

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université des Frères Mentouri Constantine1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Microbiologie

N° d'ordre : 24/D3C/2020

N° de série : 01/MB/2020



Thèse de Doctorat

Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle

Domaine : Science de la nature et de la vie

Option : Biotechnologies microbiennes, génomes et environnement

Présentée et soutenue par :

LIFA Maroua épouse BENATHMANE

Intitulée :

**Conversion microbienne des résidus de biomasse
agro-alimentaire et leur valorisation en
alimentation animale**

Membres du jury :

Président : Prof. HAMIDECHI Mohamed-Abdelhafid	(Université Frères Mentouri, Constantine1)
Rapporteur : Prof. HADDI Mohamed Laid	(Université Frères Mentouri, Constantine 1)
Examineur : Prof. BEKHOUCHE Farida	(Université Frères Mentouri, Constantine 1)
Examineur : Prof. MEZIANE Toufik	(Université de Batna)
Examineur : Prof. ARHAB Rabah	(Université d'Oum El-Bouaghi)

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Dieu, le tout puissant, qui ma donné la volonté, le courage et la patience pour la réalisation de se travail.

Un grand merci à mon directeur de thèse Pr. HADDI Mohamed-Laid de m'avoir permis de mener ce travail de thèse. Il a été très présent tout au long de cette expérience. J'ai beaucoup appris de leurs innombrables conseils, sur les plans théorique et méthodologique. Je le remercie énormément de leur participation précieuse à la partie pratique de ce travail. Il a toujours déplacé plus de 5 heures de temps pour la collecte des échantillons du liquide ruminal et après une journée très chargée, il me dirige et il participe aux manipulations étape par étape, durant toutes les expériences.

Je souhaite remercier également le Pr. SQUARTINI Andrea, Professeur à l'université de Padoue, de m'avoir accueilli aussi chaleureusement dans son laboratoire. Je tiens également à le remercier à titre personnel d'avoir toujours été présent pour me faciliter la vie en Italie, malgré ses préoccupations.

Je remercie les membres de jury en particulier Mr. HAMIDECHI M.A., Professeur à l'Université de Constantine 1 qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Je remercie également Mme. BEKOUCHE F., Professeur à l'Université de Constantine 1, Mr. MEZIANE T., Professeur à l'Université de Batna et Mr. ARHAB R., Professeur à l'Université d'Oum El-Bouaghi, pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à lire et à juger ce travail en tant qu'examineurs.

Mes remerciements s'adressent aussi à Mr. TAGLIAPIETRA Professeur à l'université de Padoue, et son encadré MORO Allesandro d'avoir participé à une partie considérable du travail effectué en Italie. J'exprime également ma profonde reconnaissance à toutes les personnes du laboratoire de Biotechnologie Agrarie Universita Degli Studi di Padova.

Je remercie BOUDERSSA Hind collègue et amie pour leur aide lors des expérimentations de l'analyse chimique des échantillons.

En fin, je remercie toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

Aux êtres les plus chères dans ma vie, ma Mère et mon Père pour leur affection, tendresse, compréhension, soutien et encouragement, Ceux qui m'ont ouvert les portes de la réussite. Je

leur serais reconnaissante tout le reste de ma vie.

Aucun mot ou expression ne suffira pour vous remercier

A ma petite famille,

(1) Mon conjoint Mohamed merci d'avoir patienté tous ce temps et merci encore de m'avoir secondé dans les moments difficiles

(2) Mes poussins Moundir Islem, Amir et Lina (qui arrivera bientôt nchallah), ma joie et ma raison de vivre

A mes sœurs et frères pour leur soutien et leurs encouragements

A ma belle famille

A mes sœurs et amies du labo 14, je n'oublierais jamais les beaux moments que j'ai passé avec vous. Que dieu vous bénissent et vous gardent près de moi le plus longtemps possible.

A mes amies et collègues de la première promotion Biologie LMD

A tous ceux que j'aime.

Publications et communications

Lifa, M., Haddi, M. L., Tagliapietra, F., Cattani, M., Guadagnin, M., Sulas, L., Muresu, R., Schiavon, S., Bailoni, L. & Squartini, A. (2018). Chemical and fermentative characteristics of agricultural byproducts and their mixtures with roughages incubated with rumen fluid from slaughtered dromedaries. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 42(6), 590-599.

Lifa, M., Haddi, M. L. et Squartini, A. L'effet de la composition du milieu de culture et de la re-fermentation des sous produits de tomates et d'oranges sur la synthèse protéique par les microorganismes du rumen. *Les Journées Internationales de Biotechnologie 2013. Hammamet (Tunisie), 21-24 Décembre 2013.*

Lifa, M., Haddi, M. L. Paramètres cinétiques de la fermentation in vitro par la flore ruminale des mélanges de paille et de résidus agro-alimentaires. *IVème Congrès International de Biotechnologie et Valorisation des Bio-ressources. Hammamet (Tunisie), 24-27 Mars 2016.*

Boudersa H., **Lifa, M.**, Haddi, M. L. Etude de la composition chimique d'un résidu agro – alimentaire utilisé dans l'alimentation des ruminants domestiques. *IVème Congrès International de Biotechnologie et Valorisation des Bio-ressources. Hammamet (Tunisie), 24-27 Mars 2016.*

Maroua LIFA, Mohamed-Laid HADDI, Asma AGGOUN, Andrea SQUARTINI. Effet du prétraitement par mélange de sous-produits d'oranges et par la source d'azote sur la valeur nutritive. Séminaire National sur les Biotechnologies en Algérie (SNBA-2019). Ecole Nationale Supérieure de Biotechnologie « Taoufik KHAZNADAR » - Constantine, le 03 et 04 Décembre 2019.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Première partie : Etude bibliographique

Chapitre I : Les différents sous-produits issus de l'industrie agroalimentaire, apports nutritifs pour les ruminants

1. Les sous-produits de tomates.....	6
1.1. Production mondiale de la tomate.....	6
1.2. Tomate industrielle en Algérie.....	6
1.3. Disponibilité des sous-produits de tomates.....	7
1.4. Composition chimique et apports nutritifs des sous-produits de tomate.....	8
1.5. Utilisation des sous-produits de tomates en alimentation animale.....	11
2. Sous-produits d'oranges.....	13
2.1. Production mondiale des agrumes.....	13
2.2. L'agrumiculture en Algérie.....	13
2.3. Disponibilité des sous-produits d'oranges	13
2.4. Composition chimique et apports nutritifs des sous-produits d'oranges.....	15
2.5. Utilisation des sous-produits d'oranges en alimentation animale.....	15
3. Sous-produits de pommes.....	18
3.1. Production mondiale et locale des pommes.....	18
3.2. Disponibilité des sous-produits de pommes.....	19
3.3. Composition chimique et apports nutritifs des sous-produits de pommes.....	20
3.4. Utilisation des sous-produits de pommes en alimentation animale.....	20

Chapitre II- Stratégies de valorisation des sous-produits agroalimentaires

1. Traitements.....	23
1.1. Traitements physiques.....	24
1.2. Traitements chimiques.....	24
1.3. Traitements biologiques.....	24
2. Complémentation.....	26
2.1. Effets associatifs	26
2.1.1. Effets associatifs positifs (synergiques).....	26
2.1.2. Effets associatifs négatifs (antagonistes).....	27

Chapitre III- Formulation des rations et besoins alimentaires des ruminants

1. Ration équilibrée.....	28
2. Besoins alimentaires des ruminants.....	28
2.1. Besoins en carbohydrates.....	28
2.2. Besoins en protéines.....	30
2.3. Besoins en minéraux.....	32
2.4. Besoins en vitamines.....	34
3. Formulation des rations au moindre coût	35
4. Déficit fourrager.....	39

Chapitre IV- Dynamique du devenir des aliments dans le rumen

1. Ecosystème ruminal.....	42
2. Biotransformation des constituants de la ration dans le rumen.....	45
2.1. Métabolisme glucidique.....	45
2.2. Dégradation de la cellulose.....	45
2.3. Dégradation de l'hémicellulose.....	47
2.4. Dégradation de la pectine.....	49
2.5. Dégradation de l'amidon.....	48
3. Métabolisme protéique.....	51
3.1. Protéolyse.....	51
3.2. Protéosynthèse.....	53
4. Métabolisme lipidique.....	55

Chapitre V : Méthodes d'étude de l'apport nutritif des sous-produits agroalimentaires et des aliments fibreux dans l'alimentation des ruminants

1. Les méthodes chimiques	57
2. Méthodes physiques.....	58
3. Les méthodes biologiques.....	59
3.1. Technique de digestibilité <i>in vitro</i>	59
3.2. Méthode de dégradation <i>in situ</i>	60
3.3. Techniques de mesure de la production <i>in vitro</i> de gaz	60

Deuxième partie : Matériel et méthodes

Partie I : Étude des caractéristiques physicochimiques, microbiologiques et fermentaires des sous-produits agro-alimentaires, des aliments fibreux et de leurs mélanges

1. Introduction.....	63
----------------------	----

2. Matériel végétal.....	63
3. Matériel animal	64
4. Analyse des caractéristiques physicochimiques des sous-produits et des aliments fibreux.....	65
4.1. Estimation de la matière sèche.....	65
4.2. Estimation de la matière organique et minérale.....	65
4.3. Dosage des sucres totaux.....	65
4.4. Dosage de matières azotées totales.....	65
4.5. Dosage de la matière grasse.....	65
4.6. Dosage des constituants pariétaux.....	66
5.5.1 Estimation de la fraction NDF.....	66
5.5.2 Estimation de la fraction ADF	66
5.5.3 Estimation de la fraction ADL.....	66
5.5.4 Estimation des hémicelluloses et cellulose.....	66
5. Détermination du pH initial et de la capacité tampon	67
6. Fermentation <i>in vitro</i> des sous-produits par le microbiote ruminal.....	68
6.1 Principe.....	68
6.2 Description du système de fermentation.....	68
6.3 Mise en œuvre de la fermentation <i>in vitro</i>	68
6.3.1. Préparation de la salive artificielle	68
6.3.2. Reconstitution du mélange salive- liquide ruminal filtré.....	69
6.3.3. Inoculation et incubation.....	69
6.3.4. Détermination des paramètres cinétiques de la production de gaz <i>in vitro</i>	70
7. Estimation du pourcentage de dégradabilité apparente	70
8. Analyse statistique des résultats	71

Partie II : Étude de l'enrichissement des sous-produits agroalimentaires et de leurs mélanges en protéines microbiennes

1. Introduction.....	72
2. Prélèvement du liquide ruminal.....	72
3. Préparation des milieux d'incubation.....	72
4. Préparation des combinaisons substrat- milieu –inoculum.....	73
5. Incubation	73
6. Estimation de la concentration de l'ammoniac.....	74
6.1. Principe.....	74
6.2. Préparation des échantillons.....	74
6.3. Préparation des réactifs.....	74
6.4. Dosage de l'ammoniac.....	74
6.5. Calcul de la concentration de l'ammoniac.....	75
7. Dosage des protéines.....	76
7.1. Principe.....	76
7.2. Préparation des dilutions de la solution d'albumine sérique bovine (BSA).....	76
7.3. Préparation du réactif MicroBCA.....	77

7.4. Méthode.....	77
7.5. Calcul de la concentration en protéines.....	77
8. Evaluation de la perte en matière sèche.....	77
9. L'analyse élémentaire CNS (carbone, azote, soufre).....	78
9.1. Principe.....	78
9.2. Préparation des échantillons.....	78
9.3. Protocole CNS.....	78
10. Evaluation de la perte en azote, carbone, soufre et gain en protéines.....	79
10.1. Bilan de l'azote.....	79
10.2. Bilan du carbone et du soufre.....	79
10.3. Bilan des protéines.....	80
11. Analyse statistique.....	80

Troisième partie : Résultats et discussion

Partie 1 : Caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques et fermentaires des sous-produits, des aliments fibreux et de leurs mélanges

1. Composition chimique des substrats.....	81
1.1. Teneur en matière sèche, en matière minérale et organique.....	81
1.2. Teneur en protéines brutes.....	83
1.3. Teneur en matière grasse.....	84
1.4. Teneurs en constituants pariétaux.....	85
2. pH initiaux et capacité tampon des substrats et de leurs mélanges.....	87
2.1. pH initiaux.....	87
2.2. Capacité tampon.....	91
3. Estimation des paramètres cinétiques et production cumulée de gaz des substrats seuls et de leurs mélanges	93
3.1. Estimation des paramètres cinétiques des résidus agro-alimentaires et des aliments fibreux	93
3.1.1. Volume potentiel et production cumulée de gaz.....	93
3.1.2. Taux horaire de la libération de gaz (c).....	97
3.1.3. Temps de la demi-production de gaz ($t_{1/2}$).....	98
3.1.4. Temps de latence (lag).....	99
3.2. Estimation des paramètres cinétiques des polymères végétaux (amidon, pectine, cellulose, hémicellulose, caséine).....	100
3.3. Estimation des paramètres cinétiques des mélanges binaires entre sous-produits agro-alimentaire et aliments fibreux.....	101
4. Cinétiques de la production cumulée de gaz après 96 heures de fermentation <i>in vitro</i> ...	104
5. pH finaux des substrats et de leurs mélanges.....	106
6. Dégradabilité apparente des substrats et de leurs mélanges	107

Partie 2 : Enrichissement en protéines des sous-produits de l'industrie agroalimentaires et de leurs mélanges.

1. Effet du substrat sur la concentration en ammoniac, sur le bilan protéique, le bilan CNS, la perte en MS et le pH ruminal.....	111
1.1. Teneur en ammoniac.....	111
1.2. Gain en protéines.....	114
1.3. Bilan du carbone, de l'azote et du soufre.....	117
1.4. Perte en matière sèche.....	120
1.5. Détermination du pH.....	120
2. Effet de la source d'azote et de la dose d'inoculum sur la concentration en ammoniac, sur le bilan protéique, le bilan CNS et le pH ruminal.....	121
3. Effet de la re-fermentation sur la concentration en ammoniac, sur le bilan protéique, sur le bilan CNS, sur la perte en MS et sur le pH ruminal.....	123
Quatrième partie : Discussion générale.....	127
Cinquième partie : Conclusion et perspectives.....	132
Références bibliographiques.....	134
Annexes.....	164

Liste des figures

Figure 1: Sous-produit générés par la transformation industrielle des tomates.....	10
Figure 2: Composition des sous produits de la tomate transformée	10
Figure 3: Présentation schématique de la production des sous-produits d'agrumes.....	14
Figure 4: Résumé des avantages potentiels de l'incorporation de sous-produits d'agrumes dans l'alimentation des ruminants	17
Figure 5 : Sous-produit générés par la transformation industrielle des pommes.....	19
Figure 6: Méthodes chimiques, physiques, physico-chimiques et biologiques pour le traitement des résidus.....	23
Figure 7: Répartition (en %) de l'offre fourragère par type de fourrage à l'échelle nationale	39
Figure 8: Représentation schématique de l'attaque enzymatique de la cellulose par les microorganismes cellulolytiques du rumen.....	46
Figure 9: Représentation de la dégradation de la fibre et de ses composantes (microfibrilles de cellulose, hémicellulose et lignine) par le complexe cellulosome.....	47
Figure 10: Représentation schématique de l'attaque enzymatique de l'hémicellulose par les microorganismes hémicellulolytiques du rumen.....	48
Figure 11: Métabolisme azoté et synthèse des protéines microbiennes chez les ruminants....	52
Figure 12: Comparaison des systèmes analytiques de Weende et Van Soest.....	58
Figure 13 : Appareil de mesure des gaz de fermentation à transducteurs de pression.....	69
Figure 14: Courbes de chute du pH lors de la titration des résidus de tomates et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin.....	90
Figure 15: Courbes de chute du pH lors de la titration des résidus d'oranges et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin.....	90
Figure 16: Courbes de chute du pH lors de la titration des résidus de pommes et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin.....	90
Figure 17: Courbes de chute du pH lors de la titration des aliments fibreux comparées à celles du liquide ruminal (LR), de la salive artificielle (SA) et du mélange LR+SA.....	90
Figure 18: Cinétiques de dégradation des résidus de tomates et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire.....	105

Figure 19: Cinétiques de dégradation des résidus d'oranges et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire.....	105
Figure 20: Cinétiques de dégradation des résidus de pommes et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire.....	105
Figure 22: Courbe étalon des sucres totaux	163

Liste des tableaux

Tableau 1 : Estimation du tonnage des sous-produits générés par la transformation industrielle des tomates, des oranges et des pommes en Algérie.....	8
Tableau 2 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit de tomate.....	12
Tableau 3 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit d'orange.....	16
Tableau 4 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit de pomme.....	21
Tableau 5 : Composition en carbohydrates dans les rations des vaches laitières hautes-productrices.....	29
Tableau 6 : Composition en protéines des rations de vaches laitières hautes-productrices....	30
Tableau 7 : Composantes protéiques et concentrations d'énergie de certains sous-produits...	31
Tableau 8 : Besoin en minéraux de certains animaux d'élevage (cas des ovins et des bovins).....	33
Tableau 9 : Fonctions et teneurs en quelques vitamines nécessaires pour une haute production des vaches laitières.....	35
Tableau 10 : <i>Évaluation de la valeur (\$)</i> par tonne de quelques sous-produits à l'aide des équations de Petersen.....	38
Tableau 11 . Evolution des importations d'aliments de bétail en Algérie.....	41
Tableau 12 : Groupes microbiens du rumen possédant des activités dégradant les fibres.....	44
Tableau 13 : Quelques caractéristiques de bactéries rencontrées dans le rumen.....	50
Tableau 14 : Composition en acides aminées des protéines de bactéries et de protozoaires du rumen en comparaison à celle de la caséine, des sous-produits de tomates, d'oranges et de pommes.....	54
Tableau 15 : Composition chimique des sous-produits et des aliments fibreux.....	82
Tableau 16 : pH initial et final, capacité tampon et dégradabilité apparente des sous-produits, des aliments fibreux, des polymères purs, de l'inoculum et du milieu d'incubation.....	88
Tableau 17 : Paramètres cinétiques estimés de la fermentation <i>in vitro</i> de 1g de MS de sous-produits d'oranges, de pommes et de tomates et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin comparés à celles des polymères purs.....	94

Tableau 18 : Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des sous-produits, des aliments fibreux et de leurs mélanges ainsi que l'effet du substrat sur ces paramètres.....115

Tableau 19 : Ratio C/N et N/S des milieux d'incubations contenant les sous-produits d'oranges, les sous-produits de tomates et leurs mélanges avec les cardes.....119

Tableau 20 : Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des sous-produits, des aliments fibreux et de leurs mélanges ainsi que l'effet de la source d'azote et de la dose de l'inoculum sur ces paramètres.....122

Tableau 21 : Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des sous-produits, des aliments fibreux et de leurs mélanges ainsi que l'effet de la re-fermentation sur ces paramètres.....124

Liste des abréviations

AA : Acides aminés

AAT-PBV : Amino Acids Truly absorbed in the small intestine- Protein Balance in the rumen (Acides aminés réellement absorbés dans l'intestin grêle – Bilan de protéines dans le rumen)

ADF: Acid Detergent Fiber (Fibre végétale résistante au détergent en milieu acide)

ADL: Acid Detergent Lignin (Lignine résistante au détergent en milieu très acide)

AGV: Acides Gras Volatils

CBM: Carbohydrate binding module (module se fixant aux glucides)

CBP : Cellulose Binding Protein (module se fixant aux protéines)

CNS : Carbone, Azote, Soufre

CP : Crude protein (protéines brutes)

CT : Capacité tampon

IVTDMD : Digestibilité réelle *in vitro* de la matière sèche

MAT : Matières azotées totales

MG : Matière grasse

MM : Matière minérale

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

N-NH₃ : Azote ammoniacal

NDF: Neutral Detergent Fiber (Fibre végétale résistante au détergent en milieu neutre)

NFC: Non fibrous carbohydrates (Carbohydrates non structuraux)

PB : Protéines brutes

PDI : Protéines digestibles dans l'intestin

RDP : Ruminant Degradable Protein (Protéines dégradables dans le rumen)

RUP : Ruminant Degradable Protein (Protéines non-dégradables dans le rumen)

TDN : Nutriments digestibles

Introduction générale

Introduction générale

Face à une augmentation constante des prix des produits carnés en Algérie, se présente une progression médiocre et largement insuffisante du secteur de la production des aliments pour bétail. L'Algérie a produit plus de 500 mille tonnes de viandes rouges (bovins, ovins, caprins et camélidés) durant l'année 2013 contre 285 milles tonnes en 2001, soit une augmentation de 55% (FAOstat, 2017). En parallèle la hausse moyenne des prix de la viande de mouton s'élève à 111% durant la même période et elle a été de +190% en décembre 2017 (ONS, 2018). En raison de la faiblesse de la production et de la cherté de la viande rouge l'Algérien reste l'un des plus faibles consommateurs de viandes du Maghreb (Chikhi et Bencharif, 2016). Les éleveurs imputent cet état à l'insuffisance locale des aliments de bétail, ce qui est associé principalement à l'insuffisance en eau et en surfaces irriguées et à la mauvaise qualité des aliments fournis (Chehat et Bir, 2008 ; Senoussi et Behir, 2010). Ceci a conduit à l'importation d'une grande quantité d'aliments fourragers et de concentrés à des prix qui progressent continuellement (Kali et *al.*, 2011).

Dans un autre volet, l'évolution continue du secteur de la transformation des fruits et des légumes conduit au rejet d'une quantité considérable de sous-produits agro-industriels (SPIAA), qui représente 30 à 50% du produit initial (FAO, 2011). Etant une matière première renouvelable, abondante et bon marché, de nombreux SPIAA sont exploités pour la production de biogaz, de biocarburants, d'acides organiques, d'enzymes, de composés aromatiques, de biomasse microbienne et d'aliments enrichis pour la nutrition animale (Nigam et Pandey, 2009).

L'utilisation des résidus agro-alimentaires comme aliments non conventionnels pour les animaux d'élevage constitue actuellement une stratégie importante qui contribue non seulement à surmonter les pénuries alimentaires et les prix élevés des aliments conventionnels, mais aussi offre des avantages économiques et environnementaux (Mirzaei-Aghsaghali et Maheri-Sis, 2008). De nombreux sous-produits de minoterie, brasserie, sucrerie et huileries sont traditionnellement utilisés pour l'alimentation du bétail. Toutefois, durant les procédés industriels, comme l'extraction de jus d'agrumes ou la préparation du concentré de tomate, la structure et la composition chimique initiale d'un fruit ou d'un légume subit diverses modifications ou altérations, ce qui donne un produit présentant des caractéristiques nouvelles, non nécessairement compatibles avec les besoins du microbiote ruminal et la physiologie de l'animal (Lifa et *al.*, 2018). Ainsi l'incorporation des SPIAA comme nouveaux aliments dans le régime alimentaire du bétail nécessite une parfaite

Introduction générale

connaissance de leurs caractéristiques nutritives et fermentaires et ainsi que les moyens susceptibles pour les améliorer et de les valoriser.

La valeur nutritive d'un sous-produit dans l'alimentation des animaux d'élevage dépend de ses caractéristiques nutritives, comme la fibrosité, la teneur en protéines, la digestibilité de la matière organique et la valeur énergétique. La valeur nutritive des SPIAA peut être déterminée par la composition chimique (Aregheore, 1993). Toutefois, cela ne fournit pas suffisamment d'informations. La combinaison entre les analyses chimiques et la méthode de la production *in vitro* de gaz donne plus d'informations sur la digestibilité des aliments et sur l'énergie disponible dans diverses circonstances (Menke et Steingass, 1988). Blümmel et Bullerdieck (1997) recommandent la complémentation de la production *in vitro* de gaz avec la mesure de la dégradabilité des aliments car elle reflète la quantité de substrat utilisée pour la formation de tous les produits de la fermentation, à savoir les acides gras à courte chaîne, les gaz et la biomasse microbienne (Blümmel et Bullerdieck, 1997).

Comme la digestion des fibres dans le rumen est assurée par une population microbienne dense et variée dont la composition change avec le changement des composants de la ration (Samsudin et *al.*, 2012 ; Iqbal et *al.*, 2018), les aliments destinés aux ruminants ne doivent pas seulement apporter un complément d'éléments nutritifs nécessaires à l'animal, mais aussi ils ne doivent pas modifier la physiologie et la microbiologie du rumen (pH, constitution microbienne) pour que cette population soit saine et viable pour permettre une utilisation maximale des constituants alimentaires. L'inclusion d'autres méthodes qui caractérisent les propriétés physico-chimiques des aliments peut aussi être d'intérêt afin de mieux cerner les différences de comportement de la fermentation des aliments. Les aliments influencent le statut acido-basique du rumen par leur pH, leur capacité tampon et la stimulation de la salivation (Le Ruyet et Tucker, 1992). Afin de prévoir l'état d'acidose ruminal, les nutritionnistes des ruminants ont perpétuellement suivis les variations du pH ruminal, en revanche la capacité tampon des fourrages était rarement étudiée voir négligée. Toutefois, certaines études ont signalé qu'il est primordial de déterminer la capacité tampon des fourrages et d'aliments destinés aux ruminants avant d'administrer n'importe quelle ration aux animaux d'élevage (Moharary, 2007). Les aliments à forte teneur en carbohydrates solubles et à faible pouvoir tampon peuvent entraîner un abaissement du pH ruminal, ce qui entraîne un risque d'acidose. Les sous-produits agro-industriels présentent des capacités tampons différentes, principalement liées à leurs sels d'acides organiques et à leur teneur en protéines (Playne et McDonald, 1966).

Introduction générale

Les gaz métaboliques produits à partir d'aliments fermentés constituent un autre aspect important lorsque les sous-produits sont utilisés comme aliments pour les ruminants en raison du risque de ballonnement, qui peut avoir lieu lors d'une production intense et rapide des gaz de fermentation. En outre, La fermentation de quantités élevées d'hydrates de carbone facilement fermentescibles entraîne une diminution du pH du rumen, ce qui affecte négativement l'activité cellulolytique et par la suite la digestibilité des parois cellulaires des fourrages (Mould et Ørskov, 1983). Ainsi une combinaison appropriée entre des SPIAA entre eux ou avec des fourrages grossiers peut offrir la possibilité de corriger certains de leurs aspects nutritionnels et physico-chimiques, tels qu'une composition nutritionnelle déséquilibrée, une faible capacité tampon et une production excessive de gaz. Dans le même temps, le processus peut valoriser les fourrages de mauvaise qualité eux-mêmes. Parmi les sous-produits de l'industrie agroalimentaire, les épluchures de tomate, la pulpe d'orange et les résidus de pommes sont produits en tonnage appréciable. Le Chardon-Marie (*Sylibum marianum*) et le Chrysanthème à couronne (*Chrysanthemum coronarium*) sont plutôt des exemples intéressants de fourrages sauvages abondant et hautement exploitable dans la région méditerranéenne (Sulas et al., 2016 ; Cabiddu et al., 2006; Valente et al., 2003). Plusieurs études ont prouvé l'efficacité de l'association entre les fourrages et les plantes (Doran et al., 2007, Liu et al., 2002), ainsi qu'entre les sous-produits eux mêmes (Abdollahzadeh et al., 2010). Tandis que des informations limitées sont disponibles sur les effets associatifs lorsque des fourrages de mauvaise qualité sont mélangés à des sous-produits facilement dégradables.

À l'instar des autres mammifères, les ruminants ne possèdent pas d'enzymes digestives capables de digérer les polymères constituant la paroi végétale, mais ils dépendent entièrement de l'activité métabolique du microbiote ruminal, communauté microbienne dotée de capacités hydrolytiques immenses qui traitent de manière naturelle et efficace de tels substrats même lorsqu'ils sont noyés dans des matrices où la présence d'autres polymères fait obstacle, comme dans le cas de la lignine, de la cutine et de la silice (Yue et al., 2013 ; Agbagla-dohnani et al., 2003) .

Le liquide ruminal bovin est largement utilisé pour l'évaluation *in vitro* de la biodégradabilité de divers aliments et produits dérivés. Toutefois, le liquide ruminal de dromadaires, malgré son aptitude au même but (Haddi, 2003), n'a guère suscité l'attention. Toutefois, en raison de leur adaptation aux conditions extrêmes, les dromadaires peuvent se nourrir d'un large éventail de plantes telles que les arbustes épineux, les halophytes et les

Introduction générale

types aromatiques, qui sont généralement évitées par les ruminants domestiques (Iqbal et Khan, 2001). Dans cette étude, nous avons choisi le dromadaire comme source d'inoculum (dans la partie effectuée en Algérie) en raison de leur alimentation naturelle typique, encore élevés à l'état semi-sauvage, sur une végétation extrêmement xérophile et sclérophyte en comparaison aux autres ruminants domestiques dont l'alimentation est largement affectée par l'intégration de concentrés et par les rejets de pain sec.

Les sous-produits de légumes et de fruits sont riches en matières cellulosiques et souvent faibles en lignine, et peuvent donc être une bonne source de nutriments pour les ruminants et des substrats prometteurs pour la production des protéines microbiennes. Toutefois, ils n'ont qu'une teneur minimale en protéines, ainsi, leur exploitation dans l'alimentation du bétail dépendra du développement de procédés pour leur enrichissement en protéine par des moyens biotechnologiques. La fermentation est une méthode alternative qui permet d'améliorer la teneur en éléments nutritifs des aliments par la biosynthèse de vitamines, d'acides aminés essentiels et de protéines (Oboh, 2006). Elle constitue une approche intéressante pour la production de sous-produits à valeurs ajoutés.

Les cellules d'algues, les champignons, les levures et les bactéries sont composés jusqu'à 60% de protéines de haute qualité. Sous diverses conditions, ces organismes peuvent consommer différents types de résidus agro-industriels, se multiplient rapidement et produisent des cellules microbiennes qui constituent une source importante de protéines. Un large éventail de microorganismes a été utilisé par plusieurs chercheurs pour enrichir des substrats pauvres en protéines destinés à la consommation animale notamment: les bactéries (Oboh, 2006), les champignons (Vendruscolo, 2009 ; Ahmadi *et al.*, 2015 ; Tijani *et al.*, 2012), les levures (Araújo *et al.*, 2008 ; Villas-Boas *et al.*, 2003) ainsi que la microflore ruminal mixte (Chumpawadee et Soychuta, 2009 ; Adeyemi *et al.*, 2007). Cependant, la fermentation avec le liquide ruminal doit être considérée en raison de l'avantage des microorganismes du rumen, un complexe microbien qui a la particularité d'utiliser des substrats de faible qualité et de l'azote non protéique pour synthétiser de la protéine microbienne.

Dans ce contexte, et pour l'obtention d'un aliment équilibré et compatible avec le travail de la flore ruminal et la physiologie digestive de l'animal, on s'est intéressé dans une première partie à l'évaluation des sous-produits de tomates, d'oranges et de pommes, et ceci à travers l'étude de leurs caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques et fermentaires

Introduction générale

lorsque ils sont incubés seuls ou en mélange avec les chrysanthèmes (*Chrysanthemum coronarium L.*), les cardes (*Silybum marianum L. Gaertn.*) et le foin de la vesce-avoine, comme aliments qui fournissent un apport en fibres.

Dans une deuxième partie, et afin de tester la possibilité de l'enrichissement des sous-produits en protéines microbiennes par le processus de fermentation répétée, les résidus de tomates, les résidus d'oranges et leurs mélanges avec les cardes sont incubés dans quatre milieux différents par la source d'azote (organique et inorganique) et la dose du liquide ruminal servant comme inoculum. Ceci afin de déterminer le meilleur substrat et la meilleure combinaison entre source d'azote et dose du liquide ruminal qui assure un rendement maximal en protéines. Trois fermentations successives sont effectuées pour tester la possibilité d'utiliser le liquide d'une fermentation comme source d'inoculum pour la fermentation suivante.

La problématique de cette thèse s'insère dans le cadre d'un projet de recherche Algéro-Italien «Identification génético-moléculaire et étude des activités hydrolytiques des principaux groupes bactériens du rumen de dromadaire, impliqués dans la dégradation de la biomasse lignocellulosique et leur applications à la valorisation des résidus agricoles », qui a débuté en 2009. La première partie de ce travail a été réalisée au niveau du laboratoire de Mycologie, de Biotechnologie et de l'Activité Microbienne situé à l'université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie. La seconde partie a été complétée à l'université de Padova, laboratoire de production animale. Department of Agronomy, Food, Natural resources, Animals and Environment, University of Padova, Italy.

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Les différents sous-produits issu de l'industrie agroalimentaire, apport nutritifs pour les ruminants

Des millions de tonnes de sous-produits sont générés en Algérie chaque année. La quantité de paille seule se chiffre entre 2,5 et 3 millions de tonnes de résidus par an (Triki et *al.*, 2010). Les sous produits de l'olivier récoltent une moyenne de 200 mille tonnes de margines et 90 mille tonnes de grignons (Nadour, 2015). Le palmier dattier offre une large gamme de sous-produits agricoles: palmes sèches, rebuts de dattes et pédicelles avec des tonnages appréciables de l'ordre de 135 000 tonnes, 67 500 tonnes et 5 000 tonnes respectivement (Chehema et Longo, 2001).

La valorisation des sous produits dans l'alimentation animale représente une option économique attrayante, puisqu'elle permet de soulager la pression sur la demande en progression d'aliments pour bétail, tout en abaissant les coûts. Dans notre étude on a choisi des résidus de l'industrie agroalimentaires qui sont générés après la transformation industrielle des fruits de tomates, d'oranges ou de pommes afin d'étudier la possibilité de leur utilisation comme aliment pour bétail.

1- Sous-produits de tomates

1 -1- Production mondiale de la tomate

En termes de production mondiale, la tomate est après la pomme de terre, le légume le plus produit dans le monde avec une production de plus de 182 millions de tonnes en 2017. Les principaux producteurs de tomates étaient la Chine, l'Inde, les Etats-Unis, la Turquie, l'Egypte, l'Iran, l'Italie, l'Espagne, le Mexique et le Brésil (75 % de la production mondiale). L'Algérie se situe au 17ème rang mondial avec une production de l'ordre de 1,28 millions de tonnes (FAOstat, 2017).

1-2- Tomate industrielle en Algérie

Les surfaces consacrées à la production de la tomate industrielle ont augmenté régulièrement jusqu'à la fin des années 1990 ; de 100 ha dans les années 1930 à près de 25 milles ha en 2001. Depuis elles ne cessent de régresser pour se situer aux environs de 12 milles ha en 2009. Ces superficies sont principalement localisées au Nord-Est du pays (Skikda, Annaba, Guelma, El-Tarf) (MADR, 2009).

Synthèse bibliographique

La filière algérienne de la tomate industrielle a vu sa production passer au plus qu'au double entre les années 2000-2009 et 2010-2017, dépassant 1 million de tonnes contre 426 mille tonnes durant la même période (MADR, 2018). Parallèlement à cette évolution, le nombre d'usines spécialisées dans l'industrie de la transformation de tomate a également connu un développement relativement rapide en passant de 5 usines en 1970 à 26 à l'échelle nationale en 2000. Après cette dernière période, les capacités ont stagné, voire chuté, du fait de la fermeture de nombreuses unités obligées d'arrêter pour cause d'incapacité à honorer leurs dettes vis-à-vis des banques. En 2011, neuf entreprises privées constituent le secteur de l'industrie de transformation de la tomate; ces usines totalisent une capacité de transformation de 18 500 tonnes/jour. Deux unités de production détiennent 75 % du marché national : la Conserverie Amor Ben Amor (CAB) située à Guelma qui produit 37 000 tonnes/an (satisfaisant 49 % des besoins nationaux) et IZDIHAR à Skikda qui produit 18 000 tonnes/an (26 % des besoins nationaux) (Bouzid et Bedrani, 2013).

1-3- Disponibilité des sous-produits de tomates

Selon l'Association Méditerranéenne Internationale de la Tomate (AMITOM), plus d'un quart de la production mondiale de la tomate est destinée à la transformation industrielle (34,33 million tonnes), ce qui place les tomates au premier rang des légumes transformés (Tomatoes news, 2018). Cette transformation est susceptible de générer des quantités importantes de sous produits et de déchets estimés en 2007 à 11 millions de tonnes (Heuzé et *al.*, 2015). En Algérie, il n'ya pas de statistiques officielles sur le volume de déchets élaboré de la transformation industrielle des tomates. Toutefois compte tenu du tonnage annuel transformé qui progresse continuellement en passant de 380 mille tonnes en 2009 (MADR, 2009) à plus de 500 mille tonnes en 2018 (Tomatoes news, 2018) on peut estimer que près de 150 mille tonnes de résidus de tomate ont été générés en 2018 (tableau 1), ce chiffre devrait augmenter au cours des prochaines années compte tenu des stratégies suivies par l'Etat pour l'amélioration de la production de la tomate industrielle, afin d'atteindre l'autosuffisance en concentré de tomate et limiter l'importation du triple et du double concentré de tomate.

