. Physiol.* 278, R179-R184
- Beauchemin K.A., McAllister T.A., Dong Y., Farr B.I., Cheng K.J. (1994) : Effects of mastication on digestion of whole cereal grains by cattle. *J. Anim. Sci.* 72, 236-246
- Berge P., Dulphy J.P. (1991) : Etude des interactions entre fourrage et aliment concentré chez le mouton. II. Facteurs de variation de la digestibilité. *Ann. Zootech.* 40, 227-246
- Beyer M., Jentsch W., Hoffmann L. (1993a) : Einfluß der Stärkeherkünfte Gerste, Mais und Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 3. Mitteilung - Energieverwertung beim Rind. *Arch. Anim. Nutr.* 44, 265-281
- Beyer M., Jentsch W., Wittenburg H., Voigt J. (1993b) : Einfluß der Stärkeherkünfte Gerste, Mais und Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 2. Mitteilung - Anteile an ruminal und postruminal verdauten Nährstoffen beim Rind. *Arch. Anim. Nutr.* 43, 63-77
- Bickerstaffe R., Noakes D.E., Annison E.F. (1972) : Quantitative aspects of fatty acid biohydrogenation, absorption and transfer into milk fat in the lactating goat, with special reference to the cis- and trans-isomers of octadecenoate and linoleate. *Biochem. J.* 130, 607-617
- Bretillon L., Chardigny J.M., Gregoire S., Berdeaux O., Sébédio J.L. (1999) : Effects of conjugated linoleic acid isomers on the hepatic microsomal desaturation activities in vitro. *Lipids* 34, 965-969
- Calvert P. (1997) : The structure of starch. *Nature* 389, 338-339
- Cant J.P., de Peters E.J., Baldwin R.L. (1993) : Mammary uptake of energy metabolites in dairy cows fed fat and its relationship to milk protein depression. *J. Dairy Sci.* 76, 2254-2265.
- Carey D.A., Caton J.S., Biondini M. (1993) : Influence of energy source on forage intake, digestibility, in situ forage degradation, and ruminal fermentation in beef steers fed medium quality brome hay. *J. Anim. Sci.* 71, 2260-2269
- Casper D.P., Schingoethe D.J. (1989) : Lactational response of dairy cows to diets varying in ruminal solubilities of carbohydrates and crude protein. *J. Dairy Sci.* 72, 928-941
- Casper D.P., Schingoethe D.J., Eisenbeisz W.A. (1990) : Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of nonstructural carbohydrate and crude protein. *J. Dairy Sci.* 73, 1039-1050
- Cerneau P., Michalet-Doreau B. (1991) : In situ starch degradation of different feeds in the rumen. *RND* 31, 65-72
- Chapoutot P. (1998) : Etude de la dégradation in situ des constituants pariétaux des aliments par

- les ruminants. Thèse de Doctorat d'Etat, INA-Paris Grignon, 750 p.
- Chardigny J.M., Sébédio J.L., Berdeaux O. (1996) : Trans polyunsaturated fatty acids : occurrence and nutritional implications. *Adv. Appl. Lipid Res.* 2, 1-33
- Chardigny J.M., Sébédio J.L. (2000) : Un CLA peut en cacher un autre. *Cholé-Doc* 58, Mars/Avril 2000, 1-4
- Chilliard Y., Ferlay A., Mansbridge R.M., Doreau M. (2000) : Ruminant milk fat plasticity : nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. *Ann. Zootech.* 49, 181-205
- Chouinard P.Y., Corneau L., Barbano D.M., Metzger L.E., Bauman D.E. (1999) : Conjugated linoleic acids alter milk fatty acid composition and inhibit milk fat secretion in dairy cows. *J. Nutr.* 129, 1579-1584
- Colin-Schoellen O., Jurjanz S., Gardeur J.N., Laurent F. (1995) : Effet de la nature de l'aliment concentré sur les performances zootechniques de vaches laitières recevant une ration complète. *Ann. Zootech.* 44, 359-372
- Colin-Schoellen O., Jurjanz S., Laurent F. (1997) : Influence de l'apport de blé ou de pommes de terre dans une ration complète pour vaches laitières : interaction avec la nature du fourrage. *Ann Zootech.* 46, 269-280
- Colonna P., Buléon A., Leloup V., Thibault J.F., Renard C., Lahaye M., Viroben G. (1995) : Constituants des céréales, des grains, des fruits et de leurs sous-produits. in: *Nutrition des ruminants domestiques*. p. 83-122, éd. INRA Paris, 1995
- Cone J.W. (1991) : Degradation of starch in feed concentrates by enzymes, rumen fluid and rumen enzymes. *J. Sci. Food Agric.* 54, 23-24
- Corl B.A., Lacy S.H., Baumgard L.H., Dwyer D.A., Griinari J.M., Phillips B.S., Bauman D.E. (1999) : Examination of the importance of $\Delta 9$ -desaturase and endogenous synthesis of CLA in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77, Supplement 1, 118
- Delgado-Elorduy A., Alio A., Lozano O., Tagari H., Cueno P., De Young D., Gheniwa G., Simas J., Yu P., Santos F. (1996) : Net absorption and hepatic metabolism of glucose and L-lactate in lactating cows fed diets containing 40% dry rolled or steam-flaked sorghum grain. *J. Dairy Sci.* 79, Suppl. 1, 193-194
- De Peters E.J., Taylor S.J. (1985) : Effects of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.* 68, 2027-2032
- De Visser H., van der Togt P.L., Tamminga S. (1990) : Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage-based dairy cow rations. *Neth. J. Agric. Sci.* 38, 487-498
- DeVisser H., VanDerTogt, Huisert H., Tamminga S. (1992) : Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage-based dairy cow rations. 2. Rumen degradation, fermentation and kinetics. *Neth. J. Agric. Sci.* 40, 431-445
- De Visser H. (1997) : Characterization of carbohydrates in concentrates for dairy cows. *Recent developments in ruminant nutrition*, éd. Cole D.J.A., Nottingham University Press, 155-174
- Dijkstra J. (1994) : Simulation of the dynamics of protozoa in the rumen. *Brit. J. Nutr.* 72, 679-699
- Doreau B. (1988) : Influence de la nature du concentré, amidon ou paroi, sur la digestion. In : *l'utilisation des céréales pour les vaches laitières*. 24p., ITEB Paris.
- Emery R.S. (1973) : Biosynthesis of milk fat. *J Dairy Sci.* 56, 1187-1195
- Faldet M.A., Bush L.J., Adams G.D. (1986a) : Effect of different levels of wheat in concentrate mixture on production responses of lactating dairy cows fed sorghum silage as the only forage. *Oklahoma Anim. Sci. Res Rep.*, 66-70
- Faldet M.A., Bush L.J., Adams G.D. (1986b) : Effect of different levels of wheat in concentrate mixture on production responses of lactating dairy cows fed alfalfa hay as the only forage. *Oklahoma Anim. Sci. Res Rep.*, 71-76
- Faverdin P., Hoden A., Coulon J.B. (1987) : Recommandations alimentaires pour vaches laitières. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, INRA*, 70, 133-153
- French D. (1973) : Chemical and physical properties of starch. *J. Anim. Sci.* 37, 1048-1061
- Gaynor P.J., Waldo D.R., Capuco A.V., Erdman R.A., Douglass L.W., Teter B.B. (1995) : Milk fat

- depression, the glucogenic theory, and trans-C 18:1 fatty acids. *J. Dairy Sci.* 78, 2008-2015
- Gnädig S., Chardigny J.M., Sébédio J.L. (2001) : Lipides. In : Lait, nutrition et santé. éd.G. Débry, éditions TEC, Paris 2001, pages 105-124
- Griinari J.M., Dwyer D.A., McGuire M.A., Bauman D.E., Palmquist D.L., Nurmela K.V.V. (1998) : Trans-octadecenoic acids and milk fat depression in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81, 1251-1261
- Griinari J.M., Nurmela K.V.V., Dwyer D.A., Barbano D.M., Bauman D.E. (1999) : Variations of milk fat concentration of conjugated linoleic acid and milk fat percentage is associated with a change in ruminal biohydrogenation. *J. Dairy Sci.* 77, Supplement 1, 117
- Grings E.E., Roffler R.E., Deitelhoff D.P. (1992) : Evaluation of corn and barley as energy sources for cows in early lactation fed alfalfa-based diets. *J. Dairy Sci.* 75, 193-200
- Guerino F., Huntington G.B., Erdman R.A., Elsasser T.H., Reynolds C.K. (1991) : The effects of abomasal casein infusions in growing beef steers on portal and hepatic flux of pancreatic hormones and arterial concentrations of somatomedin-C. *J. Anim. Sci.* 69, 379-386
- Harmison B., Eastridge M.L., Firkins J.L. (1997) : Effect of percentage of dietary forage neutral detergent fiber and source of starch on performance of lactating Jersey cows. *J. Dairy Sci.* 80, 905-911
- Harmon D.L. (1992) : Dietary influences on carbohydrases and small intestine starch hydrolysis capacity in ruminants. *J. Nutr.* 122, 203-???
- Harmon D.L. (1993) : Nutritional regulation of postruminal digestive enzymes in ruminants. *J. Dairy Sci.* 76, 2102-2111
- Hasselmann L., Münchow H., Manzke V., Nasri H. (1997) : Zum Einfluss eines unterschiedlichen Stärke und Zuckerangebots auf Milchmengenleistung und Rohmilchqualität im Hochleistungsbereich von Milchkühen. Kongressband Leipzig, September 1997.
- Herrera-Saldana R., Huber J.T. (1989) : Influence of varying protein and starch degradabilities on performance of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72, 1477-1483
- Herrera-Saldana R., Huber J.T., Poore M.H. (1990) : Dry matter, crude protein and starch degradability of five cereal grains. *J. Dairy Sci.* 73, 2386-2393
- Hoden A., Coulon J.B., Faverdin P. (1988) : Alimentation des vaches laitières. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. éd. Jarrige R., INRA Paris, 135-158
- Hoden A., Marquis B., Delaby L. (1993) : Association de betteraves fourragères à une ration mixte d'ensilage de maïs et de trèfle violet pour vaches laitière. *INRA Prod. Anim.* 1, 165-169
- Huhtanen P. (1993) : The effects of concentrate energy source and protein content on milk production in cows given grass silage ad libitum. *Grass Forage Sci.* 48, 347-355
- Huntington G.B., Reynolds P.J. (1985) : Net portal absorption of metabolites in beef heifers fed hay or concentrate and abomasally infused with glucose or starch. *J. Anim. Sci.* 61(Suppl. 1), 467
- Huntington G.B. (1997) : Starch utilization by ruminants: from basics to the bunk. *J. Anim. Sci.* 75, 852-867
- Hurtaud C., Rulquin H., Vérité R. (1993) : Effect of infused volatile fatty acids and caseinate on milk composition and coagulation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 76, 3011- 3020
- Hurtaud C., Rulquin H., Vérité R. (1998) : Effect of level and type of energy source (volatile fatty acids or glucose) on milk yield, composition and coagulating properties in dairy cows. *Repr. Nutr. Dév.* 38, 315- 330
- Hurtaud C., Rulquin H. (1999) : Effet de la nature des nutriments énergétiques (acide propionique, glucose ou amidon) sur la production et la composition du lait chez les vaches laitières. 6ème Renc. Rech. Ruminants, Paris, 103-106
- Istasse L., Ørskov E.R. (1984) : The effects of intermittent and continuous infusions of propionic acid on plasma insulin. *Can. J. Anim. Sci.* 64 (Suppl.), 148
- Jarrige R. (1966) : The composition of sheep faeces and its relation to forage digestibility. *Proc. 9th Intern. Grassl. Congress Sao Paulo (Brésil)*, 809-814
- Jiang J., Bjoerck L., Fonden R., Emanuelson M. (1996) : Occurrence of conjugated cis-9, trans-11-

- octadecadienoic acid in bovine milk : effect of feed and dietary regimen. *J. Dairy Sci.* 79,n 438-445
- Jouany J.P. (1982) : Volatile fatty acid and alcohol determination in digestive contents, silage juices, bacterial cultures and anaerobic fermentor contents. *Sci. Aliments* 2, 131-144
- Judd J.T., Clevidence B.A., Muesing R.A., Wittes J., Sunkin M.E., Podczasy J.J. (1994) : Dietary *trans* fatty acids : effects on plasma lipids and lipoproteins of healthy men and women. *Am. J. Clin. Nutr.* 59, 861-868
- Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Laurent F. (1996) : Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques de vaches laitières. *Ann. Zootech.* 45, 467-476
- Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Gardeur J.N., Laurent F. (1998) :Alteration of milk fat by variation in the source and amount of starch in a total mixed diet fed to dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81, 2924-2933
- Kienzle E., Pohlenz J., Radicke S. (1997) : Morphology of starch digestion in the horse. *J. of Veterinary Medicine series A.* 44, 207-221
- Kim Y.K., Owens F.N. (1985) : Starch digestion by feedlot cattle : Influence of roughage and intake level and particle size. *Oklahoma Agr. Exp. Sta. MP-117*, 298
- Khorasani G.R., de Boer G., Robinson B., Kennelly J.J. (1994) : Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77, 813-824
- Knowlton K.F., Glenn B.P., Erdman R.A. (1998a) : Performance, ruminal fermentation, and site of starch digestion in early lactation cows fed corn grain harvested and processed differently. *J. Dairy Sci.* 81, 1972-1984
- Knowlton K.F., Dawson T.E., Glenn B.P., Huntington G.B., Erdman R.A. (1998b) :Glucose Metabolism and milk yield of cows infused abomasally or ruminally with starch. *J. Dairy Sci.* 81, 3248-3258
- Kotarski S.F., Waniska R.D., Thurn K.K. (1992) : Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *J. Nutr.* 122, 178-187
- Kreikemeier K.K., Harmon D.L., Peters J.P., Gross K.L., Armendariz C.K., Krehbiel C.R. (1990) : Influence of dietary forage and feed intake on carbohydrate activities and small intestinal morphology of calves. *J. Anim. Sci.* 68, 2916-2929
- Kreikemeier K.K., Harmon D.L., Brandt R.T., Avery T.B., Johnson D.E. (1991) : Small intestinal starch digestion in steers : effect of various levels of abomasal glucose, corn starch and corn dextrin infusion on small intestinal disappearance and net glucose absorption. *J. Anim. Sci.* 69, 328-338
- Kris-Etherton P.M., Emken E.A., Allison D.B., Dietschy J.M., Nicolosy R.J., Denke MA (1995) : *Trans* fatty acids and coronary heart disease risk. *Am. J. Clin. Nutr.* 62, 655S-707S
- Kristensen N.B., Pierzynowski S.G., Danfaer A. (2000) : Net portal appearance of volatile fatty acids in sheep intraruminally infused with mixtures of acetate, propionate, isobutyrate, butyrate and valerate. *J. Anim. Sci.* 78, 1372-1379
- Kronfeld D.S. (1976) : The potential importance of the proportions of glucogenic, lipogenic and aminogenic in regard to the health and productivity of dairy cows. *Adv. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 7, 5-??
- Kucuk O., Hess B.W., Ludden P.A., Rule D.C. (2001) : Effect of forage:concentrate ratio on ruminal digestion and duodenal flow of fatty acids in ewes. *J. Anim. Sci.* 79, 2233-2240
- Kung L., Tung R.S., Carmeron B.R. (1992) : Rumen fermentation and nutrient digestion in cattle fed diets varying in forage and energy source. *Anim. Feed Sci. Technol.* 39, 1-12
- Laarveld B., Christensen D.A., Brockman R.P. (1981) : The effect of insulin on net metabolism of glucose and amino acids by the bovine mammary gland. *Endocrinology* 108, 2217-22??
- Laurent F. (1988) : Utilisation du blé et des céréales dans la ration des vaches laitières. *Ann. Zootech.* 37, 117-132
- Landau S., Bor A., Leibovich H., Zoref Z., Nitsan Z., Nadar Z. (1995) : The effect of ruminal starch degradability in the diet of Booroola crossbreed ewes on induced ovulation rate and prolificacy.

- Anim. Repr. Sci. 38, 97-108
- LeDoux M., Laloux L, Sauvant D. (2000) : Les isomères trans des acides gras : origine et présence dans l'alimentation. Science des aliments 20, 393-411
- LeDoux M., Rouzeau A., Bas P., Sauvant D. (2001) : Occurrence of *trans*-C18:1 fatty acid isomers in goat milk : effect of two dietary regimen. J. Dairy Sci. 84, sous presse
- Littell R.C., Milliken G.A., Stroup W.W., Wolfinger R.D. (1996) : SAS System for mixed models. Cary NC:SAS Institute Inc., 633 pp.
- Martin P A., Thomas P.C. (1988) : Dietary manipulation of the yield and composition of milk : effects of dietary inclusions of barley and oats in untreated or formaldehyde-treated forms on milk fatty acid composition. J. Sci. Food Agric. 43, 145-154
- Martin C., Philippeau C., Michalet-Doreau B. (1999) : Effect of wheat and corn variety on fiber digestion in beef steers fed high-grain diets. J. Anim. Sci. 77, 2269-2278
- Mahadevan S., Sauer F.D., Erfle J.D., Teather R.M., Morse P.M. (1982) : Changes in ammonia concentration, bacterial counts, pH and volatil fatty acid concentration in rumen of cows fed alfalfa hay or concentrate:urea-corn silage. Can. J. Anim. Sci. 62, 249-258
- McCarthy R.D., Klusmeyer T.H., Vicini J.L., Clark J.H., Nelson D.R. (1989) : Effects of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. J. Dairy Sci. 72, 2002 - 2016
- McClyment G.L., Vallance S. (1962) : Depression of blood glycerides and milk fat synthesis by glucose infusion. Proc. Nutr. Soc. 21, xli
- McGuire M.A., Griinari J.M., Dwyer D.A., Bauman D.E. (1995) : Rôle of insulin in the regulation of mammary synthesis of fat and protein.
- Mendoza G.D., Britton R.A., Stock R.A. (1993) : Influence of ruminal protozoa on site and extent of starch digestion and ruminal fermentation. J. Anim. Sci. 71, 1572-1578
- Michalet-Doreau B., Philippeau C., Doreau M. (1997) : In situ and in vitro ruminal starch degradation of untreated and formaldehyde-treated wheat and maize. Reprod. Nutr. Dev. 37, 305-312
- Miettinen H., Huhtanen P. (1996) : Effects of the ratio of ruminal propionate to butyrate on milk yield and blood metabolites in dairy cows. J. Dairy Sci. 79, 851-861.
- Miller P.S., Reis B.L., Calvert C.C., de Peters E.J., Baldwin R.L. (1991) : Patterns of nutrient uptake by the mammary glands of lactating dairy cows. J. Dairy Sci. 74, 3791-3799.
- Mills J.A.N., France J., Dijkstra J. (1999a) : A review of starch digestion in the lactating dairy cow and proposals for a mechanistic model : 2. Post-ruminal starch digestion and small intestinal glucose absorption. J. Anim. Feed Sci. 8, 451-481
- Mills J.A.N., France J., Dijkstra J. (1999b) : A review of starch digestion in the lactating dairy cow and proposals for a mechanistic model : 1. Dietary starch characterisation and ruminal starch digestion. J. Anim. Feed Sci. 8, 291-340
- Monteils V, Jurjanz S., Blanchart G., Laurent F. (2002) : Kinetics of ruminal degradation of wheat and potato starches in total mixed rations. J. Anim. Sci. 80, 235-241.
- Moran J.B. (1986) : Cereal grains in complete diets for dairy cows : a comparison of rolled barley, wheat and oats and of three methods of processing oats. Anim. Prod. 43, 27-36
- Moore J.H., Christie W.W. (1981) : Lipid metabolism in the mammary gland of ruminant animals. p.227 in: Lipid metabolism in ruminant animals. éd. Pergamon Press, Lancaster, England
- Mould F.L., Ørskov E.R., Gauld S.A. (1983) : Associative effects. II The effect of dietary addition of bicarbonate salts on the voluntary intake and digestibility of diets containing various proportions of hay and barley. Anim. Feed Sci. Tech. 10, 31
- Nalsen T., Bush L.J., Adams G.D. (1987) : Substituting wheat for corn in a concentrate mixture for dairy cows on a weight basis. Oklahoma Exp. Stat., MP. 119, 149-152
- NF V 18-121. Mars 1997. Aliments des animaux. Dosage de l'amidon. Méthode enzymatique. AFNOR
- Nocek J.E., Tamminga S. (1991) : Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. J. Dairy Sci. 74, 3598-3629