Synthèse bibliographique

Tableau 1. Estimation du tonnage de sous-produits générés par la transformation industrielle des tomates, des oranges et des pommes en Algérie (mille tonnes, MT)

Fruit	Année	Production (MT)	Quantité transformée (MT)	% de Sous- produit dans le fruit	Sous- produits générés (MT)
Tomate industrielle	2018	1280 ⁽¹⁾	500 ⁽²⁾	3-30	15-150
Orange	2016	892 ⁽¹⁾	223	50-70	111-156
Pomme	2016	500 ⁽¹⁾	125	25-35	31-44

(1) FAOstat: <http://www.fao.org/FAOstat/fr/#data/QC>; (2) Tomatonews : http://www.tomatonews.com/en/background_47.html

1-4- Composition chimique et apport nutritif des sous-produits de tomate

La transformation industrielle des tomates en sauce, ketchup, et produits en conserve s'accompagne par la libération d'une quantité importante de résidus composés principalement de pelures, pulpes et graines nommé pulpe de tomate. Ce résidu représente entre 3-30 % du poids de la tomate crue et sa composition varie en fonction des traitement effectués (King et Zeidler, 2004 ; Shao *et al.*, 2013 ; Ventura *et al.*, 2009)

La composition de la pulpe de tomate séchée indique la présence d'une quantité très significative de fibres, de lipides et de protéines (Shao *et al.*, 2013, Del Vall *et al.*, 2006). Elle est plus riche en matière organique et en fibre (NDF, ADF, ADL) que le fruit de tomate. Toutefois, elle présente une teneur en protéine semblable à ce dernier (Ventura *et al.*, 2009). La pulpe de tomate séchée a une composition en acides aminés essentiels similaire à celles des protéines de soja (Drouliscos, 1976). Les graines de tomates ont une teneur en lysine de plus de 13 % à celles des protéines de soja (Brodowski et Geisman, 1980). Cette teneur en protéines modérément élevé la rend un supplément intéressant en protéines pour l'alimentation des ruminants (Del Valle *et al.*, 2006).

Par ailleurs, les épluchures de tomates contiennent la plupart des minéraux importants pour les enzymes antioxydantes *in vivo* en particulier le Ca, le Cu, le Zn, le Mn et le Se. En outre, ces résidus peuvent être considérés comme un bon complément alimentaire en raison de sa teneur élevée en K, Ca et Mg et sa faible teneur en Na. En raison de son faible rapport Na / K, ils pourraient être utilisés comme agent de protection contre les maladies cardiovasculaires chez l'homme (Elbadrawy et Sello, 2011).

Synthèse bibliographique

Les résidus de tomates constituent une excellente source d' α -tocophérol (vitamine E) (King et Zeidler, 2004). En outre, ils sont riches en caroténoïdes tels que le lycopène (Knoblich et *al.*, 2005) qui peut être bénéfique dans le traitement du cancer, des maladies coronariennes et d'autres maladies chroniques chez l'homme. Il a été constaté que les sous-produits de tomates (peau et graines) représentaient en moyenne 53 % de la quantité totale de composés phénoliques, 52 % de la totalité des flavonoïdes, 48 % du lycopène total, 43 % de l'acide ascorbique total et 52 % de l'activité antioxydante totale présente dans les tomates (Toor et Savage, 2005). Ainsi l'addition de ces résidus aux produits alimentaire peut conduire à un produit sain dû à la fois à la fibre et aux composés bioactifs. Une étude menée par Isik et Topkaya (2016) rapporte que la substitution de la farine de blé par la pulpe de tomate dans les biscuits salés, entraînait une augmentation significative des protéines, des cendres, des fibres alimentaires, des minéraux (Mg, Ca, K, P, Mn, Zn, Fe), des phénols totaux et de l'activité antioxydante.

En conclusion, le résidu de tomate est un sous-produit riche en éléments nutritifs ce qui permet leur exploitation dans plusieurs domaines souvent dans l'alimentation des animaux (Ventura, 2009), dans l'alimentation humaine (Isik et Topkaya, 2016), comme source de vitamines (King et Zeidler, 2004) et pour la production d'enzymes (Freixo et *al.*, 2008).

Synthèse bibliographique

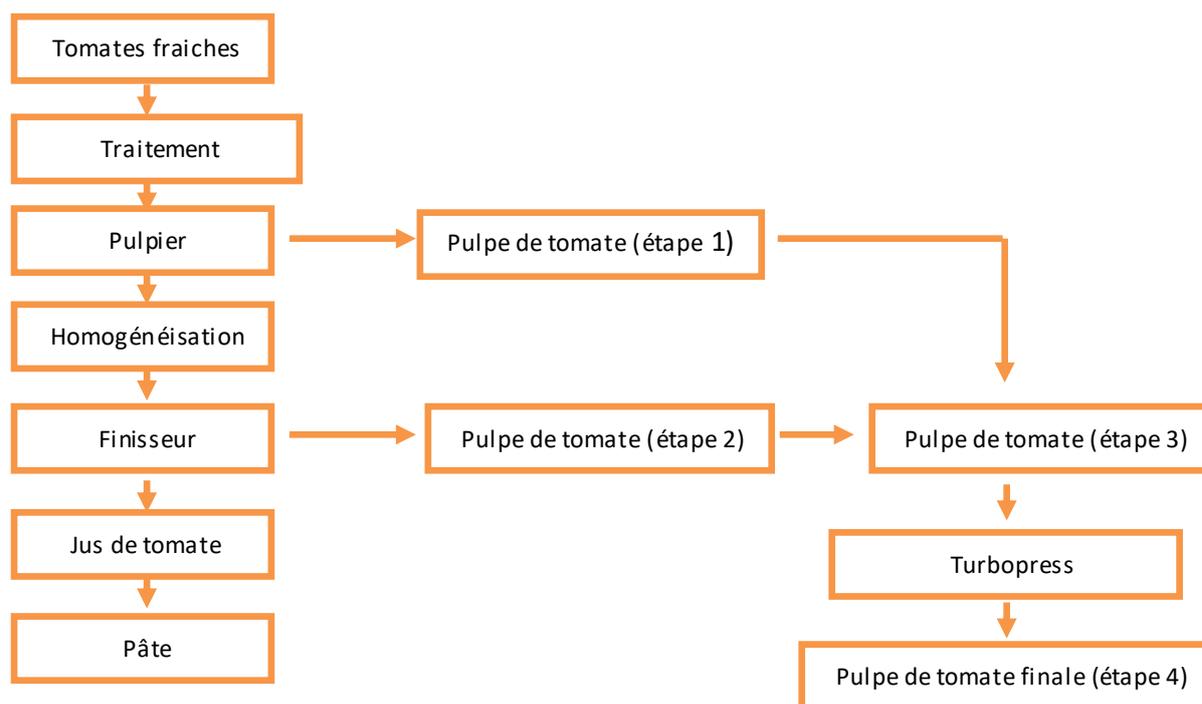


Fig. 1: Sous-produits générés par la transformation industrielle des tomates (Del Valle et al., 2006).

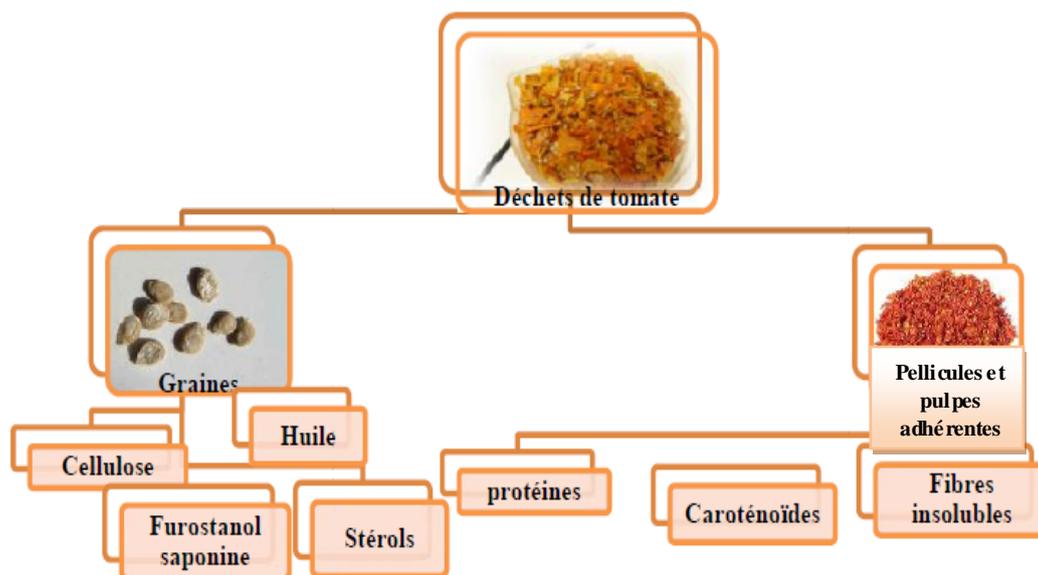


Fig. 2 : Composition des sous produits de la tomate transformée (Boukhalfa-lezzar, 2015)

1-5- Utilisation des sous-produits de tomates en alimentation animale

De part sa teneur élevée en fibres, les sous-produits de tomates ont été principalement utilisés pour nourrir le bétail, en particulier les ovins et les bovins (Celma et *al.*, 2009). Leur utilisation a également été évaluée pour l'alimentation des chèvres (Ventura et *al.*, 2009) et des volailles (Mansoori et *al.*, 2008).

Une grande quantité de sous-produits de tomates est nourrie fraîche durant des périodes de temps limitées. La pulpe de tomate fraîche a été incluse dans les rations d'élevage d'agneaux jusqu'à 200 g/kg de MS (Fondevila et *al.*, 1994) ou 480 g/kg de MS pour former des blocs alimentaires (Ben Salem et Znaidi, 2008). Une étude menée par Ventura et *al.*, (2009) a montré que les chèvres peuvent être nourries quotidiennement avec 1,5 kg de fruits de tomate frais (environ 100 g de DM) sans apparition de troubles digestifs. Cependant, En raison de la détérioration rapide du résidu humide de tomate, il est généralement séché ou ensilé pour une utilisation ultérieure (Aghajanzadeh-Golshani et *al.*, 2010 ; Abdollahzadeh et *al.*, 2010). Différentes études ont été réalisées afin de déterminer l'influence de l'intégration des sous-produits de tomates ensilés ou séchés dans l'alimentation animale et ont montré que ce résidu est un bon substitut alimentaire dans la ration traditionnelle du bétail. Denek et Can (2006) ont rapporté que la pulpe de tomate ensilée avec 10 % de paille de blé constitue une source fourragère de bonne qualité pour les moutons pendant les périodes d'insuffisance fourragère. Le marc de tomate séché peut être utilisé de manière efficace et en toute sécurité comme un supplément protéique dans les régimes alimentaires des chèvres, jusqu'à un niveau de 20 %, sans aucun effet négatif sur la croissance de l'animal et la digestibilité de la ration (Abdollahzadeh et Abdulkarimi, 2012). Il peut être inclus jusqu'à 32,5 % dans l'aliment concentré des vaches laitières sans affecter la santé de l'animal, l'ingestion de la MS et la production du lait (Belibasakis, 1990). Il peut même remplacer 50 % du fourrage quand il est nourri frais, sec ou ensilé (Caluya et *al.*, 2003). Le résidu de tomate séché au soleil a complètement remplacé l'aliment concentré dans l'alimentation des buffles mâles sans affecter l'ingestibilité et la digestibilité de la MS, la synthèse des protéines microbiennes et la production des acides gras volatils dans le rumen (Bakshi et *al.*, 2012). Chez les bovins, l'utilisation de la pulpe de tomate séchée comme seule source de fourrage grossier augmente le gain de poids corporel par rapport au foin ou à l'herbe fraîche (Yuangklang et *al.*, 2006).

Tableau 2 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit de la tomate.

		Fruit de tomate					Sous-produits de tomates					
Composants	Valeur pour 100g	Ciqual 2017	Ventura (2009)	Ventura (2009)	Fondevila (1994)	King et Zeidler (2004)	Alvarado et al (2001)	Gasa et al. (1989)	Elbadrawy et sello (2011)	DelVall et al. (2006)	Shao et al. (2013)	OECD (2008)
% du sous-produits par rapport au poids du fruit		-	-	5-10%	-	10-30%	-	-	-	4%	3-5%	-
MS	g	85.4	6,9	15-30	92,2	94,95	89,86	92,2	-	-	-	-
MM	g	12,6	7,7	-	-	-	36,4	-	5,9	-	-	5,5 - 7,5
MO	g		92,3	> 95	92,4	-	-	95	-	-	-	-
PB	g	14,2	17	15-20	22,4	26,88	17,66	18,3	10,5	19,27	15,08- 22,70	19,3 – 23,5
Fibres	g	12,3	-	-	34,3	26,3	-	46,7	-	59,03	-	-
NDF	g		-	55-65	56,2	-	-	59,9	-	-	-	54,4 - 60,0
ADF	g		-	40-50	41,3	-	-	52,3	-	-	-	47,6 - 59,8
Lignine	g		19,5	25-30	6,8	-	-	7,4	-	-	-	26,0 – 33,7
Pectine	g		-	-	-	-	-	-	-	7,55	-	-
MG	g	2,99	2,8	-	13,6	11,93	9,66	14,6	4,04	5,85	8,37 - 16,24	10,3 - 13,3
Minéraux												
Sodium	mg	247	-	-	-	-	-	-	73,6	-	-	120
Magnésium	mg	194	-	-	-	-	-	-	149	-	-	200 - 280
Phosphore	mg	356	-	-	-	-	333	-	-	-	-	47 – 600
Potassium	mg	3430	-	-	-	-	1457	-	1097	-	-	980 - 3630
Calcium	mg	110	-	-	-	-	189	-	160	-	-	220 - 430
Manganèse	mg	1,85	-	-	-	-	2	-	1,4	-	-	1,10
Fer	mg	9,09	-	-	-	-	28	-	1,5	-	-	54,1-460
Cuivre	mg	1,42	-	-	-	-	-	-	1,1	-	-	-
Zinc	mg	1,99	-	-	-	-	19	-	3,12	-	-	5,40

MS : matière sèche ; MO : matière organique ; MM : matière minérale ; MG : matière grasse ; PB : protéine brutes ; NDF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent neutre ; ADF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent a

2- Sous-produits d'oranges

2-1- Production mondiale des agrumes

Les agrumes (*Citrus* spp.) constituent l'un des fruits les plus produits dans le monde. Leur production en 2017 a atteint plus de 146 million de tonnes. L'orange (*Citrus sinensis*), la tangerine (*Citrus tangerina*), la mandarine (*Citrus reticulata*), le citron (*Citrus limon*), le pamplemousse (*Citrus paradisi*) sont les espèces les plus cultivées. L'orange occupe seule plus de 50 % de la production mondiale d'agrumes (73 millions de tonnes). Les agrumes sont cultivés dans plus de 140 pays dans le monde, dont les premiers producteurs étant le Brésil, la Chine et les Etats-Unis (FAOstat, 2017).

2-2- L'agrumiculture en Algérie

L'agrumiculture en Algérie occupe une superficie de 63 589 ha avec une production de plus de 844 mille tonnes en 2009 (MADR, 2009). Cette surface a évolué à 67 190 ha durant l'année 2017-2018, dont plus de 50 % sont localisés dans la Mitidja. Les wilayas d'Annaba, Skikda, Oran, Mascara, Mostaganem, Chlef, Blida, Alger et Tipasa sont les principales zones productrices (au total, 34 % des agrumes sont cultivés dans la plaine de la Mitidja, 27 % dans la région du Chélif et 7 % à Mascara) (4). Selon la FAO, la production des agrumes en Algérie a dépassé 1,3 million de tonnes durant l'année 2017. Le verger agrumicole est constitué par divers groupes d'agrumes, avec le plus important à l'échelle nationale étant l'orange (75 % de la production nationale d'agrumes), la mandarine (18,64 %) et le citron (5,78 %). Les autres variétés (pomelos, pamplemousse...etc.) étant estimées à moins de 1 % (FAOstat, 2017).

En raison de la qualité médiocre des agrumes et du manque de technicité des producteurs qui n'incitent pas à produire des fruits de qualité normalisée, la filière algérienne exporte très peu d'agrumes. Les exportations ont été de l'ordre de 3 tonnes d'agrumes. En revanche les importations en produits agrumicoles sont beaucoup plus élevés (FAO, 2017).

2-3- Disponibilité des sous-produits d'oranges

Depuis la restructuration du secteur agricole en 1987, la production agrumicole en Algérie a continuellement évolué. Ce développement s'est accompagné d'une progression de la transformation industrielle des agrumes en concentrés, jus naturels et confitures, qui est passé de 5 mille tonnes en 1997 à 14 mille tonnes en 1999 (Kerboua, 2002). Le tonnage

Synthèse bibliographique

d'agrumes transformé rapporté pour l'année 2011-2012 était de 22 mille tonnes (FAO, 2012). Toutefois, la transformation des agrumes en Algérie est toujours faible. De ce fait, les producteurs algériens de boissons, qui n'arrivent pas à trouver des matières premières locales, se dirigent souvent vers des concentrés importés.

L'industrie de transformation des agrumes en Algérie libère des milliers de tonnes de déchets, résultant du pressage du fruit frais pour la fabrication de jus ou de confiture. Selon le bulletin statistique de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, l'Algérie a transformé en 2011-2012 environ 6 % (22 mille tonnes) de sa production d'orange. Si on estime que l'Algérie transforme seulement 25 % de sa production de fruits d'orange en 2016, sachant que le sous-produit d'orange représente 50-70 % du poids frais du fruit original, on peut évaluer que plus de 150 mille tonnes de résidus d'oranges sont libérés au cours de cette année (tableau 1).

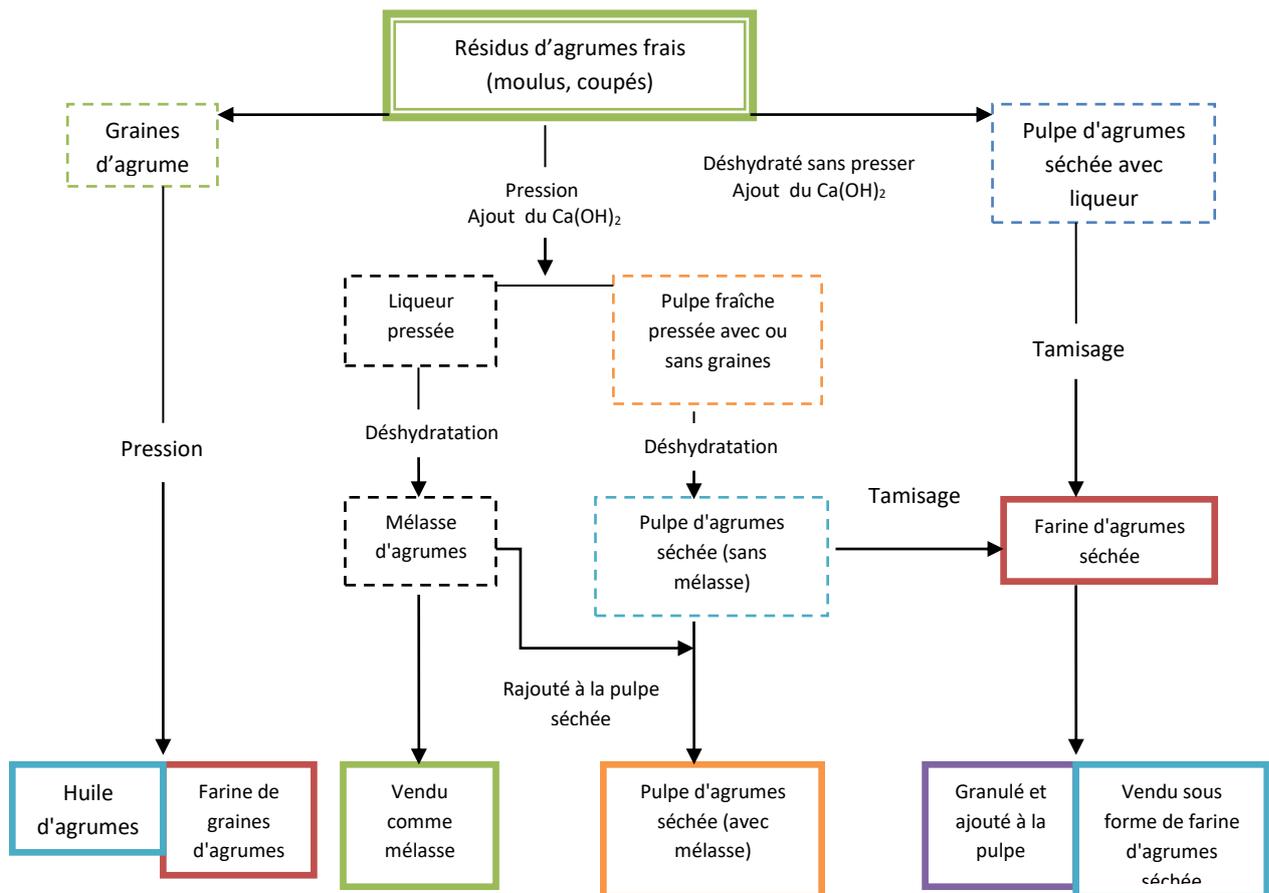


Fig. 3 : Présentation schématique de la production des sous-produits d'agrumes (Bampidis et al., 2006)

2-4- Composition chimique et apport nutritif des sous-produits d'oranges

La pulpe d'agrumes représente 50-70 % du poids frais du fruit et contient 60-65 % de peau, 30-35 % de tissus internes (segments de pulpes) et 0-10 % de graines (Mirzaei-Aghsaghali et Maheri-Sis, 2008). La pulpe d'orange est un substrat hautement énergétique, ses teneurs en substances pectiques et en sucres hydrosolubles sont particulièrement élevées. Leur fraction NDF est intermédiaire entre celle de la plupart des concentrés et des fourrages (Bampidis et Robinson, 2006 ; Villarreal *et al.*, 2006 ; Miron *et al.*, 2001b). Leur teneur médiocre en parois (NDF) et leur teneur relativement faible en lignine permet de la classer parmi les aliments à cellulose facilement digestible (Rihani, 1991). Les sous produits d'agrumes englobent des taux faibles en PB et en lipides. Cependant, ils sont modérément riches en extrait étheré et fortement riche en calcium. En revanche, ils sont pauvre en phosphore et quasiment dépourvue de vitamine A (Rihani, 1991). Cette composition est en fait très variable selon les conditions de croissance, la maturité, le climat et la variété d'agrumes utilisés (tableau 3). Selon Piquer *et al.*, (2009), la pulpe d'agrumes est beaucoup plus riche en PB, en fibres et en pectine que le fruit entier.

Par ailleurs, les sous produits d'agrumes sont une source importante d'huiles essentielles, de limonène et d'éthanol. Les agrumes contiennent également plusieurs composés non-alimentaires comme les limonoïdes et les flavonoïdes, qui se concentrent particulièrement dans les pelures en comparaison aux portions comestibles, et qui sont connus par leur activité anti-carcinogène. Les graines et les pelures d'agrumes possèdent aussi une forte activité antioxydante (Schieber *et al.*, 2001; Djilas *et al.*, 2009).

En dehors de son utilisation pour l'alimentation du bétail, la pulpe d'agrumes a été fermentée pour la production de produits précieux comme le biogaz, l'éthanol, l'acide citrique, diverses enzymes, les composés aromatiques volatils, les acides gras, la pectine et la biomasse microbienne (Djilas *et al.*, 2009 ; Mama et Christakopoulos, 2008).

2-5- Utilisation des sous-produits d'oranges en alimentation animale

En raison de sa valeur énergétique très élevée et sa bonne digestibilité chez les ruminants, la pulpe d'agrumes a été utilisée comme aliment hautement énergétique dans les rations des bovins pour soutenir la croissance et la lactation (Belibasakis et Tsirgogianni, 1996 ; Solomon *et al.*, 2000 ; Palangi *et al.*, 2013).

Tableau 3 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit d'orange.

Composition chimique	valeur pour 100g de MS	Fruit d'orange				Sous-produits d'oranges					
		USDA (2016)	Bambidis et al.(2006)	Bambidis et al. (2006)	Dakhmouche et al. (2006)	Lashkari et Taghizadeh (2015)	Akinfemi et al. (2009)	Paya et al. (2012)	Olivo et al. (2017)	DePeters et al. (2000)	Miron et al. (2001)
MS	g	17,7	13	90,2	-	89,33	-	84,9	86,10	-	-
MO	g	-	95,6	90,9	-	-	-	-	95,09	-	91,2
MM	g	-	-	-	3,46	5,51	6,75	4,7	4,91	7,35	-
PB	g	1,3	7,5	7,2	6,12	8,5	7,53	7,9	6,27	6,1	6,70
MG	g	0,3	1,9	3	0,39	3,44	5,64	1,8	-	7,35	-
FB	g	4,5	-	-	-	-	24,65	-	-	-	-
NDF	g	-	-	19,3	-	14,74	69,17	22,4	19,10	20,7	21,6
ADF	g	-	14	16,9	-	11,95	46,79	15,3	14,59	16,4	21,2
Lignine	g	-	-	0,5	-	-	13,88	-	6,84	5,3	0,31
Cellulose	g	-	-	-	-	-	32,91	-	-	-	20,9
Hemi-cellulose	g	-	-	-	-	2,79	22,38	7,1	-	-	0,40
Pectine	g	-	-	-	-	31,05	-	-	-	-	-
sucre totaux	g	-	-	-	44,6	-	-	-	-	-	-
Carbohydate	g	-	-	-	-	82,54	-	-	87,35	-	79
Calcium	mg	70	-	3,54	-	-	0,15135	-	-	225,00%	-
Phosphore	mg	22	-	3,40	-	-	0,0048	-	-	0,11	-
Magnésium	mg	14	-	1,5	-	-	0,02712	-	-	0,12	-
Potassium	mg	196	-	7	-	-	0,00915	-	-	0,68	-
Sodium	mg	2	-	0,3	-	-	0,00502	-	-	0,03	-
Soufre	mg	-	-	1,2	-	-	-	-	-	0,07	-
fer	mg	0.8	-	15,93	-	-	1,24	-	-	79	-

MS : matière sèche ; MO : matière organique ; MM : matière minérale ; MG : matière grasse ; PB : protéine brutes ; FB : fibre brute ; NDF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent neutre ; ADF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent acide.

Synthèse bibliographique

La pulpe d'agrumes fraîche a une acidité naturelle mais sa teneur élevée en humidité et en sucres solubles la rend très périssable et rapidement dégradable quand elle est en contact avec l'air. Pour cette raison, la pulpe d'agrumes fraîche est habituellement offerte aux animaux dans le voisinage des usines de transformation. Pour un stockage plus long, elle est déshydratée ou ensilée. Une grande quantité de pulpes d'agrumes est séchée et exportée dans le monde (Crawshaw, 2004).

En raison de son odeur agréable, la pulpe d'orange ensilée (Volanis et al., 2006) et l'orange en tranches ensilée (Volanis et al., 2004) se sont avérées palatables chez les brebis laitières. L'orange a été aussi utilisée comme saveur des aliments chez les ovins (Ralphs et al., 1995). Toutefois, l'introduction de la pulpe d'agrumes dans la ration alimentaire doit être progressive pour laisser le temps aux animaux de s'accoutumer avec son odeur et son goût distinctif (Bampidis et Robinson, 2006).

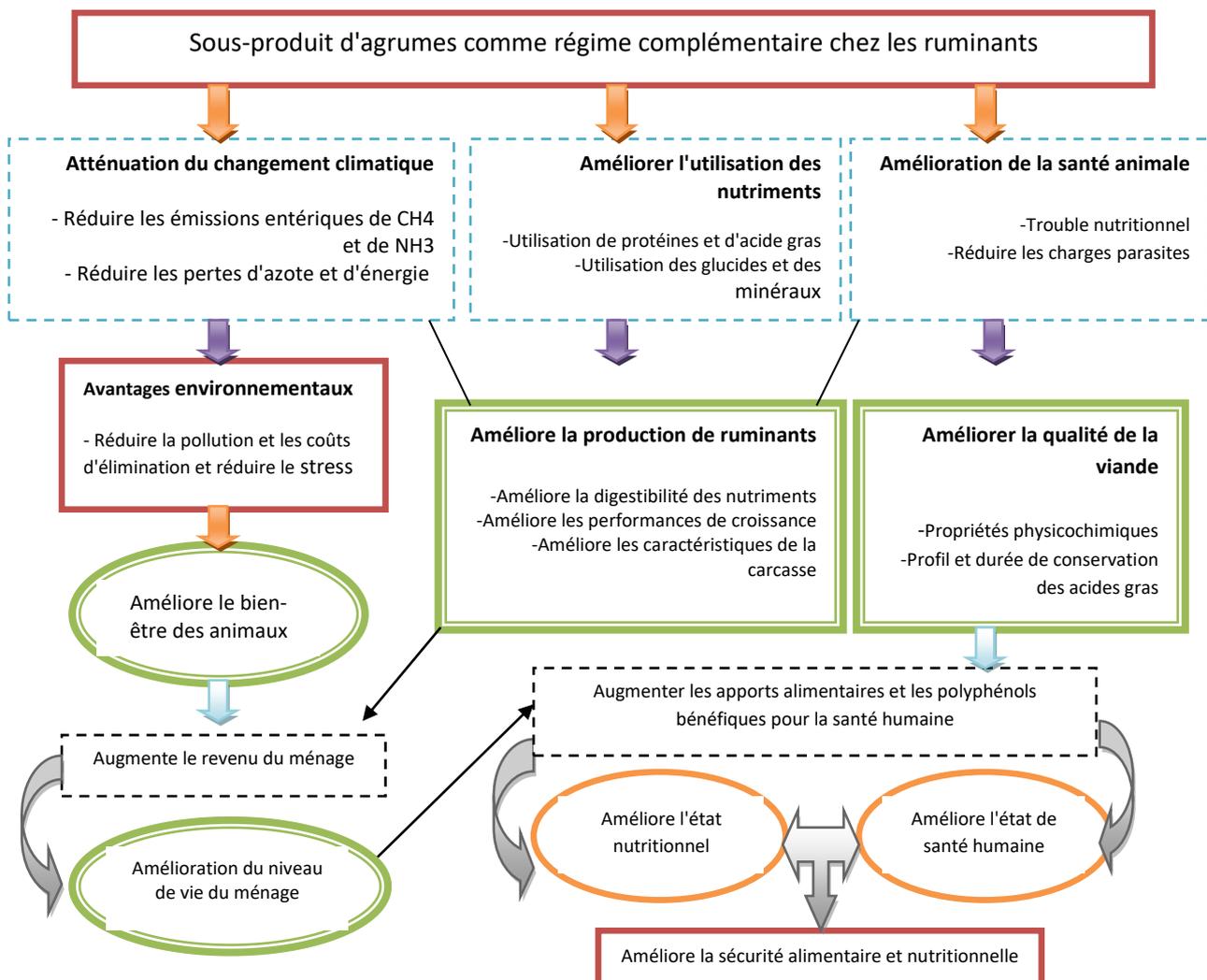


Fig. 4 : Résumé des avantages potentiels de l'incorporation de sous-produits d'agrumes dans l'alimentation des ruminants (Fritsch et al., 2017).

Synthèse bibliographique

Aucun effet négatif sur la digestion de la ration, n'est sur la production laitière n'a été enregistré lorsque la pulpe d'agrumes déshydratée a été intégrée à 20 % dans le régime alimentaire des vaches laitières (Assis et *al.*, 2004) ou jusqu'à 30 % chez les brebis allaitantes (Fegeros et *al.*, 1995). La substitution des grains de maïs ou de l'orge par la pulpe d'orange, dans les régimes d'engraissement des agneaux, n'a montré aucun effet sur les performances de croissance des animaux et sur la qualité de la viande toute en réduisant le coût de l'alimentation (Lanza et *al.*, 2001).

La pulpe d'agrumes peut également être utilisée fraîche ou sous forme d'ensilage. Un mélange d'ensilage contenant 70 % de pulpe d'agrumes fraîche n'a montré aucun effet négatif sur le poids et la performance des brebis laitières, n'est sur la production du lait. Cependant, il a augmenté la teneur en matière grasse du lait de 17 % (Volanis et *al.*, 2006). L'ensilage de la pulpe d'orange fraîche et de la paille de blé (80:20) avec 70 % du mélange de concentré habituellement offert aux agneaux peut remplacer les régimes à base de foin d'avoine-concentré sans aucun effet sur la qualité de la viande et le gain du poids quotidien de l'animal, tout en réduisant le coût de l'alimentation (Scerra et *al.*, 2001). L'ensilage d'agrumes a substitué l'ensilage de maïs dans les rations de bovins sans aucun effet négatif sur la digestibilité des nutriments, les paramètres sanguins (hémoglobine, hématocrite, protéines totales, urée, créatinine, triglycérides, cholestérol) et les performances de croissance des animaux (Gawad et *al.*, 2013). Des études *in vivo* récentes ont signalé que l'inclusion de la pulpe d'agrumes séchée à différentes concentrations dans la ration alimentaire de certains animaux d'élevage n'exerce aucun effet néfaste sur la consommation et la digestibilité de la ration et sur les performances de croissance des animaux (Javed et *al.*, 2016 ; Sharif et *al.*, 2017).

3- Sous-produits de pommes

3-1- Production mondiale et locale des pommes

La pomme est le troisième fruit consommé dans le monde, après les agrumes et la banane. Il se récolte environ 80 millions de tonnes de pommes annuellement dans le monde, dont 39 millions de tonnes est en Chine suivie par les USA, la Turquie la Pologne et l'Italie (FAOstat, 2017).

Au cours des années 2008-2009, l'Algérie a produits une quantité de pomme relativement constante, sur une surface de 52 mille ha, plus de 267 mille tonnes de pommes

Synthèse bibliographique

ont été produites. Les wilayas de Blida, Khenchela, Batna, Skikda, Ain-Defla et Medea sont les premiers producteurs avec plus de 30 % de la production locale (MADR, 2009). En 2016, la production de pomme en Algérie a connu une augmentation considérable en atteignant près de 500 mille tonnes. Toutefois, l'Algérie reste loin de satisfaire ses besoins annuels en pommes et elle a importée plus de 62 milles tonnes au cours de la même année (FAOstat, 2017).

3-2- Disponibilité des sous-produits de pommes

A l'échelle mondiale, Environ 14 millions de tonnes de pommes sont traitées principalement pour la production de jus, gelée et pâte à papier, générant de grandes quantités de sous-produits estimé à environ 12 millions (Rabetafika et al., 2014). Ce résidu représente environ 30 % du fruit (Vendruscolo et al., 2008) et il est constitué d'un mélange hétérogène d'épluchures, pépins, semences, tige et pulpe.

Dans le cadre de la valorisation de la culture du fruit de pomme en Algérie de nouvelles unités de transformation de ce fruit ont vu le jour à Ichemoul et Oued Taga à la wilaya de Batna. Toutefois, l'industrie de transformation du fruit de pomme reste faible et les quantités de pommes traitées pour la fabrication de jus ou de cidre sont inconnues. Toutefois, si on considère que seulement un quart de la production locale de pommes en 2016 est destinée à la transformation on peut estimer la quantité des résidus récupérée à plus de 31 mille tonnes (tableau 1).

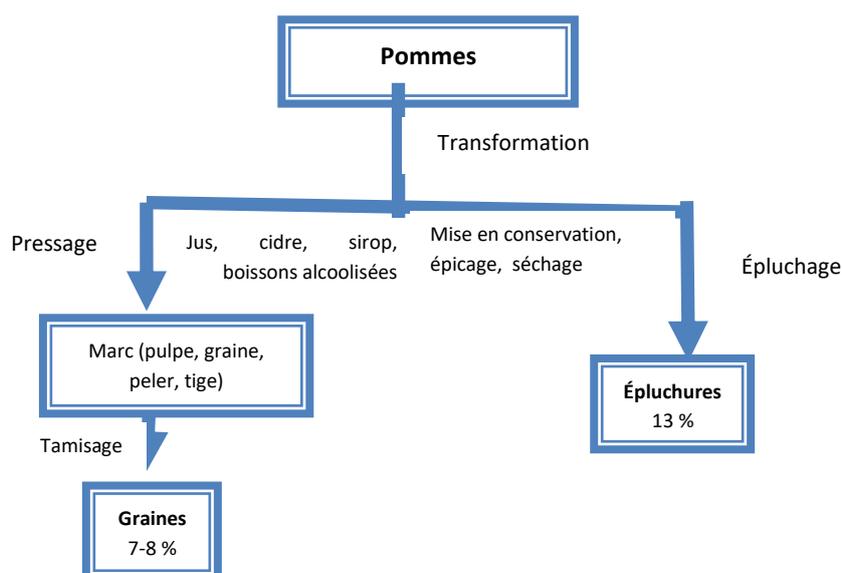


Fig. 5: Sous-produit générés par la transformation industrielle des pommes (Rabetafika et al., 2014)

3-3- Composition chimique des sous-produits de pommes

La composition du résidu de pomme varie selon la variété de pomme utilisée, la maturité des fruits et le type de traitement appliqué pour l'extraction de jus, en particulier combien de fois les fruits sont pressés (Kennedy *et al.*, 1999).

Le résidu de pomme est une source importante d'énergie, il renferme des teneurs relativement élevées en carbohydrates solubles particulièrement la pectine et les sucres simples (glucose, fructose et saccharose). La fraction des fibres insolubles (NDF et ADF) est constituée principalement de cellulose, qui peut atteindre jusqu'à 43 % du sous-produit de pomme. Les hémicelluloses représentent entre 19,9 et 32,2 %. Toutefois, le sous-produit de pomme n'englobe que de petites quantités de protéines, de minéraux et de vitamines (Zheng et Shetty, 2000; Jin *et al.*, 2002 ; Rabetafika *et al.*, 2014) (tableau 4).

Le marc de pomme est aussi riche en composés bioactifs fonctionnellement importants, tels que les polyphénols et autres antioxydants naturels. Les composés phénoliques sont concentrés dans les sous-produits de la graine et de la peau, principalement sous forme d'acide chlorogénique et de phloridzine (Rabetafika *et al.*, 2014).

Etant une source importante en nutriments, les sous produits de pommes ont constitué une matière de base prometteuse pour produire plusieurs produits à valeur ajoutée tels que les enzymes, les composés aromatiques, l'éthanol, la pectine, les carburants, les acides organiques et les antioxydants naturels (Shalini et Gupta, 2010 ; Rabetafika *et al.*, 2014; Joshi et Attri, 2006). En outre, Le marc de pomme a été utilisé pour la fabrication d'aliments enrichis en fibre destinés à l'alimentation humaine (Younis et Ahmad, 2015) ou pour la production de résidus enrichis en protéines qui peuvent servir d'aliments pour les animaux d'élevage (Joshi et Sandhu, 1996 ; Mirzaei-Aghsaghali *et al.*, 2011b).

3- 4- Utilisation des sous-produits de pommes en alimentation animale

En raison de sa forte teneur en eau (plus de 700 g/kg) et son faible pH (allant de 3,2 à 4,1), le résidu de pomme doit être séché ou ensilé pour être incorporé dans l'alimentation animale (Kennedy *et al.*, 1999 ; Pirmohammadi *et al.*, 2006 ; Ülger *et al.*, 2018).

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la substitution des résidus de pomme avec différents aliments dans l'alimentation des ruminants. L'ensilage du résidu de pomme peut être intégré avec succès jusqu'à 30 % dans la ration des vaches laitières Holstein sans effet négatif sur

Tableau 4 : Composition chimique comparée du fruit et du sous-produit de pomme.

Composants	valeur pour 100g	Fruit de pomme					Sous-produit de pomme				
		Ciqual 2017	Taasoli et kafilzadeh 2008	Khatooni et al. 2014	Maghsoud et al., 2008	Mirzaei-Aghsaghali et al. 2011	Givens 1987	Paya et al. 2012	Sato et al. 2010	Nawirska et Kwasniewska 2005	Walker 2004 dans Bernard 2010
MS	g	68,2	88,84	32,7	92,34	95,2	23,3	31,1	-	-	21,4
MM	g	-	3,7	5,76	2,2	2,3	2,3	3	1,80	-	4,9
MO	g	-	96,3	-	97,8	97,7	97,7	-	-	-	-
MG	g	0,31	6,175	3,9	3,7	3,7	2,7	2,9	1,53	-	6,3
PB	g	0,78	5,12	2,39	5,25	9,02	6,7	7,2	2,74	-	7,8
NDF	g	-	38,56	-	35,3	61,2	50,3	43,3	-	-	-
ADF	g	-	30,94	-	28	46,7	37,8	32,3	-	-	26
Lignin	g	-	-	-	-	-	16,8	-	-	20,4	-
Fibres	g	-	-	24	-	-	20,5	-	43,63	-	-
Cellulose	g	-	-	-	-	-	23,2	-	-	43,6	-
Hemicellulose	g	-	-	-	-	-	-	-	-	24,4	-
NFC	g	-	46,44	-	-	23,78	-	-	-	-	-
Sucre totaux	g	-	-	-	-	-	-	-	39,35	-	-
Minéraux											
Calcium	mg	22	11,55	-	-	-	160	-	-	-	100
Phosphore	mg	38	-	-	-	-	140	-	-	-	100
Magnésium	mg	10,5	-	-	-	-	60	-	-	-	-
Sodium	mg	87	-	-	-	-	20	-	-	-	-
Potassium	mg	450	-	-	-	-	680	-	-	-	-

MS : matière sèche ; MO : matière organique ; MM : matière minérale ; MG : matière grasse ; PB : protéine brutes ; NDF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent neutre ; ADF : fraction fibreuse non soluble dans le détergent acide.

Synthèse bibliographique

La production et la composition du lait (Ghoreishi et al., 2007). L'inclusion des résidus de pommes jusqu'à 39 % dans la ration des bovins laitiers a amélioré la teneur en protéines du lait, le gain en poids des animaux et le revenu brut (Bae et al., 1994). Par ailleurs, une augmentation de la digestibilité des nutriments et du taux de rétention d'azote est notée par Ahn et al. (2002) lorsque des résidus de pommes ont été mélangés, à des concentrations de 30 et 60 %, à la paille de riz, au son de riz et aux concentrés.

Chapitre II- Stratégies de valorisation des sous-produits agroalimentaires

L'alimentation des ruminants est constituée de pâturage naturel, de fourrages, d'ensilage, de résidus de récolte, de quelques sous produits agroalimentaires... etc. Ces aliments peuvent se caractériser par des teneurs élevées en parois lignifiées et en fibres ainsi que de faibles teneurs en azote et en éléments nutritifs. Cependant, le traitement efficace peut augmenter leur valeur nutritive (Reddy et Reddy, 1992; Aregheore, 1994)

1- Traitements

Il s'agit de procédés technologiques permettant de modifier les propriétés physico-chimiques des parois lignifiées des fourrages pour les rendre plus accessibles aux microorganismes du rumen et améliorer, ainsi, la digestibilité et l'ingestion de ces fourrages. Il existe trois grandes catégories de traitements: physiques, chimiques et biologiques. Une association entre les différents types de traitement été également mise en évidence (Figure 6).

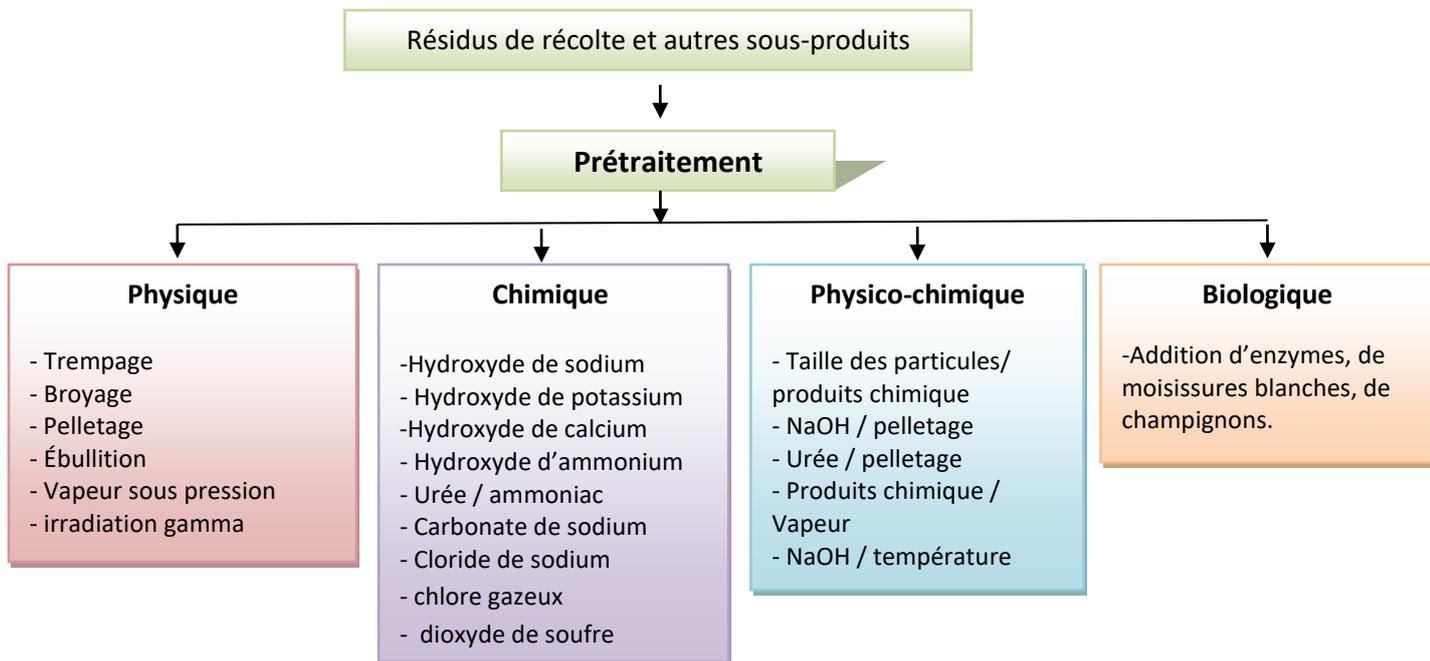


Fig. 6 : Méthodes chimiques, physiques, physico-chimiques et biologiques pour le traitement des résidus (Ibrahim, 1981).

Synthèse bibliographique

1-1-Traitements physiques

Le traitement physique consiste à un traitement mécanique des particules alimentaires par broyage ou hachage ou à un traitement à la vapeur à haute pression ou par les rayons X et les rayons gamma... etc (Sarnklong et *al.*, 2010 ; Taherzadeh et Karimi, 2008). Ce type de traitement entraîne une augmentation de la surface accessible et de la taille des pores, une diminution de la cristallinité de la cellulose et une diminution des degrés de polymérisation (Taherzadeh et Karimi, 2008). Les traitements physiques ont été intensément étudiés, ils sont économiquement rentables pour les agriculteurs alors que leurs avantages peuvent être trop faibles (Schiere et Ibrahim, 1989 ; Wanapat et *al.*, 1996).

1-2- Traitements chimiques

Le traitement chimique des fourrages consiste à modifier la structure de la paroi végétale par l'utilisation des oxydants, des acides ou des agents alcalins. Les traitements aux alcalis, particulièrement la soude, l'ammoniac et l'urée, sont les traitements les plus étudiés et les plus acceptés pratiquement pour l'application dans les fermes (Wanapat et *al.*, 1985, 1996 ; Pires et *al.*, 2010). Suite à leur absorption à travers la paroi cellulaire, ces agents entraînent une modification de la structure physique et biochimique des parois cellulaires par gonflement des fibres celluloses et rupture des liaisons ester entre la lignine et les polysaccharides pariétaux (Chenost et Kayouli, 1997; Lam et *al.*, 2001). Ces modifications facilitent la pénétration des enzymes fibrolytiques des microorganismes du rumen se qui conduit a une dégradation plus rapides et plus intense des particules végétales. le prétraitement alcalin élimine efficacement la lignine en préservant la plupart des glucides et en particulier la cellulose (Zhu et *al.*, 2010). Des études comparatives visant à améliorer la valeur nutritive des fourrages ont montré que le traitement à l'ammoniac et à l'urée est moins efficace et demande beaucoup plus de temps pour réagir que le traitement par la soude (Liu et *al.*, 2002 ; Pires et *al.*, 2010). Cependant, en plus de leur capacité d'augmenter la digestibilité de la matière organique, le traitement à l'urée et à l'ammoniac apporte une source d'azote supplémentaire importante pour les fourrages traités (Wanapat et *al.*, 1985 ; Pires et *al.*, 2010 ; Selim et *al.*, 2004).

1-3- Traitements biologiques

Bien que les prétraitements physiques et chimiques aient été considérés comme les principales technologies de prétraitement actuelles, les prétraitements biologiques ont fait

Synthèse bibliographique

l'objet d'une attention considérable ces dernières années, en raison de leurs avantages : traitements plus sécurisés, écologiques, faciles à réaliser et moins coûteux que les autres méthodes de traitement (Raghuwanshi et *al.*, 2014).

Le traitement biologique implique l'utilisation des microorganismes ou d'enzymes dans le prétraitement de la matière ligno-cellulosique. Le bio-traitement par champignons et bactéries présente deux objectifs concomitants : améliorer la dégradabilité des parois, enrichir le matériau de départ en azote (Besle et Juany, 1990 ; Abdel-Aziz et *al.*, 2015 ; Zayed, 2018).

L'utilisation de microorganismes ou de leurs enzymes est un traitement biologique potentiel pour améliorer la valeur nutritive de la paille par délignification sélective (Jalc, 2002) et par augmentation des coefficients de digestibilités (Gomaa et *al.*, 2012). Parmi les nombreux champignons ligninolytiques connues, les moisissures blanches ont été les plus étudiées et qui semblent aussi être les plus efficaces (Fan et *al.*, 1987). De nombreuses espèces de ce groupe ont été utilisées pour évaluer leur capacité à améliorer la valeur nutritive de fourrages destinés à l'alimentation des ruminants (Fazaeli et *al.*, 2004 ; Nasehi et *al.*, 2017).

Le prétraitement bactérien des résidus ligno-cellulosiques implique à la fois les systèmes anaérobies et aérobie. La dégradation anaérobie utilise principalement des bactéries provenant du rumen (Han et Shin, 2002 ; Hu et Yu, 2005 ; Yue et *al.*, 2008).

L'enrichissement en protéines de matériaux celluloses peut être obtenu par divers microorganismes. Ainsi, la croissance de *Cellulomonas sp* et d'*Alcalinogenes sp* sur paille de riz permet de transformer 75 % du substrat pour obtenir un aliment contenant 25 % de protéines (Han, 1978). Le traitement des résidus de pomme par trois espèces de levure, *Torula utilis*, *Saccharomyces cerevisiae* (UCD 595) et *Candida utilis*, a permis d'améliorer leur teneur en protéine de plus de 258, 289 et 318 %, respectivement (Joshi et Sandhu, 1996). La bioconversion de sous-produits de pommes en bio-aliment animal par une mixture de deux souches d'*Aspergillus niger* a potentiellement amélioré leur valeur nutritionnelle (Zhong-tao et *al.*, 2009). Lorsque des résidus de manioc sont fermentés avec des microorganismes du rumen (Chumpawadee et Soychuta, 2009) ou un complexe microbien composé de levure et de bactéries, leur teneur en protéines et en vitamines est accrue (Oboh, 2006).

2- Complémentation

La complémentation consiste à apporter les éléments nutritifs déficients dans les fourrages pauvres permettant aux microorganismes du rumen de mieux les digérer. La complémentation est préconisée sous plusieurs formes, comme l'apport de supplément énergétique ou protéique et la formulation de mélanges.

2-1- Effets associatifs

Les systèmes d'évaluation d'aliment pour bétail supposent que la valeur nutritive d'une combinaison alimentaire est la somme des valeurs obtenues avec les aliments seuls et ne tiennent pas compte des interactions qui peuvent se produire entre les différents ingrédients de la ration. Toutefois, les études entreprises dans ce contexte montrent que ces interactions peuvent modifier les processus métaboliques dans le rumen et par conséquent, les valeurs observées pour une combinaison alimentaire peuvent être plus élevées, égales ou inférieures aux valeurs médianes calculées à partir des composantes individuelles, c'est ce qui est appelé effet associatif (Blaxter, 1969, Liu et *al.*, 2002 ; Niderkorn et *al.*, 2011, Tagliapietra et *al.*, 2015).

La mesure des interactions entre aliments exige qu'ils soient testés séparément et dans un ou dans plusieurs combinaisons, généralement binaires. Les effets associatifs se produisent lorsque la digestion d'un aliment est indépendante de l'autre et elles peuvent être détectées lorsque la combinaison présente une réponse non linéaire (Getachew et *al.*, 2005 ; Niderkorn et Baumant, 2009).

L'association entre fourrages et aliments peuvent être influencés par plusieurs facteurs dont les plus importants sont : la forme physique des aliments combinés, leurs apports en éléments nutritifs et leurs taux d'inclusion, le ratio énergie: protéine de la ration, l'activité microbienne et le taux de passage dans le rumen (Adesogan, 2014).

2-1-1- Effets associatifs positifs (synergiques)

Les effets associatifs positifs peuvent être illustrés par une augmentation de l'utilisation de la fibre qui peut être causée par la supplémentation en aliment riche en matériel facilement digestible ou par la complémentation azotée des fourrages déficients en azote. Robinson et *al.*, (2009) et Maccarana et *al.*, (2013) ont enregistré des effets associatifs synergiques en mélangeant des sous produits d'agrumes avec l'ensilage de l'herbe ou avec

Synthèse bibliographique

une plante fibreuse. Des mélanges binaires (50 :50) entre des résidus de tomates et des résidus de pommes améliorent significativement leur valeur nutritive à travers l'augmentation de la digestibilité et de la consommation chez le mouton (Abdollahzadeh et *al.*, 2010).

Des effets positifs sur le rendement en protéines ont été également constaté en utilisant des régimes alimentaires synchronisés/équilibrés (Sinclair et *al.*, 1995; Trevaskis et *al.*, 2001 ; Chumpawadee et *al.*, 2006).

2-1-2- Effets associatifs négatifs (antagonistes)

Les effets associatifs négatifs peuvent se présenter comme une dépression de la digestion des fibres, résultant de l'ajout de concentrés dans un régime à base de fourrage (Hoover et Miller, 1991 ; Agle et *al.*, 2010). L'augmentation de la consommation (Huhtanen et *al.*, 2009) et la présence de certains facteurs antinutritionnels peut aussi engendrer des effets négatifs (Getachaw et *al.*, 2000; Getachaw et *al.*, 2004).

Chapitre III : Formulation des rations et besoins alimentaires des ruminants

1- Ration équilibrée

La ration est l'ensemble des aliments consommés quotidiennement par un animal. Une ration complète et équilibrée fournit des quantités adéquates de fibres, d'énergie, de protéines, de minéraux et de vitamines pour subvenir aux exigences nutritionnelles quotidiennes de l'animal. Ces besoins changent avec le type et l'âge de l'animal, le stade de production, le sexe, la race, les conditions environnementales, la qualité et la quantité de fourrages administrés comme aliment de base. Par conséquent, la détermination des besoins nutritionnels et des facteurs qui les influencent est une première étape nécessaire pour la conception d'un programme nutritionnel efficace et rentable (Lalman, 2007).

2- Besoins alimentaires des ruminants

2-1- Besoins en carbohydrates

Les carbohydrates sont la principale source d'énergie dans les rations des ruminants, ils comprennent généralement de 60 à 70 % de l'alimentation totale. Leur fonction principale est de fournir l'énergie pour les microorganismes du rumen et l'animal hôte. Une fonction secondaire, mais essentielle de certains types d'hydrates de carbone est de maintenir la santé du tractus gastro-intestinal, comme les fibres alimentaires (Ishler et *al.*, 1996).

Les carbohydrates sont divisés en deux fractions: carbohydrates non structuraux (NFC) et carbohydrates structuraux (fibres). L'équilibre entre ces deux fractions est effectué principalement pour contrôler le pH et la digestibilité dans le rumen, maximiser la synthèse des protéines microbiennes et par conséquent maximiser la production et maintenir la santé de l'animal (Ishler et *al.*, 1996).

Les hydrates de carbone simples sont constitués par les sucres, l'amidon, les pectines, les chaînes courtes de matières cellulosiques (β -glucanes), et les acides de fermentation dans les produits ensilés. La teneur en NFC est une valeur non chimiquement mesurable, mais elle est estimée comme $[100 - (CP + NDF + \text{extrait d'éther} + \text{cendres})]$. Ce type de glucides est hautement digestible par rapport aux fibres NDF (Ishler et *al.*, 1996).

Un bon apport en NFC est nécessaire pour fournir l'énergie facilement disponible pour les microorganismes du rumen, assurant ainsi une synthèse protéique microbienne adéquate et

Synthèse bibliographique

une digestion maximale des fibres. En revanche, une teneur excessive en carbohydrates non structuraux peut déprimer la digestibilité des fibres, la production d'acide acétique et la teneur en matières grasses du lait. Elle peut aussi entraîner des anomalies dans les tissus du rumen, ce qui peut conduire à des ulcères et des abcès du foie (Ishler et *al.*, 1996). Un optimum de 30 à 40 % d' NFC est suggéré par Batajoo et Shaver (1994). Toutefois cette valeur varie d'une étude à une autre : Nocek et Russell (1988) ont suggéré une valeur de 40 % d'NFC pour des vaches en lactation, à partir d'une évaluation des régimes à base d'ensilage de luzerne et de maïs. Hoover et Stokes (1991) ont traité les données élaborées par Nocek et Russell (1988) et ont constaté que lorsque l'alimentation en NFC était supérieure à 45-50 % ou moins de 25-30 % la production laitière est diminuée. Dans une autre étude, le pourcentage et le rendement de protéines du lait ont augmenté lorsque la teneur en NFC passe de 41,7 à 46,5 % (Minor et *al.*, 1998).

Les fibres sont composées principalement de cellulose et d'hémicellulose. La fibre fournit un matelas de glucides complexes qui rend difficile l'accès aux glucides simples, et permet ainsi de ralentir la digestibilité et de contrôler l'acidité dans le rumen. Les fibres au détergent acide (ADF) et les fibres au détergent neutre (NDF) sont les principales fractions de fibres utilisées dans la formulation des rations. Pour une haute production des animaux en lactation, les recommandations sont de 18 à 20 % d'ADF et 28 à 30 % d' NDF dans la ration totale. Le manque de fibres dans la ration peut réduire la matière grasse et la production du lait et provoquer des problèmes métaboliques, tels que l'acidose ruminale et les maladies infectieuses (Ishler et *al.*, 1996).

Les concentrations optimales d'NFC et d'NDF dans les régimes alimentaires pour les animaux d'élevage sont largement différentes selon l'animal, le stade de lactation et le type de la ration. Un guide des concentrations d'NFC et d'NDF recommandées pour une haute production des vaches laitières est mentionné dans le tableau 5.

Tableau 5 : Composition en carbohydrates dans les rations des vaches laitières hautes-productrices (Lammers et *al.*, 1994).

	Stade de lactation		
	<i>Précoce</i>	<i>Moyen</i>	<i>Avancé</i>
NDF fourrager	21-24	25-26	27-28
NDF total, % MS	28-32	33-35	36-38
NFC, % MS	32-38	32-38	32-38

Synthèse bibliographique

2-2- Besoins en protéines

La teneur en protéines des fourrages constitue un facteur limitant pour la croissance de la microflore ruminale (Cone et Van Gelder, 1999; Blummel et *al.*, 2003). Une teneur minimal est indispensable pour permettre à cette flore de se développer et de digérer les fourrages.

Le système d'évaluation de la protéine brute constituait pendant une longue période le système standard d'évaluation des besoins protéiques des animaux d'élevage. Ces besoins varient en fonction du poids, de l'âge et du niveau de production (croissance, reproduction et période de lactation), ainsi par exemple les bouvillons d'un an ont besoin d'une ration contenant 11-13 % de PB, les jeunes veaux exigent une ration contenant 16-20 %, et les vaches adultes en besoin seulement de 7-9 % de protéines (Siemens et *al.*, 1999). Toutefois, Tamminga (1992) rapporte que la teneur en azote dans la ration des bovins laitiers ne doit pas dépasser 30 g d'N / kg de MS. Cela correspond à une teneur en PB de 187 g / kg MS, soit 18,7 %.

Tableau 6 : Composition en protéines des rations de vaches laitières hautes-productrices (Lammers et *al.*, 1994).

	Stade de lactation		
	<i>Précoce</i>	<i>Moyen</i>	<i>Avancé</i>
Protéines brutes, % MS	17-18	16-17	15-16
Protéines solubles, % PB	30-34	32-36	32-38
Protéines dégradables, % PB	62-66	62-66	62-66
Protéines non dégradables % PB	34-38	34-38	34-38

La valeur de protéine brute rapportée pour les aliments pour bétail est une mesure brute de leur teneur en azote, elle ne précise pas si cet azote est présent sous forme d'acides aminés, d'azote protéique ou d'azote non protéique. En outre, elle ne précise pas combien de protéines dégradables (RDP) sont disponibles pour la synthèse de protéines microbiennes (MCP) ainsi que la quantité des protéines qui échappe à la dégradation (RUP) dans le rumen. Par conséquent, le système de protéine métabolisable (MP) a été récemment adapté pour mieux caractériser la dégradabilité et le taux de digestion des protéines (Ishler et *al.*, 1996; Hersom et Carter, 2013 ; Das et *al.*, 2014).

Synthèse bibliographique

Le système de protéine métabolisable consiste à : définir les besoins de la microflore ruminale en protéines dégradables dans le rumen (RDP) pour une digestion maximale des glucides et une synthèse protéique microbienne optimale, évaluer les exigences en protéines métabolisables de l'animal hôte pour le maintien, la croissance, la santé optimale et la reproduction avec un apport minimal de protéines non-dégradables dans le rumen (RUP) et enfin, répondre aux besoins en protéines et en acides aminés d'une vache laitière pour obtenir le rendement laitier souhaité (Das et *al.*, 2014). Paengkoum et *al.* (2019) a indiqué qu'un apport de 10 % de PB avec un ratio RUP/RDP de 35:65 peut satisfaire les besoins nutritionnels des bovins toute en assurant les exigences en azote des microorganismes du rumen.

Hersom et Carter (2013) rapportent qu'il est aussi important de connaître le rapport RDP : TDN des aliments, plus particulièrement lors de la complémentation de fourrages de mauvaise qualité. Le rapport optimal suggéré entre RDP: TDN est d'environ 8 à 13 %. La fourniture de suppléments avec des ratios RDP : TDN supérieurs à ce niveau garantit qu'un niveau adéquat de RDP est disponible pour les micro-organismes du rumen, améliorant ainsi l'utilisation de fourrage de faible qualité par l'animal (Hersom et Carter, 2013). Le tableau 7 présente les fractions PB, RDP, RUP, TDN et le ratio RDP : TDN de quelques aliments communs et sous-produits (Hersom et Carter, 2013).

Tableau 7 : Composantes protéiques et concentrations d'énergie de certains sous-produits (Hersom et Carter, 2013).

Aliment	PB %	TDN %	TDN:PB	RDP %	RDP:TDN	RUP %
Aliments protéiques :						
Farine de gluten de maïs	46,0	89,0	1,9	38,0	19,6	62,0
Farine de coton	49,0	77,0	1,6	57,0	36,3	43,0
Farine de plumes	85,0	69,0	0,8	30,0	36,9	70,0
Farine de soja	49,0	87,0	1,8	65,0	36,6	35,0
Drêches de distillerie sèche	46,0	75,0	1,6	57,0	20,8	43,0
Drêches de brasserie humides	29,0	74,0	2,6	36,0	14,1	64,0
Aliments énergétiques :						
Pulpe d'agrumes	6,0	79,0	13,0	42,0	3,2	58,0
Grains de maïs	10,0	88,0	8,8	57,0	6,5	43,0
Graines de coton	23,0	95,0	4,1	70,0	17,0	30,0
Mélasses	5,0	74,0	14,8	100,0	6,8	0,0
Pellicule de soja	12,0	77,0	6,4	58,0	9,0	42,0
Brisure de blé	18,0	82,0	4,6	77,0	16,9	23,0

PB : protéines brute ; TDN : nutriments digestibles ; RDP : protéines dégradables dans le rumen ; RUP : protéines non dégradables dans le rumen.

Synthèse bibliographique

Afin de maximiser la croissance et la production laitières des animaux d'élevage les éleveurs ne visent pas seulement l'équilibre quantitatif de la protéine de la ration mais aussi son équilibre qualitatif ou plus précisément l'équilibre en acides aminés essentiels constituant une alimentation particulière (Schwab et Ordway, 2004). Toutefois, la balance des acides aminés n'est pas aussi importante pour les ruminants que la quantité des protéines offerte à l'animal. Ceci parce que les microorganismes du rumen peuvent synthétiser tous les acides aminés essentiels, si les précurseurs appropriés, tels que l'azote et le soufre, sont présents dans le rumen. Cependant, tous les besoins d'une vache hautement productrice pour les acides aminés essentiels ne peuvent être satisfaits par la synthèse de protéines microbiennes seules. Certains acides aminés essentiels doivent être fournis dans la ration pour atteindre les taux maximaux de croissance et de production de lait (Mac Donald, 2002).

2-3- Besoins en minéraux

Les minéraux sont nécessaires à la régulation de certaines propriétés physico-chimiques (pouvoir tampon, pression osmotique) et au bon fonctionnement de pratiquement tous les processus métaboliques (Durand et Kawashima, 1980 ; Spears et weiss, 2014). Des effets positifs sur l'activité cellulolytique ou la protéosynthèse ont été observés *in vitro* suite à un apport supplémentaire de certains minéraux (S, P, Mg, K, Na, oligominéraux) à des milieux carencés (Thivend, 1985). Les minéraux sont également essentiels au maintien de la santé et de l'immunité de l'animal (Yatoo et *al.*, 2013).

Pour une croissance et une reproduction optimales, les animaux d'élevage ont besoin de différents minéraux dans des proportions variables (tableau 8), dont les plus importants étant le phosphore et le soufre. Le phosphore est nécessaire à la synthèse d'ATP et des protéines microbiennes. Son incorporation dans la cellule microbienne (pour 80 % dans les acides nucléiques et 10 % dans les phospholipides) est fonction de la production d'AGV dans le milieu (600 mg P/mole d'AGV) et de l'intensité de la protéosynthèse (Thivend, 1985). L'exigence minimale des ruminants pour le phosphore (P) varie de 1,2 à 2,4 g / kg de matière sèche, selon la fonction physiologique (Gutteridge and Shelton, 1994). Une teneur insuffisante en P peut limiter la dégradation de la paroi cellulaire (Durand et Komisarczuk, 1988) et la synthèse des protéines microbiennes (Stern et Hoover, 1979). Toutefois, des niveaux élevés de P réduisent l'utilisation du Ca et du Mg par les ruminants (Lopes et Perry, 1986). Le Mg est essentiel pour l'activation de nombreuses enzymes bactériennes, notamment les phosphohydrolases et les phosphotransférase. La cellulase de *Ruminococcus flavefaciens*

Synthèse bibliographique

s'est révélée être activée par Mg^{+2} (Pettipher et Latham, 1979). La carence en Mg réduit la sécrétion salivaire (Durand et Komisarczuk, 1988). Le Na et le K jouent le rôle de tampons et interviennent dans la régulation de la pression osmotique dans le rumen (Durand et Kawashima, 1980).

Le soufre est nécessaire pour la synthèse des acides aminés soufrés (notamment, la cystéine, la cystine, et la méthionine) et des vitamines (thiamine, biotine). Il devient plus important lorsque la ration alimentaire est riche en azote non protéique tels que l'urée (Karsli et Russell, 2001; Ishler et *al.*, 1996; Hall et *al.*, 2009). Des concentrations supérieures à 1,5 g/kg de matière sèche ou des rapports N: S inférieurs à 15:1 sont considérés comme adéquats (Gutteridge and Shelton, 1994). Une consommation excessive en soufre perturbe l'absorption du zinc et la disponibilité de cuivre chez les animaux (Durand et Komisarczuk, 1988).

Bien que nécessaires en quantités infimes (moins de 100 mg/kg de MS), les oligo-éléments (Cu, Fe, Zn, Co, I, Mn, Se) sont indispensables pour la croissance, la production et la reproduction chez les ruminants (Yatoo et *al.*, 2013 ; Spears et weiss, 2014). Le cobalt (Co) est aussi un composant de la vitamine B12. Une teneur optimale en cobalt dans le régime alimentaire assure une synthèse maximale de vitamine B12 par la microflore ruminale (Spears et weiss, 2014).

Tableau 8 : Besoin en minéraux de certains animaux d'élevage (cas des ovins et des bovins) (MLA, 2006).

Minéraux	Besoins (g/kg MS)	
	Bovins	Ovins
Eléments majeurs		
Phosphore (P)	1,0 - 3,8	0,9 – 3,0
Soufre (S)	1,5	2,0
Calcium (Ca)	2,0 – 11,0	1,4 – 7,0
Sodium (Na)	0,8 – 1,2	0,7 – 1,0
Magnésium (Mg)	1,3 – 2,2	0,9 – 1,2
Potassium (K)	5,0	5,0
Chlore (Cl)	0,7 – 2,4	0,3 – 1,0
Elément traces		
Cuivre (Cu)	4 – 14	4 – 14
Cobalt (Co)	0,07 – 0,15	0,08 – 0,15
Sélénium (Se)	0,04	0,05
Zinc (Zn)	9 – 20	9 – 20
Iode (I)	0,5	0,5
Fer (Fe)	40	40
Manganèse (Mn)	20 -25	20 – 25

2-4- Besoins en vitamines

Les vitamines sont des composés impliqués dans la régulation du métabolisme. Elles sont nécessaires en quantités infimes, et elles ont un impact sur la production, la reproduction, la qualité de la peau et la fonction immunitaire (Spears et weiss, 2014).

Le pâturage et les fourrages de qualité médiocre ou excellente contiennent généralement des quantités suffisantes de vitamines nécessaires pour le bétail. La vitamine C et les vitamines B sont hydrosolubles et sont nécessaires quotidiennement. Les vitamines B jouant un rôle crucial dans le métabolisme des glucides, des protéines et des lipides, il est probable que la demande pour ces cofacteurs augmente avec le rendement en lait (Girard, 2017). Les microorganismes du rumen produisent toutes ou presque toutes les vitamines B nécessaires pour le bétail. La vitamine C est un antioxydant très dégradé dans le rumen et qui exerce des effets positifs sur l'activité microbienne (Tagliapietra et al., 2013). Les besoins en vitamine C sont faibles et sont fournis par le régime alimentaire (Hall et al., 2009). Les vitamines A, D, E et K sont des vitamines liposolubles qui peuvent être stockées dans le corps de l'animal. Généralement la microflore ruminale synthétise des quantités suffisantes de vitamine K. Le pâturage du bétail obtient habituellement assez de vitamines A et E. La vitamine E n'est pas synthétisée par les micro-organismes présents dans le rumen (Persson-Waller et al., 2007), mais certains dérivés, tels que l' α -tocophérol quinone et l' α -tocophérol quinol, sont synthétisés par *Butyrivibrio fibrisolvens* (Huges et Tove, 1982). La vitamine E améliore l'activité microbienne (Tagliapietra et al., 2013), la fermentation ruminale in vitro (Wei et al., 2015) et la digestibilité totale in vivo de la MS et de la MO (Hernández-Mendo et al., 2017). En outre, Les vitamines A et E augmentent la prolifération microbienne, l'utilisation des acides gras et la digestibilité ruminale de la cellulose (Hino et al., 1993). La vitamine D peut être synthétisée dans la peau sous l'influence de rayonnement ultraviolet ou peut être incluse dans le régime alimentaire (Hall et al., 2009). Les bovins peuvent avoir besoin de suppléments en vitamines A, D et E lorsque l'approvisionnement en fourrage est constitué de résidus de culture, de foins surannés ou abîmés par les intempéries ou de fourrage sec en hiver.

Un guide sur la teneur en vitamines nécessaires pour une haute production des vaches laitières est illustré dans le tableau 9.

Synthèse bibliographique

Tableau 9 : Fonctions et teneurs en quelques vitamines nécessaires pour une haute production des vaches laitières (Lammers et *al.*, 1994).

	Fonction	Besoins recommandés UI/lbs MS
Vitamine A	Elément indispensable pour la vision, la fonction cellulaire, le maintien des membranes épithéliales des voies respiratoires, reproductives et digestives.	3500
Vitamine D	Croissance et développement osseux normaux, Absorbance et mobilisation du calcium et du phosphore.	Minimum 750 Maximum 1100
Vitamine E	Antioxydant; associé au sélénium.	20
Vitamine K	Nécessaire pour la coagulation du sang.	.

UI : Unité internationale, lbs : la livre= 4,535 Kg.

3- Formulation des rations au moindre coût

Le coût est l'un des facteurs importants qui intervient dans le choix d'un aliment ou la décision de substituer un aliment de la ration par un autre. L'un des avantages importants des sous-produits agroalimentaires est souvent leur coût relativement faible. Toutefois, pour créer un système de production de ruminants financièrement réussi, la réduction des coûts alimentaires *doit* être accompagnée avec une productivité élevée (Bampidis et Robinsson, 2006).

Parce que les aliments alternatifs varient dans leur composition en énergie et en protéine, leurs prix doivent prendre en considération les éléments nutritifs qu'ils fournissent. Ainsi et pour faire une comparaison fondée sur le coût des aliments, une analyse préalable du profil nutritif des aliments est nécessaire. Le résultat de cette analyse permet de classer les aliments étudiés dans les grands groupes d'aliments décrits et ainsi de les comparer vis-à-vis leurs teneur en éléments nutritifs et vis-à-vis des aliments disponibles pour l'éleveur (DiCostanzo et Meiske, 1994).

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour aider les producteurs à évaluer la valeur économique des sous-produits. Ces méthodes sont utilisées pour comparer les prix des aliments en fonction de leur composition en nutriments sur une base sèche.