- Oliveira J., Huber J.T., Ben-Ghedalie D., Pessaraki M. (1990) : Effect of sorghum grain processing on the performance of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci. (Suppl. 1)* 73, 127
- Onwubuemeli C. Huber J.T., King K.J., Johnson C.O.L.E. (1985) : Nutritive value of potato processing wastes in Total Mixed Rations for Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.* 68, 1207-1214
- Ørskov E.R., McDonald J. (1979) : The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 92, 499-503
- Ørskov E.R. (1986) : Starch digestion and utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 63, 1624-1633
- Overton T.R., Cameron M.R., Elliott J.P., Clark J.H., Nelson D.R. (1995) : Ruminal fermentation and passage of nutrients to the duodenum of lactating cows fed mixtures of corn and barley. *J. Dairy Sci.* 78, 1981-1998
- Owens F.N., Zinn R.A., Kim Y.K. (1986) : Limits to starch digestion in the ruminant small intestine. *J. Anim. Sci.* 63, 1634-1648
- Palmquist D.L., Beaulieu A.D., Barbano D.M. (1993) : Feed and animal factors influencing milk fat composition. *J. Dairy Sci.* 76, 1753-1771
- Plascencia A., Zinn R.A. (1996) : Influence of flake density on the feeding value of steam-processed corn in diets for lactating cows. *J. Anim. Sci.* 74, 310-316
- Poore M.H., Moore J.A., Swingle R.S., Brown W.H., Whiting F.M. (1989) : Influence of forage quality and sorghum grain processing in diets formulated to contain 25% of forage NDF on milk production by holstein cows. *J. Dairy Sci. (Suppl. 1)* 72, 480
- Poore M.H., Moore J.A., Eck T.P., Swingle R.S., Theurer C.B. (1993) : Effect of fiber source and ruminal starch degradability on site and extent of digestion in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 76, 2244-2253
- Precht D, Molketin J. (1997) : Effect of feeding on trans positional isomers of octadecenoic acid in milk fat. *Milchwissenschaft* 52, 564-568
- Remillard R.L., Johnson D.E. (1984) : Starch digestion in the bovine small intestine with and without buffer amylase infusion. *J. Anim. Sci. (Suppl. 1)* 59, 440 (abstract)
- Robin J.P., Mercier C., Duprat F., Charbonnière R., Guilbot A. (1975) : Amidons linnérisés. Etudes chromatographiques et enzymatiques des résidus insolubles provenant de l'hydrolyse chlorhydrique d'amidons de céréales, en particulier de maïs cireux. *Starch* 27, 36-45
- Robinson P.H., Sniffen C.J. (1985) : Forestomach and whole tract digestibility for lactating dairy cows as influenced by feeding frequency. *J. Dairy Sci.* 68, 857-867
- Robinson P.H., Tamminga S., Van Vuuren A.M. (1987) : Influence of the declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen digesta quantity, composition and kinetics of ingesta turnover in dairy cows. *Livest. Prod. Sci.* 17, 37-62
- Robyt J.F. (1984) : Enzymes in the Hydrolysis and Synthesis of Starch. In : *Starch Chemistry and Technology*. éd. Academic Press Inc. London, 1984, p.87-124
- Rode L.M., Satter L.D. (1988) : Effect of amount and length of alfalfa hay in diets containing barley or corn on site of digestion and rumen microbial protein synthesis in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 68, 445-454
- Rohr K., Schlunsen D. (1986) : The bearing of feeding methods on digestion and performance of dairy cows. In: *Developments and future perspectives in research on rumen function.*, éd. Neiman-Sorensen, Brussels, 227-242
- Romo G.A., Casper D.P., Erdman R.A., Teter B.B. (1996) : Abomasal infusion of cis or trans fatty acid isomers and energy metabolism of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79, 2005-2015
- Rooney L.W., Pflugfelder R.L. (1986) : Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *J. Anim. Sci.* 63, 1607-1623
- Sauvant D., Chapoutot P., Archimède H. (1994) : La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.* 7, 115-124
- Sauvant D. (1997) : Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.* 10, 287-300
- Schmidely P., Archimède H., Bas P., Rouzeau A., Munoz S., Sauvant D. (1996) : Effects of the

- synchronization of the rate of carbohydrate and nitrogen release of the concentrate on rumen fermentation, plasma metabolites and insulin in the dry pregnant goat. *An. Fd. Sci. Tech.* 63, 163-178
- Schoch T.J. (1945) : The fractionation of starch. In : Pigman W.W., Wolfson M.L. (eds) *Adv. Carbohydr. Chem.*, Vol. I, 247. Acad. Press Inc., New York
- Schwarz F.J., Pex E.J., Kirchgessner M. (1996) : Zum Einfluss stärkereicher Einzelfuttermittel auf die Verdaulichkeit und den Energiegehalt von Maissilage bei Rind und Schaf. *Arch. Anim. Nutr.* 49, 349-362
- Shannon J.C., Garwood D.L. (1984) : Genetics and Physiology of Starch Development. In : *Starch Chemistry and Technology*. éd. Academic Press Inc. London, 1984, p.26-86
- Seoane J.R., Christen A.M., Dion S. (1990) : Intake and digestibility in steers fed grass hay supplemented with corn or barley and fish meal or soybean meal. *Can. J. Anim. Sci.* 70, 921-926
- Sivak M.N., Preiss J. (1998) : Advances in Food and Nutrition Research. *Starch - Basic Science to Biotechnology*. éd. Academic Press Inc. London, 1998, 200p.
- Spicer L.A., Theurer C.B., Sowe J., Noon T.H. (1986) : Ruminant and postruminal utilization of nitrogen and starch from sorghum grain-, corn-, and barley-based diets by beef steers. *J. Anim. Sci.* 62, 521-530
- Storry J.E. (1970) : Ruminant metabolism in relation to the synthesis and secretion of milk fat. *J. Dairy Res.* 37, 139-147
- Straßburger (1991) : *Lehrbuch der Botanik*. éd. Gustav Fischer Verlag Stuttgart - Jena - New York, 118-297
- Sutton J.D. (1980) : Digestion and end-product formation in the rumen from production ratios. In : *Proc. 5th Int. Symp. Ruminant Physiol.*, Clermont-Ferrand, France, 271-308, ed. MTP Press Ltd., Lancaster, England
- Swinkels J.M.M. (1985) : sources of starch, its chemistry and physics. In : Van Beynum GMA, Roels JA : *starch conversion technology*. Marcel Dekker Inc. New York 1985, chapter 2. p. 15 - 46
- Tamminga S., Van Vuuren A.M., Van Der Koelen C.J., Ketelaar R.S., Van Der Togt P.L. (1990) : Ruminant behaviour of structural carbohydrates, non-structural carbohydrates and crude protein from concentrate ingredients in dairy cows. *Neth. J. Agric. Sci.* 38, 513-526
- Tamminga S., van Straalen V.M., Subnel A.P.J., Meijer R.G.M., Steg A., Wever C.J.G., Block M.C. (1994) : The Dutch protein evaluation system : the DVE/OEB system. *Liv. Prod. Sci.* 40, 139-145
- Taniguchi K., Huntington G.B., Glenn B.P. (1995) : Net nutrient flux by visceral tissues of beef steers given abomasal and ruminal infusions of casein and starch. *J. Anim. Sci.* 73, 236-249
- VanKeulen J., Young B.A. (1977) : Evaluation of acid-insoluble ash as a natural marker in ruminant digestibility studies. *J. Anim. Sci.* 44, 282-287
- VanSoest P.J., Wine R.H. (1967) : Use of detergents in analysis of fibrous feeds. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.* 50, 50-55
- Vallet A. (1991) : *Maladies des bovins*. Ed. France Agricole. Paris 1991. 319 p.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C. (1987) : Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin (PDI). *Bull. Techn. CRZV Theix INRA* 70, 19-34
- Vessby B., Smedmans A. (1999) : Conjugated linoleic acid (CLA) reduces the body fat content in humans. *Chem. Phys. Lipids* 101, 152
- Voigt J., Jentsch W., Schönhausen U., Beyer M., Kreienbring F. (1993) : Einfluß der Stärkeherkünfte Gerste, Mais und Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 4. Mitteilung - Stickstoffumsatz im Pansen. *Arch. Anim. Nutr.* 44, 369-382
- Weiss W.P., Fisher G.R., Eriksson G.M. (1989) : Effect of source of neutral detergent fiber and starch on nutrient utilization by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72, 2308-2315
- Wolff R.L., Fabien R.J. (1989) : L'extraction de la matière grasse de produits laitiers et pour l'estérification subséquente des acides gras. *Le lait* 69, 33-42

- Wu H.C. , Sarko A. (1978) : Carbohydr. Res. 61, 7 ou 27
- Yang W.Z., Beauchemin K.A., Koenig K.M., Rode L.M. (1997a) : Comparison of hull-less barley, barley or corn for lactating cows : effects on extent of digestion and milk production. J. Dairy Sci. 80, 2475-2486
- Yang W.Z., Beauchemin K.A., Farr B.I., Rode L.M. (1997b) : Comparison of barley, hull-less barley, and corn in the concentrate of dairy cows. J dairy Sci. 80, 2885-2895
- Zhao F.Q., Glimm D.R., Kennelly J.J. (1993) : Distribution of mammalian facilitative glucose transporter messenger RNA in bovine tissues. Int. J. Biochem. 25, 1897-1907

ANNEXES

Annexe 1 : Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur le profil fermentaire et la production de lait - synthèse bibliographique

Référence	Ration de base	Natures d'amidon	Amidon ingéré (kg/j)	C ₂ /C ₃ (mol%)	C ₃ /C ₄ (mol%)	(C ₂ +C ₃)/C ₄ (mol%)	PL (kg/j)	TB (g/kg)	MG (g/j)	Lait 4% (kg/j)
Aldrich et al. (1993)	Ensilage (maïs:luzerne,50:50)	R : maïs CCM+ tourteau de colza	8,9	2,7	2,0	3,2	39,3	32,6	1260	34,7
		L : maïs grain + tourteau de colza	9,3	3,2	1,5	3,8	39,5	34,6	1360	36,2
		R : maïs CCM + farine de sang	9,4	3,2	1,7	3,8	38,8	34,0	1310	35,2
		L : maïs grain + farine de sang	8,8	3,6	1,5	4,3	39,6	33,8	1340	35,9
Yang et al (1997a)	Ensilage d'orge + Foin de luzerne	R : orge	7,1	1,8	2,5	2,2	23,7	39,5	936	
		L : maïs grain	9,0	2,0	2,6	2,4	24,2	37,8	915	
Yang et al (1997b)	Ensilage d'orge + Foin de luzerne	R : orge	6,2				32,2	33,8	1060	
		L : maïs grain	8,3				33,9	33,5	1110	
Overton et al. (1995)	Ensilage (maïs:luzerne,67:33)	R orge	6,7	1,8	3,4	2,1	22,6	39,1	860	22,3
		L maïs	7,5	2,5	2,2	2,9	26,9	35,8	970	25,2
Petit et Santos (1996)	Herbe (foin + ensilage)	R : blé immature	4,0				28,2	38,5	1086	27,1
		L : maïs immature	4,5				26,6	37,8	1005	25,0
McCarthy et al. (1989)	Ensilage maïs + foin de luzerne (40:60)	R : orge + tourteau de soja	8,6	2,0	2,8	2,4	32,6	30,4	980	27,8
		L : maïs + tourteau de soja	11,0	2,0	2,8	2,4	35,2	27,3	920	27,9
		R : orge + farine de poisson	8,2	1,7	4,0	2,0	32,4	28,9	920	26,7
		L : maïs + farine de poisson	10,3	2,6	2,1	3,1	35,9	27,2	960	28,8
De Visser (1990)	Ensilage (maïs:herbe,50:50)	R : orge	5,0	2,5	1,8	3,0	37,1	43,4	1589	38,7
		L : maïs	5,6	2,4	1,8	3,0	38,2	42,5	1610	39,5
Weiss et al. (1989)	Ensilage de luzerne	R : orge	7,4	2,4	2,1	2,9	22,9	34,1	781	20,7
		L : maïs	5,9	2,9	2,8	3,5	23,3	37,5	874	22,4
Harmison et al. (1997)	Ensilage de maïs + Ensilage de luzerne	R : blé + maïs	6,0	2,5	2,9	2,8	20,4	46,7	953	22,3
		L : maïs grain	6,0	2,8	2,0	3,3	20,9	47,5	993	22,9

Annexe 1 (suite) : Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur le profil fermentaire et la production de lait - synthèse bibliographique

Référence	Ration de base	Natures d'amidon	Amidon ingéré (kg/l)	C ₂ /C ₃ (mol%)	C ₃ /C ₄ (mol%)	(C ₂ +C ₃)/C ₄ (mol%)	PL (kg/l)	TB (g/kg)	MG (g/l)	Lait 4% (kg/l)
Herrera-Saldana et Huber (1989)	Foin de luz. + son de coton (60 : 40)	R : orge + farine de coton	8,3	2,0	3,0	2,3	37,4	31,0	1200	32,4
		L : milo + farine de coton	7,4	2,0	2,7	2,4	34,2	34,0	1200	31,1
		R : orge + drêches	7,1	1,8	3,2	2,1	34,9	29,0	1010	29,1
		L : milo + drêches	5,8	2,2	2,5	2,6	34,6	36,0	1240	32,5
Poore et al. (1993)	Foin de luzerne	R : sorgho extrudé	6,1				19,2	35,7	700	
		L : sorgho aplati	6,2				18,2	35,4	650	
	Paille de blé	R : sorgho extrudé	6,8				19,6	34,7	680	
		L : sorgho aplati	7,2				18,6	37,5	690	
Casper & Schingoethe (1990)	Ens. maïs + foin de luzerne (80:20)	R : orge	9,0	2,0	2,7	2,4	31,7	32,5	1030	28,1
		L : maïs	9,9	2,3	2,2	2,7	32,1	33,9	1088	28,9
Plascenia et Zinn (1996)	Foin de luzerne	R : maïs grain extrudé	4,8	2,4	2,4	2,8	25,5	33,0	840	
		L : maïs grain aplati	3,9	3,6	1,6	4,2	22,9	36,4	840	
Nalsen et al. (1987)	Foin de luzerne	R : blé					32,9	32,2	1059	
		L : maïs grain					34,5	31,8	1097	
Faldet et al. (1986a)	Foin de luzerne	R : blé	5,7				29,1	25,6	745	
		L : maïs grain	6,3				30,5	28,2	860	
Faldet et al. (1986b)	Ensilage de sorgho	R : blé	9,7				27,2	38,1	1037	
		L : maïs grain	8,8				28,8	36,8	1060	
Grings et al. (1992)	Luzerne (foin : ensilage, 50: 50)	R : orge	10,1				41,4	34,2	1400	
		L : maïs grain	9,7				40,4	34,3	1370	
Casper & Schingoethe (1989)	Ens. maïs + foin de luzerne (80:20)	R : orge	7,5	2,2	3,0	2,6	31,9	33,1	1056	28,6
		L : maïs	7,8	2,4	2,1	2,9	32,7	33,6	1099	29,6

Annexe 1 (suite) : Effet de la nature et de la quantité d'amidon sur le profil fermentaire et la production de lait - synthèse bibliographique

Référence	Ration de base	Natures d'amidon	Amidon ingéré (kg/lj)	C ₂ /C ₃ (mol%)	C ₃ /C ₄ (mol%)	(C ₂ +C ₃)/C ₄ (mol%)	PL (kg/lj)	TB (g/kg)	MG (g/lj)	Lait 4% (kg/lj)
De Peters & Taylor (1985)	Foin de luzerne	R : orge	4,8	2,8	1,9	3,4	27,4	28,1	761	22,4
		L : maïs	4,7	3,1	1,8	3,6	28,0	30,1	836	23,7
Khorasani et al (1994)	Foin de brome	R : orge + tourteau de soja	6,5	2,9	1,9	3,5	27,9	28,0	770	22,6
		L : maïs + tourteau de soja	7,5	2,7	2,1	3,2	29,4	27,3	790	23,7
		R : orge + farine de poisson	7,9	3,2	1,8	3,7	29,7	24,9	730	22,8
		L : maïs + farine de poisson	8,0	3,0	1,8	3,5	29,7	27,0	800	23,8

Kinetics of ruminal degradation of wheat and potato starches in total mixed rations

V. Monteils, S. Jurjanz, O. Colin-Schoellen, G. Blanchart and F. Laurent

Laboratoire de Sciences Animales, INRA-ENSAIA, Nancy, France

ABSTRACT: Wheat and potato are rich in starch but their starches differ in the rate of ruminal degradation. Kinetics of in sacco disappearance and profiles of ruminal fermentation were studied for these two concentrates in total mixed rations based on grass silage or corn silage. Wheat starch was more rapidly (34%/h) degraded by rumen micro-organisms than potato starch (5%/h). The differences in starch degradation in sacco were found again in the VFA concentrations mainly in grass silage-based diets. Overall ruminal pH, total VFA concentration and proportions of acetate, propionate and butyrate, are more variable for wheat during the kinetic (amplitude and quickness) than for potato in grass silage-based diets. In these diets, risks of acidosis were more elevated with wheat than potato but the VFA concentrations were also higher. These differences of fermentation profile were so reduced in corn silage-based diets that, in this case, wheat can be substituted by potato without any effect on digestion and no risk of acidosis.

Key Words: Starch, Rumen, Kinetics, Potato, Wheat

Correspondence: 2 avenue de la forêt de Haye, B. P. 172, 54505 Vandoeuvre les Nancy Cedex, France
phone: (33) 3 83 59 58 89; fax: (33) 3 83 59 58 89; E mail: jurjanz@ensaia.inpl-nancy.fr

Introduction

Cereals such as wheat are commonly used in cattle diets but could eventually be replaced with by-products. Among these alternatives, potato peelings (**PP**) are an attractive feedstuff because of their availability in northern hemisphere, high energy concentration, and low costs. Several works have studied the use of potatoes in cattle nutrition using the beef model (Hoover et al., 1976; Beyer et al., 1993; Alert and Poppe, 1994), but only a few studies are recorded concerning diets for dairy cows (Schneider et al, 1985; Nocek and Tamminga, 1991; and Jurjanz et al., 1998). If this by-product, generated by the food industry in large amounts, is to be incorporated into diets, more knowledge about its digestive features is required.

Potato peelings are similar in starch concentration to raw potato (61 to 67% of DM, Jurjanz et al., 1998; versus 60 to 65%, Jarrige, 1988). These concentrations are very close to starch concentration of wheat (67% of DM, Jarrige; 1988). However these two feedstuffs have different characteristics: wheat and potato starches are, respectively, rapidly and slowly degraded by micro-organisms of the rumen (Sauvant et al., 1994). The aim of this trial was to compare wheat and PP in sacco disappearance kinetics, with emphasis on the starch fraction and the change of fermentation kinetics. Feedstuffs were studied with two types of total mixed ration (**TMR**): the first based on grass silage and the second on corn silage, in which wheat or PP represented 35 to 40% of total DM.

Materials and Methods

Animals and Experimental Design

Four multiparous Holstein cows were used in a 4 x 4 Latin square design. The animals were housed in free stalls at our experimental station in Nancy, France.

The factors studied were starchy concentrates (wheat or PP) and forage types (grass silage or corn silage). Each period lasted 4 wk (one wk of transition, two wk of adaptation and the last wk for taking measurements).

The cows were fitted with rumen cannulas (II 3 C, Bar Diamond Inc., Parma, ID) two mo before the trial in accordance with French Animal Care Guidelines. The daily DMI was, on average, 18.4 ± 2.4 kg. The animals weighed, on average, 659 ± 41 kg. The lactation stage at the beginning of the trial was between 61 and 106 d, and the mean milk yield was 22.5 ± 4.4 kg/d.

Diets

The composition of the different diets and their nutritive values are shown in Table 1. The PP (screening[®], McCAIN, Harnes, France) were peeling residues from the French fries industry and stored as silage (pH 4). Other feedstuffs: wheat straw, mixed meal (rapeseed and soybean) treated with formaldehyde and minerals ensured similar energy and protein concentrations in the diets based on the same forage. These feedstuffs represented 24% of the DM at most.

Cows were fed a TMR once daily in the morning for ad libitum intake using electronic feed gates (SEFER Co., Neuville de Poitou, France). Each cow was fitted with a transponder providing access to one of the gates. Individual feed intakes and the corresponding DM were recorded 5 d per wk. Each feedstuff was described chemically by analysing for DM (48 h at 80°C), and concentrations of starch by an enzymatic method (Thivend et al., 1965) and with a kit for glucose dosage (D-Glucose 716251, Roche analytics, Basel, Switzerland), crude protein (Kjeldahl method in accordance with AOAC, 1990), NDF (Van Soest and Wine, 1967) with an incubation with 250 μ L of α -amylase heat-stable (A3306, Sigma, Saint Quentin

Fallavier, France) of 0.5 g of starchy feedstuffs in neutral detergent solution during 2h at 80°C and, ash (burning for 6 h at 550°C).

In sacco study

The disappearance rates were measured using the nylon bag technique (Michalet-Doreau et al., 1987). After drying (48 h at 65°C) and grinding through a 1.5 mm sieve (SK 100, Retsch GmbH & Co. KG, Haan, Germany), 4 g of the studied concentrate used in the diet (wheat or PP) were placed separately in 9 x 14 cm nylon bags (Blutex 120, Saati France Co., Saily Saillisel, France) with a pore size of 50 µm and, respecting a ratio of 12 to 20 mg/cm². The chemical composition and the particle size distribution determined by ten minutes of dry sieving of 100 g of feedstuffs (stacked sieves: 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.125, 0.09, and 0.05 mm) of incubated feeds were shown in Table 2. The incubation times of the nylon bags were 0, 1, 3, 6, and 12 h. The soluble fraction corresponds to the difference between the non incubated feedstuff and the time 0 obtained by washing in a machine 2 x 5 min in warm water. For the others incubation times, the bags were soaked in water prior to incubation in the rumen. Access to the feed gates was allowed just after the bags had been placed into the rumen. The incubation times of 1 and 6 h were applied to a cow on the same day, the times of 3 and 12 h on the next day, to avoid disturbing the rumen conditions. After incubation, the nylon bags were washed by machine 2 x 5 min in cold water; they were then freeze-dried and weighed. For a given concentrate-forage combination and a given incubation time, six replications per cow (= per period) and feedstuff were carried out, i.e. 24 replications per feedstuff and per incubation time overall.

Analyses were done on samples pooled per cow for each feedstuff and each incubation time. For certain incubation times, the amount of feedstuffs after pooling was so small that we performed the chemical analysis in the following order: starch, NDF, CP and ash. The starch,

NDF, CP, and ash concentrations were determined as for the feedstuffs. As the nylon bags were washed after incubation, the starch analysis did not require the washing of the samples to eliminate soluble carbohydrates. The disappearance kinetics of the starch fraction of both concentrates were calculated by multiple regression (Stat-ITCF, version, ITCF, Paris, France).

Profiles of ruminal fermentation

During the measuring wk, a kinetics assay of the ruminal fluid composition was repeated for two consecutive days. The first sampling point (time 0) corresponded to the moment before access to the feed was allowed, and then subsequent samplings were taken at 1, 2, 4, 6, 8 and 10 h thereafter, with a rigid tube via the rumen cannula which allowed samplings with constant distance to the cannula. Ruminal pH was determined immediately by a portable pH meter (Knick Portamess 751 with an electrode Xerolyt Ingold M6- DXK S7/25). The liquid phase was separated from bacteria and solid particles by centrifugation (20 min, 4000 x g) and immediately frozen. The VFA concentrations were determined by gas chromatography after thawing (Jouany, 1982).

Statistical analysis

The disappearance rates of DM, starch, NDF, CP and ash were calculated separately for each cow, each diet, and each incubation time. The disappearance rates of both starchy concentrates were compared (based on the mean of both diets) for a given incubation time by Student's *t*-test.

An analysis of variance was performed to compare the profiles of ruminal fermentation of the diets containing the starchy concentrates for a given forage using the MIXED procedure of SAS (SAS Inst., Inc., Cary, NC) with the repeated time option. The model includes the cow as a randomized effect and the fixed effects concentrate, sampling time, and the interaction

between these two factors. The covariance structure between the different sampling times was defined in the model as being auto-regressive after verification of Akaike and Schwarz-Bayesian criterions (Littell et al., 1996). The speed of changes of the fermentation profile was calculated by the difference for a given variable between two consecutive times. These speed values were statistically analyzed with the same procedure than previous.