Synthèse bibliographique

Il est important de déterminer la valeur réelle de sorte que vous s'assurez que vous payez un juste prix pour le produit. Dans la plupart des cas, les aliments diffèrent à la fois en matière sèche et en éléments nutritifs. Ainsi, pour les comparer économiquement, il est préférable de déterminer le coût par quantité d'éléments nutritifs apportée par chaque aliment.

Certaines méthodes simples utilisent des équations pour la comparaison des coûts, à titre d'exemple "Les équations de Petersen" (tableau 10) qui permettent une comparaison des coûts des sous-produits en fonction de leur teneur en énergie et en protéine comparativement au coût et à la valeur nutritive du maïs-grain (source d'énergie) et des tourteaux de soya (source de protéine) (Wright, 2003).

D'autres méthodes plus évoluées utilisent des logiciels qui emploient l'algèbre matricielle ou des programmes linéaires qui comparent plusieurs éléments nutritifs simultanément, à fin de déterminer les aliments qui répondent mieux aux besoins en éléments nutritifs des animaux. Ce type de logiciels agricoles est adopté au Canada et aux États-Unis (Wright, 2003).

Le coût réel des sous-produits n'est pas le seul facteur à prendre en compte lors de l'évaluation des aliments de remplacement. D'autres facteurs entrent aussi en jeu : les coûts de transport, le coût de stockage, les frais de location, les coûts de manutention et de transformation, les frais occasionnés par le tri et l'élimination des contaminants.

Vue l'absence d'une politique de gestion des déchets de l'industrie agro-alimentaire et l'absence de marchés d'aliment pour bétail, qui peuvent servir comme un débouché pour les sous produits agro-alimentaires en Algérie, ces derniers sont principalement éliminés sous forme de décharge. Une minorité est orientée vers l'alimentation animale. Généralement, ce sont les éleveurs situés à proximité des usines de transformation qui reprennent ces sous-produits pour l'alimentation des animaux.

Il n'a pas été possible d'obtenir les tarifs de vente des sous-produits en Algérie, ils sont probablement mis à la disposition gratuitement par les industries. Pour avoir une idée globale sur les prix de vente de certains résidus agroalimentaires on a pris, à titre d'exemple, des données élaborées par le Comité National des Coproduits en France. Selon ce comité, la pulpe d'agrumes fraîche est parfois cédée gratuitement par les usines. Le prix de la pulpe de tomate et du marc de pomme varie respectivement de 3 à 9 et 3 à 4,5 euros la tonne de produit brut départ usine (Idele, 2016). Le traitement par séchage des sous-produits entraîne une

Synthèse bibliographique

augmentation importante des prix : la pulpe d'agrumes déshydratée est vendue entre 130 et 155 euros la tonne. Le prix du marc de pomme déshydraté est variable selon la saison, et est en moyenne de 150 euros la tonne de produit brut (Idele, 2016).

Tableau 10 : Évaluation de la valeur (\$) par tonne de quelques sous-produits, légumes et fruits à l'aide des équations de Petersen.

Aliment	% de	% d'UNT	% PB	% d'UNT	% PB	Coefficient A (soya)	Coefficient B (maïs)	Prix de l'aliment/ tonne
	MS	(rapporté à la MS)	(de l'aliment en l'état)					
Maïs-grain	85	89	9,6	75,7	8,2	0	1	140,00 \$
Tourteau de soya à 48 %	89	84	53,9	74,8	48	1,0<000	0	320,00 \$
Sous-produits de mouture et de transformation								
Avoine - Aliment composé	90	60	14	54	12,6	0,1698	0,5<460	130,77 \$
Déchets de boulangerie	88	89	11,9	78,3	10,5	0,0507	0,9852	154,15 \$
Drèches de brasserie - humides	24	67	25	16,1	6	0,1069	0,1069	49,17 \$
Drèches de brasserie -sèches	92	67	25	61,6	23	0,4097	0,4099	188,50 \$
Drèches de distillerie - humides	30	84	29,5	25,2	8,9	0,1537	0,1813	74,55 \$
Drèches de distillerie - sèches	92	83,7	29,5	77	27,1	0,471	0,5524	228,05 \$
Farine de gluten (40 %)	91	86	43,9	78,3	39,9	0,7895	0,2543	288,24 \$
Farine de gluten (60 %)	91	86	67,2	78,3	61,2	1,3208	-0,2708	384,76 \$
Farine de gluten de maïs	40	82	27,5	32,8	11	0,187	0,2488	94,67 \$
Farines basses de riz	88	66,9	15,6	58,9	13,7	0,1849	0,5955	142,53 \$
Lactosérum	7	78	14	5,5	1	0,0098	0,0625	11,88 \$
Marc de pommes	20	70	5	14	1	-0,0128	0,1977	23,59 \$
Pulpe d'agrumes	18,3	82,5	6,6	15,1	1,2	-0,0105	0,21	26,02 \$

Aliment	% de	% d'UNT	% PB	% d'UNT	% PB	Coefficient A (soya)	Coefficient B (maïs)	Prix de l'aliment/ tonne
	MS	(rapporté à la MS)	(de l'aliment en l'état)					
Rafles de maïs	90	47	2,8	42,3	2,5	-0,0512	0,6097	68,98 \$
Son de blé	89	70	18	62,3	16	0,233	0,5932	157,63 \$
Soya torréfié	92	93,5	41,3	86	38	0,7198	0,4255	289,90 \$
Sous-produits d'équarrissage								
Farine de plumes	93	67,7	91,4	63	85	1,9597	-1,1038	472,56 \$
Farine de poisson	90	70	67	63	60,3	1,3407	-0,4922	360,13 \$
Farine de sang	92	65	86	59,8	79,1	1,821	-1,0091	441,44 \$
Farine de viande et d'os	93	73,1	53,8	68	50	1,0691	-0,1577	320,04 \$
Gras animal	95	200		190	0	-0,5136	3,0191	258,33 \$
Fruits et légumes								
Bananes	24,3	84,1	4,5	20,4	1,1	-0,0278	0,2977	32,76 \$
Betteraves	13	80,3	12,6	10,4	1,6	0,0128	0,1253	21,65 \$
Carottes	12	84	9,9	10,1	1,2	0,0025	0,1308	19,11 \$
Choux	9,5	85,3	25,3	8,1	2,4	0,0383	0,0692	21,96 \$
Oignons	9	57,6	12,6	5,2	1,1	0,0144	0,0543	12,21 \$
Pommes	17	70	2,8	11,9	0,5	-0,0202	0,1773	18,35 \$
Pommes de terre	23	81	9,5	18,6	2,2	0,0044	0,2419	35,28 \$
Tomates	6	69	16,4	4,1	1	0,0135	0,0414	10,11 \$

Par exemple pour déterminer la valeur de la tomate quand le maïs vaut 140 \$ la tonne et le tourteau de soya 320 \$ la tonne $(0,0135 \times 320 \$) + (0,0414 \times 140 \$) = 10,11 \$$

fin

4- Déficit fourrager

Par la nature de son climat, de son relief et de ses formations végétales, par les habitudes et les pratiques agricoles, l'Algérie est un pays à vocation pastorale et fourragère (Abdelguerfi et *al.*, 2008). Toutefois, la production fourragère est limitée et les superficies fourragères, estimées à environ 39 millions d'hectares, demeurent insuffisantes compte tenu des besoins du cheptel existant (Adam et Ferrah, 2002 ; Merdjane et Yakhlef, 2016).

L'effectif national du cheptel en 2012 a été estimé à plus de 4 millions d'Unité Gros Bétail (UGB), dont l'élevage ovins occupent plus de la moitié de l'élevage total (51,72 %). L'élevage bovin, camelin, caprin et équin représentent respectivement 30,40, 8,55, 6,55 et 2,78 %. La satisfaction des besoins de ce cheptel provient essentiellement des pacages et parcours et des dérivés de céréales (83,93 %), les cultures fourragères participent à 15,87 % dans le rationnement du cheptel national et les prairies naturelles n'apportent que 0,20 % (Merdjane et Yakhlef, 2016).

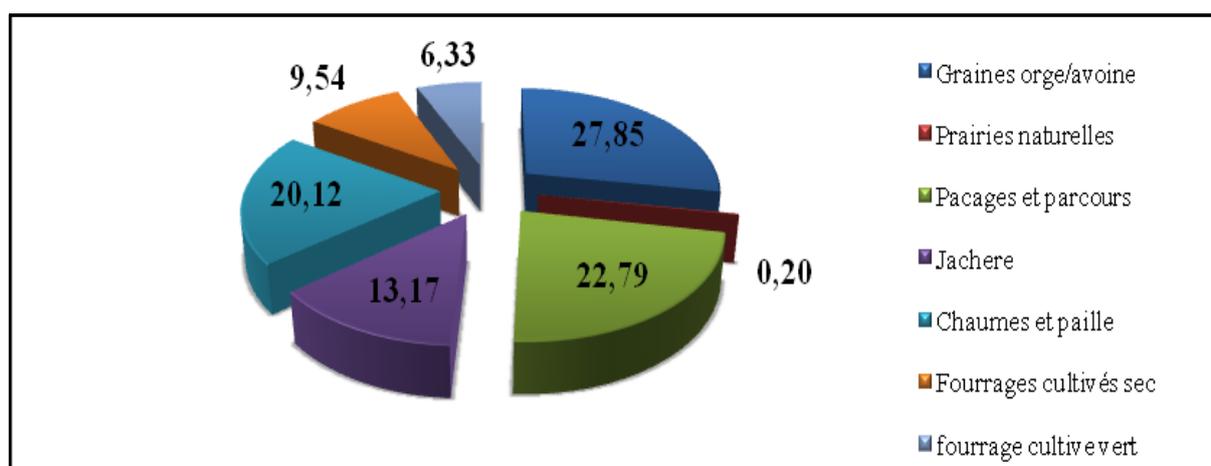


Fig. 7 : Répartition (en %) de l'offre fourragère par type de fourrage à l'échelle nationale (Merdjane et Yakhlef, 2016).

L'analyse de la balance fourragère en Algérie montre un état d'insuffisance locale qui persiste depuis long temps et qui est différent selon les années et les auteurs. En 1995, Amellal a enregistré un taux de couverture des besoins du cheptel de 50,5 %, soit un manque de 49,5 %. En 2001, Si Ziani et Bouleberhane (2001) et Adam et Ferrah (2002) ont enregistré des taux d'un déficit fourrager estimé à 18 % et 22 % respectivement. En 2008, Chehat et Bir ont estimé le seuil minimum des besoins à environ 10,5 Milliards d'UF et l'ampleur du déficit à 5,2 Milliards d'UF (49,51 %). L'estimation des besoins alimentaires du cheptel, pour

Synthèse bibliographique

l'année 2012, a montré une demande de plus de 13,3 milliards d'Unités Fourrager (UF). Toutefois, durant cette année l'Algérie ne disposait que 6 milliards d'UF, et l'offre fourragère accuse un déficit de l'ordre de 7,3 milliards d'UF, soit un taux moyen de 54,63 % (Merdjane et Yakhlef, 2016). Le déficit fourrager constaté est si ample qu'il affecte toutes les régions, bien que de manière inégale.

Plusieurs points critiques sont à l'origine (la cause) de cet écart entre les besoins et l'offre en fourrages dont les principaux sont les contraintes climatiques, les contraintes pédologiques, la rareté de l'eau d'irrigation et la répartition inégale des potentialités entre les régions (Chehat et Bir, 2008).

Malgré les efforts fournis par l'Etat en augmentant la surface irriguée (à environ 600 000 ha) et la culture des fourrages le déficit fourrager reste encore très accentué, ce qui a conduit à l'incorporation des aliments concentrés à base d'orge, de maïs ou de tourteaux de soja comme compléments alimentaires (Kazi Tani, 2014). Toutefois, l'utilisation de ces intrants alimentaires a pour conséquence d'augmenter plus que de raison les coûts de production parce qu'il s'agit d'aliments qui proviennent en grande partie de l'importation et qui deviennent de plus en plus chers et moins abondantes en raison de leur utilisation pour d'autres applications comme la production des biocarburants (Kali et *al.*, 2011).

Les quantités des matières importées, ainsi que les sommes versées par l'Etat ont augmenté en passant de 2 millions de tonnes en 2000 à 3 millions de tonnes en 2007 pour 328 millions de USD en 2000, puis 750,6 millions de USD en 2007 (Tableau 11) (Kali et *al.*, 2011). En 2008, l'Office algérien interprofessionnel des céréales (OAIC) a importé 300 000 tonnes d'orge destiné à l'alimentation de bétail. Pour soutenir la filière élevage, le gouvernement a octroyé une subvention de 2 500 dinars le quintal (l'orge est vendu à 1550 DA le quintal alors que l'OAIC l'achète à près de 4 000 DA le quintal). En 2011, l'Office national des aliments du bétail (ONAB) a importé 300.0000 tonnes de maïs et 180.000 tonnes de soja (l'aliment produit par l'ONAB étant composé à 60 % de maïs et 30 % de soja) (Nedjraoui, 2012). L'importation des aliments pour bétail par l'ONAB a encore augmenté en 2017 à 5,2 millions de tonnes (4 millions de tonnes de maïs et de 1,2 million de tonnes de tourteau de soja).

Synthèse bibliographique

Face à toutes ces contraintes et vu le développement du secteur des industries agroalimentaires, l'exploitation et la valorisation des sous produits locaux demeure une issue dans la perspective d'initier un développement local durable.

Tableau 11 : Evolution des importations d'aliments du bétail en Algérie (Kali et *al.*, 2011)

Années	Poids (millions tonnes)	Valeur (milliards DA)	Valeur (millions USD)
2000	2,40	24,7	328
2001	2,46	27	350
2002	2,95	32,8	424
2003	2,07	25,9	335
2004	2,43	36,6	508
2005	3,15	39,4	537
2006	2,94	37,8	521
2007	3,01	52	750

Chapitre IV- Dynamique du devenir des aliments dans le rumen

1- Ecosystème ruminal

Les sous produits agro-industriels sont très variés et sont souvent caractérisés par une structure très complexe et rigide. Les ruminants ont la particularité d'utiliser une telle variété d'aliments due à leur écosystème microbien très diversifié composé de bactéries (10^{10} - 10^{11} cellules/ml), protozoaires (10^4 - 10^6 cellules /ml), champignons anaérobies (10^3 - 10^5 zoospores par ml) et bactériophages. Une véritable symbiose existe entre le ruminant et sa flore ruminale, l'animal fournit l'habitat et les nutriments nécessaires pour la croissance de la flore microbienne qui assure, à son tour, la bioconversion des aliments en formes utilisables par l'animal (source d'énergie) et la production des protéines d'origine microbienne. L'équilibre de cette population est essentiel pour assurer une digestion de qualité et requiert des conditions ruminales particulières : l'anaérobiose (potentiel d'oxydoréduction moyen de -350 mv), un pH qui s'échelonne entre 5,5 et 7,3 avec un optimum à 6,0, une température de 39 à 40°C ainsi qu'une alimentation adaptée (Ferrand, 2010).

Les bactéries sont la composante principale de la biocénose ruminale, leur nombre atteint 10^{10} - 10^{11} cellules/ml et elles sont responsables de la dégradation de plus de 50 % de la fibre alimentaire. Plus de 200 espèces bactérienne ont été isolées et caractérisées au plan phénotypique mais une cinquantaine seulement est régulièrement retrouvée dans la flore dominante et peut être considérée comme autochtone. Les autres, apportées par les aliments et l'eau de boisson, n'étant présentes que d'une manière transitoire (Thivend et *al.*, 1985).

La population bactérienne est composée principalement de bactéries anaérobies strictes, mais il existe également des anaérobies facultatifs (*Streptococcus bovis*, *Lactobacillus sp.*). Des aérobies pénètrent dans le rumen avec l'eau et l'alimentation mais elles se produisent en moins grand nombre et ne s'établissent pas dans le rumen (Thivend et *al.*, 1985).

Les bactéries présentent quatre grandes localisations dans le biotope ruminal. Elles peuvent être libres dans la phase liquide ruminale, attachées aux particules alimentaires ou à l'épithélium ruminal interne, ou en fin associées à la surface des protozoaires (Thivend et *al.*, 1985). La communauté bactérienne associée à la phase solide du rumen prédomine numériquement et représente 70 à 80 % de la population microbienne totale (Minato et *al.*, 1993 ; Miron et *al.*, 2001a). Sur le plan des activités enzymatiques, elle est estimée à l'origine

Synthèse bibliographique

de 80 % de l'activité endoglucanasique, 70 % de l'activité amylasique et 75 % de l'activité protéasique dans le rumen (Minato et *al.*, 1966; Brock et *al.*, 1982; McAllister et *al.*, 1994).

En fonction du substrat dégradé, les bactéries du rumen sont réparties en bactéries cellulolytiques, hémicellulolytiques, amylolytiques, lipolytiques, protéolytiques (Tableau 12). Les fonctions d'une espèce donnée peuvent être limitées ou au contraire très larges. Les espèces bactériennes les plus abondantes dans le rumen sont les «généralistes» ou «non spécifiques», comme *Prevotella ruminicola* et *Butyrivibrio fibrosolvens*, qui dégradent une large gamme de polymères, ou *Selenomonas ruminantium* qui utilise une variété de produits finaux. Ainsi, certaines espèces apparaissent comme des "spécialistes", comme *Ruminobacter amylophilus* (Bacilles Gram-, amylolytique) et *Fibrobacter succinogenes* (Bacilles Gram-, cellulolytiques) qui dominent les environnements extrêmes (Thivend et *al.*, 1985).

Les bactéries du rumen sont probablement les agents de dégradation de fibres les plus actifs dans le rumen, mais **les champignons** jouent également un rôle important, en particulier dans leur capacité de mieux pénétrer au tissu végétal que les bactéries et les protozoaires (Orpin et Joblin, 1988 ; Nagpal et *al.*, 2009). Telle pénétration diminue la rigidité structurale des particules alimentaires et facilite l'accès des autres microorganismes à la paroi cellulaire secondaire, ce qui conduit à une dégradation plus rapide et plus complète du fourrage (Bauchop et Mountfort, 1981 ; Patterson, 1992).

En plus de la sécrétion d'enzymes solubles, les champignons anaérobies du rumen forment des cellulosomes ancrés dans les parois cellulaires, semblables à ceux des bactéries (Nagpal et *al.*, 2009). Des cellulosomes ont été décrits chez des espèces de *Piromyces* (Nagy et *al.*, 2007, Steenbakkers et *al.*, 2002), d'*Orpinomyces* (Ljungdahl, 2008) et de *Neocallimastix* (Aylward et *al.*, 1999, Zhou et *al.*, 1994). Ces champignons anaérobies produisent une large gamme d'enzymes hydrolytiques cellulase (Barichievich et Calza, 1990) et hémicellulase (Mountfort et Asher, 1989). Des estérases (féruloyle et p.coumaryl estérases) (Borneman et *al.*, 1992) sont aussi sécrétées par les champignons du rumen, ces enzymes clivent la liaison entre les hémicelluloses et la lignine ce qui rend la cellulose et l'hémicellulose plus facilement accessibles pour une dégradation supplémentaire (Nagpal et *al.*, 2009).

Certaines espèces de **protozoaires**, principalement les grandes espèces entodiniomorphides, ont longtemps été soupçonnées de contribuer à la digestion des fibres dans le rumen (Patterson, 1992; Béra-Maillet et *al.*, 2005). Cependant, il n'a pas été possible

Tableau 12 : Groupes microbiens du rumen possédant des activités dégradant les fibres (Goel et al., 2015)

	Cellulolytique	hémicellulolytique	pectinolytique
Bactéries			
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	+		+
<i>Ruminococcus albus</i>	+		+
<i>R. flavefaciens</i>	+		+
<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	+		+
<i>Eubacterium cellulosolvens</i>	+		+
<i>Clostridium longisporum</i>	+	+	
<i>Cl.locheadii</i>		+	+
<i>Prevotella ruminantium</i>		+	+
<i>Eubacterium xylanophilum</i>		+	
<i>Ruminobacter amylophilus</i>		+	
<i>Succinimonas dextrinosolvens</i>		+	
<i>Selenomonas ruminantium</i>		+	
<i>Selenomonas lactilytica</i>		+	
<i>Lachnospira multiparus</i>		+	+
<i>Streptococcus bovis</i>		+	+
Protozoaires			
<i>Eudiplodinium maggii</i>	+	+	+
<i>Ostracodinium dilobum</i>	+	+	+
<i>Epidinium caudatum</i>	+	+	
<i>Polyplastron multivesiculatum</i>	+	+	+
<i>Metadinium affine</i>	+	+	+
<i>Eudiplodinium bovis</i>	+	+	+
<i>Ophryoscolex caudatus</i>	+	+	+
<i>Diplodinium pentacanthum</i>	+		
<i>Endoploplastron triloricaum</i>	+		
<i>Ophryoscolex tricornatus</i>	+		
<i>Ostracodinium gracile</i>	+		
<i>Entodinium caudatum</i>	+	+	
<i>Isotricha intestinalis</i>	+	+	+
<i>Isotricha prostoma</i>	+	+	+
Champignons			
<i>Neocallimastix frontalis</i>	+	+	+
<i>N. patriciarum</i>	+	+	+
<i>N. joyonii</i>	+	+	
<i>Caecomyces communis</i>	+	+	
<i>Piromyces communis</i>	+	+	+
<i>Orpinomyces bovis</i>	+	+	+
<i>Anaeromyces sp.</i>	+	+	

Synthèse bibliographique

de prouver que cette digestion n'était pas due aux activités enzymatiques des bactéries ingérées ou associées (Delfosse-Debusscher et *al.*, 1979). En isolant les gènes codant pour des polysaccharidases à partir de *Polyplastron multivesiculatum*, et d'*Epidinium caudatum* il a été prouvé récemment que ces ciliés produisent leurs propres enzymes fibrolytiques (Devillard et *al.*, 1999; Devillard et *al.*, 2003; Takenaka et *al.*, 1999), qui sont distinctes de celles des bactéries qu'ils ingèrent. La diminution de la dégradation fibrolytique de la cellulose et de l'hémicellulose suite à une défaunation du rumen suggère à nouveau le rôle important des protozoaires dans la digestion des fibres dans le rumen (Ushida et *al.*, 1990).

2- Biotransformation des constituants de la ration dans le rumen

2-1- Métabolisme glucidique

La dégradation ruminale des glucides débute avec leur hydrolyse en oses à 5 ou 6 atomes de carbone grâce aux enzymes synthétisées par les microorganismes du rumen, qui vont ensuite fermenté ces produits en acide pyruvique via le phénomène de glycolyse. Il existe ensuite plusieurs voies métaboliques dépendant du type de régime alimentaire qui amènent à la formation de lactate et d'acides gras volatils à partir de l'acide pyruvique. Les AGV (dont les principaux sont l'acide acétique C2, l'acide propionique C3 et l'acide butyrique C4) permettent de synthétiser l'ATP nécessaire pour l'entretien, la croissance et la synthèse microbienne. Ils répondent à environ 70 % des besoins en énergie des ruminants (Bergman, 1990) et sont absorbés, pour la plupart, au niveau de la paroi ruminale.

2-1-1- Dégradation de la cellulose

La cellulose est le bio-polymère le plus abondant dans la planète, il représente environ 40 % de la paroi végétale. Il est constitué de plusieurs unités de glucoses reliées par des liaisons β -1,4. Les molécules de cellulose sont associées par les liaisons hydrogène et les forces de van der Waals pour former des micro-fibrilles. Ces derniers se regroupent en parallèle pour former des fibres, qui sont des formations cristallines (Leschine, 1995).

L'hydrolyse complète de la cellulose nécessite l'action combinée de multiples enzymes avec différentes spécificités de substrat. Elle débute avec l'attaque des régions amorphes solubles de la cellulose par les endo- β -glucanases en produisant de longs brins avec de nouvelles extrémités, qui servent de sites pour les exo- β -glucanases. Ces dernières clivent le disaccharide de cellobiose à partir de la cellulose. Les β -glucosidases hydrolysent enfin le cellobiose et les cellodextrines, produisant le glucose (Schwarz, 2001 ; Leschine 1995 ;

Synthèse bibliographique

Krause et *al.*, 2003 ; Aro et *al.*, 2005) (figure 8). Les principaux produits finaux produits par les bactéries cellulolytiques sont l'acétate et le butyrate (Russell et *al.*, 1992). Cependant, la concentration d'acétate sera plus élevée lorsque l'alimentation est composée principalement de concentrés ou de fourrages de mauvaise qualité.

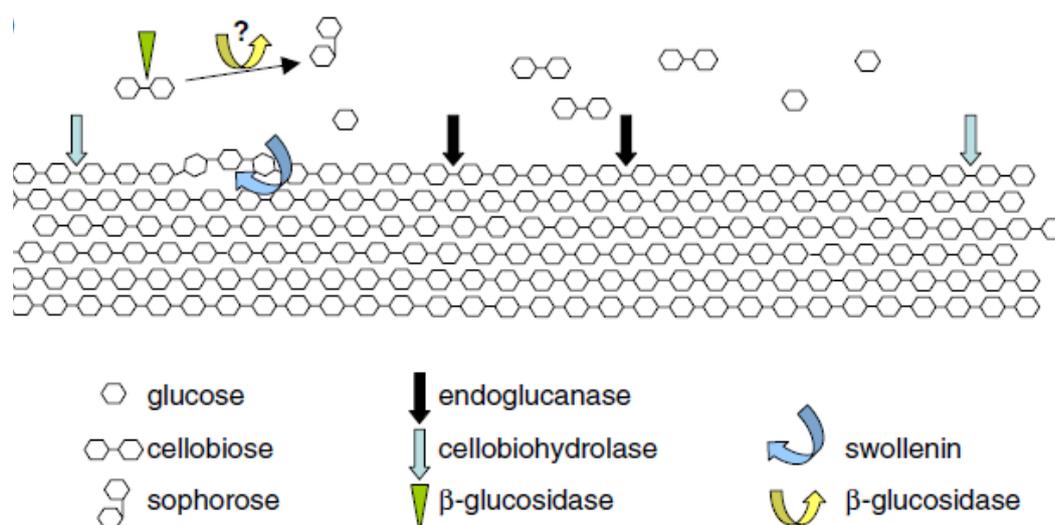


Fig. 8 : Représentation schématique de l'attaque enzymatique de la cellulose par les microorganismes cellulolytiques du rumen (Aro et *al.*, 2005)

Certains microorganismes du rumen produisent des cellulases sous forme d'enzymes libres qui agissent sur différentes parties de la cellulose. D'autres accomplissent la dégradation de la cellulose à l'aide de grands complexes multi-enzymatiques appelés cellulosomes (Schwarz, 2001) (figure 9). La fixation de ce complexe à la cellulose est réalisée par des bactéries non cellulolytiques via des protéines de liaison à la cellulose (Cellulose Binding Protein) (Krause et *al.*, 2003). A côté de la structure du cellulosome, les *Ruminococcus* utilisent également une protéine de liaison à la cellulose type C, qui implique des structures fibrillaires qui interagissent avec la cellulose. Les cellulases de *R. albus*, semblent être organisés en complexes extracellulaire de haut poids moléculaire très structuré, tandis que *B. fibrilovens* produit des polysaccharides extracellulaires ayant une composition complexe en sucre (Goel et *al.*, 2015). L'adhésion de *F. succinogenes* à la surface de la cellulose fait intervenir un CBM (Carbohydrate binding Module, module se fixant aux glucides) et sept CBP (Cellulose Binding Protein, module se fixant aux protéines) (Krause, 2003).

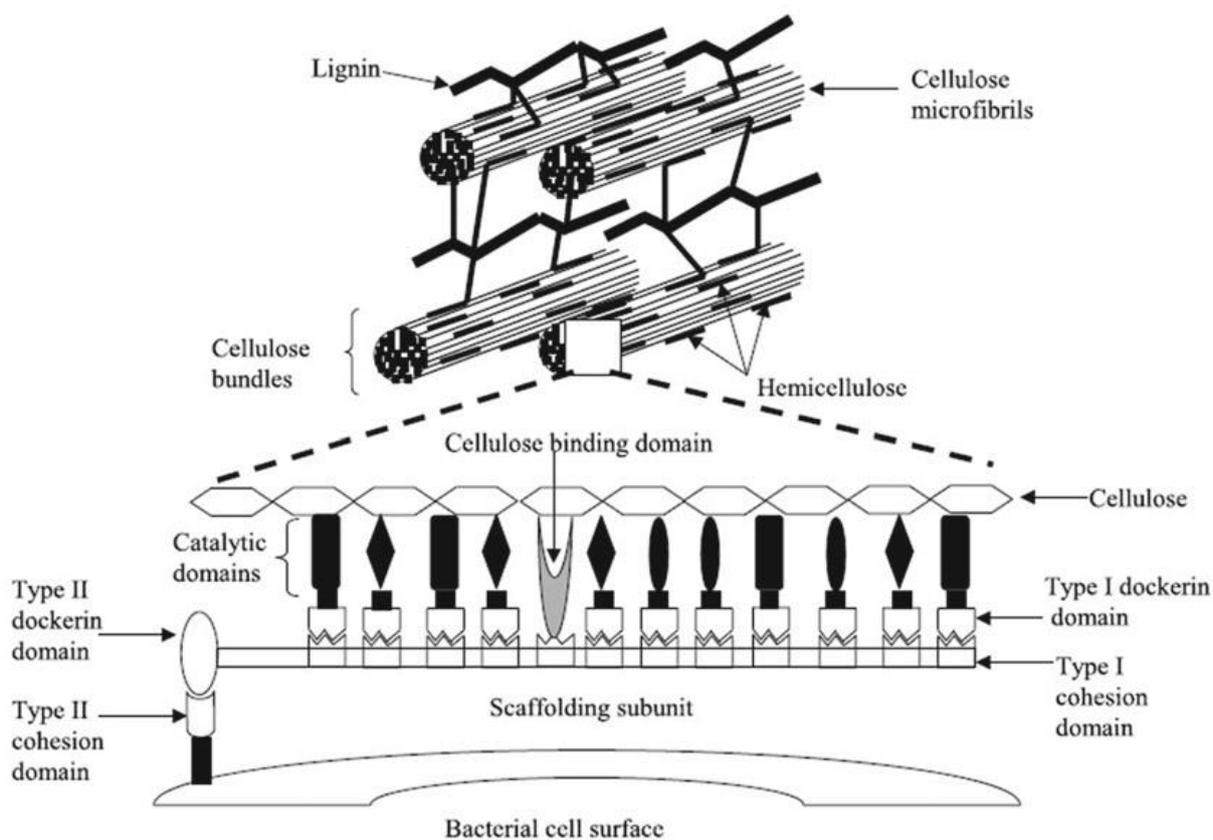


Fig. 9 : Représentation de la dégradation de la fibre et de ses composantes (cellulose, microfibrilles, hémicellulose et lignine) par le complexe cellulosome (Krause, 2003)

La population cellulolytique représente environ 9 % de la population bactérienne du rumen (Michalet-Doreau et *al.*, 2001). *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens* et *Ruminococcus albus* sont les principales bactéries cellulolytiques du rumen (Hespell, 1988, Fonty et Forano, 1999, Krause et *al.*, 2003). D'autres bactéries non cellulolytiques sont censés d'améliorer effectivement la dégradation de la cellulose, il s'agit par exemple de *Bacteroides ruminicola* H8a (actuellement classée comme *Prevotella ruminicola*), bactérie hémicellulolytique non cellulolytique (Dehority et scott, 1967) et *Treponema bryantii*, spirochète saccharolytique (Stanton et Canale-Parola, 1980).

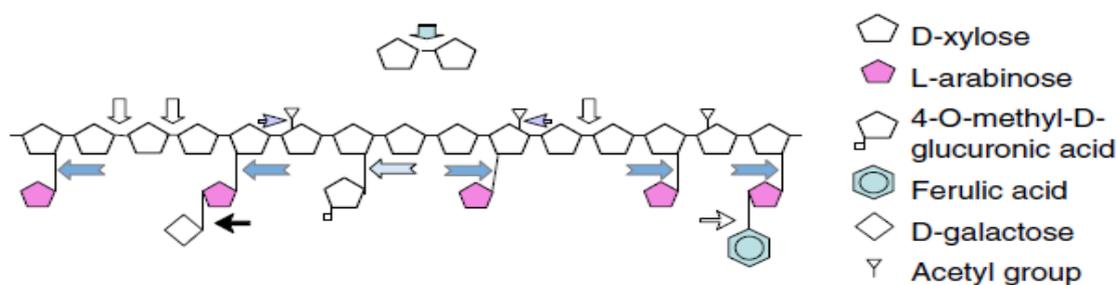
2-1-2- Dégradation de l'hémicellulose

Les hémicelluloses, contrairement à la cellulose, sont des hétéro-polymères amorphes composés d'hexoses (glucose, mannose, galactose) et surtout de pentoses (xylose, arabinose). Le xylane est le composant principale des hémicelluloses, il est composé d'un squelette de plusieurs unités de xylose où elles sont fixées différentes chaînes latérales (par exemple

Synthèse bibliographique

l'acide acétique, l'arabinose, l'acide glucuronique, l'acide 4-O-méthylglucuronique). Le xylane peut être réticulé à d'autres squelettes d'hémicellulose, à la lignine ou à la fibrille de cellulose formant un vaste réseau de liaisons transversales. Les motifs de ramification variables des structures environnantes conduisent à différents types de structures des hémicelluloses (Goel *et al.*, 2015).

La dégradation de l'hémicellulose se fait par une action coordonnée de β -1,4 endoxylyanases qui clivent la chaîne principale par l'intérieur, de β -1,4 exoxylyanases qui libèrent les sucres monomériques par les extrémités de la chaîne principale, de xylosidases ou xylobiases et d'enzymes auxiliaires telle que la β -glucuronidase qui clivent les chaînes latérales en libérant divers mono et disaccharides (Figure 10) (Aro *et al.*, 2005).



SYMBOL	ENZYME	EC-NUMBER	LINKAGE HYDROLYSED
↓	Endo-1,4- β -xylanase	3.2.1.8	β -1,4
⇩	β -D-xylosidase	3.2.1.37	β -1,4
➡	α -L-arabinofuranosidase Arabinoxylan arabinofuranohydrolases	3.2.1.55	α -L-1,2; α -L-1,3 and α -L-1,5
⇨	α -D-glucuronidase	3.2.1	α -1,2
➔	feruloyl esterase	3.2.1	ester bond
➔	α -D-galactosidase	3.2.1.22	α -1,6
⇨	acétylxylan esterase	3.1.1.6	ester bond

Fig. 10 : Représentation schématique de l'attaque enzymatique de l'hémicellulose par les microorganismes hémicellulolytiques du rumen (Aro *et al.*, 2005)

Le système enzymatique hémicellulolytique est plus largement distribué parmi les microorganismes du rumen que le système enzymatique cellulolytique (Patterson, 1992). *Butyrivibrio fibrisolvens* semble être l'élément essentiel dans la dégradation des

Synthèse bibliographique

hémicelluloses. Toutefois, *Prevotella ruminicola*, ainsi que les *Ruminococci* présentent également une activité importante vis-à-vis des hémicelluloses. Des gènes codants pour la dégradation des hémicelluloses ont également été caractérisés chez l'espèce cellulolytique *Fibrobacter succinogenes* (krause et al., 2003). Deux autres espèces du genre *Eubacterium* (*E. ruminantium* et *E. xylanophilum*) possèdent une activité xylanasiq.

2-1-3- Dégradation de la pectine

Les pectines constituent un ensemble complexe de glycanes, en partie neutres et de macromolécules, en partie acides. Elles sont constituées d'une chaîne principale (succession d' α -D-galacturoniques liés en 1,4) et de chaînes secondaires branchées (rhamnose, galactose, arabinose). Une association forte peut avoir lieu grâce aux ions calcium et/ou magnésium ce qui forme un gel. Cette gélification peut s'interrompre et les pectines deviennent fluides en absence de ces éléments. Les tissus jeunes en croissance contiennent généralement une grande quantité de pectine alors que les tissus lignifiés ne contiennent que très peu de substance pectique (Knudsen, 1997).

Parmi les bactéries ruminales *Lachnospira multiparus* est la bactérie pectinolytique par excellence (Chesson et Forsberg, 1997). D'autres espèces bactériennes y compris *Butirivibrio fibrisolvens*, *Prevotella ruminicola*, *Succinivibrio dextrinosolvens*, *Treponema bryantii* et *Streptococcus bovis* (Tiret, 2001) assurent également la digestion de la pectine. Outre les espèces bactériennes, les protozoaires et les champignons du rumen possèdent également un système enzymatique pectinolytique (Orpin, 1984; Bonhomme, 1990; Gordon et Philips, 1992).

Les enzymes pectinolytiques sont divisées en deux principaux groupes: les pectines estérases qui catalysent la dégradation du méthanol et les enzymes de polymérisation, qui sont soit des hydrolases soit des lyases.

2-1-4- Dégradation de l'amidon

L'amidon est rapidement et largement digéré dans le rumen. Les granules d'amidon sont rapidement ingérés par les protozoaires, qui les convertissent rapidement en glucides solubles et en polysaccharides de réserve (Patterson, 1992). Au contraire des protozoaires, les bactéries amylolytiques sont trop petites pour ingérer les grains d'amidon, elles s'attachent d'abord aux particules alimentaires et sécrètent des endo- et des exo-amylases qui hydrolysent

Tableau 13 : Quelques caractéristiques de bactéries rencontrées dans le rumen (Keijji and Soichi, 1981 ; Patterson, 1992)

Type de Gram et morphologie	Genre	Espèce	Forme et dimensions	Type de substrat dégradé
Cocci Gram-	<i>Veillonella</i>	<i>V.parvola</i>	Cocci de 0.3-0.5 µm de diamètre ; solé, en diplocoques ou en chaînes courtes	Utilisatrice des acides (lactate)
	<i>Megasphaera</i>	<i>M. elsdenii</i>	Cocci de 2.5-3.0 µm de diamètre; isolés, en paires ou occasionnellement en chaînes.	Utilisatrice des acides (lactate)et hydrolyse l'urée
	<i>Lampropedia</i>	<i>L. hyalina</i>	Se présente sous forme de feuillets de 0.8-1.0 µm de diamètre	nd
	<i>Oscillospira</i>	<i>O. guillermondi</i>	Bactéries larges de 5.0-9.0 µm de diamètre	nd
Cocci Gram+	<i>Ruminococcus</i>	<i>R.albus</i> <i>R.flavefaciens</i>	Cocci sphérique de dimensions : 0.8-1.5 × 0.7-1.8 µm ; isolés, en paires ou en chaînes.	Cellulose et hémicellulose
	<i>Streptococcus</i>	<i>S. bovis</i>	Cellules sphériques ou ovoïdes ; de 0.5-2.0 µm en paires ou en chaînes.	Amidon, Pectine, Sucres
	<i>Sarcina</i>	<i>S. ventriculi</i>	Cocci sphériques de 1.8-2.4 µm en paire ou en tetrade	nd
	<i>Methanosarcina</i>	<i>M. barkeri</i>	Cocci sphériques de 4-10 µm ; isolés ou en agrégat.	CO2, H2, Formate (Archea méthanogènes)
Bacilles Gram-	<i>Anaerovibrio</i>	<i>A. lipolytica</i>	Bacilles légèrement incurvés, 1.2-1.8 µm de long.	Lipide
	<i>Prevotella</i>	<i>P. ruminicola</i>	Bacilles de 0.1-1.0 × 0.8-8.0 µm ; isolés ou en courtes chaînes	Hémicellulose, protéines, amidon
	<i>Butyrivibrio</i>	<i>B. fibrisolvens</i>	Bacilles incurvés, dimensions : 0.4-0.6 × 2.5 µm	Cellulose, hémicellulose, amidon
	<i>Lachnospira</i>	<i>L. multiparus</i>	Bacilles incurvés, dimensions : 0.4- 0.6 × 2.0-4.0 µm	Pectine

Type de Gram et morphologie	Genre	Espèce	Forme et dimensions	Type de substrat dégradé
	<i>Fibrobacter</i>	<i>F. succinogenes</i>	Bacilles ovoïdes, isolés : 0.4-0.8 × 0.8-2.0 µm ou en chaînes courtes et même sous forme de rosettes	Cellulose, amidon
	<i>Selenomonas</i>	<i>S. ruminantium</i> <i>S. lactilytica</i>	Bacilles incurvés, 0.9-1.1 × 1.0-3.0 µm ; isolés ou en courtes chaînes	Amidon, sucres, lactate
	<i>Ruminobacter</i>	<i>R. amylophilus</i>	Bacilles ovales ou courts : 0.9-1.2 × 1.0-3.0 µm	Amidon, protéines
	<i>Vibrio</i>	<i>V. succinogenes</i>	Bacilles incurvés, en hélice ou droits : 0.5-1.0 × 2-6 µm droits : 0.5-1.0 × 2-6 µm	Acides
	<i>Treponema</i>	<i>T. bryanii</i>	Bactéries sous forme d'une hélice avec un diamètre de 3.0-6.0 µm	Sucres, pectine et amidon
	<i>Clostridium</i>	<i>C. cellobioparum</i> <i>C. lochheadii</i>	Bacilles de 0.3-2.0 × 1.2-2.5 µm	Cellulose
Bacilles Gram+	<i>Lactobacillus</i>	<i>L. ruminis</i> <i>L. vitulinus</i> <i>L. acidophilus</i>	Cellules de formes bacillaires régulières : 0.5-0.7 µm de diamètre	Amidon et sucres
	<i>Eubacterium</i>	<i>E. cellulosolvans</i> <i>E. xylanophilum</i> <i>E. uniformis</i>	Bacilles longs, en paires, en chaînes ou séparés : 0.2-2.0 × 0.3-10 µm	Cellulose, hémicellulose
	<i>Succinovibrio</i>	<i>S. dextrinosolvans</i>	Bacilles incurvés ou en hélice, 0.4-0.6 × 1.0-2.0 µm	Amidon, sucres
	<i>Methanobacterium</i>	<i>M. bryanii</i> <i>M. formicium</i>	Bacilles incurvés, 0.5-1.0 µm de long	CO ₂ , H ₂ , Formate (Archea méthanogènes)

	<i>Methanobrevibacter</i>	<i>M. ruminantium</i>	Bacilles ovales ou courts, en chaînes ou en paires, 0.6 µm de large ; 0.8-2.0 µm de long.	CO ₂ , H ₂ , Formate (Archea méthanogènes)
--	---------------------------	-----------------------	--	--

Synthèse bibliographique

les liaisons α 1.4 et α 1.6 qui lient les molécules de glucose pour former l'amylose et l'amylopectine. Les malto-oligomères (dextrine, maltose et glucose) résultants sont transportés dans la cellule pour être décomposés en hexoses individuels par la maltase intracellulaire et utilisés pour la production d'ATP (Kotarski et *al.*, 1992 ; Patterson, 1992).

Les bactéries amylolytiques peuvent représenter à elles seules plus de la moitié de la microflore totale lorsque les rations sont à forte proportion de produits amylicés, notamment des régimes riches en céréales. Les espèces *Streptococcus bovis*, *Ruminobacter amylophilus*, *Prevotella ruminicola*, *Succinimonas amylolytica* et *Selenomonas ruminantium* comprennent de nombreuses souches dégradant l'amidon. Certaines bactéries cellulolytiques, comme certaines souches de *F. succinogenes* et de *B. Fibrisolvens*, sont également amylolytiques (Bryant, 1961 ; Cotta, 1988). À l'exception de *Ruminobacter amylophilus*, aucune bactérie ne présente une distribution constante de l'activité amylolytique. D'autre part, certains espèces fongique du rumen sont capable d'hydrolysés l'amidon, il s'agit de *Neocallimastix patriciarum*, *Orpinomyces jayonii* et *Piromyces communis*. Toutefois leur mode d'attaque enzymatique varie selon le champignon en question et le type de grains de céréale (Yanke et *al.*, 1993).

2-2- Métabolisme protéique

2-2-1- Protéolyse

Les mécanismes par lesquels les substrats azotés sont dégradés dans le rumen diffèrent selon le type microbien (bactéries et protozoaires) et le substrat (protéine, peptides, AA, urée). Plusieurs auteurs ont fourni des représentations schématiques très descriptives du mécanisme par lequel les protéines sont décomposées par les bactéries du rumen (Bach et *al.*, 2005 ; Nocek et Russell, 1988) (figure 11).

La première étape de dégradation des protéines dans le rumen implique la fixation des bactéries sur les particules alimentaires, suivie de l'activité des protéases microbiennes qui provoquent une dégradation extracellulaire des protéines en peptides (Brock et *al.*, 1982). De là, ces peptides et tout AA libre sont engloutis par les bactéries, où une série de dipeptidyl peptidase et de tri- et di-peptidases dégradent encore les peptides en AA (Wallace, 1996). Les AA résultants seront transaminés ou utilisés directement pour la synthèse des protéines microbiennes, si l'énergie est disponible. Toutefois, si l'énergie est limitée, les acides aminés

Synthèse bibliographique

seront désaminés pour produire l' NH_3 et les AGV, ou le CO_2 (Brock *et al.*, 1982; Tamminga, 1979).

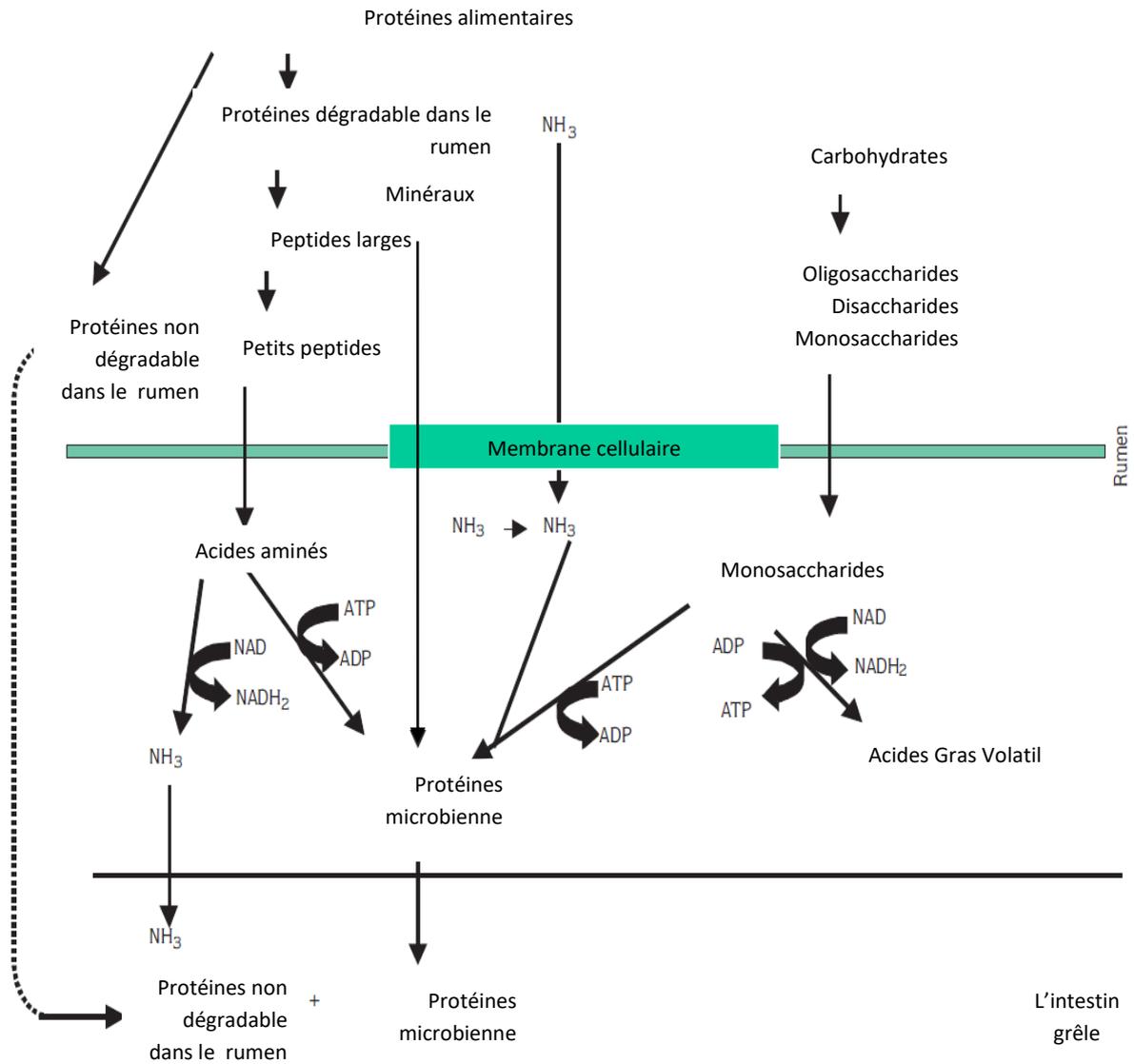


Fig.11 : Métabolisme azoté et synthèse des protéines microbiennes chez les ruminants (Noceck et Russell, 1988)

Synthèse bibliographique

Les bactéries du rumen jouent le rôle le plus important dans la dégradation des protéines, la fraction bactérienne présente une activité protéinase spécifique six à dix fois plus élevée que la fraction de protozoaires (Bach et *al.*, 2005). Contrairement aux bactéries, les protozoaires englobent les protéines bactériennes et alimentaires. Puis, ils les dégradent en sécrétant des peptidases intracellulaires (Van Soest, 1994, Jouany, 1996). Lors de la lyse de la cellule protozoaire, les protéines sont libérées sous forme d'azote disponible pour les bactéries (Dijkstra et *al.*, 1994).

La dégradation microbienne des protéines dans le rumen est fonction de plusieurs facteurs, les plus importants étant : la structure et la solubilité des protéines, la population microbienne prédominante, le pH ruminal et le type de la ration (Bach et *al.*, 2005).

De nombreuses espèces ruminales sont protéolytiques, plusieurs utilisent ou dégradent les acides aminés ou les peptides, y compris *Ruminobacter amylophilus*, *Prevotella ruminicola*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, et *Streptococcus bovis* (Attwood et Reilly, 1995). Les protozoaires du rumen ainsi que quelques espèces fongiques possèdent également une activité protéolytique (Warner, 1956 ; Wallace, 1994).

2-2-2- Protéosynthèse

Les microorganismes du rumen peuvent utiliser l'azote protéique ou non protéique comme une source d'azote pour produire leurs propres protéines. Toutefois, ils diffèrent dans leur source d'azote préférée. Les bactéries agissant sur la fraction structurale des glucides utilisent uniquement de l'ammoniac, alors que ceux qui agissent sur la fraction non structurale dérivent principalement leur azote à partir d'acides aminés et de peptides, et le reste de l'ammoniac (Russell et *al.*, 1992). Armstead et Ling (1993) suggèrent que les peptides et les acides aminés pourraient fournir respectivement de 11 à 35 % et de 36 à 68 % des besoins en azote des bactéries du rumen. Les protozoaires tirent leur azote de la dégradation des protéines alimentaires, bactériennes et fongiques. Bien que les peptides, les acides aminés et l'ammoniac puissent tous servir individuellement en tant que sources d'azote pour divers microorganismes, la population totale atteint le taux maximal de croissance sur des mélanges de ces trois sources (Hoover et Stokes, 1991 ; Ranilla et *al.*, 2001).

Les protéines microbiennes synthétisées dans le rumen constituent la principale source de protéines pour les ruminants, elles couvrent 60 à 70 % de l'apport protéique des ruminants (Demeyer et Fievez, 2000). Elles sont aussi des protéines de haute qualité, car elles

Tableau 14 : Composition en acides aminés des protéines de bactéries et de protozoaires du rumen en comparaison à celle de la caséine, des sous-produits de tomates, d'oranges et de pommes.

Acides aminés (g/100g de protéines)	Bactérie ^a	Protozoaire ^a	Caséine ^a	Résidus de tomates ^b	Résidus d'oranges ^c	Résidus de pommes ^d
Acides aminés essentiels						
Thréonine	5,37	5,07	4,9	2,74	2,2	3,87
Valine	5,49	5,24	7,2	3,10	3,3	4,27
Isoleucine	4,68	5,80	6,1	3,22	2,6	3,47
Leucine	6,47	7,18	9,2	5,64	4,4	6,81
Phénylalanine	3,98	5,29	5,0	3,37	2,8	3,87
Histidine	1,49	1,79	3,1	2,09	1,4	2,00
Lysine	6,99	10,14	8,2	4,53	1,9	4,94
Arginine	4,09	4,58	4,1	5,25	3,2	5,34
Méthionine	1,78	12,62	2,8	0,79	0,4	1,47
Acides aminés non essentiels						
Asparagine	12,10	12,62	7,1	7,49	7,8	8,95
Serine	4,24	4,10	6,3	3,51	2,5	4,54
Glutamine	11,98	13,81	22,4	23,75	8,2	15,89
Glycine	4,85	3,61	2,0	4,20	3,3	4,94
Alanine	6,12	3,48	3,2	4,17	3,1	4,94
Tyrosine	3,94	4,49	6,3	3,40	1,0	2,54
Proline	nd	nd	nd	3,47	4,6	4,41
Cystine	nd	nd	nd	0,54	0,8	2,00
Tryptophane	nd	nd	nd	2,36	0,3	nd

nd : non déterminé ; a : Thirumalesh et Krishnamoorthy (2013) ; b : moyenne des valeurs enregistrées par Elbadrawy et sello (2011), Tsatsaronis et dimitrios (1975), Knoblich (2005) et Consensus document tomate ; c : Bampidis (2006) ; d : Cho et *al.* (201

Synthèse bibliographique

ont un bon équilibre entre les acides aminés essentiels nécessaires pour les ruminants (Ishler et *al.*, 1996) (tableau 14).

La synthèse des protéines microbiennes dans le rumen dépend essentiellement de la disponibilité des composés azotés et carbonés pour répondre aux besoins microbiens. Cependant, d'autres facteurs qui incluent l'apport en MS, le rapport fourrage: concentré de la ration, le taux de dégradation de l'azote et des hydrates de carbone, la synchronisation énergie: protéine, le taux de passage dans le rumen, et la concentration en minéraux et en vitamines ont également un effet significatif sur la production microbienne (Karabulut et *al.*, 2007, Karsli et Russell, 2001 ; Thirumalesh et Krishnamoorthy, 2013).

2-3- Métabolisme lipidique

Les acides gras issus des plantes fourragères et des aliments concentrés sont présents sous forme de phospholipides, de glycolipides et de triglycérides. L'hydrolyse de ces composants lipidiques par la flore lipolytique ruminale conduit à la production d'acides gras libres insaturés, qui sont hydrogénés pour donner des produits terminaux partiellement saturés et/ou incorporés dans la fraction lipidique des bactéries associées (Demeyer et Doreau, 1999). La lipolyse conduit aussi à la libération de glycérol et de galactose, qui sont rapidement fermentés en AGV, principalement en propionate et en butyrate (Tamminga et Doreau, 1991). Les acides gras libérés ne sont pas absorbés par le rumen, mais passeront à la caillette et à l'intestin grêle, qui est le principal site d'absorption des acides gras (Drackley, 2004).

Bien que le taux d'hydrolyse des lipides soit généralement élevé (> 85 %), un certain nombre d'études ont montré que la lipolyse est inhibée par un pourcentage élevé de lipides dans la ration (Beam et *al.*, 2000) ou par un pH ruminal bas (Van Nevel et Demeyer, 1996).

Différentes souches de bactéries produisent des lipases extracellulaires. Parmi eux, la plus connue est *Anaerovibrio lipolytica*, l'une des bactéries lipolytiques les plus actives (Prins et *al.*, 1975). Autres bactéries ruminales sont impliquées dans l'utilisation des lipides, comme *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Treponema bryantii*, *Eubacterium sp.*, *Fusocillus sp.*, et *Micrococcus sp.* (Tiret, 2001) et autres comme *Megasphaera elsdenii* sont impliquées dans la biohydrogénation des acides gras insaturés (Kim et *al.*, 2002). D'autre part, aucune activité lipolytique n'a pu être attribuée aux champignons du rumen. Toutefois, certains d'entre eux ont la capacité de biohydrogénation, mais à un taux beaucoup plus lent que les bactéries (Nam et Garnsworthy, 2007). De même, l'implication des protozoaires ciliés dans l'hydrolyse des lipides alimentaire n'a pas été prouvée de façon claire (Harfooft et Hazlewood, 1997 ; Jarvis

Synthèse bibliographique

et Moore, 2009). En fait, ils n'agiraient pas directement mais comme prédateurs/régulateurs des populations bactériennes (Jenkins et *al.*, 2008).

Chapitre V : Méthodes d'étude de l'apport nutritif des résidus agro-alimentaires et des aliments fibreux dans l'alimentation des ruminants

Afin de pouvoir constituer une ration équilibrée et économique, des indications sur la valeur nutritive des différents aliments utilisés dans la nutrition animale sont nécessaires. De ce fait plusieurs méthodes d'examen chimiques, analytiques et biologiques ont été mises au point.

1- Les méthodes chimiques

La composition de l'aliment en termes de composants fondamentaux (système d'analyse Weende ou Proximate) a servi de point de départ pour l'évaluation des aliments depuis le dix-neuvième siècle. Cette méthode d'analyse divise les hydrates de carbone en deux composants, la fraction de fibres brutes qui était initialement destinée à représenter le composant non digestible, et l'extrait exempt d'azote qui comprenait des sucres solubles et d'autres composants. Bien que ce système soit simple, il donne seulement des informations sur la composition chimique mais pas sur la digestibilité. En outre, le système présente d'autres inconvénients avec une possibilité d'interprétation erronée de la valeur nutritive (Van Soest, 1994). Par conséquent, la méthode alternative, le système d'analyse par des détergents (Van Soest, 1967) a été appliquée pour caractériser plus efficacement les hydrates de carbone en les divisant suivant leur dégradabilité en composants pariétaux mal digérés et en composants cellulaires facilement digérés, ce qui a offert l'avantage de prédire l'ingestion et la valeur nutritive (Wood et Badve, 2001 ; Mould, 2003).

Les analyses chimiques sont moins coûteuses et rapides, mais ne donnent pas d'estimation directe de la valeur nutritive.

Synthèse bibliographique

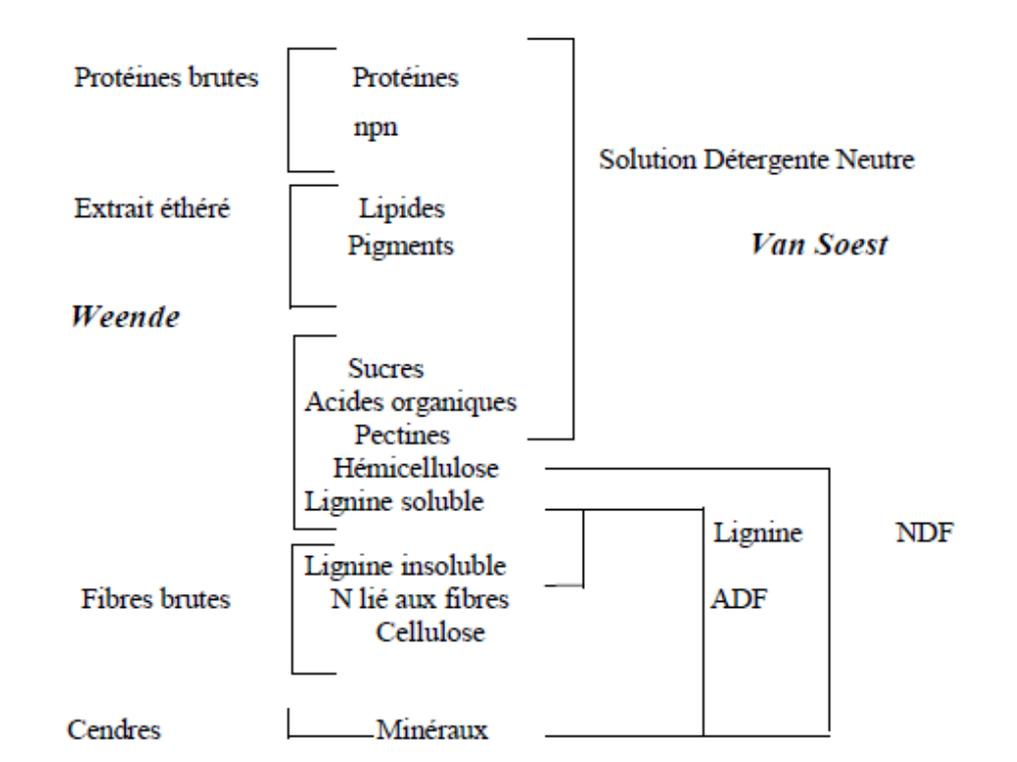


Fig. 12 : Comparaison des systèmes analytiques de Weende et Van Soest (Mould, 2003)

2- Méthodes physiques

La spectrophotométrie à réflectance dans le proche-infrarouge (NIRS) est une méthode analytique physique développée par Norris et *al.*, (1976). Cette méthode est basée sur l'irradiation avec la lumière proche-infrarouge des matériaux organiques qui absorbent sélectivement l'énergie dans la région de longueur d'onde proche de l'infrarouge (1100-2500 nm). L'intensité de l'absorption est proportionnelle à la concentration d'une liaison chimique spécifique ou d'un nutriment dans l'échantillon. Il est donc possible d'identifier des régions spécifiques du spectre en corrélation avec des constituants tels que l'amidon, la fibre ou les protéines brutes (Mould, 2003). Les spectres d'absorption sont principalement influencés par la composition chimique mais aussi par la taille des particules, la température et l'homogénéité de l'échantillon (Reeves III, 2000).

Les spectres NIR ont été utilisés avec succès pour évaluer la composition chimique, la digestibilité *in vivo* de la matière organique, l'ingestion volontaire et l'énergie métabolisable des aliments destinés aux ruminants (Boval et *al.*, 2004 ; Restanio et *al.*, 2009 ; Steen et *al.*, 1998 ; Givens et *al.*, 1991 ; Landau et *al.*, 2006).

Comparativement aux autres méthodes d'analyses, la technique NIRS est unique car elle est non destructrice, elle ne nécessite aucun réactif chimique et est donc non polluante et elle caractérise l'ensemble du fourrage plutôt que des composants spécifiques d'intérêt. Cependant, leur principale limite est son étalonnage précis à l'aide d'échantillons appropriés et d'analyses de laboratoire appropriées (Landau et *al.*, 2006).

3- Les méthodes biologiques

3-1- La technique de digestibilité *in vitro*

La méthode de Tilley et Terry (1963) est l'une des méthodes les plus utiles pour prédire la digestibilité *in vivo*. Contrairement à d'autres techniques, qui tentent seulement de simuler la digestion ruminale, cette technique imite également la digestion gastrique et prédit donc avec précision la digestibilité *in vivo* de nombreux fourrages (Tilley et Terry, 1963, De Boever et *al.*, 1988).

La méthodologie initiale de Tilley et Terry comprenait deux étapes, représentant le rumen et le tube digestif inférieur, respectivement. Le substrat est d'abord fermenté en anaérobiose dans le liquide ruminal tamponné, puis soumis à une incubation « pepsine acide » pour digérer la cellule végétale non dégradée et la protéine microbienne. Les résidus sont récupérés et analysés pour déterminer l'ampleur de la dégradation de la matière sèche et de la matière organique.

Pour mieux tenir compte de la digestion post-ruminale, Goering et Van Soest (1970) ont introduit une technique qui mesure la digestibilité réelle *in vitro* de la matière sèche (essai IVTDMD) en remplaçant l'étape pepsine-acide de la technique de Tilley et Terry (1963) par une étape de digestion au détergent neutre. Cette technique est encore largement utilisée. Cependant, étant donné que l'ampleur de la dégradation dans le rumen d'un aliment est le produit du temps de séjour dans le rumen et du taux de dégradation, ces méthodologies sont déficientes parce qu'elles ne fournissent aucune information cinétique sur la dégradation. Il est donc possible que deux substrats aient des valeurs de dégradation finales similaires, mais des taux de dégradation différents. Ceci est d'une importance fondamentale, car les aliments ayant un taux de dégradation plus élevé seront généralement consommés en plus grandes quantités (Mould et *al.*, 2005).

Synthèse bibliographique

En raison du coût et de l'inopportunité de conserver des animaux fistulés dans le rumen, et de la variabilité de l'activité du liquide ruminal, des tentatives ont été faites pour développer des tests de digestibilité purement enzymatiques. Plusieurs techniques à base de cellulose ont été utilisées avec un certain succès pour estimer la digestibilité du fourrage (Iowerth et *al.*, 1975). Toutefois, la variabilité de l'activité des préparations enzymatiques constitue un point critique, ce qui met l'accent sur la nécessité d'un étalonnage et d'une standardisation adéquate.

3-2- Méthode de dégradation *in situ*

La méthode *in situ*, appelée également *in sacco* ou méthode des sachets, a été dérivée de la méthode des poches de soie utilisée par Quin et *al.* (1939) et consiste à incuber dans le rumen d'animaux fistulés, de petits sacs en nylon contenant les échantillons d'aliments. Orskov et McDonald (1979) ont d'abord décrit cette méthode pour estimer la dégradabilité de la fraction azotée des aliments dans le rumen. Elle est devenue ensuite la base de plusieurs systèmes d'évaluation de l'alimentation en protéines métabolisable : système PDI en France (Vérité et *al.*, 1987) et système AAT-PBV en Scandinavie (Madsen, 1985).

La méthode permet également de décrire les cinétiques de dégradation des aliments dans le rumen (Chapoutot, 1998 ; Offner et *al.*, 2003) et de fournir des prévisions relativement bonnes de l'ingestion et de la digestibilité des fourrages (Orskov, 2000). En revanche, cette technique reste notoirement difficile à standardiser malgré des tentatives répétées (Madsen et Hvelplund, 1994). Plusieurs études sur la technique (Huntington, 1995 ; Nocek, 1985 ; Nozière et Michalet-Doreau, 2000 ; Orskov, 2000) indiquent que les résultats obtenus varient selon la méthode de préparation de l'échantillon, le procédé de lavage et de séchage, l'étendue et la nature des pertes de particules, le site d'incubation, l'espèce animale hôtes et le régime alimentaire, la taille du sac, le type de tissu et la taille des pores.

3-3- Techniques de mesure de la production *in vitro* de gaz

La technique de la production de gaz *in vitro* est largement utilisée dans la nutrition animale pour l'évaluation des aliments et pour étudier la cinétique du processus de fermentation microbienne dans le tube digestif. Cette technique est basée sur l'hypothèse que le gaz produit dans des cultures discontinues inoculées avec des microorganismes mixtes du contenu ruminal est directement lié à la quantité de substrat fermenté. La technique repose sur

Synthèse bibliographique

la modélisation mathématique pour estimer le taux et l'étendue de la digestion des aliments à partir des profils cumulatifs de production de gaz (Williams, 2000).

L'association étroite entre la fermentation ruminale et la production de gaz est reconnue depuis longtemps mais l'histoire de la technique de mesure du gaz libéré dans le rumen a commencé au début des années 1940 (Quin, 1943), mais la technique n'a été considérée comme une méthode de routine d'évaluation des aliments qu'après les travaux de Menke et *al.* (1979), où une corrélation élevée entre la production de gaz *in vitro* et la digestibilité apparente *in vivo* a été reportée. Ces auteurs ont développé un système appelé essai de Hohenheim, dans lequel les fermentations ont eu lieu dans des seringues en verre étanches aux gaz contenant l'aliment et le mélange de jus de rumen et de solution tampon. Le gaz produit pousse le piston à l'extérieur et le volume de gaz produit est enregistré.

La technique a ensuite été modifiée par Theodureau et *al.*, (1994), par le remplacement des seringues par des flacons en verre où le gaz est mesuré à l'aide d'un capteur de pression manuel. Cette méthode, bien que techniquement simple, elle a été un travail intensif car des lectures fréquentes étaient nécessaires (approximativement chaque 3-4h), en particulier au cours des premières heures de la fermentation.

Pour faciliter la lecture et la récolte des données de gaz produit, plusieurs systèmes automatisés ont été développés. Le plus ancien a été rapporté par Beuvink et *al.* (1992), dans ce système une bouteille de sérum a été reliée à une bouteille de déplacement d'eau et à un récipient de collecte placé sur une balance. Le changement du poids a été enregistré toutes les 25 minutes et des calculs ont été effectués afin de convertir le poids en volume de gaz, qui est par la suite enregistré par un enregistreur de données.

Une année plus tard, Pell et Schofield (1993), de l'université de Cornell aux Etats Unis, ont décrit pour la première fois l'utilisation des capteurs de pression automatisés pour contrôler la production de gaz. Le dispositif est composé d'une série de bouteilles sériques fermées de 50 ml, chacune avec son propre agitateur et capteur de pression, qui étaient reliés à un ordinateur compatible pour l'enregistrement des données.

En 1996, Cone et ses collaborateurs ont décrit un nouvel appareillage entièrement automatisé qui relie la production de gaz au temps. Cet appareil emploie une combinaison d'un capteur de pression et d'une valve électrique pour chaque bouteille. Chaque ouverture de la valve représente une quantité de gaz fixe et les cinétiques de fermentation sont

Synthèse bibliographique

déterminées en enregistrant la période de chaque ouverture de valve sur un enregistreur de données.

Les méthodes *in vitro* ont l'avantage non seulement d'être moins coûteuses, plus faciles et hautement reproductibles, mais ils permettent de maintenir les conditions expérimentales plus précisément que les essais *in vivo*. En outre, elles utilisent de petites quantités d'aliments et beaucoup d'échantillons peuvent être analysés en même temps (Williams, 2000). Toutefois, comme tout outil ces méthodologies possèdent de nombreux inconvénients, dont le plus important est le manque de l'uniformité. Les résultats obtenus varient selon le type de système utilisé, la source et l'activité du liquide ruminal utilisé (Rymer et *al.*, 2005), ce qui rend la comparaison des résultats très difficile.

Partie I : Etude des caractéristiques
physicochimiques et fermentaires des
sous-produits de l'industrie
agroalimentaire

1- Introduction

Les animaux d'élevage traditionnellement utilisent de grandes quantités de sous-produits traditionnels bien connus et largement disponibles tels que les tourteaux d'oléagineux, le son, la farine de céréales, les drêches de brasserie, la pulpe de betterave et de mélasse...etc. Au cours des dernières années, des aliments non conventionnels provenant essentiellement des industries agroalimentaires sont fréquemment incorporés dans l'alimentation du bétail (Denek et Can, 2006)

Les résidus agro-industriels sont les ressources les plus abondantes et renouvelables de la planète. L'accumulation de cette biomasse en grande quantité chaque année entraîne non seulement la détérioration de l'environnement, mais aussi la perte de ressources potentiellement utiles qui peut être traitées pour obtenir un certain nombre de produits à valeur ajoutée précieuse (Singh et Pandey, 2009). Toutefois, certains principes doivent être gardés à l'esprit lorsque l'on considère l'utilisation de ces aliments de substitution. Il s'agit notamment de la variabilité de leur teneur en éléments nutritifs, en énergie et en azote utilisable, leur conservabilité (comme le développement ultérieur de moisissures), la présence de substances anti-nutritionnelles et les besoins des ruminants en vitamines et en minéraux (Dicostanzo et *al.*, 1994).

Dans cet esprit, nous avons effectué une série d'expériences pour décrire dans une première partie les caractéristiques physicochimiques de trois sous-produits (résidus de tomates, d'oranges et de pommes) et de trois aliments fibreux (cardes, chrysanthèmes et le foin de vesce-avoine) et ceci par la détermination de la matière sèche, de la matière organique et minérale, de la teneur en fibres brutes, en NDF, en ADF, en lignine et en sucre totaux ainsi que la capacité tampon et le pH initial et final. Dans une deuxième partie : les caractéristiques fermentaires à travers l'estimation des paramètres cinétiques et du pourcentage de dégradabilité apparente des sous-produits, des aliments fibreux et de leurs mélanges binaires.

2- Matériel végétal

Les substrats utilisés pour cette étude sont :

- Trois sous produits de l'industrie agro-alimentaires : résidus de tomates (*Solanum lycopersicum*), résidus de pommes (*Malus communis*) et d'oranges (*Citrus sinensis*, L. Osb).

Matériel et méthodes

Les résidus composés de peaux, de pulpes, de graines, de fruits endommagés impropres à la consommation humaine ont été collectés des entrepôts locaux de la ville de Padoue. Un échantillon de chaque résidu (1 kg) a été séché à l'étuve à 60 ° C jusqu'à poids constant.

- Deux plantes fibreuses : chrysanthèmes (*Chrysanthemum coronarium* L.) et cardes (*Sylibum marianum* L. Gaertn.) sont des plantes méditerranéennes originaires du Nord de la Sardaigne, en Italie. Elles sont cultivées au début novembre puis récoltées à un stade de croissance tardif en juin pour maximiser la production de biomasse. Une fois arrivées au laboratoire, elles sont immédiatement séchées à l'air et conservées.
- Cinq types de polymères végétaux purs : cellulose CF11 (Whatman), xylan (Sigma), pectine (Fluka), amidon (Merck) et caséine (Sigma). Ces substrats sont destinés à mettre en évidence l'équilibre de la composition des principaux groupes bactériens qui constituent la flore ruminale utilisée comme inoculum.
- La fermentation de ces substrats est comparée à un substrat standard, consommé habituellement par les ruminants : foin de la vesce avoine.

Avant d'être utilisées, les substrats secs sont broyés au moyen d'un broyeur électrique, tamisés à travers une grille de 1.0 mm et conservés dans des récipients en plastique fermés jusqu'à leur utilisation.

3- Matériel animal

Vu l'absence d'animaux donneurs de liquide ruminal dans la station expérimentale, nous avons prélevé le jus de rumen utilisé pour la fermentation à partir d'un abattoir situé dans la région de Sétif. Pendant tous les essais, les animaux utilisés comme source d'inoculum étaient des dromadaires qui proviennent de la région du sud, d'âge différents et qui ont reçu un régime alimentaire basé sur les plantes fibreuses des parcours du sud de Biskra.