The intake variables were tested using the same model without the time factor and its interactions.

Significance was declared at $P < 0.05$ using the error of the sum of square type III. The values of the analyzed variables were presented as least square means (i.e. adjusted for the effects of the other factors in the model) and were compared by Student's *t*-test.

Results

Nutrient intakes

The intakes of DM, starch, nitrogen and NDF by cows (Table 3) were similar for the two concentrates in both diets (NS). Independently of the concentrate, the intakes of DM, starch and nitrogen were higher ($P < 0.01$) when the forage is corn silage versus grass silage, except the NDF intake. The DMI was between 15.9 and 19.7 kg/d and, the starch intake was 3.4 and 6.4 kg/d for the grass silage and corn silage-based diets respectively. The nitrogen intake ranged from 350 to 440 g/d, and the NDF intake from 6.3 to 7.2 kg/d.

In sacco study

The disappearance kinetics of the wheat starch fraction correspond to the model of Ørskov and Mc Donald (1979) according to the equation: $Y = 63.2 + 35.7 (1 - e^{-1.65t})$ ($r^2 = 0.96$). The PP starch fitted more with a linear model: $Y = 40.1 + 4.8 t$ ($r^2 = 0.99$). That is why we

preferred to compare on the one hand soluble fractions of both starches and on the other hand the progressively degraded fraction of starch.

The disappearance of the starch, NDF, and CP fractions of wheat and potato are illustrated in Figure 1. The DM and the ash fraction (data not shown) and the NDF, and CP fractions disappeared similarly with no animal or forage effects, and this was the case for wheat as well as for PP.

The disappearance of the starch fraction of wheat or PP was not linked to forage type in the diet. The soluble fraction of wheat starch was clearly higher than that of PP starch (63% versus 38%, $P < 0.01$). The disappearance velocity of wheat starch was very high in the first hour and slowed down afterwards, whereas PP starch disappeared more slowly but more regularly. After 1 h, more than 90% of the wheat starch had disappeared versus barely 50% for the PP starch. And after 12 h, wheat and PP starch disappearances were nearly complete (100% versus 96%). The disappearance rates of the starch fractions not instantaneous solubility were 34 and 5%/h, respectively, for wheat and PP.

Profiles of ruminal fermentation

For the kinetics of grass silage diets, the decreases in pH were similar between 0 and 1 h for wheat and PP (0.7 versus 0.6 points, NS). After 2 h, the pH remained stable for PP. For wheat, the pH decreased to become significantly lower ($P < 0.05$) than for PP between 4 and 8 h (Table 4). After 6 h, the pH with wheat in the diet increased to reach a similar value that of PP pH at the end of the kinetics assay (NS).

The VFA concentrations for wheat or for PP diets differed clearly during the kinetics assay. Wheat rapidly increased VFA concentrations up to 6 h, whereas PP increased VFA concentration only during the first hour and then remained relatively stable (NS). Between 4

and 8 h, the VFA concentrations were significantly higher for wheat than for PP ($P<0.01$) and the proportions of each VFA during the measurement period differed between the diets.

Overall the kinetics of acetate (C2) were similar between wheat and PP (NS). However, the slope of decrease in the proportion of C2 between 1 and 2 h was greater ($P<0.01$) for wheat than for PP. Propionate (C3) reached its highest proportion in the VFA later (1 h time lag) for wheat than for PP. The slopes of the curves were similar (NS) between 0 and 1 h for PP, and between 1 and 2 h for wheat. As of 2 h after access to feed was allowed, the proportion of C3 decreased clearly ($P<0.05$) for wheat and this continued up to 6 h, whereas it did not change for PP. After 2 h, the proportion of butyrate (C4) increased more rapidly for wheat than for PP ($P<0.01$). Thus, between 6 and 10 h, the proportion of C4 was significantly higher ($P<0.01$) for wheat than for PP.

For the kinetics of corn silage diets, the pH changes were similar for wheat and PP (NS, Table 5).

The total concentration of VFA for wheat peaked out at 4 h. Such a maximum was not observed for PP. However the modifications remained moderate (NS) compared to the grass silage-based diets.

The composition of the VFA hardly changed during the kinetics assay and in a similar way for wheat and PP with no significant differences. However, the proportion of C2 was lower for wheat from 1 to 10 h (in average -1.3 mol/100mol, NS), the proportion of C3 was systematically higher for wheat (in average +1.1 mol/100mol, NS), and the proportion of C4 was lower only the first 2 h after feed access for wheat.

Discussion

The starch supply of the forages did not influence the disappearance of the non-starchy fractions of wheat and PP. According to Rohr and Schlunsen (1986), the TMR may involve smaller effects. The disappearance rate of the slowly degradable starch fraction was higher for wheat than for PP (34 versus 5%/h). This wheat value was higher than the values observed by Tamminga et al. (1990) or Sauvant et al. (1994), 18 and 19%/h, respectively. These authors had classified potato starch among the slowly degrading starches (5%/h), confirmed by our results. Although PP contained more than 30% of fine particles (under 90 μm) versus only 1% for wheat, this should theoretically accelerate their disappearance. In fact, Cerneau and Michalet-Doreau (1991) had shown variations of 17 points for in situ corn starch degradation depending of the fineness of grinding (3 or 6 mm): this difference could be explained by elevated losses of particles and greater accessibility of starch for micro-organisms when the grinding was fine. A second consequence of a fine grinding could be the increase of the amylolytic activity (Martin and Michalet-Doreau, 1995). The nylon bag pore size in our trial could lead to over-estimated disappearance values because of considerable particles losses for PP through the pores. The available data from other studies did not make it possible to compare disappearance values because the degree of feedstuff grinding was never specified. Another over-estimation could involve the incorporation of the feedstuffs studied in sacco in the diets. The ruminal micro-organisms in our study probably had higher amylolytic activity, involving greater in sacco starch disappearance compared to standard laboratory diets. These conditions seemed to greatly affect the degradation rate of wheat starch but have no effect on potato starch, suggesting a smaller effect of the modification of amylolytic activity on the disappearance of slowly degrading starches. In our study, the disappearances of wheat and PP starches were similar between the grass silage and corn silage diets. Therefore, there was no

effect of the rapidly degrading starch of corn silage (according to our data, not shown) on the *in sacco* degradabilities of starch.

No interaction between concentrate and forage was observed for *in sacco* data. However, the profiles of ruminal fermentation showed differences between the two concentrates for the same forage, and differences between the two forages for the same concentrate. Wheat diets involved a greater and more rapid pH decrease after feed access than PP diets. The profiles of wheat and PP were very different in grass silage diets, but to a lesser extent in corn silage diets. According to Aldrich et al. (1993) and De Visser (1993), the pH decrease of the rumen fluid was smaller with a slowly degrading starch diet than with a rapidly degrading starch diet. De Visser (1993) specified that this effect was reduced in TMR. Only a few studies have shown pH kinetics after feeding (Aldrich et al., 1993). Our kinetics study showed that the presence of rapidly degrading starch involved a more rapid and greater ruminal pH decrease, confirming the observations of Aldrich et al. (1993). Differences in pH between wheat and PP for corn silage could be buffered by the presence of rapidly degrading starch in the two diets. However, the observed pH decreases in corn silage diets were smaller than in grass silage diets. It seems that corn silage limits the wheat starch effect on pH change after feeding. Sauvant et al. (1999) had estimated the acceptable pH value at 4 h to be under 5.5, beyond which acidosis could occur. These conditions had been expected for the four diets. So wheat like PP seemed not to enhance a risk of acidosis in this TMR context. The mixed distribution of all feedstuffs could explain a buffer phenomena mainly on quickness of fermentation.

Total VFA concentrations were higher for wheat than for PP mainly in grass silage diets. Slow-rapid starch comparisons have not shown significant differences for mean VFA concentrations of rumen fluid (De Peters and Taylor, 1985; Casper et al., 1990; Overton et al., 1995). However, in their review, Sauvant et al. (1994) showed an increase in the mean concentration of VFA when large amounts of rapidly degrading starch are degraded in the

rumen, which was confirmed by De Visser (1993). This effect was reduced in TMR according to Rohr and Schlunsen (1986). The presence of a VFA peak for the wheat / grass silage diet was also detectable for wheat / corn silage, even if the peak was lower. This observation may reflect the combined effects of the different starches present in the diet on VFA concentration or an effect of fiber type. In the literature cited, ruminal fermentations were studied using average values and not kinetics assay. This could mask temporary variations in VFA concentrations.

The starchy concentrate influenced the evolution of C2 at the beginning of the kinetics assay. Mc Carthy et al. (1989) and Overton et al. (1995) observed significantly higher values for slowly degrading starches, whereas Casper and Schingoethe (1989), Nocek and Tamminga (1991) and Yang et al. (1997) did not show any difference. According to Mc Carthy et al. (1989) and Overton et al. (1995), C2 differences between rapidly and slowly degrading starches (barley versus corn) were linked to variations in the amount of starch intake. This observation was probably more an effect of the amount of starch intake than an effect of starch type. In our study, starch intakes with the two concentrates were similar for a given forage. The starch type had no effect on mean values, but the variations in the proportions of C2 in total VFA were higher for wheat than for PP, and were higher in grass silage diets than in corn silage diets.

The change of the proportion of C3 in the VFA also differed between the two starchy concentrates in grass silage diets, whereas no difference was observed in corn silage diets. Generally, the propionate percentages were lower in slowly degrading starch than in rapidly degrading starch diets (Casper et al., 1990; Overton et al., 1995; Harmison et al., 1997). Only Khorasani et al. (1994) observed a significantly higher C3 value with corn grain than with barley in the diet. Mills et al. (1999) showed that a high starch intake enhanced a high C3 proportion during fermentation. By contrast, a high forage intake involved high C2 and C4

proportions. A possible reason for the variation in ruminal fermentation could be the ratio between degraded starch and fibers. But in our study, the levels of fiber intake corresponded to the values of the literature cited, without significant differences between the two concentrates for a given forage. Our observations were in agreement with those of Khorasani et al. (1994). That study from a kinetic approach made it possible to observe, after the start of feed intake, a rapid and considerable rise in C3 concentration for grass silage diets, with no effect of concentrate type in the diet. The kinetics clearly showed that mean values easily masked temporary variations. With our results, it seemed that the mean value of C3 was lower for rapidly degrading starch because of the very low values of this parameter at the end of the kinetics assay.

With grass silage diets, the change of the proportion of C4 was more rapid for wheat than for PP, involving higher C4 values after 6 h for wheat. In corn silage diets, this parameter varied similarly for wheat and PP. The corn / barley comparisons in the literature (Mc Carthy et al., 1989; Weiss et al., 1989; De Visser et al., 1990) showed no significant differences in C4 proportions. Casper and Schingoethe (1989), Casper et al. (1990), and Overton et al. (1995) showed significantly higher C4 proportions for diets with slowly degrading starches. Thus the amount of starch intake had a considerable impact on the C4 proportion. Therefore, for the trials with starch intakes of below 6 kg/d, the C4 proportion did not vary, except for the trials of Mc Carthy et al. (1989) and Weiss et al. (1989) with no difference reported even when the intakes were above 7 kg/day and with large differences between the compared starch sources. The significant variations in butyrate proportions for slowly-degrading starch diets were observed in trials in which starch intakes were higher than 7 kg/day, except Harmison et al. (1997), who reported a difference of 2.4 points for a starch intake of only 6 kg. Frequently, the starch intakes were higher for slowly degrading starch. Comparisons

between the profiles of ruminal fermentation require equivalent intakes; this was the case in our trial.

The VFA proportions were expressed in relation to the total VFA concentrations. So the change of one VFA amplifies the differences in the others. This data expression has some disadvantages, but it seems to be the most appropriate for drawing comparisons between different VFA and different diets.

Implications

In grass silage-based total mixed ration, the supply of wheat as starch source compared to a potato supply combined a higher energetic profit with a higher acidosis risk. With corn silage-based diets, the ruminal fermentation of wheat and potato were similar. So potatoes can be used in cattle nutrition, but their interest depend greatly of the forage used. This study dealt only with the ruminal aspects; milk production and composition studies are needed in order to understand the applicability of these data to production systems.

Literature Cited

- Aldrich, J.M., L. D. Muller, G. A. Varga, and L. C. Griel. 1993. Nonstructural carbohydrate and protein effects on rumen fermentation, nutrient flow, and performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 76:1091-1105.
- Alert, H.J., and S. Poppe. 1994. Trockensubstanz- und Nährstoffverlust bei Futtermitteln nach Inkubation im Pansen (Nylonbeutel-Technik). *Arch. Anim. Nutr.* 47:181-186.
- AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis*. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.

- Beyer, M., W. Jentsch, and L. Hoffmann. 1993. Einfluß der Stärkeherkünfte Gerste, Mais und Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 3. Mitteilung – Energieverwertung beim Rind. *Arch. Anim. Nutr.* 44:265-281.
- Casper, D.P., and D. J. Schingoethe. 1989. Lactational response of dairy cows to diets varying in ruminal solubilities of carbohydrates and crude protein. *J. Dairy Sci.* 72:928-941.
- Casper, D.P., D. J. Schingoethe, and W. A. Eisenbeisz. 1990. Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of nonstructural carbohydrate and crude protein. *J. Dairy Sci.* 73:1039-1050.
- Cerneau, P., and B. Michalet-Doreau. 1991. In situ starch degradation of different feeds in the rumen. *Reprod. Nutr. Dev.* 31:65-72.
- De Peters, E.J., and S. J. Taylor. 1985. Effects of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.* 68:2027-2032.
- De Visser, H. 1993. Characterization of carbohydrates in concentrates for dairy cows. In: P.G. Gainsworthy and D.J.A. Cole (ed.) *Recent Advances in Animal Nutrition*. p 19. University Press, Nottingham, United Kingdom.
- De Visser, H., P. L. Van der Togt, and S. Tamminga. 1990. Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage-based dairy cow rations. *Neth. J. Agric. Sci.* 38:487-498.
- Harmison, B., M. L. Eastridge, and J. L. Firkins. 1997. Effect of percentage of dietary forage neutral detergent fiber and source of starch on performance of lactating Jersey cows. *J. Dairy Sci.* 80:905-911.
- Hoover, W.H., C. J. Sniffen, and E. E. Wildman. 1976. Nutrive value of potato-based silages for dairy bulls. *J. Dairy Sci.* 59:1286-92.

- Jarrige, R. 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. 2nd ed. Inst. Natl. Rech. Agron., Paris, France.
- Jouany, J.P. 1982. Volatile fatty acid and alcohol determination in digestive contents, silage juices, bacterial cultures and anaerobic fermentor contents. *Sci. Aliments* 2:131-144.
- Jurjanz, S., O. Colin-Shoellen, J. N. Gardeur, and F. Laurent. 1998. Alteration of milk fat by variation in the source and amount of starch in a total mixed diet fed to dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81:2924-2933.
- Khorasani, G.R., G. De Boer, B. Robinson, and J. J. Kennelly. 1994. Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77:813-824.
- Littell, R.C., G. A. Milliken, W. W. Stroup, and R. D. Wolfinger. 1996. SAS[®] System for Mixed Models. SAS institute Inc., Cary, NC.
- Martin, C., and B. Michalet-Doreau. 1995. Variations in mass and enzyme activity of rumen micro-organisms: effect of barley and buffer supplements. *J. Sci. Food Agric.* 67:407-413.
- Mc Carthy, R.D., T. H. Klumeyer, J. L. Vicini, J. H. Clark, and D. R. Nelson. 1989. Effects of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72:2002-2016.
- Michalet-Doreau, B., R. Vérité, and P. Chapoutot. 1987. Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix* 69:5-7.
- Mills, J., J. France, and J. Dijkstra. 1999. A review of starch digestion in the lactating dairy cow and proposals for a mechanistic model. 2. Postruminal starch digestion and small intestinal glucose absorption. *J. Anim. Feed Sci.* 8:451-481.
- Nocek, J.E., and S. Tamminga. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598-3629.

- Ørskov, E. R., and J. Mc Donald. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci.* 92:499-503.
- Overton, T. R., M. R. Cameron, J. P. Elliott, J. H. Clark, and D. R. Nelson. 1995. Ruminal fermentation and passage of nutrients to the duodenum of lactating cows fed mixtures of corn and barley. *J. Dairy Sci.* 78:1981-1998.
- Rohr, K., and D. Schlunsen. 1986. The bearing of feeding methods on digestion and performance of dairy cows. In: Neiman-Sorensen (ed.) *Developments and future perspectives in research on rumen function.* p 227. University Press, Brussels, Belgium.
- Sauvant, D., P. Chapoutot, and H. Archimède. 1994. La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *Prod. Anim.* 7:115-124.
- Sauvant D., F. Meschy, and D. Mertens. 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Prod. Anim.* 12:49-60.
- Schneider, P.L., M. R. Stokes, L. S. Bull, and C. K. Walker. 1985. Evaluation of potato meal as a feedstuff for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 68:1738-43.
- Tamminga, S., A. M. Van Vuuren, C. J. Van Der Koelen, R. S. Ketelaar, and P. L. Van Der Togt. 1990. Ruminal behaviour of structural carbohydrates, non- structural carbohydrates and crude protein from concentrate ingredients in dairy cows. *Neth. J. Agr. Sci.* 38:513-526.
- Thivend, P., C. Mercier, and A. Guilbot. 1965. Dosage de l'amidon dans les milieux complexes. *Ann. Biol. Anim. Biochem. Biophys.* 5:513-526.
- Van Soest, P.J., and R. H. Wine. 1967. Use of detergents in analysis of fibrous feeds. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Offic. Agric. Chem.* 50:50-55.
- Weiss, W.P., G. R. Fisher, and G. M. Eriksson. 1989. Effect of source of neutral detergent fiber and starch on nutrient utilization by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72:2308-2315.

Yang, W.Z., K. A. Beauchemin, K. M. Koenig, and L. M. Rode. 1997. Comparison of hull-less barley, barley or corn of lactating cows: Effects on extent of digestion and milk production. *J. Dairy Sci.* 80:2475-2486.

Table 1: Composition and nutritive values of the different diets

Diet	Corn silage		Grass silage	
	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a
Ingredient, % of DM				
Wheat	22.0	0	30.5	0
PP ^a	0	25.5	0	27.6
Corn silage	56.8	50.8	0	0
Grass silage	0	0	63.8	61.9
Wheat straw	7.1	6.4	0	0
Mixed meal (rapeseed and soybean) ^b	12.4	15.5	5.1	9.4
Minerals ^c	1.7	1.8	0.6	1.1
DM of the diet, %	39	34	37	31
Nutritive values, /kg DM				
NE _i , Mcal	1.65	1.68	1.58	1.58
NDF, g	363	328	410	389
Starch, g	311	321	211	201
Crude Protein, g	137	134	144	138
Ash, g	46	43	70	71

^a PP potato peeling residues

^b Mixed meal treated with formaldehyde

^c Premix contained 6% P, 24% Ca, 1% Na, 5% Mg, 1% S, 0.38% Zn, 0.25% Mn, 0.1% Cu, 0.006% I, 0.003% Co and 0.001% Se.