Après abattage des animaux le liquide ruminal est transporté immédiatement au laboratoire, dans des thermos aseptisés pour le conserver à sa température de prélèvement. Au laboratoire, avant d'entamer les différentes analyses, le liquide ruminal est filtré à travers deux couches de mousseline stériles pour éliminer les débris végétaux.

4- Analyse des caractéristiques physicochimiques des sous-produits et des aliments fibreux

Afin d'évaluer leur valeur nutritive, la détermination de la composition chimique des différents substrats est effectuée selon les techniques classiques pour quantifier les constituants nutritifs à savoir la matière sèche, la matière minérale et organique, la matière azotée totale, la matière grasse, les fibres pariétales, les sucres totaux, le pH initial et la capacité tampon.

Pour chaque échantillon trois répétitions ont été effectuées, les résultats sont rapportés en pourcentage par rapport à la MS.

4-1- Estimation de la matière sèche

La teneur en matière sèche résiduelle des substrats est déterminée après dessiccation d'un gramme de chaque substrat dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (A.O.A.C, 1990). La différence de poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche. La matière sèche est exprimée en pourcentage de poids humide.

4-2- Estimation de la matière organique est minérale

La teneur en matière minérale est le résidu obtenu après destruction de la matière organique par l'incinération d'un gramme d'échantillon sec dans un four à moufle à 550°C pendant 8 heures. La perte de poids observée au cours de la calcination correspond à la matière organique et le résidu à la matière minérale. Les résultats sont exprimés en gramme pour 100 g de MS.

4-3- Dosage des sucres totaux

Les sucres totaux sont déterminés selon la méthode décrite par Dubois et *al.* (1956). Les sucres simples, oligosaccharides, polysaccharides et leurs dérivés réagissent avec le phénol et l'acide sulfurique concentré et donnent une coloration jaune-orange. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses à une longueur d'onde de 488 nm. La méthode de dosage est décrite en annexe 1.

4-4- Dosage de matières azotées totales

L'azote total contenu dans les échantillons est déterminé par la méthode de Kjeldahl, dont les trois étapes sont : la minéralisation de l'échantillon, l'entraînement à la vapeur de l'ammoniac et en fin la titration par l'acide chlorhydrique 0,05 N (annexe 2). Le taux en protéines brutes est en suite calculé en multipliant par 6,25 la teneur en azote total.

4-5- Dosage de la matière grasse

Pour la détermination du pourcentage des lipides dans nos échantillons, nous avons utilisé la méthode Soxhlet dans laquelle l'extraction de la matière grasse se fait par l'éther de pétrole pendant 6 à 8 heures. Le contenu en matière grasse obtenu est exprimé en pourcentage par rapport à la quantité de matière sèche utilisée.

4-6- Dosage des constituants pariétaux

Le but de cette analyse est de distinguer les différents constituants pariétaux de nos substrats. La procédure appliquée est celle de Van Soest et *al.* (1991) (Annexe 3).

4-6-1- Estimation de la fraction NDF (Neutral Detergent Fibre)

La fraction **NDF** est la fraction insoluble dans un détergent neutre, elle correspond à la teneur en cellulose, hémicellulose et lignine.

4-6-2- Estimation de la fraction ADF (Acid Detergent Fibre)

La fraction **ADF** de l'aliment est la partie insoluble dans un détergent acide, elle contient la lignine et la cellulose. L'hémicellulose et le reste des constituants sont solubilisés dans la solution du détergeant acide.

4-6-3- Estimation de la fraction ADL

La fraction **ADL** est la fraction insoluble dans l'acide sulfurique à 72%. Le résidu correspond, en plus des cendres, à la lignine brute.

4-6-4- Estimation des hémicelluloses et cellulose

Les teneurs en hémicelluloses et en cellulose sont calculées respectivement par les différences (NDF – ADF) et (ADF – ADL) et exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche.

5- Détermination du pH initial et de la capacité tampon

La capacité tampon intrinsèque est définie comme la capacité d'un aliment à maintenir le pH du milieu aqueux ou à résister à un changement du pH après l'addition d'un acide ou d'une base (Moharrery, 2007).

La capacité tampon a été mesurée pour liquide ruminal (LR), la salive artificielle (SA), le mélange LR+ SA, les sous-produits, les aliments fibreux et les mélanges binaires.

La solution employée pour la détermination de la capacité tampon est préparée en mélangeant 1 g de matière sèche de substrat (ou 0,5 g de chaque substrat dans le cas des mélanges) dans 20 ml d'eau bi-distillée. Le pH initial de l'aliment est enregistré après 2 heures d'agitation. Pour le liquide ruminal et la salive artificielle 20 ml de chacun sont utilisés et la prise du pH est immédiate. La capacité tampon est déterminée par titrage de la solution de 20 ml, sous agitation continue, en abaissant son pH initial à un pH de 4 avec l'acide acétique 0,1N. Pour les aliments dont le pH initial est inférieur à 7, on fait d'abord augmenter ce dernier en ajoutant la solution d'ammoniaque 0,1N. Si le pH initial est supérieur à 7, seul le volume d'acide nécessaire pour réduire le pH de 7 à 4 est enregistré. Pour la détermination de la capacité tampon du contenu du rumen et de la salive artificielle, une prise d'essai de 20 ml sert à la détermination immédiate du pH et à la titration avec de l'acide acétique (1 N).

Chacune des courbes de titration obtenues est modélisée afin d'associer à chaque valeur de pH sa valeur de pouvoir tampon calculé à partir des paramètres de la courbe suivant la méthode décrite par Giger-Reverdin *et al.* (2002) qui se présente comme suit :

$$\text{pH} = a - b \text{ eqH}^+$$

Où : eqH⁺ représente la quantité d'acide acétique (1N) ajoutée, en équivalent gramme de H⁺.

a, *b*, *c*, *d* sont des paramètres positifs estimés à partir de la courbe, par le logiciel SAS.

La capacité tampon (CT) est égale à l'inverse de la valeur de la fonction dérivée qui caractérise le changement de pH après addition d'acide acétique.

$$\text{CT} = 1/ b$$

6- Fermentation *in vitro* des fourrages par le microbiote ruminal

Les caractéristiques de la fermentation des aliments par la flore microbienne du rumen peuvent être étudiées par des méthodes biologiques *in vivo*, *in situ* et *in vitro*. La technique de fermentation *in vitro* utilisée dans ce travail est celle décrite par Cone et *al.*, (1996).

6-1- Principe

La technique de production de gaz *in vitro* est une simulation de la digestion dans le rumen. Elle consiste en la fermentation en anaérobiose du substrat avec un mélange de liquide ruminal et d'une solution tampon. La fermentation a pour résultat la production d'acides gras volatils, de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et de la masse microbienne. La quantité de gaz produite pendant l'incubation est mesurée pour prévoir la digestion de l'aliment (Menke et Steingass, 1988) et évaluer sa dégradation *in vitro*.

6-2- Description du système de fermentation

Le système de fermentation se compose de 12 flacons en verre de 100 ml chacun. Il est muni d'un capteur de pression électronique et d'une valve électrique liée à un ordinateur pour le contrôle continu de tous les flacons. Pendant la fermentation, chaque valve s'ouvre pour libérer le gaz accumulé quand le capteur de pression enregistre une pression de gaz fixe et connue par étalonnage. Le nombre d'envois (libération de la pression) et le temps de chaque envoi pour chaque flacon sont enregistrés automatiquement par un enregistreur de données et sont employés pour tracer des profils cumulatifs de gaz (Figure 13).

L'avantage majeur de l'utilisation de ce type de système réside dans la facilité qu'il présente pour la mesure du gaz dégagé et le traçage des profils cumulatifs de gaz. En outre, le grand nombre de points expérimentaux enregistrés produit des modèles de fermentation très détaillés. En effet, les systèmes non automatisés (système de seringues) nécessite une mesure manuelle, ce qui peut engendrer des pertes et induit ainsi des erreurs de mesure.

6-3- Mise en œuvre de la fermentation *in vitro*

6-3-1- Préparation de la salive artificielle

La salive artificielle est une solution minérale qui joue le rôle d'une part d'un tampon et d'autre part, elle constitue un apport de sels minéraux et d'oligoéléments aux

Matériel et méthodes

microorganismes du rumen. Elle est préparée selon la procédure décrite par Menke et Steingass (1988) (Annexe 4).

6-3-2- Reconstitution du mélange salive- liquide ruminal filtré

Dans un bain marie thermostaté réglé à 39°C et sous une agitation continu et un flux de CO₂, le liquide ruminal filtré est mélangé avec la salive artificielle déjà réduite à raison d'un volume du liquide ruminal filtré avec deux volumes de salive artificielle, soit 1000 ml de salive artificielle pour 500 ml du liquide ruminal filtré.

6-3-3- Inoculation et incubation

Avant d'entamer l'inoculation, nous allumons l'appareil de mesure de gaz et l'ordinateur pour qu'ils soient prêts à détecter les premières quantités du gaz évacuées lors du début de la fermentation.

Dans chaque flacon, 500 mg de substrats seuls (ou 250 mg de chaque substrat dans le cas de mélange) sont mis à fermenter avec 75 ml de jus de rumen tamponné sous un flux continu de CO₂ (réduit par une colonne en cuivre rouge). Les différents flacons sont incubés dans un bain marie à agitation réglée à 39 C° pendant 120 heures. La température du bain marie doit être maintenue à 39 ± 0,5°C pendant la période d'incubation car une surchauffe peut endommager l'activité microbienne. Une légère baisse de température à moins d'effet sur la production de gaz.

À la fin de la fermentation, le contenu de chaque flacon est vérifié pour son pH final et le résidu non dégradé.

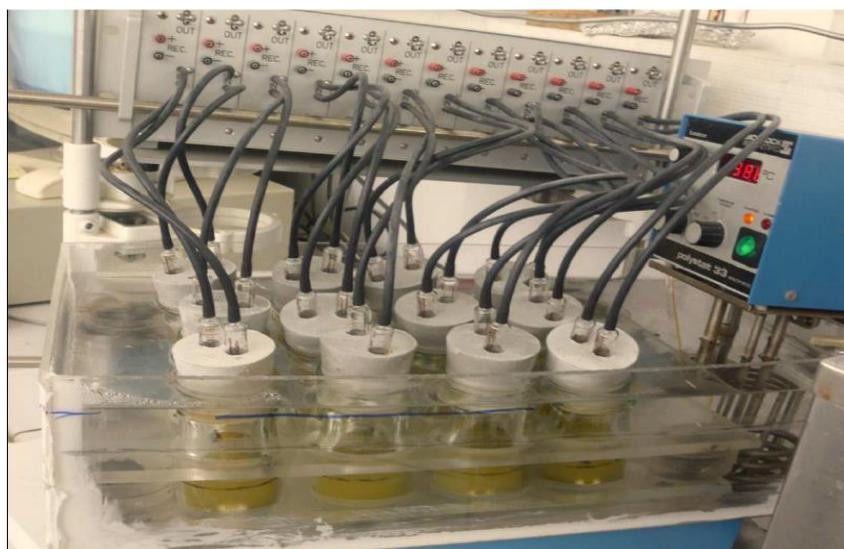


Fig. 13 : Appareil de mesure des gaz de fermentation à transducteurs de pression

6-3-4- Détermination des paramètres cinétiques de la production de gaz in vitro

Le suivi de la cinétique de fermentation est effectué par la mesure volumétrique de la production de gaz indiquée automatiquement par l'appareil qui permet de mesurer instantanément la quantité de gaz produite dans chaque flacon en donnant à chaque fois un signal lumineux lorsque 270 µl de gaz sont libérés, durant la durée d'incubation. Le nombre de signaux enregistrés par l'appareil est transféré vers l'ordinateur pour les traiter à l'aide d'un programme approprié. Les données sont ensuite récupérées et les paramètres cinétiques des divers substrats sont obtenus par ajustement non linéaire des données observées selon le modèle exponentiel décrit par Dhanao (1988). Ce modèle met en relation le volume de gaz produit au cours de la fermentation avec le temps d'incubation selon l'équation:

$$\text{gaz (t)} = \mathbf{b} (1 - e^{-c(t-\text{lag})})$$

gaz (t) : volume cumulé de gaz en fonction du temps d'incubation t (ml/g de MS);

b : production potentielle de gaz pour un temps d'incubation infini (ml/g de MS);

c : taux horaire constant de production de gaz (fraction de b/h);

t_½ : temps (h) au bout duquel la demi- production de gaz (**50% de b**) est atteinte;

Lag: temps de latence dans l'apparition du gaz (h) ;

t : temps d'incubation (h).

7- Estimation du pourcentage de dégradabilité apparente

À la fin de la période d'incubation, le contenu de chaque flacon de fermentation est filtré dans des sachets en nylon secs et préalablement tarés, ayant des pores de 54 µm de diamètre. Les sachets sont rincés abondamment avec de l'eau, séchés à 65°C pendant 72h, puis pesés à l'aide d'une balance de précision. Le résidu sec obtenu correspond à la quantité de substrat insoluble et non dégradé après fermentation, il sert pour déterminer le pourcentage de dégradabilité apparente selon la formule suivante :

$$\% \text{ dégradabilité apparente} = \mathbf{(P_1 - P_0) * 100 / P_d}$$

Où : P₀ : le poids du sachet vide ;

P1 : le poids du sachet après séchage ;

Pd : la prise d'essai initiale.

La dégradabilité apparente est exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche.

8- Analyse statistique des résultats

Les données collectées ont porté sur trois répétitions des expériences. Ceci nous a permis de calculer la moyenne et l'erreur standard pour chaque paramètre estimé et pour chaque substrat fermenté.

Les résultats de l'analyse physicochimique et fermentative ont été soumis à une analyse statistique à l'aide de logiciel statistique SAS (Statistical Analysis System, 2005). Les moyennes ont été comparés grâce au test " t " de Student, pour étudier l'effet du type de résidus sur chaque paramètre étudié. Les différences sont considérées comme significatifs si $p \leq 0,05$.

Partie II : Etude de l'enrichissement des
sous-produits de l'industrie
agroalimentaire en protéines
microbiennes

1- Introduction

Dans le cadre de cette expérience, le liquide ruminal bovin et deux résidus de l'industrie agroalimentaire (résidus de tomates, résidus d'oranges) ainsi que leurs mélanges avec la plante fibreuse *Sylibum marianum* (cardes) ont été incubés dans quatre milieux différents par leur source d'azote (azote minérale ou organique) et par la dose de liquide ruminal inoculé (5 ou 30 ml). Trois fermentations successives de 12 h ont été effectuées. Cette étude a été menée pour:

- Tester la possibilité d'utiliser le milieu simplifié comme une alternative au milieu conventionnel de Menke, plus complexe.
- Déterminer la meilleure combinaison entre milieu d'incubation et sous-produit agroalimentaire qui donne un gain en protéines.
- Etudier l'effet de l'association des résidus de tomates ou d'oranges avec les cardes, sur le rendement en protéines.
- Vérifier la possibilité d'utiliser le résidu de fermentation d'une incubation pour ensemercer d'autres substrats alimentaires.

2- Prélèvement du liquide ruminal

Le liquide ruminal qui a servi comme inoculum provient de vaches laitières logées dans les locaux de la station expérimentale "Toniolo L" de l'Université de Padoue Italie. Le régime alimentaire de ces vaches était composé de rations mixtes (données pour des périodes de 6 à 12 mois) constituées de : prairie de fauche, foin de luzerne, ensilage de maïs, paille, farine de maïs, orge, pulpe de betterave séchée, pellets de son de blé, supplément de vitamine, farine de soja, eau.

Le liquide ruminal est aspiré à l'aide d'une sonde œsophagienne reliée à une pompe à vide à travers un tube flexible. Une fois récupéré, le liquide du rumen est filtré à travers trois couches de gaze puis transporté au laboratoire.

3- Préparation des milieux d'incubation

Parallèlement au milieu conventionnel de Menke (**azote= 169 mg /litre**) (annexe 4), un autre milieu nommé "milieu simplifié" (**azote= 84 mg /litre**) est utilisé comme milieu

d'incubation. Ce dernier est composé uniquement d'un tampon (NaHCO_3 : 10 g/l) et d'une source d'azote (urée : 0,18 g/l).

4- Préparation des combinaisons substrat- milieu -inoculum

Pour chaque flacon de 250 ml, 2 g de sous-produits secs sont pesés, dans le cas de mélanges (50:50) 1 g de chaque substrat est pesé. Un autre flacon sans l'ajout de substrat appelé «témoin» est préparé parallèlement.

Les quatre combinaisons alimentaires et les témoins sont incubés selon les conditions suivantes :

- **Milieu MSN1** : 55 ml du milieu simplifié et une faible dose (5 ml) d'inoculum (**azote** dans 5 ml d'inoculum = 6,2 mg durant la première fermentation);
- **Milieu MMN1** : 55 ml du milieu Menke et une faible dose (5 ml) d'inoculum;
- **Milieu MSN2** : 30 ml du milieu simplifié et une dose élevée (30 ml) d'inoculum (**azote** dans 30 ml d'inoculum = 37,4 mg durant la première fermentation);
- **Milieu MMN2** : 30 ml du milieu Menke et une dose élevée (30 ml) d'inoculum.

Quatre répétitions de chaque substrat sont incubées pour chacun des milieux indiqués ci-dessus. Au total 16 flacons sont préparés pour chaque substrat.

5- Incubation

Trois incubations successives de 12 heures à 39°C sont réalisées en anaérobiose (pour une durée totale de 36 h). Le liquide de fermentation obtenu à la fin de chaque incubation est utilisé comme inoculum pour la fermentation suivante. Le transfert du liquide de fermentation est fait en gardant la même combinaison substrat et milieu d'incubation. À la fin de chaque série de fermentation, le pH final dans chaque flacon est mesuré et le liquide de fermentation est divisé en deux fractions : un aliquote de 2 ml est conservé dans des tubes Eppendorf à -20°C pour de futures analyses de l'ammoniac et de protéines, et le reste est lyophilisé pour être analysé pour le contenu en carbone, azote et soufre par analyse élémentaire.

Les étapes citées dessus ont été réalisées par Alessandro Moro, étudiant chercheur en science et technologie animale à la faculté de Médecine Vétérinaire Université de Padoue. Les étapes qui suivent ont été effectuées par moi même.

6- Estimation de la concentration de l'ammoniac

6-1-Principe

Le kit enzymatique **Ammonia Assay** (Sigma- Aldrich, Catalogue numéro AA0100) est utilisé pour la détermination enzymatique quantitative de l'ammoniac dans les aliments et les échantillons biologiques. La méthode est basée sur l'utilisation de l'enzyme la L-Glutamate déshydrogénase (GDH). En présence de cette dernière, l'ammoniac contenu dans l'échantillon réagit avec l'acide alpha-cétoglutarique (KGA) et le NADPH pour former le glutamate et le NADP+, qui peut être suivie par mesure spectrophotométrique.



6-2-Préparation des échantillons

Les échantillons contenant le liquide ruminal fermenté, conservés préalablement à – 20°C, sont décongelés à température ambiante puis dilués au vingtième en mélangeant 25µl du liquide ruminal fermenté et 475µl d'eau distillée.

6-3- Préparation des réactifs

Le réactif de dosage de l'ammoniac (Ammonia Essay Reagent) est fourni dans le kit dans des petits flacons sous forme de poudre sèche. Le réactif sec contient l'acide alpha-cétoglutarique (KGA), le NADPH, des tampons et des stabilisants. Chaque flacon est reconstitué avec 10 ml d'eau distillée. Après addition de l'eau, le contenu est immédiatement homogénéisé plusieurs fois par inversion jusqu'à complète dissolution.

La **L-Glutamate Déshydrogénase** et la **solution Standard** (Ammonia Standard Solution) sont prêtes à l'emploi.

6-4- Dosage de l'ammoniac

Un millilitre du réactif de dosage de l'ammoniac, préparé préalablement, est introduit dans une série de cuves étiquetées. Cent microlitre de chaque échantillon test sont ajoutés dans la cuve appropriée. Le mélange est en suite homogénéisé par inversion et une première lecture au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 340 nm est effectuée. La valeur obtenue correspond à l'absorbance initial (A_{initial}). La solution standard et le blanc sont

Matériel et méthodes

préparés on ajoutant à 1 ml de réactif de dosage, 50 µl de la solution standard ou 100 µl d'eau distillée.

Après la première lecture au spectrophotomètre, 10 µl de l'enzyme L-Glutamate Déshydrogénase sont ajoutées dans chaque cuve. Le contenu est homogénéisé puis incubé pendant 5 minutes à température ambiante. Enfin, l'absorbance finale (A_{final}) sur la même longueur d'onde est mesurée. La concentration de l'ammoniac dans chaque échantillon est exprimée en mg/ml d'échantillon dilué au vingtième puis convertie en mg/l.

6-5- Calcul de la concentration de l'ammoniac

- On détermine le ΔA_{340} du blanc :

$$\Delta A_{340} = A_{\text{Initial}} - A_{\text{Final}}$$

- On détermine le Δ (ΔA_{340}) de la solution standard et des échantillons tests :

$$\Delta (\Delta A_{340}) = \Delta A_{340} (\text{Test ou Standard}) - \Delta A_{340} (\text{Blanc})$$

- On calcule la concentration de NH_3 (mg/ml) :

$$\begin{aligned} [\text{NH}_3] &= \frac{A * \text{TV} * \text{MW de l'ammoniac} * F}{\epsilon * d * \text{SV} * \text{Facteur de conversion du g au mg}} \\ &= \frac{A * \text{TV} * 17 * F}{6,22 * 1 * \text{SV} * 1,000} \\ &= \frac{A * \text{TV} * F * 0,00273}{\text{SV}} \end{aligned}$$

Où : $A = \Delta (\Delta A_{340})$ Test ou Standard;

TV = Volume de dosage total en ml;

SV = Volume de l'échantillon en ml;

MW de l'ammoniac = 17 g/mole ou en équivalent 17 mg/mole;

F = Facteur de dilution;

Matériel et méthodes

ϵ = coefficient d'extinction millimolaire pour NADPH à 340 nm [$\text{mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ou en équivalent (ml/mmoles) (1/cm)];

d = la longueur de solution à traverser (cm) = 1 cm dans le cas de notre étude.

7- Dosage des protéines

Le kit **MicroBCA™ Protein Assay** (Thermo-scientific , Produit N° 23235) est utilisé pour la quantification des protéines totales dans nos échantillons. Ce kit est une adaptation du kit BCA Protein Assay (Nr. 23 225). Il a été optimisé pour une utilisation avec des échantillons de protéines dilués (0,5 à 200 $\mu\text{g/ml}$).

7-1- Principe

L'acide bicinchoninique (BCA) est utilisé comme réactif de détection pour le Cu^{+1} , qui est formé lorsque le Cu^{+2} est réduit par la protéine dans un milieu alcalin. Un produit de réaction de couleur pourpre est formé par la chélation de deux molécules de BCA avec un ion cuivreux (Cu^{+1}). Ce complexe soluble dans l'eau présente une forte absorbance à 562 nm, qui est linéaire avec l'augmentation de la concentration en protéines.

7-2- Préparation des dilutions de la solution d'albumine sérique bovine (BSA)

Des concentrations décroissantes de la solution d'albumine sont préparées par dilution afin de créer des courbes d'étalonnage de dosage protéique pour mesurer précisément la concentration en protéines. Les dilutions sont préparées selon le tableau suivant :

Tube	Volume du diluant	Volume et source de BSA	Concentration finale de BSA
A	4,5 ml	0,5 ml du stock	200 $\mu\text{g/ml}$
B	8,0 ml	2,0 ml de la dilution A	40 $\mu\text{g/ml}$
C	4,0 ml	4,0 ml de la dilution B	20 $\mu\text{g/ml}$
D	4,0 ml	4,0 ml de la dilution C	10 $\mu\text{g/ml}$
E	4,0 ml	4,0 ml de la dilution D	5 $\mu\text{g/ml}$
F	4,0 ml	4,0 ml de la dilution E	2,5 $\mu\text{g/ml}$
G	4,8 ml	3,2 ml de la dilution F	1 $\mu\text{g/ml}$
H	4,0 ml	4,0 ml de la dilution G	0,5 $\mu\text{g/ml}$
I	8,0 ml	0	0 $\mu\text{g/ml}$ =Blanc

7-3- Préparation du réactif MicroBCA (Thermo scientific)

Le réactif principal MicroBCA est préparé par le mélange des trois réactifs : MA (Micro BCA réactif A), MB (Micro BCA réactif B) et MC (Micro BCA réactif C) dans un rapport de 25 :24 :1 respectivement. Ces derniers sont fournis dans le kit sous forme de solutions prêtes à l'emploi.

7-4- Méthode

Après décongélation des échantillons tests à température ambiante, 5 µl de chacun sont dilués dans 995 µl d'eau distillée. Un millilitre du réactif MicroBCA est ajouté dans chaque tube. Parallèlement, 1 ml de chaque solution standard est mélangé avec 1 ml du réactif MicroBCA. Le mélange est vortexé et l'ensemble des tubes est incubé à 37°C pendant deux heures. Après incubation l'absorbance est mesurée à 562 nm.

7-5- Calcul de la concentration en protéines

À partir des valeurs d'absorbance enregistrées la courbe d'étalonnage d'albumine standard est tracée et son équation est utilisée pour déterminer la concentration en protéine des échantillons analysés.

8- Evaluation de la perte en matière sèche

Après lyophilisation des échantillons, le résidu sec contenu dans chaque tube est pesé. La perte en matière sèche est déterminée en faisant la différence entre la matière sèche initiale et la matière sèche finale. Le pourcentage en perte de matière sèche est ensuite calculé par la relation suivante :

$$\% \text{ perte de MS} = (\text{MS}_{\text{initiale}} - \text{MS}_{\text{finale}}) \times 100 / \text{MS}_{\text{initiale}}$$

Dans laquelle :

MS_{initiale}: représente le total de la matière sèche apportée par le substrat, le milieu et l'inoculum.

MS_{finale} : représente la quantité de matière sèche du lyophilisat de chaque échantillon après incubation.

9- L'analyse élémentaire CNS (carbone, azote, soufre)

9-1-Principe

L'analyse des éléments carbone, azote et soufre est effectuée en utilisant un analyseur élémentaire automatisé VARIO MACRO. L'analyseur élémentaire permet de déterminer la concentration en carbone total, azote total et soufre par le biais d'une combustion à haute température, qui a lieu en présence d'oxygène et de flux d'hélium et l'analyse subséquente des gaz de combustion.

9-2- Préparation des échantillons

Environ 70 mg de matière sèche du lyophilisat de chaque échantillon fermenté ou du substrat avant fermentation et 60 mg d'oxyde de tungstène sont emballés dans une feuille d'étain et placés dans le carrousel du chargeur automatique de l'échantillon.

9-3- Protocole CNS

Parallèlement à la procédure d'introduction de l'échantillon et au niveau de la vanne à bille, chaque échantillon est individuellement rincé avec du gaz vecteur hélium pour enlever l'azote atmosphérique, résultant du processus d'échantillonnage.

Dans un processus entièrement automatisé, l'échantillon est transféré à travers la vanne à bille dans le tube à combustion où l'incinération aura lieu à haute températures (1150°C) et dans une atmosphère hautement oxygénée. Lors de la combustion les éléments C, H, N et S produisent- en plus de l'azote moléculaire (N₂) - les produits d'oxydation suivants : CO, CO₂, H₂O, NO_x, SO₂ et SO₃.

Ensuite, et dans le catalyseur du tube de post-combustion (contenant le CuO et un catalyseur en platine), l'échantillon est complètement oxydé : toutes les substances organiques et inorganiques sont transformées en produits gazeux (CO₂, NO_x, SO₂).

La post-combustion est suivie par la réduction des gaz de combustion sur le cuivre chaud dans le tube de réduction. Les oxydes d'azote et le SO₃ seront quantitativement réduits en N₂ et SO₂. Le gaz circulant va passer à travers des colonnes spécifiques où le SO₂ et le CO₂ seront séquentiellement adsorbés tout en permettant à l'azote de passer à travers. L'azote coule vers le détecteur de conductivité thermique (TCD) et sera mesuré comme la première composante. Après l'intégration de l'azote, sa valeur est enregistrée. Le système va alors augmenter la température de la colonne de l'adsorption du CO₂, libérant le gaz CO₂ et lui permettant ainsi

de s'écouler vers le détecteur TCD. Le deuxième pic est intégré et sa valeur est enregistrée. Enfin, la colonne de SO₂ est chauffée et le gaz est quantifié par le TCD. Un ordinateur connecté calcule la concentration des éléments C, N et S à partir du signal du détecteur.

10-Evaluation de la perte en azote, carbone, soufre et gain en protéines

À la fin de l'analyse CNS on établit la teneur en carbone, azote et soufre de chaque échantillon, ce qui nous a permis de calculer le bilan de ces composants.

10-1-Bilan de l'azote

Le pourcentage de l'azote perdu est calculé selon l'équation:

$$\%N \text{ perdu} = \frac{(N \text{ initial} - N \text{ final}) * 100}{N \text{ initial}}$$

N initial correspond à l'azote apporté par le substrat, le milieu et l'inoculum où :

$$N \text{ substrat} = \frac{MS \text{ initiale substrat} \times \% N \text{ substrat}}{100}$$

$$N \text{ inoculum} = \frac{MS \text{ initiale inoculum} \times \% N \text{ inoculum}}{100}$$

$$N \text{ milieu} = \sum \text{mg N des composantes de chaque milieu}$$

Sachant que le contenu en N de chaque composant est calculé en multipliant la matière sèche initiale du composant par le pourcentage en azote du milieu puis divisé par 100.

10-2-Bilan du carbone et du soufre

Pour calculer le bilan du carbone et du soufre, on suit les mêmes formules de calcul effectués pour la détermination de la perte en azote.

$$C(S) \text{ perdu} = C(S) \text{ initial} - C(S) \text{ final}$$

Puis on convertit la quantité du carbone ou du soufre perdu en pourcentage

$$\% C(S) \text{ perdu} = (C(S) \text{ perdu} \times 100) / C(S) \text{ initial}$$

10-3- Bilan des protéines

Le bilan des protéines a été établi selon la formule suivante :

$$\text{Gain en protéines} = \text{Quantité finale de protéines du liquide fermenté} - \text{Quantité initiale de protéines}$$

- La quantité finale des protéines est le résultat du dosage des protéines par le kit enzymatique, elle est exprimée en mg/l.
- La quantité des protéines initiales est l'ensemble des protéines du substrat et du milieu où:
 - Protéines substrat = Protéines brute * matière sèche initiale;
 - Les protéines de l'inoculum correspondent à :
 - 14,0 mg quand on utilise 5 ml d'inoculum lors de la première fermentation. En passant à la deuxième ou à la troisième fermentation, les protéines deviennent le résultat de la teneur en protéines finales de la fermentation précédente multiplié par 5 (volume de l'inoculum utilisé) divisé par le volume total du flacon.
 - 84,0 mg quand on utilise 30 ml d'inoculum lors de la première fermentation. En passant à la deuxième ou à la troisième fermentation, les protéines deviennent le résultat de la teneur en protéines finales de la fermentation précédente multiplié par 30 (volume de l'inoculum utilisé) divisé par le volume total du flacon.

Le gain en protéine est exprimé en mg/ 100g de MO.

11- Analyse statistique

Afin de déterminer les effets des trois facteurs étudiés (substrat, milieu et refermentation) sur les différents paramètres évalués, une analyse de la variance a été réalisée à l'aide de logiciel SAS, sur la base du test " t " de Student. Les moyennes sont considérées significativement différentes si $p \leq 0,005$.

Caractéristiques physico-chimiques et fermentaires des sous-produits et de leurs mélanges

1- Composition chimique des substrats

La composition chimique des sous-produits, des plantes fibreuses et du foin sont récapitulés dans le tableau 15.

1-1- Teneur en matière sèche, en matière minérale et organique

Les teneurs en matière sèche des substrats de cette étude sont comparables et s'échelonnent entre 88,8 (pour les résidus de tomate) à 93,23 % (pour le foin) (tableau 15). Globalement les fourrages (foin et plantes fibreuses) présentent des valeurs en matière sèche légèrement supérieures à celles des sous-produits et cela peut revenir de leur nature (plantes), leur origine (provient d'un milieu terrestre pauvre en eau) et leur stade de maturité au moment de la récolte. Les sous-produits de notre étude sont des résidus qui proviennent après traitement du fruit de tomate, d'oranges ou de pommes. Il est connu que le fruit renferme plus d'eau que le reste de la plante. En outre, ces résidus subissent plusieurs étapes de traitement et de rinçage se qui peut modifier leur teneur en humidité.

Les sous-produits de pommes et d'oranges renferment des taux de matières organiques statistiquement plus élevés que tous les autres substrats, soit 98,07 et 97,35 % (tableau 15). Maghsoud *et al.* (2008) et Mirzaei-Aghsaghali *et al.* (2011) ont rapporté des teneurs en MO pour des résidus de pommes proche des nôtres (97,8 et 97,7 %). Pirmohammadi *et al.* (2006) ont rapporté un taux relativement inférieur (92,9 %). À leur tour, Aregheore (2000), Lashkari et Taghizadeh (2015) et Palangi *et al.* (2013) ont noté des teneurs en MO largement moindres que les nôtres pour la pulpe d'orange. Comme ces deux sous-produits renferment des valeurs importantes en MO donc ils sont pauvres en matière minérale. Selon Ventura *et al.* (2009), le taux faible en matière minérale est probablement dû à la solubilisation des minéraux durant les différents traitements industriels. Les sous-produits de tomates renferment plus de matière minérale que les autres sous produits et moins de MO (88,2 %). Cette valeur est comparable à celle mentionnée par Maghsoud *et al.* (2008), mais différente de celles de Mahersis *et al.* (2012) et de Denek et Can (2006).

Les chrysanthèmes et le foin renferment des taux en MO intermédiaires entre celui des sous-produits de pommes et d'oranges et celui de la tomate, 94,41 et 91,7 % respectivement. Les chrysanthèmes ont une teneur en cendres brutes de 5,59 %. L'USDA National Nutrient Database (2014) rapporte un pourcentage en MM trois fois inférieur, soit 1,67 % pour

Tableau 15 : Composition chimique des sous-produits et des aliments fibreux

Substrats	MS	MO	PB	EE	FB	NDF
Résidus de tomates	88,8 ± 0,15	88,2 ± 0,30 (d)	12,1 ± 0,03 (a)	1,66 ± 0,01 (b)	26,02 ± 0,12 (d)	33,1 ± 0,25 (c)
Résidus d'oranges	89,04 ± 0,15	97,35 ± 0,20 (a)	5,75 ± 0,11 (b)	0,60 ± 0,01 (b)	10,42 ± 0,25 (e)	15,70 ± 0,1 (d)
Résidus de pommes	89,14 ± 0,25	98,07 ± 0,1 (a)	2,26 ± 0,035 (e)	0,97 ± 0,03 (b)	7,48 ± 0,03 (f)	13,68 ± 0,35 (e)
Cardes	88,11 ± 0,1	87,0 ± 0,1 (e)	4,32 ± 0,22 (c)	0,62 ± 0,01 (b)	45,37 ± 0,2 (b)	68,8 ± 0,55 (b)
Chrysanthèmes	90,55 ± 0,06	94,41 ± 0,1 (b)	2,43 ± 0,1 (e)	0,65 ± 0,01 (b)	54,4 ± 0,2 (a)	79,0 ± 0,23 (a)
Foin	93,23 ± 0,52	91,7 ± 0,5 (c)	3,5 ± 0,23 (d)	3,02 ± 0,5 (a)	32,8 ± 0,7 (c)	69,0 ± 0,34 (b)

Substrats	ADF	ADL	Sucres totaux	Hémicellulose	Cellulose
Résidus de tomates	30,01 ± 0,17 (d)	9,81 ± 0,16 (a)	31,25 ± 0,9 (c)	3,08 ± 0,1 (d)	20,2 ± 0,01 (d)
Résidus d'oranges	11,71 ± 0,10 (e)	0,02 ± 0,001 (e)	50,61 ± 0,44 (c)	3,94 ± 0,035 (d)	11,70 ± 0,08 (e)
Résidus de pommes	9,46 ± 0,12 (f)	1,55 ± 0,01 (d)	77,76 ± 0,62 (a)	4,22 ± 0,23 (d)	7,91 ± 0,11 (f)
Cardes	52,55 ± 0,015 (b)	8,56 ± 0,06 (b)	7,9 ± 1,19 (e)	16,41 ± 0,54 (c)	43,81 ± 0,07 (b)
Chrysanthèmes	58,12 ± 0,13 (a)	10,15 ± 0,34 (a)	9,51 ± 0,4 (e)	21,0 ± 0,37 (b)	48,0 ± 0,21 (a)
Foin	39,8 ± 0,73 (c)	2,46 ± 0,05 (c)	20,0 ± 1,50 (d)	29,2 ± 0,38 (a)	37,7 ± 0,80 (c)

Les moyennes avec différentes lettres diffèrent significativement ($p \leq 0,05$), MS : matière sèche, MO : matière organique, PB : protéines brutes, EE : extrait éthéré, FB : fibres brutes, NDF: Fibres insolubles dans le Détergeant Neutre, ADF: Fibres insolubles dans le Détergeant Acide, ADL: Lignine.