Table 2: Composition and particles size distribution of starchy concentrates

Starchy concentrate	Wheat	PP ^a
DM, %	87.7	32.1
Composition of the DM, %		
Starch	64.5	69.0
NDF	15.7	10.7
Crude protein	12.6	6.8
Ash	2.0	2.5
Particle size, % of the mass		
< 0.09, mm	1.5 ± 0.4	31.6 ± 1.7
0.09 to 0.125, mm	4.6 ± 2.1	7.4 ± 1.0
0.125 to 0.2, mm	24.5 ± 2.2	12.9 ± 0.3
0.2 to 0.5, mm	20.6 ± 0.8	24.4 ± 0.4
> 0.5, mm	48.8 ± 2.5	23.7 ± 0.4

^a PP: potato peeling residues

Table 3: Nutrient intakes by dairy cows fed wheat or potato peelings (PP) with two silages

Diets	Corn silage		Grass silage		Effects			SEM
	Wheat	PP	Wheat	PP	Concentrate	Forage	Conc x For	
DMI, kg/d	19.7	20.5	17.3	15.9	NS	<0.01	NS	2.4
Starch intake, kg/d	6.1	6.6	3.6	3.2	NS	<0.01	NS	1.6
Nitrogen intake, g/d	432	440	400	350	NS	<0.01	NS	50
NDF intake, kg/d	7.0	7.0	7.2	6.3	NS	NS	NS	0.7

Table 4: Effect of the starchy concentrate in a grass silage-based diet on the profile of rumen fermentation

Sampling time	pH		VFA, mmol/L				Acetate, mol/100mol		Propionate, mol/100mol		Butyrate, mol/100mol				
	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a			
0	6.86	6.73	96	91	56.6	*	53.2	25.4	25.6	13.8	*	16.2			
1	6.09	6.10	122	116	55.4	*	51.5	26.9	†	29.4	14.0	14.9			
2	6.12	6.18	129	117	50.1		50.7	30.1		29.0	15.4	15.7			
4	5.75	**	6.18	144	**	112	50.3	51.4	26.9		27.9	18.1	†	16.3	
6	5.53	**	6.25	151	**	111	50.5	49.8	24.7	*	28.2	20.2	**	17.4	
8	5.90	**	6.25	136	**	112	50.3	52.1	23.1	**	26.9	21.6	**	16.6	
10	6.15		6.05	123		121	46.2	*	50.3	25.7	†	28.2	22.4	**	17.0
Effects															
Concentrate	<i>P</i> <0.10		<i>P</i> <0.01				NS		<i>P</i> <0.05		<i>P</i> <0.01				
Conc x Time	<i>P</i> <0.01		<i>P</i> <0.01				<i>P</i> <0.05		NS		<i>P</i> <0.01				
SEM	0.43		22				4.0		3.1		2.9				

^a potato peeling residues

†Wheat and PP were different (*P*<0.10) within measurement and time shown

* Wheat and PP were different (*P*<0.5) within measurement and time shown

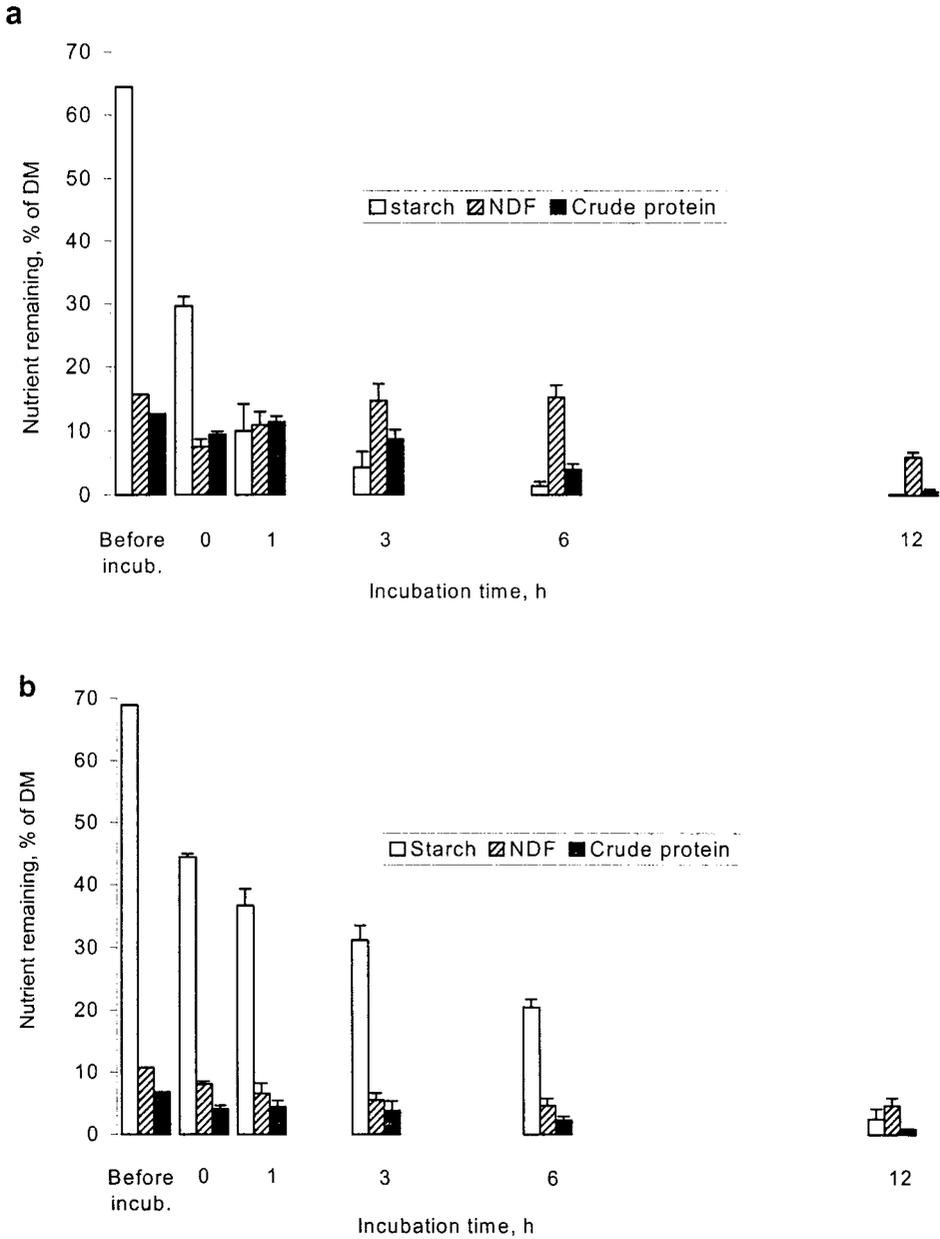
** Wheat and PP were different (*P*<0.01) within measurement and time shown

Table 5: Effect of the starchy concentrate in a corn silage-based diet on the profile of rumen fermentation

Sampling time	pH		VFA, mmol/L		Acetate, mol/100mol		Propionate, mol/100mol		Butyrate, mol/100mol	
	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a	Wheat	PP ^a
0	6.62	6.59	104	98	50.6	50.1	25.7	24.8	17.1	19.3
1	6.02	5.92	113	118	50.6	50.7	26.6	25.6	17.0	19.2
2	6.09	6.14	109	114	48.0	50.2	26.6	25.2	19.0	20.0
4	5.74	6.03	132	120	46.8	49.7	26.8	25.6	20.1	19.9
6	5.73	5.80	123	124	47.5	50.0	26.2	25.3	20.4	20.0
8	5.83	5.95	120	123	47.5	48.7	26.2	25.5	20.5	21.0
10	5.71	5.78	130	125	47.7	48.6	26.4	25.3	20.5	21.5
Effects										
Concentrate	NS		NS		NS		NS		NS	
Conc x Time	NS		NS		NS		NS		NS	
SEM	0.40		19		3.9		3.3		2.7	

^a potato peeling residues

Figure 1. Residues of the starch, NDF, and crude protein fractions of wheat (a) and potato peeling residues (b) during in sacco incubation. The values are the averages of the grass silage and corn silage diets.



Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques de vaches laitières

JURJANZ S., COLIN-SCHOELLEN O., LAURENT F.

Laboratoire de Sciences Animales, INRA - ENSAIA, 2 avenue de la forêt de Haye,
B.P. 172, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Titre courant : performances zootechniques de vaches laitières et nature d'amidon

Résumé - Douze vaches laitières sont utilisées dans un schéma expérimental en carré latin pour étudier l'effet de 2 sources d'amidon (pomme de terre et blé) et de la supplémentation en méthionine protégée (0 ou 19 g/jour) sur leurs performances zootechniques. Les rations complètes, assurant des apports isoénergétiques et isoazotés, sont composées d'un mélange ensilage de maïs+paille, de tourteau de soja, de tourteaux tannés (colza-soja), de minéraux et, soit de blé, soit de résidus de découpe de pomme de terre, et sont supplémentées ou non en méthionine.

Il n'y a pas d'effet significatif des traitements sur la matière sèche ingérée (22,1 kg), la production laitière (27,0 kg), la teneur en lactose (50 g/kg), la quantité de matière protéique (912 g/jour) et le gain de poids (338 g/jour). Le taux butyreux, la quantité de matière grasse et le lait 4% sont significativement plus faibles avec le concentré « blé » (respectivement 34,2 contre 38,0 g/kg pour les pommes de terre, $p < 0,01$; 958 contre 1045 g/jour, $p < 0,01$; 25,5 contre 26,5 kg/jour, $p < 0,10$), l'urémie et l'ANP du lait plus élevés (respectivement 0,38 contre 0,27 g/l, $p < 0,01$; 320 contre 272 mg/l, $p < 0,01$).

Le taux protéique n'est pas significativement affecté par la nature de l'aliment concentré mais les vaches recevant les rations « méthionine » ont un TP significativement plus élevé (33,0 contre 32,2 g/kg, $p < 0,01$).

nature d'amidon / vache laitière / composition du lait / méthionine

Summary - Effect of the starch nature of the energy concentrate and of a methionine supply on the rearing performance of dairy cows. The effect of 2 starch sources (potatoes and wheat) as a supply of rumen protected methionine is studied in a latin square design using 12 dairy cows. Both diets are composed of maize silage, wheat straw, soybeanmeal, formaldehyde treated mixmeal (rape and soybean) and minerals supplemented by wheat or potato pelling residues. The diets have similar contents of energy (0,91 UFL/kg DM) and protein (105 g PDI/kg DM). They are supplied with or without 19 g of rumen protected methionine.

No effect was observed on the dry matter intake (22,1 kg/day), the milk yield (27,0 kg/day), the lactose content (50 g/kg), the protein yield (912 g/day) and the weight gain (338 g/day). The fat content, the fat yield and the yield of standard milk (4% of fat) were lower with the wheat diet (respectively 34,2 vs 38,0 g/kg for potato diet, $p < 0,01$; 958 vs 1045 g/day, $p < 0,01$; 25,5 vs 26,5 kg/day, $p < 0,10$), but the ureamia and the non protein nitrogen content of the milk were higher (respectively 0,38 vs 0,27 g/l, $p < 0,01$; 320 vs 272 mg/l, $p < 0,01$).

The methionine supply increases the protein content (33,0 vs 32,2 g/kg, $p < 0,01$) but there's no significant effect of the starch source on this parameter.

starch source / dairy cow / milk composition / methionine

INTRODUCTION

La couverture des besoins énergétiques de la vache laitière haute productrice nécessite l'utilisation d'une proportion élevée d'aliments concentrés. Suite à la baisse du prix des céréales, leur incorporation dans les rations est devenue intéressante d'un point de vue économique. Le blé est constitué d'un amidon très vite dégradé dans le rumen (SAUVANT et

al., 1994) et peut induire des chutes importantes du taux butyreux (TB) (HURTAUD et al., 1992). En revanche, l'amidon de la pomme de terre, caractérisé par une teneur plus élevée en amylopectine (SWINKELS, 1985), a une dégradation ruminale plus lente (ALERT et POPPE, 1994). Ainsi un éventuel effet positif sur le taux protéique pourrait ne pas s'accompagner avec ce complément énergétique d'une chute du TB .

Avec les rations à base d'ensilage de maïs complémentés avec du tourteau de soja, la méthionine et la lysine sont les premiers acides aminés limitants (RULQUIN, 1992). Une supplémentation en méthionine protégée contre les dégradations ruminales devrait permettre de lever la limitation en cet acide aminé. La teneur en lysine étant particulièrement élevée pour la pomme de terre (VOIGT et al., 1993 ; BRANCO-PARDAL et al., 1995), la comparaison de deux rations supplémentées en méthionine devrait permettre d'étudier l'effet de l'apport supplémentaire de lysine par la pomme de terre.

L'objectif de cet essai est de comparer deux sources d'amidon (résidus de découpe de pomme de terre et blé), apportées en complément de rations à base d'ensilage de maïs, en interaction avec une supplémentation en méthionine, quant à leurs effets sur les performances zootechniques de vaches laitières.

MATERIEL ET METHODES

Dispositif expérimental

L'essai est conduit selon un schéma expérimental en carré latin (4x4) avec deux traitements à deux modalités : nature de l'amidon du complément énergétique (blé ou résidus de découpe de pommes de terre) et supplémentation en méthionine ou non. Après une période préexpérimentale de 2 semaines, 12 vaches (dont 4 primipares) sont allotées en 3 quadruplets (carré ou bloc) en fonction de la parité, du stade de lactation, de la moyenne préexpérimentale pour la production laitière ($29,7 \pm 5,6$ kg/jour) et le taux protéique ($29,3 \pm$

2,3 g/kg). Chaque carré débute l'essai au même stade de lactation moyen (54 ± 3 jours post-partum). Pour chaque carré, la succession des traitements est déterminée par tirage aléatoire. Chacune des périodes expérimentales a une durée de 28 jours, les mesures étant effectuées pendant les 10 derniers jours.

Tableau II : Composition et valeur nutritive estimée des rations

Source d'amidon	Ration « blé »	Ration « pomme de terre »
Composition (% MS)		
Ensilage de maïs + 5% de paille blé	61,8	57,5
pommes de terre	0	21,0
tourteau de soja	11,9	13,6
tourteaux tannés (soja/colza)	5,9	5,8
minéraux	2,9	2,1
Composition chimique		
% amidon	34,5	35,2
% glucides solubles	3,0	2,8
% MAT	15,5	15,0
% NDF	33,0	32,3
% ADF	17,5	17,1
% cendres totales	4,6	4,6
Valeur nutritive estimée (par kg)		
MS	45,0	40,0
UFL ¹	0,91	0,91
PDIN ¹	109	104
PDIE ¹	112	113
%PDIA/PDI	53	54

¹ estimé d'après Faverdin et al. (1987)

Les animaux reçoivent une ration complète à base d'ensilage de maïs, de paille de blé, de tourteau de soja, d'un mélange tourteaux tannés de soja et de colza (50 : 50), de blé ou de résidus de découpe de pomme de terre (« screening » McCain, Harnes, France) et d'un complément minéral. Les résidus de découpe de pommes de terre ont été ensilés dès réception (tableau I). Les proportions des différents constituants de la ration sont établies de manière à ce que les teneurs en énergie et en azote soient semblables (tableau II). Pour chacune des 2 rations, 19 g par vache et par jour de méthionine protégée contre les dégradations ruminales ("Smartamine", Rhône Poulenc Nutrition Animale, Commeny,

France) ont été distribués pour couvrir un éventuel déficit. Pendant la période préexpérimentale, la ration « blé non enrichie en méthionine » a été distribuée à tous les animaux.

La ration est distribuée à volonté une fois par jour, l'accès étant individualisé par des portillons électroniques.

Mesures

L'ingestion individuelle est mesurée 5 jours par semaine par pesée des quantités distribuées et des refus et détermination des teneurs en matière sèche correspondantes. Une analyse chimique (MS, MAT, ADF, NDF, cendres totales) est effectuée sur chaque aliment (excepté le complément minéral et la paille de blé). Pour chaque ration un échantillon hebdomadaire est prélevé et un échantillon moyen reconstitué par mois est analysé pour les mêmes paramètres plus la teneur en amidon. Les valeurs UFL et PDI des rations ont été calculées à partir des estimations des valeurs nutritives des différents aliments (valeurs calculées à partir de leur composition chimique et des tables INRA, 1988) et corrigées des interactions digestives pour la valeur UFL (VERMOREL et al., 1987).

La production laitière est enregistrée à chaque traite (système ISALAIT 2045). Le taux protéique, le taux butyreux, la teneur en lactose (analyse par infrarouge, analyseur IRMA) et le dénombrement cellulaire (comptage des noyaux, Fossomatic) sont déterminés sur 4 traites consécutives à 2 reprises pendant les 10 derniers jours de chaque période. La nature des matières azotées des laits individuels (azote total, azote soluble à pH 4,6 et azote non-protéique ; ROWLAND, 1938) est déterminée sur 4 échantillons pondérés reconstitués par jour de prélèvements. Les teneurs en azote protéique et en azote caséique du lait sont calculées à partir de ces mesures.

Les animaux sont pesés lors de 2 journées consécutives à la fin de chaque période expérimentale, à heure fixe. Pour chaque période expérimentale le gain de poids vif, corrigé des variations de l'ingestion (CHILLIARD et al., 1987), est calculé.

Les taux de couverture des besoins des animaux en UFL et en PDI sont calculés selon les propositions de FAVERDIN et al. (1987).

Des prélèvements sanguins sont réalisés lors de deux journées consécutives pour chaque période en parallèle avec les prélèvements de lait, par ponction dans la veine caudale (dans des tubes héparinés). La séparation du plasma sanguin est assurée par centrifugation. Les teneurs en AGNE (dosage enzymatique colorimétrique, Unipath), la glycémie (dosage enzymatique, Merck) et l'urémie (dosage enzymatique colorimétrique, Biotrol) sont déterminées à partir des échantillons de plasma congelé.

Traitement des données

Les moyennes individuelles par période ont fait l'objet d'une analyse de variance (procédure GLM du logiciel SAS, 1987). Le modèle tient compte des effets suivants :

$$X = \alpha(\text{traitement}) + \beta(\text{période}) + \delta(\text{interaction traitement}^*\text{période}) + \gamma(\text{carré}) + \lambda(\text{individu}(\text{carré})) + \varepsilon$$

Les effets des deux facteurs étudiés ainsi que leur interaction sont testés par la méthode des contrastes (DAGNELIE, 1973).

RESULTATS

Performances zootechniques

Les rations ont les mêmes teneurs en amidon et en fibres. Elles sont isoénergétiques (tableau II) et présentent un écart PDIE-PDIN de 10 g/UFL.

La matière sèche moyenne ingérée (22,1 kg/jour) et la production moyenne de lait brut (27,0 kg/jour) ne sont significativement affectées ni par la nature du complément énergétique ni par la supplémentation en méthionine.

Le taux butyreux (TB) est significativement plus élevé pour les régimes « pomme de terre » par rapport aux régimes « blé » (38,0 contre 34,2 g/kg, $p < 0,01$). Les vaches du régime « pommes de terre » produisent en moyenne 1 kg de lait à 4% de matière grasse de plus ($p < 0,10$) (tableau III). La quantité de matière grasse produite est également plus élevée (en moyenne +86 g/jour, $p < 0,01$), l'écart pomme de terre-blé étant particulièrement marqué entre les 2 rations supplémentées en méthionine (+101 g/jour, $p < 0,05$). En moyenne la supplémentation en méthionine n'influence pas le TB, la production de lait à 4% de matière grasse et la quantité de matière grasse produite.

Il n'y a pas d'effet significatif de la source d'amidon sur le taux protéique (32,6 g/kg). Par contre celui-ci est significativement plus élevé pour les rations supplémentées en méthionine (+0,7 g/kg, $p < 0,01$). L'effet de la supplémentation est plus marqué pour les rations à base de pomme de terre (+1 g/kg, $p < 0,05$) que pour les rations enrichies en blé (+0,5 g/kg, NS) (tableau III). La quantité de matière protéique produite (911 g/jour en moyenne) n'est significativement influencée ni par la nature de l'amidon ni par la supplémentation en méthionine.

Le gain moyen quotidien corrigé des variations d'ingestion (CHILLIARD et al., 1987) ne varie pas en fonction des traitements (tableau III).

Nature des matières azotées du lait

Les laits des rations contenant du blé ont des teneurs en azote soluble à pH 4,6 et en azote non protéique significativement supérieures aux laits des rations contenant des pommes de terre (respectivement +70 mg/l et +48 mg/l, $p < 0,01$). La proportion d'azote caséique dans l'azote protéique est significativement plus faible (-0,3 %, $p = 0,05$), la proportion d'ANP dans l'azote total significativement plus élevée (+0,8 %, $p < 0,01$) pour les rations « blé ».

Les teneurs en azote total, azote protéique, azote caséique et azote soluble à pH 4,6 du lait varient significativement avec la supplémentation en méthionine (tableau IV), le lait des régimes supplémentés présentant des teneurs plus élevées (respectivement +121 mg/l, $p < 0,05$; +116 mg/l, $p < 0,10$; +94 mg/l, $p < 0,10$; +26 mg/l, $p < 0,05$). La supplémentation en méthionine n'a pas fait varier la teneur en ANP du lait.

Paramètres sanguins

La teneur du plasma sanguin en acides gras non estérifiés et la glycémie ne varient pas avec le type de complément énergétique ou la supplémentation en méthionine. L'urémie est significativement plus élevée pour les régimes « blé » (+0,11 g/l, $p < 0,01$) (tableau IV) alors qu'elle ne varie pas avec la supplémentation en méthionine.

DISCUSSION

SAUVANT et al. (1994) ont classé l'amidon de pomme de terre dans la catégorie des amidons lentement dégradables comme le maïs et le sorgho. JENTSCH et al. (1992) et ALERT et POPPE (1994) constatent de faibles différences de digestibilité de l'énergie (totale et ruminale respectivement) entre le maïs et la pomme de terre pour des rations contenant plus de 25% de concentrés. Le maïs grain est sans doute un des compléments énergétiques dont l'amidon est le plus proche de celui des pommes de terre malgré de légères différences de comportement dans le tube digestif.

Le niveau d'ingestion égal à 3,4 kg/100 kg de poids vif est voisin des valeurs habituellement rapportées pour les rations à base d'ensilage de maïs. Différents auteurs enregistrent une augmentation de la matière sèche ingérée pour des rations de type « amidon lent » (maïs grain) par rapport au type « amidon rapide » (orge), soit pour des apports isoénergétiques et isoazotés (CASPER et SCHINGOETHE, 1989), soit dans le cas d'apports différents

(CASPER et al., 1990 ; McCARTHY et al., 1989). Cet effet lié au rythme de fermentation de l'amidon n'a pas été retrouvé dans nos conditions expérimentales.

La nature de l'amidon ne semble pas influencer la production de lait brut. Nos résultats confirment les observations de REARTE et al. (1989), DE VISSER et al. (1990) et KHORASANI et al. (1994). Par contre POORE et al. (1993), CASPER et SCHINGOETHE (1989) et McCARTHY et al. (1989) observent une augmentation de la production de lait brut avec l'augmentation de la quantité d'amidon digestible dans l'ensemble du tube digestif. SAUVANT et VAN MILGEN (1995) expliquent l'augmentation de la production laitière pour un amidon lentement dégradable par une ingestion plus élevée de matière sèche. NOCEK et TAMMINGA (1991) constatent que la production laitière varie plus en fonction de la quantité totale d'amidon digéré que de la nature de l'amidon (pour une digestibilité totale voisine de 90%) et du lieu de sa digestion. Dans notre essai la part d'amidon apporté par le blé ou les résidus de découpe de pommes de terre représente 35% et 40% respectivement de l'apport d'amidon total. Cet apport est peut être trop faible pour induire un effet sur la production laitière.

HERRERA-SALDANA et HUBER (1989), CASPER et al. (1990) et KHORASANI et al. (1994) observent un TB plus élevé avec un apport de glucides non structuraux lentement fermentescibles, ce qui est en accord avec nos résultats. En effet, la dégradation lente des glucides non structuraux au niveau du rumen favorise la production d'acides gras volatiles de type C₂ (McCARTHY et al., 1989 ; POORE et al., 1993) ou C₄ (CASPER et SCHINGOETHE, 1989 ; CASPER et al., 1990 ; MUNOZ-ARBOLEDA, 1995) entraînant un effet favorable sur la synthèse de matière grasse au niveau de la glande mammaire (DE VISSER 1993). McCARTHY et al. (1989) observent un TB plus faible pour le traitement « amidon lent » mais la production de lait brut a augmenté simultanément. Par contre REARTE et al. (1989) et DE VISSER et al. (1990) n'observent aucune variation significative du TB en fonction de la nature de l'amidon pour des rations à base d'herbe fraîche ou ensilée. Ils expliquent la non-réponse du TB par, d'une part, la nature du fourrage utilisé et, d'autre part, le fort pouvoir tampon de la ration complète. L'ampleur de la diminution du TB observée avec la ration blé (-

3,75 g/kg) est particulièrement importante et peut paraître surprenante compte tenu du TB moyen (36 g/kg). En effet SAUVANT et al. (1994) estiment que la vitesse de dégradation de l'amidon a peu d'influence sur le TB pour des rations qui induisent des taux butyreux normaux (>35 g/l). L'augmentation de la quantité de matière grasse et du lait à 4% de matière grasse pour la ration « pomme de terre » résultent normalement des effets observés sur la production de lait brut et sur le TB.