Résultats et discussion

même plante. Selon Spear (1994), la concentration des éléments minéraux dans les plantes varie fortement avec le type de sol, le climat, le stade de maturité et la saison de récolte. Les cardes sont les plus pauvres en MO. Les teneurs en MM sont variables, les cardes sont les plus riches en matière minérale (13 %). Selon Amrani (2006) la teneur des cardes en matières minérales varie entre 12,5 et 23,75 % en fonction des phases phénologique (végétative, floraison, maturation, plante sèche). La plante contient plus de minéraux lors de la maturation, à un degré moindre lors de la phase végétative et à la floraison mais beaucoup moins lorsque la plante est sèche.

1-2- Teneur en protéines brutes

À l'exception des sous-produits de tomate, qui possèdent une teneur en protéines brutes modérément élevée (12,6 %), tous les substrats présentent des taux faibles. Les sous-produits de pomme ont la valeur en PB la plus basse. Selon Villas-Boâs et *al.* (2003) la principale critique contre l'utilisation des résidus de pomme dans l'alimentation animale est sa teneur trop faible en PB pour l'entretien des ruminants, suggérant que les régimes alimentaires contenant ces résidus doivent être complétés ou traités pour enrichir leur valeur azotée (Joshi et Sandhu, 1996; Villas-Boâs et *al.*, 2003). Ceci est bien constaté avec la teneur en PB du marc de pomme examinés dans cette étude qui n'atteignent que 2,26 g/100 g de MS. Cette valeur est en accord avec celles rapportées par Khatooni et *al.* (2014). D'autres chercheurs (Villas-Boâs et *al.*, 2003; Taasoli et kafilzadeh, 2008 ; Maghsoud et *al.*, 2008 ; Pirmohammadi et *al.*, 2006 ; Givens et Barber, 1987) ont noté des teneurs plus élevées, qui varient entre 4,1- 6,7 %, mais qui reste relativement faibles par rapport aux besoins en protéines recommandés pour un bon fonctionnement de la microflore ruminale.

Les résidus d'oranges présentent aussi des teneurs faibles en MAT (5,75 %). Laskari et *al.* (2014), Palangi et *al.* (2013) ont enregistré des teneurs plus élevés (plus que 8 % de MS). Djekrif-Dakhmouche et *al.* (2006) ont rapporté des taux en PB pour des résidus qui proviennent de l'unité de Ramdhane Djamel de SKIKDA très proches de celles des nôtres.

Parmi les aliments fibreux, les cardes ont le taux en MAT le plus élevé (4,32 %), suivi par le foin (3,5 %) et les chrysanthèmes (2,43 %). Amrani (2006), Hadjigeorgio et *al.* (2003) et Cabiddu et *al.* (2006) ont signalé des teneurs en PB plus élevées pour ces trois plantes (cardes, foin et chrysanthème, respectivement). En outre, Amrani (2006) a signalé pour le

Résultats et discussion

Sylibum marianum des teneurs en PB qui diffèrent selon le stade phénologique (végétative vs floraison vs maturation vs plante sèche), et selon la partie testée de la plante (feuilles vs tiges). De même manière, Cabiddu et *al.* (2006) ont constaté que l'espèce *Chrysanthemum coronarium* présente des teneurs en PB différentes selon la saison de récolte. Il existe de nombreux facteurs qui influent sur la teneur en protéines brutes, comme le stade de croissance (Promkot et Wanapat, 2009), les espèces ou la variété (Von Keyserlingk et *al.*, 1996) et le type de sol (Baloyi et *al.*, 1997). Ces facteurs peuvent expliquer en partie les différences de teneur en protéines brutes entre notre étude et les autres.

Globalement, les substrats étudiés dans cette expérience, à l'exception des sous-produits de tomates, n'atteignent pas le taux de 7 à 8 % de PB, préconisé par Van Soest (1994) pour le fonctionnement optimal du rumen.

1-3- Teneur en matière grasse

Les résultats de cette étude révèlent que les sous-produits et les deux plantes fibreuses sont très pauvres en lipides, et renferment des valeurs très proches qui s'échelonnent entre 0,60 à 1,66% pour les résidus d'oranges et de tomates, respectivement. Le substrat standard (foin) présente une teneur en MG significativement supérieure des teneurs des autres substrats. Toutefois cette valeur reste faible et ne dépasse pas 3,05 % de MS.

Le contenu en lipides des sous-produits d'oranges est très faible mais en accord avec le résultat obtenu par Djekrif-Dakhmouche et *al.* (2006) qui a enregistré une valeur de 0,39 g/100 g de MS pour des sous-produits algériens. Par contre, Lashkari et Taghizadeh (2015) et Ibrahim et *al.* (2011) ont noté des valeurs six à huit fois supérieures à celle obtenue dans cette étude (3,44 et 4,76 % de MS, successivement).

Les résultats obtenus pour les sous-produits de pommes sont largement différents de ceux rapportés pour nos échantillons. Khatooni et *al.* (2014), Maghsoud et *al.* (2008) et Mirzaei-Aghsaghali et *al.* (2011) ont rapporté pour le résidu de pomme des valeurs très proches allant de 3,7 à 3,9 % de MS.

La pulpe de tomate est plus riche en lipides que les deux autres résidus, mais cette teneur reste très loin de ceux cités dans la littérature (Fondevila, 1994 ; Safamehr et *al.*, 2011 ; Valizadeh et Sobhanirad, 2009).

Résultats et discussion

Les teneurs en lipide des espèces *Sylibum marianum* et *Chrysanthemum coronarium* sont faibles et proches (0,62 et 0,65 % de MS), mais elles sont aussi inférieures aux teneurs cités dans la littérature (Amrani, 2006 ; USDA National Nutrient Database, 2014, Cabiddu, 2006). Les différences dans les valeurs obtenues et rapportées par la bibliographie sont probablement dues aux différents procédés d'extraction de la matière grasse et à la nature des solvants utilisés, mais aussi à la variété et aux autres facteurs affectant le développement de la plantes.

Il est clair que les teneurs en MG enregistrées dans cette étude sont de loin inférieures aux normes préconisées néfastes pour les ruminants (>6 %) (Linn, 2003).

1-4- Teneurs en constituants pariétaux

D'une manière générale, on constate que les plantes étudiées présentent une composition pariétale différente de celles des sous-produits (tableau 15). Les teneurs en FB, NDF, ADF et ADL sont plus élevées chez *Chrysanthemum coronarium* que chez *Sylibum marianum*. En comparaison aux plantes et au foin, les sous-produits sont moins riches en fibres. Il était prévisible d'avoir des résultats pareils dus à la nature fibreuse des plantes étudiées. D'autres auteurs (Valente et al., 2003) supportent notre constat et rapportent de fortes teneurs en paroi totale pour le chrysanthème, 42,5- 49,0 % d'NDF et 38,8-44,7 % d'ADF. Toutefois, ces valeurs restent plus faibles que celles de notre étude. Sulas et al. (2016) ont signalé des valeurs plus faibles d'NDF et d'ADF pour des cardes récoltées à un stade précoce que celui de notre expérience. Les différences des teneurs en paroi totale des plantes entre les études pourraient être dues à l'état de la production de fourrage, au stade de récolte, au ratio feuille / tige ou à la variation génétique (Gihad et El Shaer, 1992; Benjamin et al., 1995; El-Shatnawi et Abdullah, 2003).

Concernant les sous-produits, les épluchures de tomates présentent la teneur en FB (26,02 %) la plus élevée comparativement aux pulpes d'oranges (10,42 %) et au marc de pomme (7,48 %). La valeur en FB enregistrée pour les résidus de tomates est parfaitement identique à celle rapportée par King et Zeidler (2004) (26,3 %), mais elle se révèle légèrement plus faible que celle étudiée par Ayhan et Aktan (2004) qui ont enregistré 30,54 %, et beaucoup plus faible que la teneur (59,03 %) rapportée par DelVall et al. (2006). La teneur en fibre brute affecte fortement l'ingestion de la MO. Une valeur de 32% de FB est rapportée par Mbaye et Sall (1999) pour une ingestion maximale de la matière organique, Au-delà là de cette valeur l'ingestion du régime devient limitée.

Résultats et discussion

La teneur en NDF suit la même tendance que les FB, elle est plus importante (33,1 %) pour les résidus de tomates que pour les résidus oranges (15,7 %) et les résidus de pommes (13,68 %). Maghsoud *et al.* (2008) rapportent des taux en paroi totale relativement élevés pour la pulpe de tomate (67,4 %) et les résidus de pommes (35,3 %).

De nombreuses études (Saman et Akbar, 2015 ; Valiollah *et al.* 2013 ; Cone *et al.*, 2009) rapportent des teneurs en NDF médiocre pour les pulpes d'oranges, qui n'atteignent pas le seuil recommandé pour une fonction ruminale efficace (30 %) (Jolly et Wallace, 2007 ; Ishler *et al.*, 1996). Selon Ishler *et al.* (1996) le manque d'NDF dans la ration peut provoquer des problèmes métaboliques, tels que l'acidose ruminale.

Les teneurs en NDF dépendent fortement des conditions environnementales. Des travaux de Pascual *et al.* (2000) ont indiqué que les hautes températures et les faibles précipitations tendent à augmenter la fraction pariétale (NDF) et à diminuer le contenu soluble des végétaux.

La fraction lignocellulosique (ADF) est significativement différentes entre les trois résidus. Les teneurs les plus faibles sont observées avec les résidus de pommes (9,49 %). Les valeurs notées avec les oranges (11,71 %) sont légèrement supérieures. En revanche, les sous-produits de tomates sont trois fois plus riches en ADF (30,01 %) que les résidus de pomme. Van Soest (1994) note que la richesse en parois cellulaires, notamment en lignocellulose, a une influence négative sur la digestibilité.

La cellulose, qui est utilisée par les microorganismes du rumen comme source principale des acides gras volatils, est respectivement plus élevée avec les chrysanthèmes (48 %), les cardes (43,81 %), le foin (37,7 %), la pulpe de tomate (20,2%), les résidus d'oranges (11,70%) et en fin les résidus de pommes (7,91 %). Ibrahim *et al.* (2011) et Amrani (2006) ont rapporté pour les résidus d'oranges et les cardes respectivement, des teneurs en cellulose brute inférieures de celles de notre étude.

Quand aux résultats de la teneur en hémicellulose, ils sont inférieurs à la fraction cellulosique et significativement différents entre tous les substrats. Cette composante de la paroi végétale est plus importante chez le foin (29,2 %) et les plantes fibreuses (16,4– 21,0 %) que chez les sous-produits qui apparaissent assez pauvres en hémicellulose (3,08- 4,22 %).

Résultats et discussion

La lignine est un composé phénolique synthétisée par la plante pendant les périodes les plus avancées de sa croissance, qui intervient dans la rigidité de la plante. Selon le tableau 15, les chrysanthèmes, les résidus de tomates et les cardes sont des substrats faiblement lignifiés (10,15, 9,81 et 8,56 % respectivement). Les autres résidus sont très pauvres voir dépourvu en lignine (cas des résidus d'oranges, 0,02 %).

Le dosage des sucres totaux montrent des teneurs à l'opposé de celles des teneurs en fibres. De fortes teneurs sont observées pour les résidus de pommes (77,76 %) et d'oranges (50,61 %). Les sous-produits de tomates (31,25 %) et l'aliment de référence présentent des valeurs intermédiaires. Par contre, de faibles valeurs sont observées pour les cardes 7,9 % et les chrysanthèmes (9,5 %). Alvarado *et al.* (2001) ont enregistré, pour des résidus de tomates, une teneur en sucres totaux trois fois plus basse que celle notée dans notre étude. Toutefois, Djekrif-Dakhmouche *et al.* (2006) et Oussadi et kitouni (2015) ont noté, pour des sous-produits d'oranges Algerien, des valeurs de sucres totaux similaires (44,6 et 44,5 % respectivement) et relativement proche de nos résultats.

2- pH initiaux et capacité tampon des substrats et de leurs mélanges

2-1- pH initiaux

Les pH initiaux sont significativement différents entre les substrats étudiés. Ils varient d'une valeur proche de la neutralité 8,16 à une valeur acide 4,09 (tableau 16). Les sous-produits de l'industrie agro-alimentaires possèdent des pH initiaux acides et statistiquement identiques, soit 4,09, 4,11 et 4,39 pour les résidus d'oranges, de tomates et de pommes, respectivement. Moharrery (2007) et Giger-Reverdin *et al.* (2002) ont rapporté pour des résidus de tomates (4,73) et des résidus d'agrumes (5,77), des pH initiaux supérieurs à celles notées dans notre étude. Les différences constatées sont probablement dues à la méthode suivie pour la préparation de la solution des substrats à partir de laquelle le pH initial est mesuré ou à la nature et l'origine du sous-produit.

Les aliments fibreux montrent des valeurs de pH initial plus basiques. Les cardes ont le pH_i le plus élevé (8,16) parmi tous les pH initiaux mesurés. Le chrysanthème (6,19) présentait un pH initial moins élevé que les cardes, mais plus élevé que celui du foin (5,66). Giger-Reverdin *et al.* (2002) ont noté un pH initial similaire pour le foin de luzerne (5,6).

Tableau 16: pH initial et final, capacité tampon et dégradabilité apparente des substrats fermentés, des polymères purs, de l'inoculum et du milieu d'incubation.

	pH initial	pH final après incubation	Capacité tampon (mEquivalents-gramme d'acide acétique 1N/g MS)	Dégradabilité apparente (g/100 g MS)
<i>Milieu et inoculum</i>				
Liquide ruminal	7,48 ^{b(1)}	§	0,96 ^d	§
Salive artificielle	6,89 ^c	§	3,33 ^a	§
Liquide ruminal + Salive artificielle	6,88 ^c	§	1,49 ^b	§
SEM	0,13	§	0,46	§
Valeurs-P	0,002	§	0,0005	§
<i>Sous-produits</i>				
RP	4,39 ^{jk}	6,60 ^{cd}	0,24 ^{ij}	96,0 ^a
RO	4,09 ^k	6,56 ^{cd}	0,49 ^g	96,2 ^a
RT	4,11 ^k	6,71 ^{bcd}	1,26 ^c	86,2 ^b
SEM	0,06	0,01	0,19	1,13
Valeurs-P	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
<i>Aliments fibreux</i>				
Cardes	8,16 ^a	6,77 ^{bc}	1,52 ^b	54,6 ^f
Chrysanthèmes	6,19 ^f	6,75 ^{bc}	0,34 ^{hi}	49,6 ^f
Foin	5,66 ^g	6,71 ^{bc}	0,54 ^f	67,3 ^{de}
SEM	0,45	0,02	0,23	1,53
Valeurs-P	0,0001	0,38	0,0001	0,0001
<i>Mélange entre sous-produits et aliments fibreux</i>				
RP: Cardes	6,56 ^e	6,70 ^{bc}	0,55 ^f	72,0 ^{de}
RP: Foin	5,67 ^h	6,77 ^{bc}	0,34 ^{hi}	86,8 ^b
RO: Cardes	5,66 ^h	6,87 ^b	0,54 ^f	72,1 ^{de}
RT: Cardes	5,29 ⁱ	7,22 ^a	0,70 ^e	63,0 ^e
RP: Chrysanthèmes	5,08 ^j	6,73 ^{bc}	0,28 ^{ij}	69,1 ^{de}
RO: Foin	4,75 ^k	6,63 ^{cd}	0,44 ^{fgh}	76,0 ^{cd}
RO: Chrysanthèmes	4,66 ^l	6,48 ^d	0,37 ^{ghi}	75,4 ^{cd}
RT: Foin	4,46 ^m	6,78 ^{bc}	0,82 ^e	81,3 ^{bc}
RT: Chrysanthèmes	4,39 ^m	6,57 ^{cd}	0,74 ^e	68,0 ^{de}
SEM	0,16	0,34	0,04	1,62
Valeurs-P	0,0002	0,0001	0,0001	0,003
<i>Polymères</i>				
Caséine	5,74 ^h	7,09 ^a	0,34 ^{hi}	95,84 ^{ab}
Cellulose	4,52 ^{ij}	6,54 ^{cd}	0,004 ^l	99,0 ^a
Pectine	2,73 ^l	6,69 ^{bcd}	0,20 ^{jk}	99,75 ^a
Amidon	5,36 ^h	6,59 ^{cd}	0,01 ^l	99,25 ^a
Xylan	5,81 ^g	6,72 ^{bcd}	0,11 ^{kl}	99,6 ^a
SEM	0,36	0,06	0,01	0,51
Valeurs-P	0,0001	0,001	0,0001	0,01
<i>Moyennes regroupées</i>				
Milieu et inoculum	6,74 ^{a(1)}	§	1,92 ^a	§
Sous-produits	4,2 ^b	6,64 ^b	0,66 ^{bc}	91,5 ^b
Mélanges	5,17 ^b	6,75 ^a	0,53 ^{bc}	73,7 ^c
Aliments fibreux	6,74 ^a	6,74 ^a	0,8 ^{ab}	56,7 ^d
Polymères	4,71 ^b	6,72 ^a	0,13 ^c	98,7 ^a
SEM	0,19	0,01	0,1	1,78
CV	23,83	2,27	104,3	21,14
Valeurs-P	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

(1) Moyennes dans la même colonne affectées de lettres différentes sont significativement distinctes (P<0,05); RP: Résidus de pommes; RO: Résidus d'oranges; RT: Résidus de tomates; §: non applicable. CV: Coefficient de variation; SEM: Erreur standard des moyennes; P: Seuil de significativité.

Résultats et discussion

Les polymères végétaux ont des valeurs de pH initiaux (4,71) plus élevées que les pH initiaux des sous-produits agro-alimentaires (4,20), mais plus basses que celles des aliments fibreux (6,74) et des mixtures (5,17).

Giger-Reverdin *et al.* (2002) ont signalé que la teneur en protéines brute est positivement corrélée aux pH initiaux des substrats. Toutefois, cette corrélation était faible et présentait un faible coefficient de corrélation ($r = 0,48$). Les mêmes auteurs ont conclu que les variations dans les valeurs de pH initiaux ne sont reliées ni avec la composition chimique des substrats, ni avec leurs paramètres physiques (capacité de rétention d'eau, la pression osmotique intrinsèque).

Le mélange des résidus agro-alimentaires avec les aliments fibreux a significativement augmenté leurs pH initiaux. À l'exception du mélange sous-produits de pommes + cardes, tous les mélanges ont enregistré des pH initiaux qui se situent entre ceux des aliments fibreux et des sous-produits. D'après ces résultats, il semble que le *Sylibum marianum* tamponne mieux le pH (sous-produits de pommes + cardes (6,56) ; sous-produits d'oranges + cardes (5,66) ; sous-produits de tomates + cardes (5,29)) que le *chrysanthemum coronarium* (sous-produits de pommes + chrysanthèmes (5,08); sous-produits d'oranges + chrysanthèmes (4,66) ; sous-produits de tomates + chrysanthèmes (4,39)) et l'aliment de référence (sous-produits de pommes + foin (5,67); sous-produits d'oranges + foin (4,75); sous-produits de tomates + foin (4,46)). Cela résulte de la forte capacité tampon notée avec les cardes (tableau 16).

Le liquide ruminal montre un pH initial (7,48) proche de la neutralité, qui varie d'un essai à un autre selon le régime alimentaire de l'animal abattu (résultats non présentés). Selon la bibliographie les valeurs élevées de pH du rumen chez le dromadaire traduisent des conditions d'activité cellulolytique (Jouany (1994) et montrent une stabilité due à un fort pouvoir tampon de l'animal. Arhab (1999) et Amokrane (2010) travaillant sur des dromadaires adultes alimentés à base d'un régime libre non défini, note des intervalles de pH de (6,2-7,7) et (5,34-7,60) respectivement.

Le mélange du liquide ruminal et de la salive artificielle présente un pH initial (6,88) très proche de celui de la SA. Cette valeur moyenne est la valeur optimale pour une activité microbienne maximale au niveau du rumen.

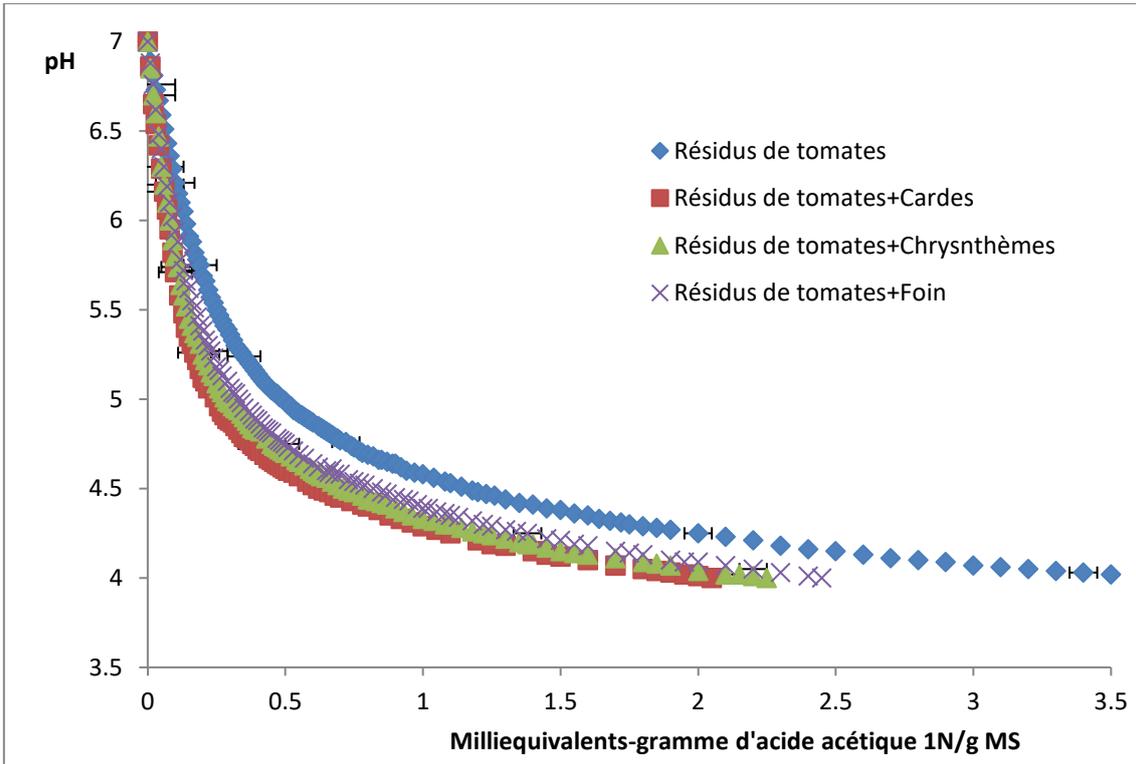


Fig. 14 : Courbe de chute du pH lors de la titration des résidus de tomates et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin

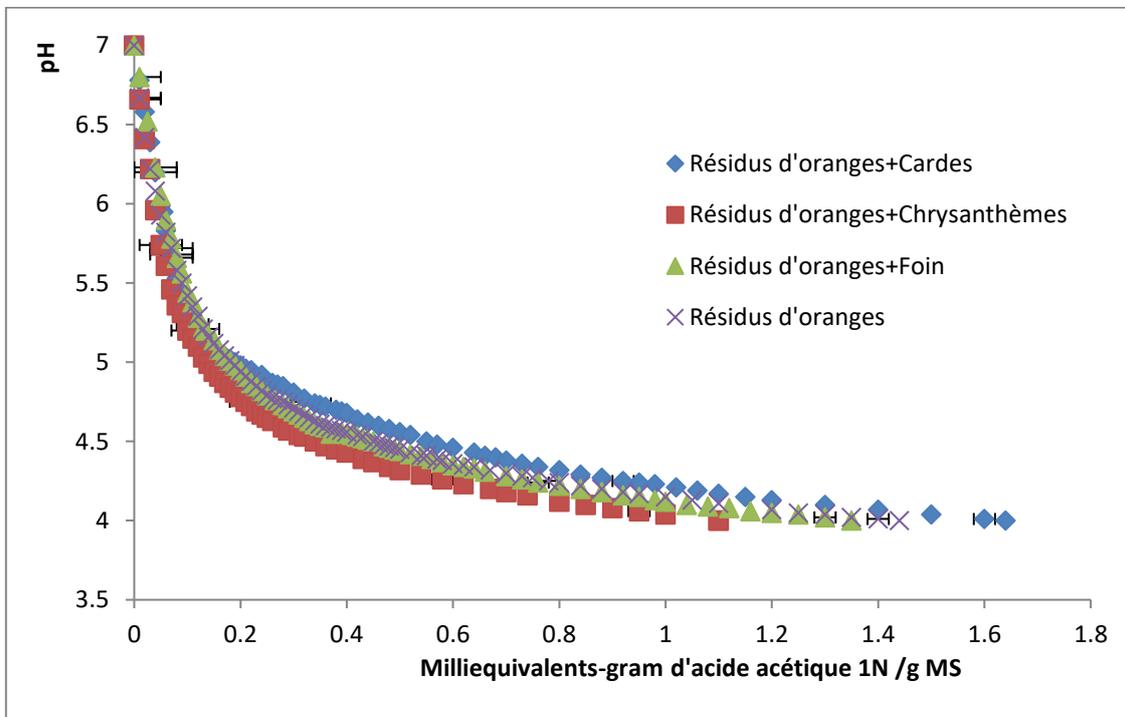


Fig. 15 : Courbe de chute du pH lors de la titration des résidus d'oranges et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin

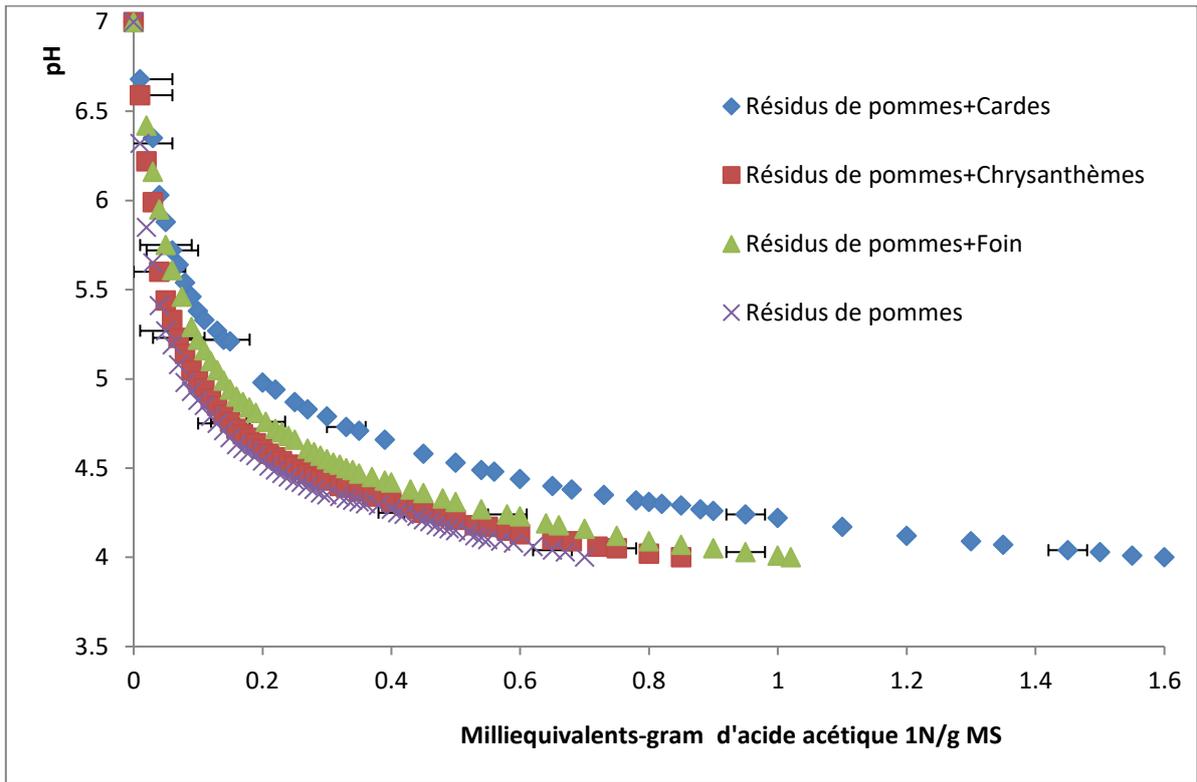


Fig.16 : Courbe de chute du pH lors de la titration des résidus de pommes et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin

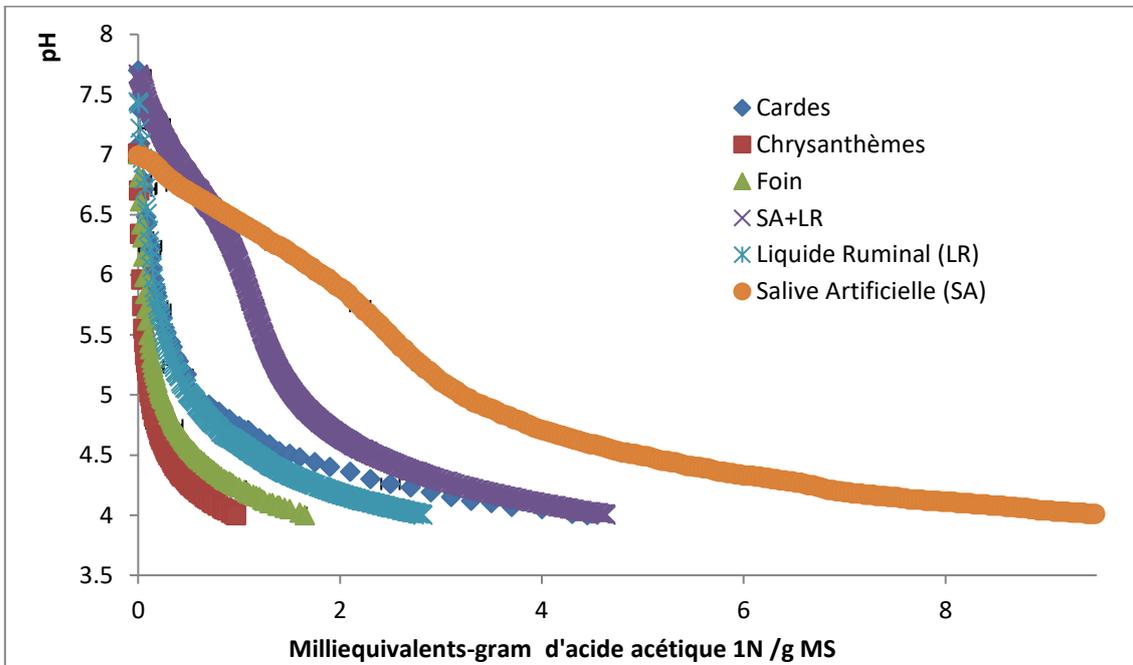


Fig.17 : Courbe de chute du pH lors de la titration des aliments fibreux comparées à celles du liquide ruminal (LR), de la salive artificielle (SA) et du mélange LR+SA

Résultats et discussion

2-2 Capacité tampon

La capacité tampon (CT) varie considérablement entre les échantillons testés. Cependant, elle ne suit pas les résultats des pH initiaux. Moharrery (2007) rapporte des résultats comparables aux nôtres et note que la CT est négativement corrélée au pH initial, toutefois cette corrélation est faible ($r = -0,22$, $n = 46$) et non significative ($p = 0,135$).

La salive artificielle a le pouvoir tampon le plus élevé (3,33 mEquivalent-gramme d'acide acétique 1 N/ g MS), ce qui est parfaitement logique car elle contient une quantité importante en sodium, potassium, bicarbonates et phosphates.

Le liquide ruminal et son mélange avec la salive donne une CT deux fois moindre que celle de la SA. Kayouli *et al.* (1991 et 1992) et Jouany *et al.* (1995) notent que le dromadaire se distingue par rapport aux autres ruminants par son pouvoir tampon élevé à l'égard des conditions d'acidité du rumen. La salivation très abondante et continue chez le dromadaire assure au contenu ruminal un pouvoir tampon par l'apport d'une grande quantité d'ions bicarbonates et phosphates (Hungate, 1966).

Parmi les substrats étudiés, le pouvoir tampon le plus élevé est noté avec les cardes (1,52 mEquivalent-gramme d'acide acétique 1 N/ g MS) suivi par les résidus de tomates (1,26). Les autres substrats donnent des CT plus faibles qui fluctuent entre 0,54 pour le foin et 0,24 pour les résidus de pommes. Des valeurs de CT supérieures pour des sous-produits de tomates (3,52 meq/0,5 g MS) et du foin (5,21 meq/0,5 g MS) ont été mentionnées par Moharrery (2007). En revanche, Jasaitis *et al.* (1987) ont enregistré avec des sous-produits d'agrumes un pouvoir tampon inférieur de celui de notre étude (0,082 meq/ 0,5 g MS).

L'utilisation de différentes sources d'acides ou de bases, l'utilisation de plusieurs approches de détermination du pouvoir tampon et la diversité des expressions du pouvoir tampon montrent qu'il y a un manque de méthode standard (Yuan et Lavkulich 1995), rendant complexe la comparaison des résultats obtenus dans les différentes études.

En comparant les substrats seuls, on constate que la capacité tampon diminue généralement lorsque la teneur en matière minérale diminue. Jasaitis *et al.* (1987) ont également signalé que la capacité tampon est étroitement liée à la teneur en cendres totaux. D'autres paramètres y compris la teneur en acides organiques, le taux de protéines brutes ainsi que le contenu en fibre peuvent influencer dans une certaine mesure le pouvoir tampon des aliments (Plane et McDonald, 1966 ; Jasaitis *et al.*, 1987).

Résultats et discussion

Les mélanges des sous-produits et des aliments fibreux ont révélé des résultats différents. Tous les mélanges effectués sur la base des sous-produits de tomates (SPT) ont donné une diminution significative de la CT : 44,4 avec les cardes, 41,3 avec les chrysanthème et 34,9 % avec le foin.

Une teneur en PB plus élevée augmente la CT des aliments en raison de la présence de l'ammoniac provenant de la désamination des protéines (Crawford et *al.*, 1983) et de la capacité tampon des groupes amines (Jasaitis et *al.*, 1987). Ces suggestions peuvent expliquer en partie la diminution de la capacité tampon obtenue quand les résidus de tomates sont combinés avec des aliments moins riches en protéines. Jasaitis et *al.* (1987), Giger-Reverdin et *al.* (2004), Moharrery (2007) et Montañez-Valdez et *al.* (2013) ont constaté que les aliments riches en protéines sont dotés d'un pouvoir tampon plus élevé que celui des fourrages et des aliments énergétiques. Cependant, Plane et McDonald (1966) a montré que les protéines contribuent peu à la capacité tampon des plantes (seulement 10-20% de la capacité tampon totale). Selon Giger-Reverdin et *al.* (2004) une combinaison entre le pH initial, les protéines brutes et la matière minérale peuvent mieux expliquer les variations du pouvoir tampon entre les aliments.

Les mélanges des sous-produits de pommes (SPP) se comportent inversement. Le pouvoir tampon des SPP a doublé par leur combinaison avec les cardes (+129,2 %). Des valeurs inférieures ont été observées pour les mixtures SPP+foin (+41,7%) et SPP+chrysanthèmes (+16,7 %). Ces résultats peuvent en partie être dûs à la teneur importante en fibres de ces aliments. Jasaitis et *al.* (1987) ont attribué la teneur plus élevée en CT des fourrages, de la pulpe d'agrumes et de betterave, comparativement aux autres aliments énergétiques, à leurs teneurs élevées en fibres. Toutefois, Moharrery (2007) a démontré qu'aucune corrélation n'a été détectée entre la capacité tampon et le contenu en fibres ou en carbohydrates non structuraux des aliments. D'une autre part, vu que les sous-produits de pommes sont très pauvres en MM, leur mixture à des aliments plus riches en minéraux augmente leur CT. Ce constat confirme une autre fois la cohérence entre la capacité tampon et les cendres totales.

Concernant les mélanges à base des sous-produits d'oranges (SPO), une augmentation de la CT est notée seulement pour la mixture SPO+ cardes (10,20 %). Des taux négatifs ont été observés pour les autres mélanges. Ces résultats sont liés à la capacité tampon des chrysanthèmes et du foin, qui est faible et proche de la CT des résidus d'oranges.

Résultats et discussion

Les polymères végétaux utilisés comme contrôles ont présenté un faible pouvoir tampon en comparaison aux autres groupes d'aliments. La caséine possède une capacité tampon (0,34 mEq) plus élevée par rapport aux autres polymères et comparable à celle des résidus de pommes (0,24) et de quelques mélanges (SPP + chrysanthèmes : 0,28, SPP + foin : 0,34 et SPO + chrysanthèmes : 0,37). Cela est probablement lié à la nature protéique de ce substrat. L'amidon (0,01 mEq) et la cellulose (0,004 mEq) ont présenté le pouvoir tampon le plus faible parmi tous les substrats étudiés.