La nature de l'amidon semble avoir une influence faible sur le TP (SAUVANT et al., 1994) quand la quantité de matière organique fermentescible apportée par la ration est suffisante, correspondant à la capacité de dégradation de la population microbienne (DE VISSER, 1993). Ces observations rejoignent celles de DE PETERS et TAYLOR (1985), HERRERA-SALDANA et HUBER (1989), DE VISSER et al. (1990), GRINGS et al. (1992) et KHORASANI et al. (1994). MOREL d'ARLEUX et al. (1995) constatent une augmentation du TP dans deux essais en ajoutant des pommes de terre à la ration témoin. Cet effet peut être en partie lié à la production laitière inférieure pour la ration "pomme de terre" et à l'apport supplémentaire d'énergie. Dans nos conditions expérimentales, le TP est relativement élevé (32 à 33 g/kg) et sans doute proche du potentiel génétique des animaux, ce qui pourrait rendre difficile la mise en évidence d'un éventuel effet de la nature de l'aliment concentré.

L'importance de la synchronisation de la vitesse de dégradation ruminale de l'azote et des glucides non structuraux n'est pas encore clairement établie (REARTE et al., 1989 ; CASPER et al., 1990 ; SAUVANT et al., 1994 ; MUNOZ-ARBOLEDA, 1995). Dans le cas d'une non-synchronisation de la disponibilité de l'azote et de l'énergie dans le rumen, l'urémie (MUNOZ-ARBOLEDA, 1995) et l'excrétion d'ANP dans le lait pourraient augmenter comme nous l'avons observé dans nos conditions expérimentales pour la ration complémentée en blé. SAUVANT et VAN MILGEN (1995) observent une urémie accrue pour la combinaison azote et glucide rapides par rapport à la combinaison glucide lent et azote rapide. Cependant la nature des glucides n'a aucun effet sur l'urémie si elle a lieu avec un azote lentement dégradable. La teneur en ANP du lait est en étroite relation avec l'équilibre PDI/UFL de la ration (VIGNON et LAURENT, 1979). Dans cet essai, malgré des valeurs UFL

et PDI calculées peu différentes entre les différentes rations, un apport en PDIN supérieur pour la ration blé (+110 g) par rapport à la ration pomme de terre pourrait expliquer une excrétion accrue d'ANP dans le lait et l'élévation de l'urémie. L'écart entre teneurs en PDIE et PDIN plus élevé pour la ration pomme de terre (9 contre 3 g/kg MS pour la ration blé) peut jouer également dans le sens d'un moindre gaspillage d'azote. Dans tous les cas, le fort taux de couverture des besoins azotés peut conduire à des teneurs en ANP du lait relativement élevées.

Nous n'observons pas d'effet significatif de la nature de l'aliment concentré sur les gains de poids vif vide mais ceux-ci ont été mesurés sur des courtes périodes. Ils sont positifs pour tous les traitements, ce qui correspond à des taux calculés de couverture des besoins largement excédentaires (UFL : 118 à 124%, PDIN : 131 à 137%, PDIE : 139 à 144%). Les écarts observés sur les taux de couverture des besoins en UFL et PDIN ne sont pas importants compte-tenu de la précision de ces calculs.

L'augmentation du taux de protéines et de caséines du lait liée à la supplémentation en méthionine correspond aux résultats rapportés par RULQUIN (1992) et COLIN-SCHOELLEN et al. (1995). Dans nos conditions expérimentales la supplémentation en méthionine du régime « pomme de terre » est accompagnée par une augmentation du taux protéique plus importante que pour le régime « blé ». Après la levée de la limitation en méthionine, l'apport plus important en lysine par la pomme de terre (VOIGT et al., 1993 ; BRANCO-PARDAL et al., 1995) pourrait être à l'origine de cette réponse plus marquée.

L'effet de la nature de l'amidon sur la part des caséines dans les protéines est peu habituel. Cependant les différences observées sont faibles et significatives uniquement pour les rations supplémentées en méthionine.

CONCLUSIONS

Dans nos conditions expérimentales, une ration complète à base d'ensilage de maïs complétée avec 21% de pommes de terre permet de maintenir un TB correct, ce qui n'est pas le cas avec 17,5% de blé dans la ration. La quantité de matière grasse et la production de lait à 4% sont plus élevées pour les rations « pomme de terre ». Afin de préciser l'effet de la vitesse de dégradation de l'amidon il serait intéressant d'étudier son influence dans des rations où la part de l'amidon apporté par la ration de base est plus faible. Par ailleurs, une comparaison de l'ampleur de la réponse du TB dans des conditions plus favorables à un niveau plus élevé du TB compléterait cet essai.

L'urémie plus forte associée à une excrétion plus élevée d'azote non-protéique dans le lait pour la ration « blé » par rapport à la ration « pomme de terre » peut avoir plusieurs origines : excédent de PDIN ainsi qu'une dégradation ruminale éventuellement non-synchronisée de l'amidon et de l'azote.

La supplémentation en méthionine permet d'augmenter le taux protéique du lait sans variation significative du lait brut. Cet effet semble plus accentué avec les pommes de terre qu'avec le blé.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la société Rhône Poulenc Nutrition Animale pour la mise à disposition de la méthionine protégée ainsi que le personnel du domaine expérimental de la Bouzule pour leur travail lors du déroulement de l'essai.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alert H.J., Poppe S. (1994) : Trockensubstanz- und Nährstoffverlust bei Futtermitteln nach Inkubation im Pansen (Nylonbeuteltechnik). *Arch. Anim. Nutr.* 47, 181-186
- Branco-Pardal P., Lalles J.P., Formal M., Guilloteau P., Toullec R. (1995): Digestion of wheat gluten and potato protein by the preruminant calf : digestibility, amino acid composition and immunoreactive proteins in ileal digesta. *Reprod. Nutr. Dév.* 35, 639-654
- Casper D.P., Schingoethe D.J. (1989) Lactational response of dairy cows varying in ruminal solubilities of carbohydrate and crude protein. *J. Dairy Sci.* 72, 928-941
- Casper D.P., Schingoethe D.J., Eisenbeisz W.A. (1990) Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of nonstructural carbohydrates and crude protein. *J. Dairy Sci.* 73, 1039-1050
- Chillard Y., Remond B., Agabriel J., Robelin J., Verité R. (1987) Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bull. Tech. Cent. Rech. Zoot. Vet. Theix* 70, 117-131
- Colin-Schoellen O., Laurent F., Vignon B., Robert J.C., Sloan B. (1995) : Interactions of ruminally protected methionine and lysine with protein source or energy level in the diets of cows. *J. Dairy Sci.* 78, 2807-2818.
- Dagnelie P. (1973) : *Théorie et méthodes statistiques*. Vol. 2. les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 451p.
- De Peters E.J., Taylor S.J. (1985) Effect of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.* 68, 2027-2032
- De Visser H., Van Der Togt P.L., Tamminga S. (1990) Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage based dairy cow rations. 1. Feed intake and milk production. *Netherlands J. Agriculture and Science* 38, 487-498
- De Visser H. (1993) Characterization of carbohydrates in concentrates for dairy cows. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*. ed. P.G. Garnsworthy, D.J.A., Nottingham, University Press, 19-38
- Faverdin P., Hoden A., Coulon J.B. (1987) Recommandations alimentaires pour les vaches laitières. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix INRA* 70, 133-153
- Grings E.E., Roffler R.E., Deitelhoff D.P. (1992) Evaluation of corn and barley as energy sources for cows in early lactation fed alfalfa based diet. *J. Dairy Sci.* 75, 193-200
- Herrera-Saldana R.E., Huber J.T. (1989) Influence of varying protein and starch degradabilities on performance of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72, 1477-1483

- Hurtaud C., Rolquin H., Verité R. (1992) Effect on milk yields and composition of inferior of different levels and natures of energy into digestive tract of dairy cows. *Ann. Zoot.* 41, 102
- INRA (1988) : *Alimentation des bovins, ovins et caprins* (R. Jarrige, ed.) INRA, Paris, 476p.
- IO7, Version 1995. *Base de données AFZ de l'alimentation animale* (Tran G., Bonetti B., Lapierre O., INA PG)
- Jentsch W., Wittenburg H., Beyer M. (1992) Einfluss der Stärkeherkünfte Gerste, Mais, Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 1. Mitteilung - Vergleichende Untersuchungen zur Nährstoffverdaulichkeit bei Rind und Schaf. *Arch. Anim. Nutr.* 42, 301-316
- Khorasani G.R., De Boer G., Robinson B., Kennelly J.J. (1994) Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77, 813-824
- McCarthy R.D., Klusmeyer T.H., Vicini J.L., Clark J.H., Nelson D.R. (1989) Effect of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72, 2002-2016
- Morel d'Arleux F., Marechal M., Samson R., de Montigny A., Lebrun J.M., Ratier F. (1995) Utilisation des pommes de terre par les vaches laitières. *Ann. Zoot.* 44 Suppl., 378
- Munoz-Arboleda L.S. (1995) Influence de la nature des glucides des aliments concentrés sur la digestion des ruminants. *Thèse de Doctorat INA Paris-Grignon*, 144p
- Nocek J.E., Tamminga S. (1991) Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74, 3598- 3629
- Poore M.H., Moore J.A., Swingle R.S., Eck J.P., Brown W.H. (1993) Response of lactating holstein cows to diets varying in fiber source and ruminal starch degradability. *J. Dairy Sci.* 76, 2235-2243
- Rearte D.H., Benardino J.Di., Penalta R. (1989) Supplementation of concentrate of different starch and protein degradability in rumen, to dairy cows grazing high quality pasture. *J. Dairy Sci.* 72 Suppl. 1, 539
- Rowland S.J. (1938) The determination of the nitrogen distribution in milk. *J. Dairy Sci.* 19, 42-46
- Rulquin H. (1992) Interêts et limites d'un apport en méthionine et de lysine dans l'alimentation des vaches laitières. *INRA Prod. Anim.* 5, 29-36
- SAS ® Guide for Personal Computers, Version 6.04 Edition. 1987. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- Sauvant D., Chapoutot P., Archimede H. (1994) La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.* 7, 115-124

- Sauvant D., Van Milgen J. (1995) Les conséquences de la dynamique de la digestion des aliments sur le métabolisme ruminal et les performances animales. *INRA Prod. Anim.* 8, 353-367
- Swinkels J.J.M. (1985) Sources of starch, its chemistry and physics. In *starch conversion technology*, ed. by G.M.A. VanBeynum, J.A. Roels, Marcel Dekker Inc., New York, 15-46
- Vermorel M, Coulon J.B., Journet M. (1987) Révision du système des unités fourragères (UF). *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix INRA* 70, 9-18
- Vignon B., Laurent F. (1979) : Influence de l'alimentation des ruminants sur la teneur en azote non protéique du lait. *Ann. Nutr. Alim.* 33, 569,
- Voigt J., Jentsch W., Schönhusen U., Beyer M., Kreienbring F. (1993) Einfluss der Stärkeherkünfte Gerste, Mais, Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 4. Mitteilung - Stickstoffumsatz im Pansen. *Arch. Anim. Nutr.* 44, 369-382

Tableau I : Composition chimique et valeur nutritive estimée des différents aliments

ALIMENT	MS (%)	MAT (%MS)	CB (%MS)	ADF (%MS)	NDF (%MS)	CENDRES (%MS)	AMIDON (%MS)	UFL ² (par kg MS)	PDIN ² (par kg MS)	PDIE ² (par kg MS)
ensilage de maïs	33,3	6,9	16,8	22,9	41,5	3,2	35,9	0,93	42	67
blé	85,2	13,7	2,0	3,3	12,0	2,0	69,0 ¹	1,24	94	113
pommes de terre	22 à 40	5,9	2,7	5,0	14,6	1,9	67,5	1,22	34	94
tourteaux tannés (soja/colza)	86,5	47,1	8,1					1,13	381	364
tourteau de soja	87,2	52,8	4,6					1,19	376	256

¹ d'après IO7 (1995)

² estimé d'après FAVERDIN et al. (1987)

Tableau III : Effet des différents traitements sur les performances zootechniques

	p.d.t.	p.d.t.	blé	blé	ETR	seuil de signification		
	0	mét.	0	mét.		pdt - blé	suppl. mét	interaction
MS ingérée (kg/jour)	21,9	22,2	22,2	22,2	1,24	NS	NS	NS
lait brut (kg/jour)	26,6	26,9	27,2	27,4	1,44	NS	NS	NS
lait 4% (kg/jour)	26,6 A	26,5 A	25,8 AB	25,2 B	1,92	0,07	NS	NS
TB (g/kg)	38,0 a	37,9 a	34,7 b	33,7 b	2,90	< 0,01	NS	NS
TP (g/kg)	32,0 b	33,0 a	32,5 ab	33,0 a	0,94	NS	0,01	NS
TL (g/kg)	50,3	49,7	50,4	50,1	0,92	NS	0,10	NS
matière grasse (g/jour)	1050 a	1039 a	979 ab	938 b	103	<0,01	NS	NS
matière prot. (g/jour)	888	914	914	930	55	NS	NS	NS
GMQ (g/jour)	384	251	252	467	607	NS	NS	NS

a,b lettres différentes indiquent une différence significative au seuil de 5%

A,B lettres différentes indiquent une différence significative au seuil de 10%

Tableau IV : Effet des différents traitements sur la nature des matières azotées du lait et sur les paramètres sanguins

	p.d.t.	p.d.t.	blé	blé	ETR	seuil de signification		
	0	mét.	0	mét.		pdt - blé	suppl. mét	interaction
N total (mg/l)	5432 b	5596 ab	5554 ab	5632 a	203	NS	0,05	NS
N protéique (mg/l)	5163 B	5322 A	5236 AB	5311 A	212	NS	0,07	NS
N caséique (mg/l)	4241 B	4383 A	4298 AB	4344 AB	178	NS	0,08	NS
N soluble (mg/l)	1191 c	1213 c	1256 b	1288 a	38	<0,01	0,02	NS
ANP (mg/l)	269 b	274 b	318 a	321 a	21	<0,01	NS	NS
% N cas. / N protéique	82,2 ab	82,3 a	82,1 ab	81,8 b	0,5	0,05	NS	NS
% ANP /N total	5,0 b	4,9 b	5,8 a	5,7 a	0,5	<0,01	NS	NS
AGNE (μ mol/l)	55,3	58,2	76,3	54,1	42,9	NS	NS	NS
Glycémie (g/l)	0,60	0,62	0,64	0,61	0,08	NS	NS	NS
Urémie (g/l)	0,27 b	0,27 b	0,39 a	0,37 a	0,06	<0,01	NS	NS

a,b,c lettres différentes indiquent une différence significative au seuil de 5%

A,B lettres différentes indiquent une différence significative au seuil de 10%

**INFLUENCE DE L'APPORT DE BLÉ OU DE POMMES DE TERRE
DANS UNE RATION COMPLÈTE POUR VACHES LAITIÈRES :
INTERACTION AVEC LA NATURE DU FOURRAGE**

O. COLIN-SCHOELLEN, S. JURJANZ, F. LAURENT

Laboratoire de sciences animales, Inra-Ensaia, 2 av. de la forêt de Haye,
BP 172, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France.

titre abrégé : Nature de l'amidon du concentré et production laitière

Summary - Influence of the supply of wheat or potatoes as a complement in a total mixed ration for dairy cows : Interaction with the forage nature.

The effect of starch source used as an energy concentrate (wheat or potato pelling residues) was studied in interaction with forage nature (maize silage or grass silage) in a latin square design with 24 dairy cows. The diets, consisting of maize silage + straw or grass silage, formaldehyde treated soyabean meal, formaldehyde treated rapeseed- and soyabean- meal and wheat or potato pelling residues, had, for the same forage, similar energy and crude protein concentrations. The dry matter intake was significantly ($P < 0.01$) higher with the potatoes (+ 1.3 kg DM /cow /day) and with the maize silage (+ 2.1 kg DM /cow /day). The milk yield was not significantly affected by the treatments. With the maize silage diets, the fat content of the milk, the fat corrected milk and the fat yield were significantly higher with the potatoes (respectively + 2.6 g/kg, + 1.7 kg/day and + 103 g/day compared with wheat, $P < 0.05$) when the nature of the energy concentrate had no significant effect with the grass silage diets. The true protein content, the protein yield and the gain in body weight were significantly lower with the grass silage diets (respectively - 0.9 g/kg, - 43 g/day and - 327 g/day compared with grass silage, $P < 0.01$). The non protein

nitrogen and urea contents of the milk and the uremia were significantly higher with the maize silage diets (respectively + 24, + 42 and + 55 mg/l compared with grass silage, $P < 0,01$) and with the wheat (respectively + 16, + 24 and + 20 mg/l compared with the potatoes, $P < 0,05$).

total mixed ration / starch source / forage nature / milk composition

Résumé - L'influence de la source d'amidon utilisée comme complément énergétique d'une ration complète (blé ou résidus de découpe de pommes de terre) a été étudiée en interaction avec la nature du fourrage (ensilage d'herbe ou ensilage de maïs) dans un essai en carré latin avec 24 vaches laitières. L'ingestion de matière sèche est significativement plus élevée avec le complément pommes de terre et avec l'ensilage de maïs. La production de lait brut n'est pas significativement influencée par les traitements. Pour les rations à base d'ensilage de maïs, le taux butyreux du lait, la quantité de lait à 4% et la quantité de matière grasse sont significativement plus élevés avec le complément pommes de terre alors que la nature du complément énergétique n'a pas d'influence significative pour les rations à base d'ensilage d'herbe. La teneur en protéines du lait, la quantité de matière protéique et le gain de poids vif sont significativement plus faibles pour les rations à base d'ensilage d'herbe. Les teneurs en azote non protéique et en urée du lait ainsi que l'urémie sont significativement plus élevées pour les rations à base d'ensilage de maïs et pour les rations comprenant du blé.

ration complète / nature d'amidon / nature du fourrage / composition du lait

INTRODUCTION

Les dernières revues bibliographiques sur l'utilisation de l'amidon par les ruminants (Nocek et Tamminga, 1991; Harmon, 1992; Sauvant *et al*, 1994) ont nettement montré les différences concernant les sites et les taux de dégradation entre diverses sources de glucides non membranaires utilisées en alimentation. Cependant ces revues étaient plus centrées sur les aspects digestifs que sur les performances zootechniques qui y sont liées. Par ailleurs, les essais réalisés sur ce thème ont surtout concerné la comparaison de différentes céréales ou de différents traitements entraînant des variations de digestibilité de l'amidon. En Europe, la mise en place de la nouvelle politique agricole commune a entraîné une baisse des prix des céréales plus ou moins importante suivant les années et ainsi a accru leur compétitivité dans l'alimentation des ruminants. D'autre part, parmi les sous-produits utilisés en alimentation animale, les résidus issus de la découpe des pommes de terre représentent un complément intéressant, compte-tenu de leur teneur en énergie élevée. Cet essai a donc été réalisé pour étudier l'influence de deux natures d'amidon utilisées comme complément énergétique (blé ou pommes de terre) distribuées en rations complètes à des vaches laitières. Dans un essai préalablement réalisé à la ferme expérimentale de l'ENSAIA pour une ration complète à base d'ensilage de maïs, des valeurs inférieures du taux butyreux ont été enregistrées pour un complément blé comparativement à un complément pommes de terre. La production laitière et le taux protéique n'étaient pas significativement influencés par la nature du complément (Jurjanz *et al*, 1996). Les pommes de terre et le blé se différenciant par leur vitesse de dégradation de l'amidon, l'hypothèse selon laquelle l'amplitude de la réponse du taux butyreux varie avec la part d'amidon total dans la ration peut être émise. Afin de faire varier la quantité d'amidon ingérée par les animaux, deux natures de fourrage (ensilage de maïs ou ensilage d'herbe) ont donc été utilisées. Pour limiter les effets d'autres facteurs, les rations ont été constituées pour présenter des teneurs proches en énergie et en azote par kg de M.S pour le même fourrage de base.

MATERIEL ET METHODES

Dispositif expérimental

L'essai a été conduit selon un schéma expérimental en carré latin 4 x 4. Deux natures de ration de base, ensilage de maïs ou ensilage d'herbe, et deux natures d'amidon pour le complément énergétique, blé ou pommes de terre ont été testées. L'essai a comporté une préexpérience de 2 semaines permettant l'allotement des animaux et 4 périodes expérimentales de 4 semaines chacune. Chaque période expérimentale était constituée de 10 jours de transition alimentaire, 10 jours d'adaptation à la nouvelle ration et 1 semaine de mesure.

24 vaches laitières de race "Prim' Holstein", dont 8 primipares ont été regroupées en 6 quadruplets à partir de leur parité (primipares - multipares), de leur stade de lactation au moment de la mise en essai et de la quantité de matière grasse produite au cours des 2 semaines préexpérimentales. La succession des traitements pour chaque quadruplet a été déterminée par tirage aléatoire. Les vaches sont introduites dans l'essai à la même date. La production laitière moyenne, le taux butyreux et le taux protéique moyen pour les 2 semaines préexpérimentales ainsi que le stade de lactation et le poids vif des animaux en début d'essai sont respectivement de 31,7 ($\pm 6,9$) kg/jour, 40,6 ($\pm 5,5$) g/kg de lait, 32,4 ($\pm 3,2$) g/kg de lait, 71 (± 34) jours et 663 (± 88) kg.

Les vaches ont été conduites en stabulation libre à logettes et ont eu accès individuellement à l'alimentation par des portillons électroniques. Elles ont reçu une fois par jour une ration complète distribuée à volonté et composée pour les fourrages, d'ensilage de maïs plus de la paille broyée pour les rations "maïs" (M) et d'ensilage d'herbe pour les rations "herbe" (H), pour les aliments concentrés de tourteau de soja, d'un mélange de tourteaux tannés de colza et de soja (50:50) et de blé pour les rations "blé" (B) ou de

pommes de terre pour les rations "pommes de terre" (PT) ainsi que de minéraux. La composition des 4 rations est présentée au tableau I.

Tableau I. Composition et valeur nutritive des rations complètes

Ration	Herbe	Herbe	Maïs	Maïs
	Pomme de terre	Blé	Pomme de terre	Blé
Composition (%)				
Ensilage de maïs			59,2	58,5
Paille			6,3	6,5
Ensilage d'herbe	54,7	53,2		
Pommes de terre	28		16,4	
Blé		33,1		18,7
Tourteau de soja	2,8		14,4	12,1
Tourteau colza+soja tannés	13,6	13	2,1	2,8
Minéraux	0,9	0,7	1,6	1,5
Composition chimique (%)				
MS	32,3	41,1	41,3	48,9
MAT	16,6	17,2	14,6	15
Cellulose brute	18,9	18,2	12,7	12,5
ADF	24,5	22,6	17,6	16,8
NDF	42,4	39,4	34,8	33,4
Amidon	18,4	24	32,6	35,1
Cendres	7,6	7	4,2	3,9
Valeurs nutritive estimée ^a (/kilo MS)				
UFL	0,89	0,87	0,91	0,9
PDIN	113	118	98	103
PDIE	118	117	104	105
PDIA	60	60	48	50

a Estimée à partir des analyses sur fourrages et concentrés et corrigée d'après Vermorel et al. (1987)

Afin d'assurer des teneurs en énergie par kg de MS proches pour les 4 rations, la part de fourrage a été réduite pour les rations composées d'ensilage d'herbe au profit du blé ou des pommes de terre. En période préexpérimentale, tous les animaux ont reçu la ration complète du traitement MB.

Mesures et analyses

Les quantités distribuées et les refus ont été mesurés individuellement 5 jours par semaine. Les teneurs en matière sèche ont été déterminées 5 jours par semaine sur un échantillon représentatif pour chacune des 4 rations distribuées et les refus correspondants. Des prélèvements des différents aliments et des 4 rations complètes ont été effectués pour chaque période expérimentale; les teneurs en MS, MAT, CB, ADF, NDF, amidon et cendres ont été déterminées et les valeurs UFL et PDI calculées (Jurjanz *et al*, 1996).

La production laitière individuelle a été mesurée à chaque traite. Le taux butyreux (TB), le taux protéique (TP) et la teneur en lactose (analyse par infrarouge, analyseur IRMA) ainsi que le dénombrement cellulaire (comptage des noyaux, appareil Fossomatic) ont été déterminés individuellement sur 2 traites consécutives chaque semaine pendant la période préexpérimentale et les 3 premières semaines de chaque période expérimentale. Pendant la dernière semaine de chaque période expérimentale, la composition du lait a été déterminée 2 fois sur 4 traites consécutives : pour ces laits, la nature des matières azotées (azote total, azote non protéique et azote soluble à pH 4,6; Rowland, 1938) et la teneur en urée (méthode adaptée d'après Siest, 1968) ont également été déterminées. Les teneurs en azote protéique et en azote caséique du lait ont été calculées à partir de ces mesures.

Les poids vifs des animaux en essai ont été obtenus par pesée sur 2 journées consécutives environ 6 heures après l'accès à l'alimentation, à la fin de la période préexpérimentale et lors de la dernière semaine de chaque période expérimentale.

Les taux de couverture des besoins énergétiques et azotés des animaux ont été calculés à partir des apports UFL et PDI des rations et des besoins pour l'entretien et la production laitière (INRA, 1988).

Des prélèvements sanguins individuels sur héparine ont été réalisés par ponction dans la veine caudale, le matin juste après la distribution de la ration, sur 2 journées consécutives en dernière semaine de chaque période expérimentale. Les échantillons de sang ont immédiatement été centrifugés et les plasmas congelés. Après décongélation, ont été déterminées la glycémie (dosage enzymatique, Merck) et l'urémie (dosage enzymatique colorimétrique, Biotrol).

Analyses statistiques

Les données ont été traitées selon un modèle général d'analyse de variance (procédure GLM du logiciel Statistical Analysis System, SAS Institute, Inc, 1987) qui prend en compte les effets de la ration, de la période, du quadruplet, de la vache hiérarchisée par le quadruplet et de l'interaction ration * quadruplet. L'analyse a porté sur les moyennes individuelles de la dernière semaine de chaque période expérimentale (semaine de mesures) pour les différentes variables mesurées. 95 données ont fait l'objet du traitement statistique, les données d'une vache en période 1, éliminées suite à une mammité, étant considérées comme données manquantes. Les effets de la nature du complément énergétique, de la nature du fourrage et de l'interaction ont été testés par la méthode des contrastes (Dagnelie, 1973). Les moyennes présentées dans les tableaux sont ajustées des effets des facteurs du modèle.

RESULTATS

Composition et valeur nutritive des rations

Compte-tenu de la richesse en fibres de l'ensilage d'herbe, les rations à base d'ensilage d'herbe présentent des teneurs en CB, ADF et NDF nettement supérieures aux rations à base d'ensilage de maïs (tableau I). Conformément à l'objectif de l'essai, les rations à base d'ensilage d'herbe présentent des teneurs en amidon plus faibles que les rations à

base d'ensilage de maïs. La relative pauvreté des pommes de terre en amidon (62% de la MS) et leur incorporation dans les rations à des taux plus faibles que l'incorporation de blé expliquent les teneurs en amidon plus faibles pour les rations contenant des pommes de terre par rapport aux rations contenant du blé (tableau I). La plus forte teneur en MAT de l'ensilage d'herbe que celle escomptée a entraîné des teneurs en MAT plus élevées pour les rations à base d'ensilage d'herbe, ce qui est également retrouvé au niveau des teneurs en PDI .

Ingestion

L'ingestion totale de matière sèche est significativement plus élevée pour les rations contenant des pommes de terre par rapport au blé (+1,3 kg MS /vache/jour, $P < 0,01$) et pour les rations à base d'ensilage de maïs par rapport à l'ensilage d'herbe (+2,1 kg MS /vache/jour, $P < 0,01$) (tableau II). Par suite les quantités d'énergie ingérées sont significativement plus élevées pour les rations contenant des pommes de terre et les rations à base d'ensilage de maïs (respectivement + 1,4 et + 2,4 UFL /vache/jour, $P < 0,01$). Par contre les teneurs en PDI étant plus faibles pour les rations à base d'ensilage de maïs et les teneurs en PDIN plus faibles pour les rations supplémentées en pommes de terre, les quantités de PDIN ingérées ne sont pas significativement influencées. Les quantités de PDIE ingérées sont significativement plus faibles pour les rations contenant du blé (-126 g/vache/jour par rapport aux pommes de terre, $P < 0,01$). L'interaction nature du complément énergétique x nature de la ration de base n'est pas significative.

Production et composition du lait

La production de lait brut (27,1 kg/vache/jour), n'est pas significativement influencée par le traitement. La quantité de lait à 4% n'est influencée significativement ni par la nature du complément énergétique ni par la nature de la ration de base; par contre, l'interaction entre nature du complément énergétique et nature du fourrage est significative: la distribution de pommes de terre à la place du blé augmente la production de lait 4% dans les

ractions avec ensilage de maïs (+1,7 kg/jour, $P < 0,01$) mais ne la modifie pas significativement dans les rations avec ensilage d'herbe (tableau II).

De même, pour les rations à base d'ensilage de maïs, le taux butyreux du lait est significativement plus élevé pour la ration contenant des pommes de terre par rapport à la ration contenant du blé (+2,6 g/kg, $P < 0,01$). Pour les rations à base d'ensilage d'herbe, le taux butyreux n'est pas significativement influencé par la nature du complément énergétique. Le taux protéique du lait est significativement plus élevé pour les rations à base d'ensilage de maïs (+0,9 g/kg par rapport à l'ensilage d'herbe, $P < 0,01$) et tend à être plus élevé pour les rations supplémentées en blé (+0,4 g/kg par rapport au blé, $P < 0,10$), l'interaction n'est pas significative (tableau II). Ni la teneur en lactose, ni le dénombrement cellulaire des laits ne sont modifiés par les traitements.

La quantité de matière grasse est significativement influencée par la nature du complément énergétique (en moyenne +33 g/vache/jour pour les pommes de terre, $P < 0,05$), l'interaction avec la nature de la ration de base étant également significative : la quantité de matière grasse augmente significativement avec la distribution de pommes de terre dans les rations avec ensilage de maïs (+103 g/vache/jour, $P < 0,01$) mais diminue dans les rations avec ensilage d'herbe (-36 g/vache/jour, NS). La quantité de matière protéique est significativement ($P < 0,01$) plus élevée pour les vaches recevant les rations à base d'ensilage de maïs : 903 g/jour contre 860 g/jour pour les rations à base d'ensilage d'herbe (tableau II).

Nature des matières azotées du lait

Les teneurs en azote total, azote protéique et azote caséique des laits sont significativement ($P < 0,01$) plus élevées pour les rations à base d'ensilage de maïs par rapport aux rations à base d'ensilage d'herbe (respectivement 5,69 ; 5,38 et 4,45 g/l contre 5,53 ; 5,24 et 4,35 g/l). Elles ne varient pas significativement sous l'effet de la nature du complément énergétique. Les teneurs en azote soluble, azote non protéique et urée sont significativement ($P < 0,01$) plus élevées pour les rations à base d'ensilage de maïs

(respectivement 1230, 299 et 380 mg/l contre 1160, 275 et 338 mg/l) et pour les rations contenant du blé (respectivement 1222, 295 et 371 mg/l contre 1170, 279 et 347 mg/l). La proportion de caséines dans les protéines totales n'est pas significativement influencée par le traitement.

Gain de poids

Le gain de poids vif n'est pas influencé par la nature du complément énergétique, en revanche il est significativement plus élevé ($P < 0,01$) pour les vaches recevant les rations à base d'ensilage de maïs : celles-ci présentent un gain moyen quotidien de 271 g/jour alors que les vaches recevant la ration à base d'ensilage d'herbe perdent en moyenne 56 g/jour (tableau III).

Taux de couverture des besoins

Le taux de couverture des besoins énergétiques est positif pour les animaux recevant les rations à base d'ensilage de maïs (113%) et significativement supérieur à celui des animaux recevant les rations à base d'ensilage d'herbe (100%). La nature du complément énergétique influence significativement le taux de couverture des besoins énergétiques : 110 % pour les rations PT contre 104 % pour les rations B (tableau III).

Les taux de couverture des besoins azotés sont largement positifs et significativement plus élevés pour les rations à base d'ensilage d'herbe : + 7 points par rapport aux rations à base d'ensilage de maïs ($P < 0,01$). Le taux de couverture des besoins en PDIE est également significativement plus élevé pour les rations contenant des pommes de terre (+ 7points par rapport au blé, $P < 0,01$).

Paramètres sanguins

L'urémie est significativement plus élevée pour les rations à base d'ensilage de maïs et contenant du blé (respectivement +55 mg/l par rapport aux rations contenant de l'ensilage

d'herbe, $P < 0,01$ et +20 mg/l par rapport aux rations contenant des pommes de terre, $P < 0,05$). La glycémie n'est pas significativement influencée par le traitement (tableau III).

DISCUSSION

Influence de la nature de l'amidon du concentré

Peu d'auteurs ont étudié l'influence de la nature de l'amidon en comparant la pomme de terre à d'autres sources d'amidon. Les études sur l'influence de la nature de l'amidon chez la vache laitière ont surtout été réalisées en comparant différentes céréales (avoine, maïs, millet, orge, sorgho ...). Jentsch *et al* (1992), Beyer *et al* (1993) et Alert et Poppe (1994) ont comparé la digestibilité de l'amidon de blé, d'orge, de maïs et de pomme de terre chez des boeufs ; Sauvant *et al* (1994) leur dégradation in sacco. La synthèse de ces travaux montre que la digestibilité ruminale de l'amidon de pomme de terre est plus faible que celle des céréales comme le blé et l'orge.

Nous observons dans cet essai une augmentation de la quantité de matière sèche ingérée avec les rations PT. Ces résultats correspondent à ceux de Casper et Schingoethe (1989), Mc Carthy *et al* (1989), Casper *et al* (1990) et Khorasani *et al* (1994) qui observent une augmentation des quantités ingérées avec des amidons lentement dégradables alors que d'autres (De Peters et Taylor, 1985, De Visser *et al*, 1990, Grings *et al*, 1992 et Jurjanz *et al*, 1996) n'observent pas d'influence significative de la nature du complément énergétique. Compte-tenu de ces différences d'ingestion, les quantités d'amidon ingéré sont similaires pour les rations à base d'ensilage de maïs (respectivement 7,2 et 7,3 kg/jour pour les rations MB et MPT) alors qu'elles sont plus faibles pour la ration HPT par rapport à la ration HB (respectivement 3,7 et 4,6 kg/jour).

Pour la plupart des auteurs la production laitière n'est pas influencée par la nature du complément énergétique (De Peters et Taylor, 1985 ; Grings *et al*, 1992 ; Khorasani *et al*, 1994 ; Jurjanz *et al*, 1996). En revanche, la production de lait 4% est supérieure dans

certaines essais pour les rations comportant des sources d'amidon lentement dégradable (Casper et Schingoethe, 1989 ; Casper *et al*, 1990 ; Khorasaniet *al*, 1994 ; Jurjanz *et al*, 1996). Nos résultats vont dans le même sens, une augmentation du lait 4% et du taux butyreux des laits étant observée pour les animaux recevant la ration MPT par rapport à la ration MB alors que cette différence n'existe pas pour les rations à base d'ensilage d'herbe. Le taux butyreux et la quantité de matière grasse plus faibles dans la ration MB apparaissent alors que la proportion d'amidon provenant de l'aliment concentré ne représente que 37% de l'amidon ingéré. Sauvant *et al* (1994) estiment que, pour des rations entraînant un fort apport énergétique et un taux butyreux réduit, un apport d'amidon rapide entraînerait une chute plus importante du taux butyreux du lait alors qu'un apport d'amidon lent permettrait de le maintenir. Dans cet essai, même si le taux butyreux moyen des laits est élevé (40,5 g/kg en moyenne), l'hypothèse d'une réduction des précurseurs des matières grasses du lait dans le cas du régime MB peut être émise. En effet, de nombreux auteurs (Casper et Schingoethe, 1989 ; Mc Carthy *et al*, 1989 ; Casper *et al*, 1990) observent une augmentation de la proportion de propionate parmi les AGV ruminiaux et/ou une diminution du rapport (acétate + butyrate) / propionate pour les rations composées d'amidon "rapide" (comparaison orge-maïs). Pour tous ces auteurs, les apports totaux d'amidon étaient importants, compris entre 7,5 et 11 kg/jour. De même, Sauvant *et al* (1994) observent un rapport (acétate + butyrate) / propionate nettement plus faible avec des aliments à amidon rapide lorsque le régime induit déjà une valeur faible de ce rapport. Ces résultats confirment ceux établis par Jurjanz *et al* (1996) pour une comparaison blé / pommes de terre avec des rations à base d'ensilage de maïs apportant une forte quantité d'amidon (7,5 kg/vache/jour). Pour les rations à base d'ensilage d'herbe, l'absence d'effet de la nature du complément énergétique sur les matières grasses du lait est cohérente avec les résultats des autres essais, car avec ces rations les quantités d'amidon ingérées sont nettement plus faibles (3,7 à 4,6 kg/vache/jour). De Visser *et al* (1990), pour une ingestion d'environ 5 kg d'amidon par jour, n'ont observé de variation significative avec la nature du complément énergétique ni pour le taux butyreux, ni pour la production de lait 4%, ni pour les proportions des différents acides gras volatils.

Le taux protéique des laits a tendance à être plus élevé pour les rations à base d'ensilage d'herbe et comprenant du blé au lieu de pommes de terre alors qu'il n'y a pas d'effet de la nature du complément énergétique pour les rations à base d'ensilage de maïs. Seuls Rearte *et al* (1989) observent une variation significative de la teneur en protéines sous l'effet de la dégradabilité de l'amidon, mais en faveur de l'amidon lentement dégradable. Le traitement du sorgho à la vapeur, en favorisant la dégradabilité de sa fraction amylolytique, entraîne en revanche une augmentation de la teneur en protéines des laits (Poore *et al*, 1993).

Les teneurs en azote non protéique et en urée du lait ainsi que l'urémie sont plus fortes pour les rations comprenant du blé. Pourtant la quantité de PDIN ingérée est voisine pour toutes les rations mais la quantité d'énergie ingérée, plus élevée pour les rations comprenant les pommes de terre, a pu permettre une meilleure valorisation de l'azote ingéré. De plus, comme le soulignent Jurjanz *et al* (1996), l'écart PDIE - PDIN ingérées plus élevé pour les rations PT (+ 103 contre + 11 g pour les rations B) peut entraîner un recyclage d'azote plus important dans le cas des rations PT et donc une excrétion d'urée plus faible.

Dans cet essai le gain de poids vif n'a pas varié significativement avec la nature de l'amidon. Pourtant Sauvant *et al* (1994) estiment qu'avec des rations riches en énergie et entraînant un taux butyreux réduit, une prise de poids plus importante pourrait être observée pour les régimes riches en amidon rapidement dégradable. De Visser *et al* (1990) observent d'ailleurs un gain de poids supérieur pour les rations contenant de l'orge en comparaison au maïs, mais Casper et Schingoethe (1989) et Casper *et al* (1990) enregistrent des résultats inverses. Le schéma expérimental de cet essai induisant des périodes de traitement courtes, il est de toute façon difficile de mettre en évidence des variations significatives du poids vif.

Les taux de couverture des besoins énergétiques et azotés (notamment en PDIE), plus faibles pour les rations B que pour les rations PT, reflètent les écarts des niveaux d'ingestion en énergie et en azote car les différences de production de lait à 4% et de teneur en protéine sont faibles.

Influence de la nature du fourrage

Les vaches recevant de l'ensilage d'herbe ont ingéré des quantités de matière sèche et d'énergie moins importantes que les vaches recevant de l'ensilage de maïs. Ces observations rejoignent celles de Favardin *et al* (1987), Phipps *et al* (1992), et Klop et de Visser (1994). Compte-tenu des teneurs en PDI plus élevées pour les rations à base d'ensilage d'herbe, les ingestions d'azote sont similaires pour les 2 fourrages. La teneur en protéines du lait est plus faible pour les rations à base d'ensilage d'herbe, ce qui est cohérent avec les ingestions d'énergie plus faibles pour ces rations (Colin et al, 1993). Remond et Journet (1987), Phipps et al (1993) et Klop et de Visser (1994) ont également montré que le taux protéique était plus élevé pour des vaches recevant une ration à base d'ensilage de maïs ou avec une forte proportion d'ensilage de maïs par rapport à l'ensilage d'herbe. Les teneurs en azote non protéique et en urée du lait ainsi que l'urémie plus élevées pour les rations à base d'ensilage de maïs ne peuvent s'expliquer par les différences d'énergie et d'azote ingérées. En revanche les rations à base d'ensilage de maïs présentent des proportions de PDIA dans les PDI totales plus faibles que les rations à base d'ensilage d'herbe (-4%). La part de l'azote fermentescible étant plus élevé pour les rations M, des pertes azotées accrues ont pu se produire lors de la digestion ruminale. Les vaches recevant de l'ensilage d'herbe ont perdu du poids alors que les vaches recevant les rations à base d'ensilage de maïs en ont gagné. Ces résultats sont cohérents avec les taux de couverture des besoins énergétiques calculés, proches de 100% pour les rations H alors qu'ils sont largement positifs pour les rations M.

CONCLUSION

L'utilisation d'une source d'amidon lentement dégradable dans le rumen (résidus de découpe de pommes de terre) comme complément énergétique permet de maintenir le taux

butyreux du lait dans des rations comportant environ 60 % d'ensilage de maïs alors qu'avec une source d'amidon rapidement dégradable (blé), celui-ci chute. Ces résultats ont d'ailleurs été bien établis par d'autres auteurs. En revanche, avec des rations comportant plus de 50 % d'ensilage d'herbe, la nature du complément énergétique n'influe pas sur la teneur en matière grasse des laits. Il semble donc que la quantité d'amidon total apporté dans la ration soit le facteur déterminant quant à l'effet de la nature de l'amidon du complément énergétique. Pour compléter cette étude, il serait intéressant d'étudier l'influence de la quantité d'amidon ingérée par les vaches laitières sur la teneur en matière grasse des laits pour un complément énergétique rapidement dégradable dans le rumen. La teneur en protéines des laits est peu influencée par la nature du complément énergétique. Par suite, le rapport taux protéique / taux butyreux est le plus élevé pour la ration à base d'ensilage de maïs complémentée en blé.

Il pourrait y avoir un effet spécifique des pommes de terre sur l'ingestion de matière sèche. L'utilisation d'ensilage d'herbe à la place d'ensilage de maïs conduit à limiter les quantités ingérées et notamment la quantité d'énergie et par suite la teneur en protéines des laits et le gain de poids vif. Ces résultats correspondent à ceux établis antérieurement. Les variations des teneurs en urée du lait et du sang sous l'effet de la nature du fourrage et de la nature du complément énergétique peuvent s'expliquer par les écarts entre quantités d'énergie et d'azote ingérées ou par la part des protéines fermentescibles dans le rumen.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alert H.J., Poppe S. (1994) Trockensubstanz- und Nährstoffverlust bei Futtermitteln nach Inkubation im Pansen (Nylonbeuteltechnik). *Arch. Anim. Nutr.* 47, 181-186
- Beyer M., Jentsch W., Hoffman L.(1993) Einfluss der Stärkeherkünfte Gerste, Mais und Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 3. Mitteilung - Energieverwertung beim Rind. *Arch. Anim. Nutr.* 44, 265-281

- Casper D.P., Schingoethe D.J. (1989) Lactational response of dairy cows varying in ruminal solubilities of carbohydrate and crude protein. *J. Dairy Sci.* 72, 928-941
- Casper D.P., Schingoethe D.J., Eisenbeisz W.A. (1990) Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of nonstructural carbohydrates and crude protein. *J. Dairy Sci.* 73, 1039-1050
- Colin O., Laurent F., Vignon B. (1993) : Alimentation et maîtrise de la qualité protéique et technologique des laits en élevage. *Ann. Zootech.* 42, 371-378.
- Dagnelie P. (1973) : *Théorie et méthodes statistiques. Vol. 2.* Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique
- De Peters E.J., Taylor S.J. (1985) Effect of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.* 68, 2027-2032
- De Visser H., Van Der Togt P.L., Tamminga S. (1990) Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage based dairy cow rations. 1. Feed intake and milk production. *Netherlands J. Agriculture and Science* 38, 487-498
- Faverdin P., Hoden A., Coulon J.B. (1987) Recommandations alimentaires pour les vaches laitières. *Bull. Tech. Cent.Rech.Zootech.Vet. Theix* 70, 133-153
- Grings E.E., Roffler R.E., Deitelhoff D.P. (1992) Evaluation of corn and barley as energy sources for cows in early lactation fed alfalfa based diet. *J. Dairy Sci.* 75, 193-200
- Harmon D.L. (1992) Starch utilization in ruminants. In: *53rd Minnesota Nutrition Conference, Bloomington, Minnesota, USA, 22-23 september 1992*, 57-66.
- INRA (1988) *Alimentation des bovins, ovins et caprins* (R Jarrige, ed), INRA Publications, Versailles
- Jentsch W., Wittenburg H., Beyer M. (1992) Einfluss der Stärkeherkünfte Gerste, Mais, Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die Energieverwertung bei Wiederkäuern. 1. Mitteilung - Vergleichende Untersuchungen zur Nährstoffverdaulichkeit bei Rind und Schaf. *Arch. Anim. Nutr.* 42, 301-316
- Jurjanz S., Colin-Schoellen O., Laurent F, (1996) Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques de vaches laitières. *Ann. Zootech.* 45, sous presse
- Khorasani G.R., De Boer G., Robinson B., Kennelly J.J. (1994) Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77, 813-824
- Klop A., De Visser H. (1994) Effect van verschillende verhoudingen grassilage:maissilage in het rantsoen op voeropname, melkproductie, pensfermentatie, penskinetiek en

- mestverteerbaarheid. *Rapport Instituut voor Veehouderij en Diergezondheid (ID-DLO)*, Lelystad, Netherlands, 270, 31 p
- Mc Carthy R.D., Klusmeyer T.H., Vicini J.L., Clark J.H., Nelson D.R. (1989) Effect of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72, 2002-2016
- Nocek J.E., Tamminga S. (1991) Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74, 3598-3629
- Phipps R.H., Weller R.F., Rook A.J. (1992) Forage mixtures for dairy cows : the effect on dry matter intake and milk production of incorporating different proportions of maize silage into diets based on grass silages of differing energy value. *J. Agric. Sci.* 118, 379-382
- Phipps R.H., Sutton J.D., Jones B.A., Allen D., Fischer W. (1993) The effect of mixed forage diets on food intake and milk production of dairy cows. *Anim. Prod.* 56, 424
- Poore M.H., Moore J.A., Swingle R.S., Eck J.P., Brown W.H. (1993) Response of lactating holstein cows to diets varying in fiber source and ruminal starch degradability. *J. Dairy Sci.* 76, 2235-2243
- Rearte D.H., Benandino J.Di., Penalta R. (1989) Supplementation of concentrate of different starch and protein degradability in rumen, to dairy cows grazing high quality pasture. *J. Dairy Sci.* 72 Suppl. 1, 539
- Remond B., Journet M. (1987) Effet de l'alimentation et de la saison sur la composition du lait. In : *Le lait, matière première de l'industrie laitière*. INRA Publications, Versailles, 171-186.
- Rowland S.J. (1938) The determination of the nitrogen distribution in milk. *J. Dairy Sci.* 9, 42-46
- SAS (1987) *SAS/STAT Guide for personal computers, Version 6.04* . SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- Sauvant D., Chapoutot P., Archimède H. (1994) La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.* 7, 115-124
- Siest G. (1968) Etude de la réaction urée-diacetylmonoxime. *Ann. Biol. Clin.* 26, 431-448
- Vermorel M., Coulon J.B., Journet M. (1987) Révision du système des unités fourragères (UF). *Bull. Tech. C. R. Z. V.Theix* 70, 9-18

Tableau II. Effet de la nature du complément énergétique sur les quantités ingérées, la production et la composition du lait.
Interaction avec la nature du fourrage.

	HPT	HB	MPT	MB	Etr	Seuil de signification			
						Effet traitement	Effet nature du complément énergétique	Effet nature du fourrage	Effet interaction
Matière sèche ingérée (kg/jour)	19,9 bc	19,1 c	22,5 a	20,7 b	1,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	NS
UFL ingérées (/jour)	17,7 c	16,6 d	20,5 a	18,7 b	1,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	NS
PDIN ingérées (g/jour)	2235 ab	2264 a	2233 ab	2135 b	188	NS	NS	0,1	NS
PDIE ingérées (g/jour)	2328 a	2244 ab	2346 a	2177 b	185	< 0,01	< 0,01	NS	NS
Lait brut (kg/jour)	26,7 b	27,0 ab	27,8 a	27,0 ab	1,9	NS	NS	NS	NS
Lait 4% (kg/jour)	26,3 b	26,9 b	27,8 a	26,1 b	1,7	< 0,01	0,1	NS	< 0,01
Taux butyreux (g/kg)	40,3 a	41,4 a	41,4 a	38,8 b	2,4	< 0,01	NS	NS	< 0,01
Taux protéique (g/kg)	32,5 b	33,3 a	33,8 a	33,8 a	1,1	< 0,01	< 0,10	< 0,01	NS
Teneur en lactose (g/kg)	49,9	49,8	49,7	49,6	0,6	NS	NS	NS	NS
Matière grasse (g/jour)	1047 bc	1083 ab	1124 a	1021 c	78	< 0,01	< 0,05	NS	< 0,01
Matière protéique (g/jour)	846 c	874 bc	914 a	893 ab	63	< 0,01	NS	< 0,01	< 0,10
Cellules (10 ³ /mL)	142	204	211	140	204	NS	NS	NS	NS

HPT : herbe-pommes de terre, HB : herbe-blé, MPT : maïs-pommes de terre, MB : maïs-blé. a, b, c, d : lettres différentes pour une même ligne pour des valeurs significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau III. Effet de la nature du complément énergétique sur le gain de poids, les taux de couverture des besoins énergétiques et les paramètres sanguins. Interaction avec la nature du fourrage.

	HPT	HB	MPT	MB	Etr	Seuil de signification			
						Effet traitement	Effet nature du complément énergétique	Effet nature du fourrage	Effet interaction
GMQ (g/jour)	- 30 b	- 82 b	+ 326 a	+ 216 ab	559	< 0,05	NS	< 0,01	NS
Taux de couverture des besoins (%)									
UFL	104 b	97 c	116 a	111 a	9	< 0,01	< 0,01	< 0,01	NS
PDIN	127 a	126 a	120 b	117 b	10	< 0,01	NS	< 0,01	NS
PDIE	133 a	126 bc	126 b	119 c	11	< 0,01	< 0,01	< 0,01	NS
Urémie (g/litre)	0,30 c	0,34 b	0,37 a	0,38 a	0,05	< 0,01	< 0,05	< 0,01	NS
Glycémie (g/litre)	0,66	0,66	0,67	0,65	0,05	NS	NS	NS	NS

HPT : herbe-pommes de terre, HB : herbe-blé, MPT : maïs-pommes de terre, MB : maïs-blé. a, b, c, d : lettres différentes pour une même ligne pour des valeurs significativement différentes au seuil de 5%.

ALTERATION OF MILK FAT BY STARCH

Alteration of Milk Fat by Variation in the Source and Amount of Starch in a Total Mixed Ration for Dairy Cows

S. JURJANZ,* O. COLIN-SCHOELLEN,* J. N. GARDEUR,*[□] and F. LAURENT*

* Laboratoire de Sciences Animales¹,
Associé à l'Institut National de Recherches Agronomiques,
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires,
2 Avenue de la Forêt de Haye, B.P. 172,
54 505 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

[□] Département de Biologie Appliquée,
Institut Technologique Universitaire de Nancy-Brabois,
Université Henri Poincaré Nancy I,
Le Montet,
54 601 Villers-lès-Nancy, France

¹ Phone (33) 3 83 59 58 89

¹ Fax (33) 3 83 59 58 04

¹e-mail: jurjanz@mais.ensaia.u-nancy.fr

Number of tables: 8

ABSTRACT

The effect on milk yield and composition of the supplementation of the rations of dairy cows with wheat or potato peelings was studied at three different starch intakes (<5, 6, and >7.5 kg/d) for DMI around 20 kg/d. Starch supply was varied using different dietary concentrations of maize silage. Trials were conducted using Latin square designs, and all cows were fed a total mixed ration composed of maize silage, grass silage, or both; soybean meal; a mixed meal with formaldehyde treatment; minerals; and one of the following energy concentrates: potato peelings or wheat. Dry matter and energy intakes varied significantly only at the low starch concentration; higher intakes were observed when the potato peelings were fed. Body weight, milk yield, true protein content, lactose content, and protein yield were not affected by treatment. Milk fat content was higher (+3.3 g/kg) when potato peelings were fed at the high starch concentration, but was unaffected at the low and medium starch concentration. Slow degradation of starch from the potato peelings in the rumen could enhance a higher delivery of precursors of milk fat synthesis in the udder. The effect on fat yield differed among starch concentrations. Milk fat content appeared to decrease for cows fed rations containing fast degradable starch at a starch intake exceeding 7 kg/d.

(**Key words:** dairy cow, milk fat content, starch type, starch concentration)

Abbreviation key: **FMM** = mixed meal treated with formaldehyde, **PP** = potato peelings, **SBM** = soybean meal)

INTRODUCTION

The application of the quota system on milk and fat yields in Europe led farmers to limit the fat content of milk. The control of milk fat content through nutrition of the cow is quicker and easier than the control of milk fat content through genetics. The use of high amounts of

concentrate in dairy cow rations causes notable decreases in milk fat content, especially when these concentrates contain large amounts of starch (2, 6, 25, 26). Nevertheless, concentrates vary widely in degradability of starch. In fact, the most recent reviews on the use of starch by ruminants (13, 14, 20, 24) have shown that differences exist in the site and rate of degradation of different types of nonstructural carbohydrates, mainly starch, used in diets of animals. These reviews focused more on digestive aspects than on production results. Sauvant (24) was interested in differences in starch degradation and their effects on dairy production. Other trials have compared different cereal grains or grain proceedings that included variations in starch degradability.

Despite the reformed agricultural policy in the European Union, world stocks of cereals are low. However, cereals could be replaced by by-products in the rations of animals. Among these alternative by-products, potato peelings (**PP**) are an attractive feedstuff because of their high energy concentration, availability, and relatively low cost. These PP could eventually replace wheat or barley in dairy cow rations. Moreover, the starch in potatoes is degraded to a lesser extent than that in barley or wheat in the rumen (1, 8, 23), which limits the problems caused by the incorporation of a large amount of wheat or barley starch in the ration.

Three trials were carried out to study the effects of concentrate at different starch concentrations on milk yield and composition by using wheat and PP. The starch supply was varied to determine at which concentration wheat or PP would affect milk yield or composition, but the net energy content was always similar in the rations. At the low starch concentration, we compared wheat or PP in a TMR based on grass silage. In the trial that involved the ration with a medium starch supply, grass and maize silage were mixed to obtain an intermediate starch supply from the roughage part of the ration so that the effect of wheat or PP could be tested. Both energy concentrates were also tested using a maize silage ration to obtain a high starch concentration. Therefore, choice of starch concentration dictated the roughage. In Europe, the proportion of the concentrate in the ration does

normally not exceed 50 %. So, in these trials, we changed the roughage by using the most common silage types (grass and maize) and not only the roughage amount.

MATERIALS AND METHODS

In all three trials, cows were housed in free stalls at our experimental station in Nancy, France. The cows were fed a TMR once daily in the morning for ad libitum intake. The TMR was offered using electronic feed gates (SEFER company, Neuville de Poitou, France); each cow was fitted with an electronic transponder that provided access to one of the gates. In all trials, the rations were formulated to meet French recommendations for TMR (15) for cows of 600 kg of BW. The chemical composition of each foodstuff in each trial is shown in table 1.

All cows were milked twice daily, and individual milk yields were automatically recorded at each milking (system Isalait 2045, Boumatic, Paris, France).

The animal protocol was in accordance with the French Animal Care Guidelines.

Low Starch Concentration

The effect of two types of starch (wheat or potato) was compared in interaction with the type of roughage (maize silage or grass silage) in the ration. Indeed, the amount of starch provided by the roughage could modify the effect on milk composition of the starch concentration provided by the energy concentrate.

Two factors were tested in a replicated 4 x 4 Latin square design (7): type of starch or the energy concentrate (wheat or PP) and roughage type (grass silage or maize silage); however only results at the low starch concentration are considered here. Twenty cows (8 primiparous) were blocked in five Latin squares by parity, DIM, and fat yield (mean of 2 preexperimental wk; Table 2). Cows in all squares began the trial on the same day, which explains the different stages of lactation for cows in each of the blocks (Table 2). Each experimental period lasted 4 wk, and measurements were performed during the last 10 d of

each period. The cows were fed a TMR composed of grass silage, wheat or PP, soybean meal (**SBM**), a mixed meal (rapeseed and soybean) treated with formaldehyde (**FMM**), and minerals (Table 3). Both rations had very similar energy contents even though the wheat had a higher starch content than did the PP (240 vs. 184 g/kg of DM). Crude protein contents were also similar.

Medium Starch Concentration

In this trial, a mixed basal diet (grass silage and maize silage) provided the medium starch content so that the effect of starch type on milk composition could be tested. Three treatments were tested in a replicated 3 x 3 Latin square design (Jurjanz & Colin-Schoellen, 1997, unpublished), but only two treatments at the medium starch concentration are considered here.

Cows in all squares began the trial on the same day, which explains the different stages of lactation for cows in each of the blocks (Table 2). A total of 18 dairy cows (6 primiparous) were blocked in six Latin squares by parity, calving date, and milk fat yield (mean of 2 preexperimental wk). Each experimental period lasted 4 wk, and all measurements were performed during the last 10 d of each period. Cows were fed a TMR composed of a roughage mixture (maize silage, grass silage and wheat straw), wheat or PP, SBM, FMM, and minerals (Table 3). Rations had very similar energy, starch, and CP contents. Moreover, the portion of starch in the ration that was supplied by the energy concentrate was similar between the treatments (2.7 kg/d) (Table 4).

High Starch Concentration

The effect on milk composition of wheat or PP in a ration with more than 50% maize silage was evaluated in combination with the effect of methionine supplementation. Two factors were tested in a replicated 4 x 4 Latin square design (16): type of starch or energy

concentrate (wheat or PP) and methionine supplementation. Only the two treatments without methionine supplementation are considered here so that the trials can be easily compared. The 4 cows in each square began the trial at the same mean DIM (54 ± 3 d postpartum). Each experimental period lasted 4 wk, and measurements were performed during the last 10 d of each period. Twelve cows (4 primiparous) were blocked in three Latin squares by parity, DIM, milk yield, and milk protein content (mean of 2 preexperimental wk; Table 2). The cows were fed a TMR composed of maize silage, wheat straw, wheat or PP, SBM, FMM, and minerals (Table 3). Rations had similar energy, CP and starch contents (around 350 g/kg of DM).

Generally, the energy and CP contents varied little among the different trials, although the low starch rations were slightly poorer in energy and were somewhat richer in CP than were the medium and high starch rations.

Sampling and Chemical Analyses

Each feedstuff was sampled monthly and analysed chemically: CP by the Kjeldahl method, crude fiber by the Weende method, ADF (29), and NDF (30) by the Van Soest method as well as ash by incineration at 550°C during 6h. Each ration was also sampled weekly and pooled to form a monthly sample that was analyzed in a manner similar to the feedstuff samples. Starch was also analyzed in these samples by an enzymatic method (28).

Milk composition was determined twice at four consecutive milking times during the measurement period. The milk fat, protein, and lactose contents were analyzed using an infrared method analyzer (Milkoscan 605, Fosselectric, Hillerød, Denmark), and the somatic cells were counted by nucleus coloration (Fossomatic 360 cell counter, Fosselectric, Hillerød, Denmark).

At the end of each period, the cows were weighed on 2 consecutive d.

Statistical Analyses

Data were grouped to test principal effects with an identical model that considered type of starch (wheat or PP) and starch concentration (low, medium or high) as well as the interaction between them. In this manner, the data from the trials involving rations with the low starch concentration (20 cows), the medium starch concentration (18 cows), and the high starch concentration (12 cows) were unified. Seasonal differences of milk yield and milk composition have been taken in account by a trial specific covariable. This value is, for each trial, the difference between the preexperimental mean of each trial and the global preexperimental mean of all three trials. The variables of milk yield and milk composition were tested using an unbalanced four-way hierarchical mixed model of covariance analysis according to the MIXED model procedure of SAS (22)(Table 5.2). All intake variables and BW were tested by the same statistical model without covariable (Table 5.1). The variables analyzed corresponded to the least square means (means adjusted for the effects of the other factors in the model; Type III error of the sums of squares) and were compared by a t test.

Significance was declared at $P < 0.05$, and data at this level were retained for interpretation of the statistical test. The statistical power of the comparison tests at each starch concentration was calculated using the root means square error, which indicated the real difference observed between both mean values and 50 experimental units (i.e., number of cows). The statistical power of the interaction tests was calculated using the six treatments and the highest difference between two mean values.

RESULTS

Intakes and BW

The DMI was not significantly affected by energy concentrate (Table 6), although in the trial with the low starch ration plus PP, cows showed a tendency for higher DMI (+0.8 kg of DMI; NS).

Net energy intake was significantly affected by type of starch or energy concentrate (Table 6). In fact, the lower the starch content, the higher the net energy intake of the cows fed PP compared with that of cows fed wheat. The slight and insignificant increase in DMI for cows fed the low starch ration plus PP induced a significantly higher net energy intake (+1.8 Mcal of NE_L/d; $P < 0.01$). At the medium starch concentration, only a slightly higher net energy intake for cows fed the PP was observed (+1.3 Mcal/d; NS), which corresponded with the slightly higher DMI at this starch concentration. Net energy intake was not affected by type of starch at the high starch concentration.

The interaction of type of starch or energy concentrate and amount of starch affected ($P < 0.05$) CP intake (Table 6). At the medium starch concentration, cows fed PP had a higher CP intake (+0.17 kg/d; $P < 0.05$), but, at the high starch concentration this difference was inverted, although not significantly (-0.18 kg/d). The CP intake was not affected at the low starch concentration.

The lower starch content of the low starch ration plus PP induced a highly significant lower starch intake for these cows (-0.9 kg of starch/d; $P < 0.01$). At the medium and high starch concentrations, no effect of type of starch on the starch intake was observed (Table 6). The differences in starch supply between the starch concentrations were mainly due to the starch delivered by the maize silage, which was 0 % for the low starch ration, 55 % at the medium starch concentration and ranged between 58 and 63 % at the high starch concentration respectively of the total starch intake (Table 4).

Body weight was not significantly affected by type of starch or energy concentrate or by the interaction of type of starch and starch concentration (Table 6).

Milk Yield and Milk Composition

The preexperimental means of each trial (adjusted covariable) significantly affected milk yield and milk composition ($P < 0.05$), demonstrating seasonal differences in responses. The interaction between this covariable and the starch concentration was only significant for the lactose content.

Milk and FCM yields were not affected by energy concentrate at any starch concentration (Table 7), although a slight tendency toward lower yields at the medium starch concentration was observed for cows fed the PP.

Globally, milk fat content was only significantly affected by type of starch when it interacted with the concentration of starch in the ration ($P < 0.05$) (Table 7). The fat content of milk was not affected by the energy concentrate at the low or medium starch concentrations (respectively +1.1 g/kg and +0.7 g/kg; NS; wheat vs. PP) but was significantly decreased when wheat was fed with the high starch ration (-3.3 g/kg; $P < 0.01$).

Overall, the true protein and lactose contents of the milk did not vary with type of starch or the interaction of type of starch and starch concentration of the ration. A significantly higher true protein content when wheat was supplemented (+0.8 g/kg; $P < 0.05$) was only observed for cows fed the low starch ration (Table 7).

No significant effect of the adjusted main factors alone was observed for the fat and protein yields (Table 7), although there appeared to be an interaction between these factors for fat yield. Indeed, at the medium starch concentration cows fed PP had a slight tendency to yield less milk fat (-51 g/d; NS), but, at the high starch concentration, this tendency was reversed (+71 g/d; NS).

DISCUSSION

Most studies on the effect of type of starch have been conducted with grains (barley, maize, millet, oat, sorghum, or wheat) but rarely with potatoes. Beyer et al. (3) and Alert and Poppe (1) compared the starch digestibility of barley, maize, and potatoes in beef cattle and observed that potato starch was degraded to a lesser extent than barley starch in the rumen but more than maize starch did. The study of different starch types using the in sacco technique (23) showed that the ruminal degradation of potato starch is slower than that of wheat or barley and resembles that of maize starch. These observations have been confirmed by enzymatic test with rumen fluid (8). It seems that the rate of maize starch degradation is practically the same as that of potato starch.

The DMI was not significantly affected by type of starch in our trials. A tendency for a higher DMI for cows fed PP was only observed at the low starch concentration. Some studies reported increased DMI for cows fed rations with slowly degradable starch (maize grains) compared with that for cows fed rations containing quickly degradable starch (barley) (4, 17, 18). Others (9, 10, 12) did not observe any effect of type of starch. Sauvante (24) studied 33 comparisons of quickly and slowly degradable starch and showed that the DMI of dairy cows was significantly higher (+0.6 kg/d) when slowly degradable starch was fed. This researcher supposed that in rations containing quickly degradable starch, an increased VFA production could decrease the DMI by regulatory mechanisms.

The intake differences observed for net energy, CP, and starch were fully explained by differences in DMI or their concentration in the experimental rations. The variations in BW among cows fed rations containing wheat and PP were low at all starch concentrations. In our experimental designs, short periods (4 wk) did not permit differences in growth or body condition change to be demonstrated.

Cows yielded around 26 kg of milk/d. The DIM at the start of each trial accounted for the differences in milk yield between trials. At the high starch concentration, cows started at 54 DIM and yielded, on average, 27 kg/d. At the medium starch concentration, cows starting at

100 DIM yielded 25 kg/d. The milk yield did not vary significantly with type of starch in accordance with other studies (9, 12, 17).

An increased fat content and fat yield were observed for cows fed rations containing PP in comparison with those observed for cows fed rations containing wheat when the starch content was high; however, this increase was only a tendency for the fat yield. Type of starch did not affect these parameters when a medium or low starch ration was fed. Other studies (4, 5, 17) also reported that the fat content, FCM yield, or both were significantly increased when cows were fed rations with starch that was degraded slowly in the rumen (maize grain vs. barley). This effect of the rate of starch degradability is easier to observe when the milk fat content is initially low (23). McCarthy et al. (18) reported a lower fat content for cows fed maize grain than for cows fed barley, but the FCM yield tended to be higher even though this difference was nonsignificant. In those trials (4, 5, 17, 18), the total starch intake varied between 6.5 and 11 kg/d. In a comparison of maize grain and barley with starch intakes between 5.0 and 5.5 kg/d, FCM yield and fat content were not significantly modified by type of starch (10). No effect was observed on the milk fat content when a wheat and maize grain ration was fed that supplied <5 kg/d of starch (21). Type of starch appeared to affect only the milk fat (content or yield) if the rations contained a high starch content and consequently if the cows were given a large supply of starch. This effect could start at around 7 kg/d for a DMI of 20 to 22 kg/d. For us, high starch intakes were between 7.3 to 7.7 kg/d, but the starch intakes for cows fed the medium and low starch rations did not exceed 6.2 kg/d. Our results also show that the effect of the starch concentration was not due to different net energy concentrations because of the similar energy contents in all diets. But fermentation in the rumen can be strongly influenced by factors like fiber type and amount as well as particle size of the ration. The higher fiber content of the low and medium starch rations could buffer a possible effect of starch type of the concentrate. However it is impossible to formulate rations with different starch concentrations without also changing the fiber content.

The hypothesis of a threshold of starch intake for the effect of the starch type on the milk fat could be explained by a decrease in milk fat precursors in the high starch rations that

were degraded quickly in the rumen. Indeed, the rumen is the major site of starch digestion in cattle (24, 27). Several studies (4, 5, 18) noted that cows fed rations containing quickly degradable starch in the rumen had increased propionate proportion in the volatile fatty acids or a decreased (acetate+butyrate) to propionate ratio, or both when starch intake was >7 kg/d. In vivo studies (23, 24) showed a decreased (acetate+butyrate) to propionate ratio for cows fed rations containing starch that was degraded quickly in the rumen, particularly when this ratio was initially low. A supply of quickly degradable starch will lead to a heavier decrease in the fat content for rations with a higher energy supply than a supply of slowly degraded starch. Miettinen and Huhtanen (19) confirmed the effect of the propionate to butyrate ratio on the milk fat content by VFA infusion in dairy cows. Another explanation for the decreased fat content in the high starch diet could be an increased production of *trans* fatty acids in the rumen. Indeed Gaynor et al. (11) observed an increased content of *trans* C_{18:1} in the rumen and in milk fat if diets rich in grain concentrate lead to a decreased milk fat content.

True protein content was significantly increased for cows fed the low starch ration plus wheat. For these cows, starch intake was significantly higher than that for cows fed the low starch ration plus PP because of the higher starch content of the ration. The increase in the true protein content was probably due to the effect of the higher starch (and energy) intake rather than to type of starch although Sauvant (22) showed a significantly higher true protein content for cows fed quickly degradable starch than for cows fed slowly degradable starch. Indeed it is possible that quickly degraded starch allows a higher synthesis of microbial protein, particularly in cows fed rations rich in fiber.

Under the conditions of our study, the energy concentrate represented between 30 to 40% of the total starch concentration in the high starch rations (Table 4). Most feed starch came from maize silage. In the literature, in trials featuring a high dietary starch content, the roughage mainly consisted of maize silage and hay. It would be interesting to determine the outcome if the starch of the roughage hydrolyzed rapidly in the rumen (e.g., wheat silage). We can assume that the starch supply that would induce a decrease in milk fat synthesis

with quickly degradable starch would be lower than in our case. This hypothesis should be examined. It would also be interesting to study the fatty acid composition of milk fat when fat contents are modified to determine whether differences exist.

CONCLUSIONS

The use of starch that is degraded slowly in the rumen (e.g., PP) to improve the energy supply allows the milk fat content to be maintained for cows fed maize silage based rations with a high starch content (350 g/kg of DM). This maintenance of the milk fat content contrasts with starch that is degraded quickly in the rumen (e.g., wheat), which induces a decrease in the milk fat content and fat yield. If the starch supply of the ration is low, the type of starch does not seem to affect milk fat synthesis. Milk yield and true protein and lactose contents were not generally affected by type of starch at any starch concentration in these comparisons between wheat and PP.

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge the La Bouzule experimental unit for technical assistance. We are also very grateful to the McCain company (Harnes, France) for the PP.

REFERENCES

- 1 Alert, H. J., and S. Poppe. 1994. Trockensubstanz und Nährstoffverlust bei Futtermitteln nach Inkubation im Pansen (Nylonbeuteltechnik). *Arch. Anim. Nutr.* 47:181-186.
- 2 Beauchemin, K. A., B. I. Farr, and L. M. Rode. 1991. Enhancement of the effective fibre content of barley based concentrates fed to dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3128-3139.
- 3 Beyer, M., W. Jentsch, and L. Hoffmann. 1993. Einfluss der Stärkeherkünfte Gerste, Mais, Kartoffeln und ihrer Rationsanteile auf die Nährstoffverdaulichkeit und die

Energieverwertung bei Wiederkäuern. 3. Mitteilung - Energieverwertung beim Rind. Arch. Anim. Nutr. 44:265-281.

- 4 Casper, D. P., and D. J. Schingoethe. 1989. Lactational response of dairy cows varying in ruminal solubilities of carbohydrate and crude protein. J. Dairy Sci. 72:928-941.
- 5 Casper, D. P., D. J. Schingoethe, and W. A. Eisenbeisz. 1990. Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of nonstructural carbohydrates and crude protein. J. Dairy Sci. 73:1039-1050.
- 6 Colin-Schoellen, O., S. Jurjanz, J. N. Gardeur, and F. Laurent. 1995. Effet de la nature de l'aliment concentré sur les performances zootechniques de vaches laitières recevant une ration complète. Ann. Zootech. Paris 44:359-372.
- 7 Colin-Schoellen, O., S. Jurjanz, and F. Laurent. 1997. Influence de l'apport de blé ou de pommes de terre dans une ration complète pour vaches laitières. Ann. Zootech. Paris 46:269-280.
- 8 Cone, J. W. 1991. Degradation of Starch in Feed Concentrates by Enzymes, Rumen Fluid and Rumen Enzymes. J. Sci. Food Agric. 54:23-34
- 9 de Peters, E. J., and S. J. Taylor. 1985. Effect of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. J. Dairy Sci. 68:2027-2032.
- 10 de Visser, H., P. L. van der Togt, and S. Tamminga. 1990. Structural and non-structural carbohydrates in concentrate supplements of silage based dairy cow rations. 1. Feed intake and milk production. Neth. J. Agric. Sci. 38:487-498.
- 11 Gaynor, P. J., D; R. Waldo, A. V. Capuco, R. A. Erdman, L. W. Douglass, and B. B. Teter. 1995. Milk fat depression, the glucogenic theory, and *Trans*-C_{18:1} fatty acids. J Dairy Sci. 78:2008-2015.
- 12 Grings, E. E., R. E. Roffler, and D. P. Deitelhoff. 1992. Evaluation of corn and barley as energy sources for cows in early lactation fed alfalfa-based diets. J. Dairy Sci. 75:193-200.
- 13 Harmon, D. L. 1992. Starch utilization in ruminants. Pages 57-66 in 53rd Minnesota Nutr. Conf., Bloomington, MN. Bloomington Univ., Bloomington, MN.
- 14 Huntington, G. B. 1997. Starch utilization by ruminants: from basics to the bank. J. Anim. Sci. 75:852-867.
- 15 Jarrige, R., ed. 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Inst. Natl. Rech. Agron., Paris, France.
- 16 Jurjanz, S., O. Colin-Schoellen, and F. Laurent. 1996. Influence de la nature de l'amidon du complément énergétique et d'une supplémentation en méthionine sur les performances zootechniques des vaches laitières. Ann. Zootech. Paris 45:467-476.

- 17 Khorasani, G. R., G. de Boer, B. Robinson, and J. J. Kennelly. 1994. Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77:813-824.
- 18 McCarthy, R. D., T. H. Klumeyer, J. L. Vicini, J. H. Clark, and D. R. Nelson. 1989. Effect of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 72:2002-2016.
- 19 Miettinen, H., and P. Huhtanen. 1996. Effects of the ratio of ruminal propionate to butyrate on milk yield and blood metabolites in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79: 851-861.
- 20 Nocek, J. E., and S. Tamminga. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598-3629.
- 21 Petit, H. V., and G.T.D. Santos. 1996. Milk yield and composition of dairy cows fed concentrate based on high moisture wheat or high moisture corn. *J. Dairy Sci.* 79:2292-2296.
- 22 SAS \rightarrow System for Mixed Models. 1996. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- 23 Sauvant, D., P. Chapoutot, and H. Archimède. 1994. La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.* 7:115-124.
- 24 Sauvant, D. 1997. Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.* 10:287-300.
- 25 Sutton, D. J., J. A. Bines, S. V. Morant., D. J. Napper, and D. I. Givens. 1987. A comparison of starchy and fibrous concentrates for milk production, energy utilization and hay intake by Friesian cows. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 109:375-386.
- 26 Sutton, D. J., S. V. Morant, J. A. Bines, D. J. Napper, and D. I. Givens. 1993. Effect of altering the starch:fibre ratio in the concentrates on hay intake and milk production by Friesian cows. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 120:379-390.
- 27 Taniguchi, K., G. B. Huntington, and B. P. Glenn. 1995. Net nutrient flux by visceral tissues of beef steers given abomasal and ruminal infusions of casein and starch. *J. Anim. Sci.* 73:236-249.
- 28 Thivend P., C. Mercier, and A. Guilbot. 1965. Dosage de l'amidon dans les milieux complexes. *Ann. Biol. Anim. Biochem. Biophys.* 5:513-526.
- 29 Van Soest P. J. 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. Preparation of fiber residues of low nitrogen contents. *Assoc. Off. Agric. Chem. J.* 46:825-829.
- 30 Van Soest P.J., and R. H. Wine. 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. 4. Determination of plant cell wall constituents. *Assoc. Off. Agric. Chem. J.* 50:50-55.

TABLE 1. Mean chemical composition of foodstuffs used in the different trials.

Trial (starch concentration ¹)	Maize silage		Grass silage		PP ²			Wheat			SBM ³			FMM ⁴		
	Medium	High	Low	Medium	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
DM, %	37,4	33,3	30,4	20,2	23-32	23-36	22-40	89,1	86,7	85,2	86,4	87,1	87,2	87,4	87,4	86,5
CP, g/kg of DM	72	69	123	108	67	70	59	136	116	137	522	513	528	471	460	471
ADF, g/kg of DM	251	229	372	424	81	92	50									
NDF, g/kg of DM	452	415	599	671	223	234	146									
CF, g/kg of DM	192	168	310	353	38	36	29	27	37	20	42	42	46	73	82	81
Ash, g/kg of DM	39	32	102	99	30	25	19	19	18	20	72	70	84	65	66	69
Starch, g/kg of DM	366	359			615	606	675	690	675	690						

¹ Low = <5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high = >7,5 kg/d.

² Potato peelings.

³ Soybean meal.

⁴ Mixed meal treated with formaldehyde.

TABLE 2. Blocking features of cows at the different starch concentrations.

Cows, no.	Starch concentration ¹					
	Low		Medium		High	
	20	18	18	12	12	SE
	Ξ	SE	Ξ	SE	Ξ	SE
DIM	71	34	100	29	54	3
Milk yield, kg/d	31.7	6.9	32.2	7.7	29.7	5.6
Fat content, g/kg	40.6	5.5	37.6	5.6	38.0	3.5
True protein content, g/kg	32.4	3.2	32.5	3.2	29.3	2.3

¹ Low = <5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high = >7,5 kg/d.

TABLE 3. Composition of rations containing different starch concentrations and types of starch.

Composition	Starch concentration ¹					
	Low		Medium		High	
	Wheat	PP ²	Wheat	PP	Wheat	PP
Ingredient	-----(% of DM)-----					
Maize silage	0	0	47.0	45.5	56.8	52.5
Grass silage	53.2	54.7	13.2	9.8	0	0
Wheat straw	0	0	1.5	1.8	5.0	5.0
Wheat	33.1	0	19.7	0	17.5	0
PP	0	28.0	0	20.9	0	21.0
SBM ³	0	2.8	14.4	20.3	11.9	13.6
FMM ⁴	13.0	13.6	2.9	0	5.9	5.8
Minerals ⁵	0.7	0.9	1.3	1.6	2.9	2.1
Chemical						
NE _L , Mcal/kg of DM	1.48	1.51	1.55	1.56	1.55	1.55
Starch, g/kg of DM	240	184	309	300	345	352
CP, g/kg of DM	172	166	159	163	155	150
NDF, g/kg of DM	394	424	363	365	330	323
ADF, g/kg of DM	226	245	200	195	175	171
Ash, g/kg of DM	70	76	54	50	46	46

¹ Low = <5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high = >7,5 kg/d.

² Potato peelings.

³ Soybean meal.

⁴ Mixed meal treated with formaldehyde.

⁵ Contained 7% P and 21% Ca.

TABLE 4. Supply of starch by the ingredients of the ration at the different starch concentrations.

	Starch concentration ¹					
	Low		Medium		High	
	Wheat	PP ²	Wheat	PP	Wheat	PP
Roughage, kg/d	0.1	0.1	3.4	3.3	4.8	4.5
Energy concentrate, kg/d	4.3	3.4	2.7	2.7	2.7	3.1
Other feedstuffs in the ration, kg/d	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Total starch intake, kg/d	4.5	3.6	6.2	6.1	7.6	7.7

¹ Low = <5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high = >7,5 kg/d.

² Potato peelings.

TABLE 5.1. Unbalanced four-way hierarchical mixed model of variance analysis¹ for the variables DMI, net energy intake, CP intake, starch intake and BW.

Source	df	Means square reference
Type of starch	1	Cow (square, starch concentration)
Concentration of starch	2	Square (starch concentration)
Interaction of type of starch and starch concentration	2	Cow (square, starch concentration)
Square (starch concentration) ²	11	SE
Cow (square, starch concentration) ³	47	SE
Error	36	

¹ According to the MIXED model procedure of SAS (21)

² Hierarchical random effect.

³ Double hierarchical random effect.

TABLE 5.2. Unbalanced four-way hierarchical mixed model of covariance analysis¹ for all variables of milk yield and milk composition.

Source	df	Means square reference
Type of starch	1	Cow (square, starch concentration)
Concentration of starch	2	Square (starch concentration)
Interaction of type of starch and starch concentration	2	Cow (square, starch concentration)
Covariable ²	1	Cow (square, starch concentration)
Interaction of covariable and starch concentration	2	Cow (square, starch concentration)
Square (starch concentration) ³	11	SE
Cow (square, starch concentration) ⁴	47	SE
Error	33	

¹ According to the MIXED model procedure of SAS (21)

² Difference between the preexperimental mean of one trial and the overall preexperimental mean of all three trials.

³ Hierarchical random effect.

⁴ Double hierarchical random effect.

TABLE 6. Feed and nutrient intakes of cows fed rations containing different starch concentrations and different types of starch.

Intake	Starch concentration ¹												Effect			SDE ³
	Low		Effect of starch type P	Power (%)	Medium		Effect of starch type P	Power (%)	High		Effect of starch type P	Power (%)	Starch type P	Interaction type and concentration of starch P	Power (%)	
	Wheat	PP ²			Wheat	PP			Wheat	PP						
DM, kg/d	18.8	19.6	0.07	87	19.9	20.5	0.25	76	22.2	21.9	0.54	18	0.25	0.27	100	1.4
NE _L , Mcal/d	27.8	29.6	<0.01		30.8	32.1	0.07	99	34.4	33.9	0.53	72	0.05	0.10	100	2.2
CP, kg/d	3.23	3.26	0.64	10	3.21	3.38	0.04		3.46	3.28	0.08	95	0.86	0.03	98	0.24
Starch, kg/d	4.50	3.60	<0.01		6.23	6.14	0.50	84	7.67	7.70	0.86	6	<0.01	<0.01	100	0.41
BW, kg	664	662	0.62		649	643	0.51		626	628	0.72		0.62	0.73		16

¹ Low = <5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high = >7,5 kg/d.

² Potato peelings.

³ Standard Deviation Estimate

TABLE 7. Effect of type and concentration of starch in the ration on milk yield and composition.

Treatment	Starch concentration ¹												Effect			SDE ³
	Low		Effect of starch type P	Power %	Medium		Effect of starch type P	Power %	High		Effect of starch type P	Power %	Starch type P	Interaction type and concentration of starch P	Power %	
	Wheat	PP ²			Wheat	PP			Wheat	PP						
Milk yield, kg/d	25.7	25.9	0.72	10	25.4	24.1	0.10	89	27.2	26.6	0.53	23	0.25	0.35	99	2.3
FCM, kg/d	25.7	25.7	0.97	0	26.0	24.2	0.12	87	25.8	26.6	0.41	68	0.75	0.25	89	2.3
Fat content, g/kg	41.7	40.6	0.28	69	43.1	42.4	0.52	19	34.7	38.0	0.01		0.41	0.02		3.1
True protein content, g/kg	33.7	32.9	0.02		35.7	35.9	0.39	16	32.5	32.0	0.25	82	0.12	0.07	100	1.0
Lactose content, g/kg	49.8	49.9	0.75	7	50.7	50.1	0.13	88	50.4	50.3	0.73	7	0.37	0.41	92	1.2
Fat yield, g/d	1039	1026	0.70	10	1066	1015	0.14	85	979	1050	0.09	93	0.91	0.08	95	103
Protein yield, g/d	844	833	0.65	11	882	853	0.24	78	914	888	0.40	69	0.15	0.85	99	74

¹ Low =<5 kg/d, medium = 6 kg/d, and high =>7,5 kg/d.

² Potato peelings.

³ Standard Deviation Estimate

SUMMARY

The effect of variations in the source and amount of starch provided by the diet on the milk production of cows was studied during 5 trials with different starch levels and sources. These variations were realized using wheat or potatoes in total mixed diets based on grass silage or maize silage.

In sacco kinetics confirm that wheat starch disappears more quickly than potato starch in the rumen (instantaneous solubility of 65% and 40% respectively). The daily starch intake with maize silage based diets is over 6 kg per cow. In view of the rapid degradation of maize silage starch in the rumen (86% of instantaneous solubility), these diets can be characterized by a rapid (wheat - maize silage) or mixed speed of starch degradation (potatoes - maize silage).

The milk and protein yields increase with the starch supply even if the protein and fat contents decrease for supplies over 6-7 kg per day. This threshold separates the diets based on grass silage or maize silage.

The dry matter intake, milk and protein yields do not vary between the diets containing one of the starch concentrates. So, the main result of this work is the decreased milk fat (content and yield) with wheat in comparison to potatoes in maize silage based diets (respectively - 2,6 to -3,3 g fat/kg milk and -71 to -122 g fat/day) i.e. in diets with a starch supply of over 7kg per day. The milk fat composition shows significantly fewer short and medium chain fatty acids and more long chain fatty acids (+3,6%) with wheat diets compared to potato diets.

No differences in ruminal fermentation were shown between the two starch concentrates in these rations. The postprandial pH drop is stronger with wheat diets but no differences were observed for VFA concentration or composition or blood metabolites. As the milk fat precursors did not vary between the two diets, the lower milk fat content with wheat could be due to an inhibition of the activity of essential enzymes for milk fat synthesis. Indeed the milk fat of cows eating the wheat diet is significantly richer in C 18:1 *trans* (4,4 versus 2,7%) especially for the Δ 10 isomer (+1,46%) - a fatty acid known as being an efficient inhibitor of key-enzymes of *de novo* synthesis and desaturation.

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur SAUVANT Daniel, Professeur, INA, Paris

Monsieur CHARDIGNY Jean-Michel, Chargé de Recherche, INRA, Dijon

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur JURJANZ Stefan

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Moduler les performances zootechniques par l'apport d'amidon de la ration".

en vue de l'obtention du titre de :

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDOEUVRE CEDEX

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Sciences Agronomiques »

Fait à Vandoeuvre, le 16 novembre 2004

Le Président de l'I.N.P.L.

J. HARDY



RESUME

Les effets de variations d'apports d'amidon dans la ration sur la qualité du lait de vaches ont été étudiés lors de 5 essais dont les apports d'amidon ont été modulés en utilisant du blé ou des pommes de terre incorporés dans des rations complètes à base d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs.

Les cinétiques de disparition in sacco confirment que l'amidon de blé est dégradé dans le rumen plus vite que l'amidon de la pomme de terre (solubilité de 65% et 40% respectivement). Dans les rations à base d'ensilage de maïs l'apport d'amidon total dépasse 6 kg/jour. Compte tenu de la vitesse de dégradation de l'amidon de maïs ensilage (solubilité 86%) ces rations sont caractérisées par une dégradation de l'amidon soit rapide (ensilage de maïs - blé) soit mixte (ensilage de maïs - pommes de terre).

La production de lait brut et de protéines augmente avec la quantité d'amidon apportée par la ration malgré une diminution des taux butyreux et protéique avec un effet seuil aux alentours de 6-7 kg/jour dissociant les rations à base d'ensilage de maïs de celles à base d'ensilage d'herbe.

En absence d'une réponse de l'ingestion, de la production laitière ou des protéines du lait, le résultat majeur est une diminution de la matière grasse du lait (en teneur et en quantité) avec le blé comparativement aux pommes de terre dans des rations à base d'ensilage de maïs c'est-à-dire pour des ingestions supérieures à 7 kg d'amidon/jour (en moyenne -3 g de TB/kg et -100 g de matière grasse/jour). La composition de la matière grasse du lait montre pour le blé significativement moins d'acides gras courts et moyens et plus d'acides gras longs (+3,6%).

La fermentation des rations à base d'ensilage de maïs est similaire pour les deux concentrés. La chute postprandiale du pH est plus prononcée avec le blé mais la concentration en AGV totaux et leur composition sont statistiquement identiques tout au long de la cinétique ce qui est confirmé par l'absence de réponse des métabolites sanguins. Les précurseurs de la matière grasse du lait ne sont donc pas affectés par la nature du concentré. La teneur plus faible en matière grasse avec le blé pourrait alors provenir d'une inhibition d'enzymes indispensables pour la synthèse. En effet, le profil de la matière grasse du lait montre pour le blé significativement plus de C18:1 trans (4,4% contre 2,7%), notamment pour l'isomère de position D10 (+1,46 %) particulièrement inhibiteur pour des enzymes de la synthèse de novo et des désaturases.