3- Estimation des paramètres cinétiques et production cumulative de gaz des substrats seuls et de leurs mélanges

Les résultats de la production cumulée de gaz et les paramètres cinétiques de la fermentation *in vitro* des résidus agro-alimentaires (SPAA), des plantes fibreuses (PF), de leurs mélanges binaires et des polymères végétaux sont présentés dans le tableau 17.

La modélisation mathématiques des résultats de la production *in vitro* de gaz par le model exponentiel de Dhanoa et *al.* (1989) nous a permit de déduire le volume maximal de la production *in vitro* de gaz, le temps nécessaire pour l'obtention de sa demi-production, le taux horaire de la libération de gaz et le temps de latence.

3-1- Estimation des paramètres cinétiques des résidus agro-alimentaires et des aliments fibreux

3-1-1- Volume potentiel et production cumulée de gaz

La fermentation *in vitro* des substrats a été suivie durant 96 heures d'incubation.

Les résultats de cette étude montrent que les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire ont un potentiel de production de gaz beaucoup plus important que celui des aliments fibreux et des mélanges binaires. Après 48 heures de fermentation, les sous-produits d'oranges (239,05 ml/g de MS) et de pommes (231,56 ml/g de MS) libèrent une quantité de gaz plus élevée mais non significativement différente comparativement aux sous-produits de tomates (203,4 ml/g de MS). Toutefois, cette différence était hautement significative après 6, 12 et 24 h d'incubation, ce qui signifie que les SPT se dégradent plus lentement que les deux autres résidus. Maghsoud et *al.* (2008) ont enregistré après 6 h de fermentation une production nette de gaz légèrement moindre pour les résidus de tomates (84,6 ml/g MS) et de pommes (136,1).

Tableau 17: Paramètres cinétiques estimés de la fermentation *in vitro* de 1g de MS de sous-produits d'oranges, de pommes et de tomates et de leurs mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin comparés à celles des polymères purs

Substrats	c(b/h)	b ⁽¹⁾	lag (h)	t1/2 (h)	b6 ⁽¹⁾	b12 ⁽¹⁾	b24 ⁽¹⁾	b48 ⁽¹⁾	Se
Sous-produits									
RO	0,144 ^{ab(2)}	239,5 ^{bc}	0,19 ^d	4,96 ^c	138,0 ^a	195,5 ^a	230,7 ^{ab}	239,0 ^b	5,3
RP	0,181 ^a	231,5 ^{bc}	0,48 ^d	3,89 ^c	153,5 ^a	204,7 ^a	228,2 ^{ab}	231,5 ^b	6,3
RT	0,108 ^{bcd}	203,4 ^{cd}	0,31 ^d	6,41 ^{bc}	97,2 ^{bc}	147,8 ^{bc}	188,1 ^{bc}	202,2 ^{bc}	8,4
SEM	0,007	5,19	0,10	0,24	6,25	6,74	5,8	5,24	
Aliments fibreux									
Cardes	0,072 ^{cde}	90,5 ^{ghi}	3,64 ^{cd}	9,72 ^{bc}	31,7 ^{de}	52,3 ^{fg}	74,3 ^{ef}	87,5 ^{gf}	2,4
Chrysanthèmes	0,055 ^{de}	70,3 ⁱ	2,12 ^d	12,16 ^b	20,5 ^e	34,9 ^g	52,1 ^f	65,2 ^g	0,7
Foin	0,072 ^{cde}	105,1 ^{fghi}	1,92 ^d	11,66 ^{bc}	36,0 ^{de}	57,9 ^{fg}	81,3 ^{ef}	87,7 ^{efg}	3,5
SEM	0,006	4,28	0,56	0,92	3,0	4,1	4,42	4,15	
Valeurs-P	0,06	0,002	0,5	0,5	0,1	0,1	0,03	0,005	
Mélanges									
RO : Cardes	0,125 ^{bc}	128,1 ^{efgh}	7,13 ^{bc}	5,54 ^{bc}	77,6 ^{cd}	99,6 ^{def}	121,7 ^{de}	127,8 ^{def}	3,7
RO : Chrysanthèmes	0,076 ^{cde}	171,3 ^{de}	1,71 ^d	9,13 ^{bc}	62,7 ^{cde}	102,5 ^{def}	143,6 ^{cd}	166,8 ^{cd}	3,4
RO : Foin	0,116 ^{bcd}	202,3 ^{cd}	0,001 ^d	6,02 ^{bc}	111,1 ^{bc}	151,5 ^{bc}	189,4 ^{bc}	201,5 ^{bc}	5
RP : Cardes	0,087 ^{bcd}	143,8 ^{ef}	0,55 ^d	7,98 ^{bc}	58,5 ^{cde}	93,2 ^{ef}	126,0 ^{de}	141,6 ^{de}	5
RP : Chrysanthèmes	0,109 ^{bcd}	125,0 ^{efgh}	0,50 ^d	6,59 ^{bc}	61,1 ^{cde}	91,6 ^{ef}	115,3 ^{de}	123,8 ^{def}	3,8
RP : Foin	0,111 ^{bcd}	200,0 ^{cd}	0,25 ^d	7,09 ^{bc}	97,0 ^{bc}	144,4 ^{bcd}	181,5 ^{bc}	187,0 ^{bc}	10,4
RT : Cardes	0,114 ^{bcd}	125,0 ^{efgh}	8,05 ^b	6,06 ^{bc}	62,0 ^{cde}	93,2 ^{ef}	116,8 ^{de}	124,3 ^{def}	2,9
RT : Chrysanthèmes	0,07 ^{cde}	137,0 ^{efg}	2,36 ^d	9,97 ^{bc}	47,0 ^{de}	77,9 ^{efg}	111,7 ^{de}	132,2 ^{def}	3,2
RT : Foin	0,105 ^{bcd}	145,3 ^{ef}	0,77 ^d	6,59 ^{bc}	67,4 ^{cd}	103,4 ^{def}	133,2 ^d	144,2 ^{cd}	2,5
SEM	0,005	7,7	0,6	0,4	5,0	6,8	7,5	7,64	
Valeurs-P	0,06	0,01	<0,001	0,04	0,06	0,04	0,02	0,01	
Polymères									
Xylan	0,17 ^{ab}	203,1 ^{cd}	1,59 ^d	4,22 ^c	129,3 ^{ab}	175,4 ^{ab}	198,7 ^b	202,9 ^{bc}	8,4
Pectine	0,104 ^{bcd}	285,6 ^a	1,12 ^d	7,06 ^{bc}	129,2 ^{ab}	198,5 ^a	257,1 ^a	282,0 ^a	7,1
Amidon	0,064 ^{cde}	235,0 ^{bc}	8,22 ^b	11,28 ^{bc}	75,1 ^{cd}	125,4 ^{cde}	182,5 ^{bc}	222,0 ^b	6,1
Cellulose	0,032 ^e	265,0 ^{ab}	18,33 ^a	22,66 ^a	47,0 ^{de}	85,0 ^{ef}	141,6 ^{cd}	205,6 ^{bc}	6,4
Caséine	0,102 ^{bcd}	82,2 ^{hi}	3,55 ^{cd}	7,13 ^{bc}	37,2 ^{de}	57,1 ^{fg}	74,0 ^f	81,1 ^{fg}	4
SEM	0,01	16,6	1,52	1,6	9,0	12,2	14,2	15,34	
Valeurs-P	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
Moyennes regroupées									
Sous-produits	0,140 ^{a(2)}	221,8 ^a	0,33 ^c	5,2 ^c	125,5 ^a	178,1 ^a	212,0 ^a	221,2 ^a	6,9
Aliments fibreux	0,072 ^c	95,7 ^c	2,28 ^b	11,5 ^a	32,1 ^d	52,4 ^d	74,4 ^d	89,6 ^d	2,8
Polymères	0,092 ^b	213,7 ^a	6,7 ^a	10,7 ^a	81,9 ^b	126,3 ^b	169,0 ^b	197,5 ^b	6,3
Mélange	0,1 ^b	156,1 ^b	2,1 ^b	7,3 ^b	70,3 ^c	107,9 ^c	140,0 ^c	153,9 ^c	4,4
SEM	0,005	7,06	0,48	0,52	4,67	6,15	6,76	6,84	
CV	43,4	39,0	167,6	59,26	56,36	49,58	42,76	39,06	
Valeurs-P	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

(1) ml de gas/g MS; (2) Moyennes avec différents exposants différent significativement (P <0,05); se: Erreur résiduelle; RO: Résidus d'oranges; RP: Résidus de pommes; RT: Résidus de tomates; SEM: Erreur standard des moyennes; P: Seuil de significativité; CV: coefficient de variation.

Résultats et discussion

Cependant, ils ont noté vers la fin des 48 h un volume maximal de gaz largement plus élevé pour les pommes que celui de notre étude (305,1 ml/g de MS). Paya et *al.* (2012) ont également rapporté des valeurs supérieures en incubant un gramme de sous-produits d'oranges (256 ml/g de MS) ou de pommes (364 ml/g de MS). Nos données sont aussi inférieures à celles notées par Cone et *al.* (2002) et Valiollah et *al.* (2013) pour des résidus d'oranges.

La dégradation *in vitro* du foin de la vesce-avoine engendre moins de gaz (105,1 ml/g de MS), suivi par le *Sylibum marianum* qui présente un volume de gaz de 90,5 ml/g de MS, soit comparable à celui de l'aliment de référence. Les chrysanthèmes sont les substrats les moins fermentescibles, ils ne produisent que 70,3 ml/g de MS.

Tagliapietra et *al.*, (2015) ont incubés les mêmes substrats en utilisant le liquide ruminal bovin, ils ont enregistré une production de gaz inférieure à celle de l'inoculum de dromadaire aux stades précoces (6 h) et une production de gaz cumulée supérieure au stade asymptotique lorsque les sous-produits et les cardes sont incubés seuls. En revanche, les chrysanthèmes et les mixtures ont donné des valeurs de gaz produit plus élevés pour l'inoculum bovin tout au long de l'incubation.

En fait, il est souvent difficile de comparer les résultats de la production de gaz obtenus *in vitro* par différents chercheurs en raison de la variation des conditions opératoires, telles que les procédures de collecte et de traitement du liquide ruminal (Cornou et *al.*, 2013), le type de tampon utilisé (Patra et Yu, 2013), la taille des échantillons (Ramin et Huhtanen, 2012), la source d'inoculum (Haddi et *al.*, 1999), le type d'équipement utilisé pour la mesure du gaz, tels que les seringues ou les bouteilles, pouvant être fermées ou ventilées à heures fixes ou à pression fixe (Gierus et *al.*, 2008; Tagliapietra et *al.*, 2010; Cattani et *al.*, 2014) et le modèle statistique adopté pour l'ajustement des données (Haddi et *al.*, 2000).

Les sous-produits ont produit constamment et durant toute la période d'incubation des volumes plus élevés de gaz par rapport aux fourrages naturels. Ces résultats sont prévisibles et ils sont associés principalement à la composition chimique des substrats étudiés. Les résidus d'oranges et de pommes ont été plus fermentescibles par ce qu'ils sont très riches en pectine et en glucides non structuraux. Lashkari et Taghizadeh (2015) ont indiqué que la fraction des hydrates de carbone des sous-produits d'agrumes est constituée de plus de 35 % de glucides rapidement dégradables et de plus de 36 % de fibres dont la pectine est le majeur composant.

Résultats et discussion

Ce constituant pariétal soluble est également utilisé par les microorganismes du rumen comme source d'énergie fermentescible.

En outre, le rendement élevé de gaz obtenu avec les résidus de pommes et d'oranges est le résultat d'une forte capacité de dégradation par la microflore ruminale des hydrates de carbone structuraux et non structuraux de ces résidus. Ce qui est reflété par leurs hauts taux de dégradabilité apparente mesuré à la fin de la fermentation (tableau 16). Aregheore (2000) a noté à son tour, une haute production de gaz avec les déchets d'agrumes en comparaison aux coquilles d'arachide, aux épis de maïs et aux épluchures de manioc. Il a expliqué ce constat par la forte digestibilité de l'NDF et de la matière organique. Dans le système *in vitro*, le volume de gaz est un bon paramètre qui prédit la digestibilité, les produits finaux de fermentation et la synthèse des protéines microbiennes (Sommart et al., 2000). En outre, la digestibilité *in vitro* de la matière sèche et de la matière organique ont montré une forte corrélation avec le volume de gaz produit (Sommart et al., 2000).

La production potentielle de gaz des résidus de tomates est faible, par ce qu'ils renferment des taux en fibres brutes, en NDF et en ADF beaucoup plus élevé. En outre, les SPT contiennent une grande proportion de parois cellulaires lignifiées, qui est identique à celle du chrysanthème et plus élevé que celle des cardes et du foin qui sont des aliments fibreux. Nos résultats sont en accord avec celles de Sommart et al. (2000), Nitipot et Sommart (2003) et Chumpawadee et al. (2007) qui ont signalé que les sources d'énergie ayant moins d'NDF ont un plus grand potentielle de production de gaz.

La teneur relativement élevée en FB, NDF, ADF, cellulose et hémicellulose des aliments fibreux a conduit à une faible production de gaz par rapport aux résidus agro-alimentaires. Plusieurs autres auteurs ont observé que la production de gaz *in vitro* et les paramètres cinétiques estimés sont négativement influencés par le contenu en parois cellulaires (Karabulut et al., 2007; Getashaw et al., 2000; Fructos et al., 2004; Gurbuz, 2007).

La grande proportion de parois cellulaires lignifiées de la plante *Chrysanthemum coronarium* est éventuellement la cause de sa faible fermentescibilité par la microflore ruminale. Melaku et al. (2003) ont constaté que les constituants fibreux, en particulier la lignine, influençaient négativement la production de gaz *in vitro*. Van Soest (1994) a indiqué que le contenu cellulaire est presque entièrement digestible et que la lignine est le principal facteur limitant la digestibilité des fourrages.

Résultats et discussion

D'une autre part, la production nette de gaz reflète généralement le contenu en glucides fermentescibles et en azote disponible dans les aliments. Toutefois, le niveau élevé du volume net de gaz généré par la fermentation *in vitro* des SPP et des SPO peut supposer que la teneur en azote ne limitait pas l'activité microbienne permettant aux fractions glucidiques d'être dégradés. Ce résultat appuie les constatations d'Aregheore *et al.* (2000) et de Long *et al.* (1993), qui rapportent que la contribution de la matière azotée totale à la production de gaz ne constitue pas un facteur d'influence significatif. Blümmel *et al.* (1999), étudiant plusieurs aliments à différents teneurs en protéines (PB varie entre 32 et 487 g / kg MS) n'ont noté aucun effet du niveau des PB sur la production de gaz. Cependant d'autres études ont montré que la dégradation des protéines influence la production de gaz (Cone et Van Gelder, 1999), et que la teneur en PB des aliments peut avoir un effet sur la production de gaz après 12 ou 24 h d'incubation (Chenost *et al.*, 2001 ; Lashkari *et al.*, 2014). Gasmi-Boubaker *et al.* (2005) ont rapporté une corrélation positive entre les PB et la production de gaz à 24 h avec quelques arbustes méditerranéens. En revanche, Getachew *et al.* (2004) ont signalé que le niveau de PB était négativement corrélé avec la production de gaz. Une étude récente de Rahbapur *et al.* (2011) a montré que la production de gaz diminue lors de l'augmentation des PB soluble dans la ration alimentaire. Khazaal *et al.* (1995) ont justifié la diminution du gaz produit en présence des composés azotés dégradables par la liaison du dioxyde de carbone à l'ammoniac. En fait, la production de gaz reflète plus le contenu en énergie digestible plutôt que le contenu protéiques, alors que la contribution des matières grasses est négligeable (Abate, 1980; Aregheore, 2000; De Boever *et al.*, 2005; Uddin *et al.*, 2015).

3-1-2- Taux horaire de production de gaz « c »

Un taux horaire de production de gaz égal à 1 h/b signifie que toute la production cumulée de gaz est libéré en une heure.

Le taux horaire de production de gaz est plus élevé pour les résidus de pommes (0,181 b/h), suivi de la pulpe d'orange (0,144). Les sous-produits de tomates produisent leur gaz avec un taux plus bas (0,108) mais statistiquement comparable à celui des SPO. Les taux de fermentation des aliments fibreux sont similaires et significativement comparables à ceux des épiluchures de tomates. Le taux élevé de la production de gaz est affecté par les fractions glucidiques facilement accessibles à la population microbienne (Delavar, 2014), et il est négativement et significativement ($p < 0,01$) corrélé à la fraction NDF ($r = -0,49$) et ADF ($r = -0,53$) (Ndlovu et Nherera, 1997). Par ailleurs, la lignine constitue une structure difficile à

Résultats et discussion

l'adhésion des micro-organismes, ce qui peut entraîner un ralentissement de la dégradation (Chumpawadee., 2009).

En utilisant le modèle exponentiel et le liquide ruminal ovin, Delavar et *al.*, (2014) ont rapporté pour le marc de pomme un taux « c » deux fois inférieur (0,073 b/h) à celui de notre étude. Paya et *al.* (2012) ont noté un taux horaire de libération de gaz plus élevé pour les sous-produits d'oranges que celui des pommes mais les deux valeurs restent largement inférieures à nos résultats. Plusieurs autres auteurs ont également signalé des valeurs inférieures pour des sous-produits de tomates (Maghsoud et *al.*, 2008 ; Mirzaei-Aghsaghali et *al.*, 2011). En revanche, Aghajanzadeh-Golshani et *al.* (2010) rapportent un taux « c » supérieur (0,114 ml/h).

En fermentant les mêmes substrats ayant la même composition chimique que les nôtres, Tagliapietra et *al.* (2015) ont enregistré des valeurs largement inférieures à celles rapportés dans notre étude pour les trois résidus, les cades et les chrysanthèmes. Ces dissimilitudes reviennent aux systèmes utilisés pour la mesure du gaz produit, au type du liquide ruminal (bovin vs camelin) qui a servi comme inoculum, à la méthode de la récupération du jus de rumen et au model mathématique utilisé pour l'ajustement des données.

3-1-3- Temps de la demi-production de gaz ($t_{1/2}$)

Les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire atteignent le volume maximal de gaz après 48 h de fermentation et libèrent la moitié de ce volume au bout de 3,88 h pour les SPP, 4,95 h pour les SPO et 6,4 h pour les SPT. Comparativement aux sous-produits agro-alimentaires les aliments fibreux libèrent la moitié du gaz produit lentement (cardes : 9,72 h; foin : 11,66 h et chrysanthèmes : 12,16 h).

Le temps de la demi-production de gaz noté pour les SPP et les SPO apparaissent très courts (3,88 et 4,95 h) avec un volume important de gaz libéré. Ceci peut augmenter le risque de ballonnement et d'acidose, *in vivo*. Toutefois, les pH enregistrés à la fin de la fermentation indiquent que la libération des AGV au cours du processus de fermentation n'a pas abaissé le pH à un seuil critique et que le milieu a été parfaitement tamponné. D'autre part, il est admis que l'utilisation des aliments très riches en énergie digestible peut conduire à une acidose ruminale. Toutefois, les résidus d'oranges et de pommes sont des aliments riches en pectine. Les pectines se dégradent très rapidement et abondamment dans le rumen mais, contrairement

Résultats et discussion

à l'amidon, elles produisent l'acide acétique comme principal produit final de la fermentation plutôt que de l'acide lactique. Ceci entraîne une moindre diminution du pH ruminal (Bampidis et Robnsson, 2006 ; Wing, 1988). En évaluant le potentiel de la pulpe d'agrumes à provoquer une acidose ruminale, Júnior et *al.*, (2008) ont indiqué que la pulpe d'agrumes peut être utilisée pour nourrir les bovins avec un faible risque de causer une acidose lactique aiguë. D'autres études ont suggéré que la pulpe d'agrumes est un aliment plus sécurisé que les concentrés d'amidon. Dans une expérience menée avec des bovins laitiers au Costa Rica, Rojas-Bourrillon et *al.* (2001) ont signalé que l'augmentation de la quantité de la pulpe d'agrumes comme substituant aux grains de maïs dans les régimes alimentaires a entraîné une augmentation du pH ruminal. Ainsi, la pulpe d'agrumes a été considérée comme un aliment plus sécurisé pour l'animal que les grains de maïs (Rojas-Bourrillon et *al.*, 2001). En effet, l'utilisation de la pulpe d'agrumes ne semble pas augmenter l'incidence de l'acidose aux niveaux auxquels elle est couramment distribuée (100-150 g / kg MS de ration) (Bampidis et Robnsson, 2006).

3-1-4- Temps de latence (lag)

Les cardes ont commencé à produire du gaz après 3,64 h, les chrysanthèmes et le foin après 2,12 et 1,92 h, respectivement. Toutefois ces valeurs ne sont pas différentes d'un point de vue statistique ($p=0,5$).

Les résidus agro-alimentaires ont été plus rapidement colonisés par les microorganismes du rumen, ils ont un temps de latence très réduit et non significativement différent. Ce dernier varie entre 0,19 h pour les résidus d'oranges à 0,48 h pour ceux des pommes. Delavar et *al.*, (2014) ont noté un lag plus bas pour des sous-produits de pommes (0,38 h).

Cette colonisation rapide des sous-produits est éventuellement liée à la fraction soluble plus ou moins importante de ces substrats qui est disponible pour les micro-organismes. Selon Delavar et *al.*, (2014), le temps de latence n'est pas probablement affecté par le temps requis pour la fixation bactérienne à un nouveau substrat, qui se produit très rapidement; le temps de latence est plus lié à la digestion appropriée des aliments et à la colonisation à long terme par les microorganismes. Le lag le plus bas noté pour les résidus d'oranges peut être lié à la petite taille de ses particules. Udén (1992) signale que le temps de latence *in vitro* diminuait généralement lorsque la taille des particules de fourrage diminuait.

Résultats et discussion

3-2- Estimation des paramètres cinétiques des polymères végétaux (amidon, pectine, cellulose, hémicellulose, caséine)

Les polymères végétaux servent comme substrats purs modèle qui permettent de tester l'activité microbiologique de chaque groupe bactérien (cellulolytique, hémicellulolytique, pectinolytique, amidolytique et protéolytique). Dans cette étude, on note une activité microbienne intense et positive avec tous les polymères testés. Toutefois, l'activité pectinolytique est la plus intense, les bactéries libèrent 285,6 ml de gaz par la fermentation d'un gramme de pectine avec une vitesse de 0,103 b/h. L'activité cellulolytique est également très élevée et la fermentation de la cellulose produit une quantité de gaz non statistiquement différente à celle de la pectine (264,88 ml/ g MS) mais avec une vitesse beaucoup moins élevée (0,032 ml/ g MS), soit la vitesse la plus basse. La dégradation du xylane par la flore microbienne du rumen de dromadaire libère un volume maximal de gaz (203,08 ml/ g MS) comparable à celui de l'amidon (234,91) et avec la vitesse de dégradation la plus élevée (0,17 b/h). L'activité protéolytique vis-à-vis la caséine est la moins intense (82,23) mais avec un taux horaire constant de 0,102 b/h, soit comparable à celui de la pectine.

Une différence hautement significative ($p < 0,001$) est notée entre les temps de latences et les temps de demi-production de gaz des substrats purs étudiés. Les valeurs les plus remarquables étant celles enregistrées avec la cellulose. Ce substrat ne commence à être dégradé qu'après 18,33 h de temps contre 1,11 (pectine), 1,59 (xylane), 3,55 (caséine) et 8,22 (amidon). La dégradation de la cellulose est tributaire d'une longue phase de latence. Un résultat identique a été noté par d'autres chercheurs : des phases de latence de 8 h et de 18 h ont été enregistrées par Weimer (1990) et Maccarana et *al.* (2013). Cette dernière est probablement due au temps nécessaire aux microorganismes cellulolytiques pour adhérer aux chaînes de polymère et/ou au temps nécessaire pour élaborer les cellulases spécifiques pour dégrader la cellulose. D'après Menke et *al.*, (1979), ce retard dans la fermentation aboutit à de grande fluctuation dans la quantité de gaz produite après 24 h. Maccarana et *al.* (2013) ont décelé que l'association de la cellulose aux sous-produits d'agrumes élimine le temps de latence. En revanche, la mixture avec les sous-produits de tomates donne un lag plus ou moins important (6 h) mais largement moindre que celui de la cellulose seule.

3-3- Estimation des paramètres cinétiques des mélanges binaires entre sous-produits agroalimentaires et aliments fibreux

Le mélange 50:50 des résidus agro-alimentaires avec les aliments fibreux à variablement affecté les différents paramètres cinétiques (tableau 17). Une différence hautement significative ($p < 0.0001$) a été enregistrée entre **les volumes maximum de gaz** produit par les substrats seuls et leurs mixtures. La quantité de gaz issue après dégradation des résidus a fréquemment diminué après leurs mélanges avec les plantes fibreuses. Elle s'échelonne entre 125,0 ml/g MS pour les mélanges SPP + chrysanthème, SPT + carde et 202,3 ml/g MS pour le mélange SPO + foin.

L'effet de l'association des aliments fibreux aux SPIAA a été plus important lorsque les SPO et les SPP ont été incubés en combinaison avec les cardes et les chrysanthèmes respectivement. Des pourcentages de diminution de gaz produit de 47 et 46 % ont été notés pour les mixtures SPO + carde et SPP: chrysanthème, successivement. La combinaison entre des SPT et le *Sylibum marianum* a également montré un fort taux de réduction de gaz (39 %). Ces baisses de productions de gaz représentent un aspect positif permettant de limiter le risque de ballonnement dû à un excès de gaz de fermentation ruminale.

Le traitement par mélanges avec les fourrages a aussi allongé les temps de demi-production de gaz. Ceci se note particulièrement dans le cas des résidus de pommes où le $t_{1/2}$ est passé de 3,89 h pour les résidus de pommes seuls à 6,59 pour la mixture SPP + chrysanthèmes, 7,98 pour la mixture SPP + cardes et 7,09 h pour la mixture SPP + foin. Cette augmentation du temps de demi- production de gaz permet d'augmenter le temps de rétention dans le rumen et conduit ainsi à une dégradation microbienne plus lente, dans le cadre d'utilisation *in vivo*.

Ces résultats peuvent être causés par la fraction pariétale et la lignification des aliments fibreux qui ont minimisé l'accès des microorganismes aux constituants pariétaux facilement biodégradables des sous-produits agro-alimentaires ce qui a conduit à une réduction de la production de gaz. Maccarana et *al.* (2013) ont rapporté des résultats semblables en mixant les sous-produits de tomates ou d'oranges aux cardes avec des proportions de 25 : 75 pour le résidu et la plante respectivement. Toutefois, lorsque la proportion des sous-produits était prédominante la réduction du gaz libéré était beaucoup moindre (Maccarana et *al.*, 2013).

Résultats et discussion

D'après ces résultats, il est à signaler que les deux plantes de cette étude ont entraîné un effet négatif plus important sur la libération de gaz en comparaison au foin de la vesce avoine, avec le quel on a noté une réduction non significative du volume de gaz libéré quand il a été mélangé avec les résidus de pommes (-13,7 %) ou d'oranges (-15,5 %). Ce résultat peut être dû à la structure fibreuse riche en ADL du *Sylibum marianum* et du *Chrysanthemum coronarium* d'un côté, ainsi qu'à l'aptitude et à l'adaptation de la flore ruminale à la dégradation du foin, d'un autre côté.

Plusieurs chercheurs ont signalé divers plantes ou arbustes comme compléments alimentaire efficaces pour les animaux d'élevage (Doran et al., 2007; Melaku et al., 2003; Tessema et Baars, 2004).

L'effet de la combinaison entre les aliments fibreux et les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire est une relation dans laquelle les fourrages amènent la fibre nécessaire qui ralentit dans une certaine mesure la dégradation rapide et intense des sous-produits qui peut conduire à des risques de ballonnement et d'acidose. À leur tour, les SPIAA apportent les carbohydrates facilement digestibles et l'énergie nécessaire pour une croissance optimale des microorganismes du rumen et ainsi une dégradation plus complète. La présence d'une source de cellulose et d'hémicellulose facilement fermentescible dans le régime alimentaire augmente le nombre de micro-organismes fibrolytiques, stimulant la digestibilité des autres sources de fibres moins dégradables (Silva et Orskov, 1988). En utilisant le liquide ruminal bovin, Tagliapietra et al., (2015) ont rapporté une amélioration de la dégradation des plantes fourragers lesquelles ont été mixées avec des sous-produits de pommes ou d'agrumes, résultats identiques à nos résultats. Une production de gaz intense et proportionnelle à l'ajout des feuilles de murier à la paille de riz est noté par Liu et al., (2002). L'apport de fibres solubles ou de protéines peut augmenter l'activité des microorganismes fibrolytiques, favorisant ainsi une meilleure dégradation de la fibre (Niderkorn et Baumont 2009; Liu et al., 2002).

Bien que les sous-produits de tomates (SPT) possèdent une teneur plus importante en fibres en comparaison aux autres sous-produits, leurs mixtures avec les aliments fibreux, particulièrement avec les cardes et les chrysanthèmes, entraînent une amélioration de la valeur nutritive de ces plantes via une production importante de gaz, comparables aux mélanges réalisés avec les résidus de pommes ou d'oranges. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les SPT riches en matières azotées totales et en éléments minéraux, stimulent efficacement la

Résultats et discussion

fermentation des plantes fibreuses riche en fraction pariétale. En effet, il a été rapporté que l'addition des SPT améliorerait la valeur nutritionnelle du régime alimentaire, en raison de leur taux de protéines digestibles (61,2 %) (Abdollahzadeh et *al.*, 2010). Par ailleurs, il a été démontré que les minéraux sont indispensables à la stimulation de la flore cellulolytique impliquée dans la dégradation des fibres et à l'activité enzymatique des microorganismes du rumen (McSweeney et Denman, 2007). Ils agissent directement sur la fermentation ruminale en fournissant des cofacteurs enzymatiques et des éléments essentiels à la biosynthèse des microorganismes (Broudiscou et *al.*, 1999).

On conclusion, on peut dire qu'à l'exception des mélanges SPO + foin, SPO + chrysanthèmes, SPP + foin, tous les mélanges binaires ont présenté des volumes maximum de gaz statistiquement similaires à celui de l'aliment standard (105,1 ml/g MS).

L'effet du prétraitement par mélange des résidus agro-alimentaires avec les aliments fibreux est également prononcé avec les autres paramètres cinétiques. Les mélanges 50:50 des résidus de pommes avec les plantes fibreuses a significativement diminué **les taux horaires** de la production de gaz avec des taux allant de 39,44 % pour les résidus de pommes + chrysanthèmes à 52,22 % pour les résidus de pommes + carde. Bien qu'une réduction de la vitesse de dégradation des résidus d'oranges et de tomates est révélée après mélange avec les aliments fibreux, cette réduction est faible et elle n'est statistiquement significative qu'avec le mélange SPO + chrysanthème (47,6 %). Toutefois cette diminution a pu rapprocher la vitesse de dégradation des mélanges binaires à celle du foin. D'autres études ont exposé des réductions du taux « c » en augmentant la proportion de la paille de blé dans les mixtures paille: feuilles de mûrier ou paille: foin (Liu et *al.*, 2002). En utilisant un autre type d'animal donneur de jus de rumen et un autre modèle mathématique pour l'ajustement des données, Tagliapietra et *al.* (2015) ont pareillement enregistré des taux moins élevés quand des résidus de pommes, de tomates ou d'oranges ont été associés aux cardes et aux chrysanthèmes en comparaison aux taux « c » des sous-produits seuls.

La nature différente des ingrédients des mélanges pourrait provoquer une asynchronie dans la libération des éléments nutritifs, ce qui pourrait entraîner des différences dans la croissance et la production de la biomasse microbienne, ce qui pourrait à son tour modifier le taux et / ou la production de gaz (Blummel et *al.*, 1997).

Résultats et discussion

Le temps de latence a légèrement augmenté avec les mélanges 50:50. Ces derniers ont présenté des temps de latence similaires au foin (1,92 h), à l'exception des mélanges SPT+ carde (8,05 h) et SPO+ carde (7,13 h) qui ont montré des valeurs inattendues, très élevées et largement différentes de celles des autres mélanges et aliment standard. Le temps de latence est influencé principalement par deux facteurs: (1) la teneur en fraction soluble, une teneur élevée en carbohydrates facilement fermentescibles stimule la colonisation microbienne (et vice versa); (2) la taille des particules alimentaires: plus la taille des particules est grosse, plus la surface exposée à la colonisation microbienne est grande (et vice versa) (Ouda et *al.*, 2006). Krishnamoorthy et *al.* (1995) ont souligné que les informations sur le temps de latence et le taux de fermentation en tant qu'indices de rapidité de la fermentation de la matière organique dans le rumen peuvent être utiles pour formuler un régime alimentaire avec un taux de fermentation souhaitable.

4- **Cinétiques de la production cumulée de gaz après 96 heures de fermentation *in vitro***

Les courbes cinétiques de la production cumulée de gaz des sous-produits seuls et de leurs mélanges sont illustrées par les figures 18, 19 et 20. Tous les substrats et mélanges de cette étude ont présenté des profils qui évoluent progressivement suivant une allure ascendante jusqu'à atteindre un pic vers 24 h d'incubation. Par la suite, un ralentissement dans la production de gaz est observé jusqu'à une stabilisation complète après 48 h d'incubation. Tous les profils indiquent une production accrue durant les premières 24 h. Après cette phase l'accumulation des acides de fermentation et l'épuisement du substrat conditionnent la stabilisation de la fermentation.

D'après les figures les sous-produits sont rapidement et intensément plus dégradés lorsque ils sont incubés seuls. Ceci revient à leur contenu pariétal riche en sucres solubles ou insolubles facilement dégradables. Les mixtures avec les aliments fibreux ont ralenti la dégradation des sous produits, ce qui est logique vue la nature fibreuse de ces aliments. Deaville et Given (2001) ont indiqué que la cinétique de la production de gaz pourrait être affectée par la fraction glucidique des substrats. La teneur relativement faible en fibres peut faciliter la colonisation des aliments par la population microbienne du rumen, ce qui pourrait à son tour induire des taux de fermentation plus élevés, améliorant ainsi la digestibilité (Van Soest, 1994).

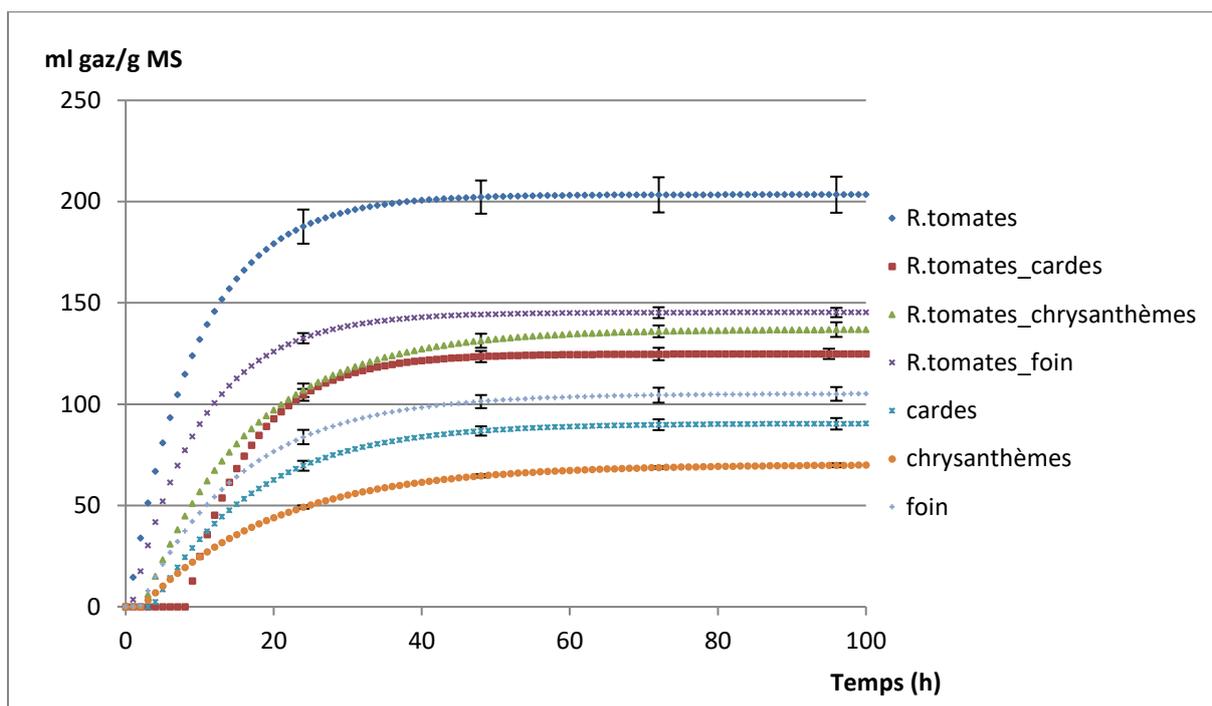


Fig.18 : Cinétiques de dégradation des résidus de tomates et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire.

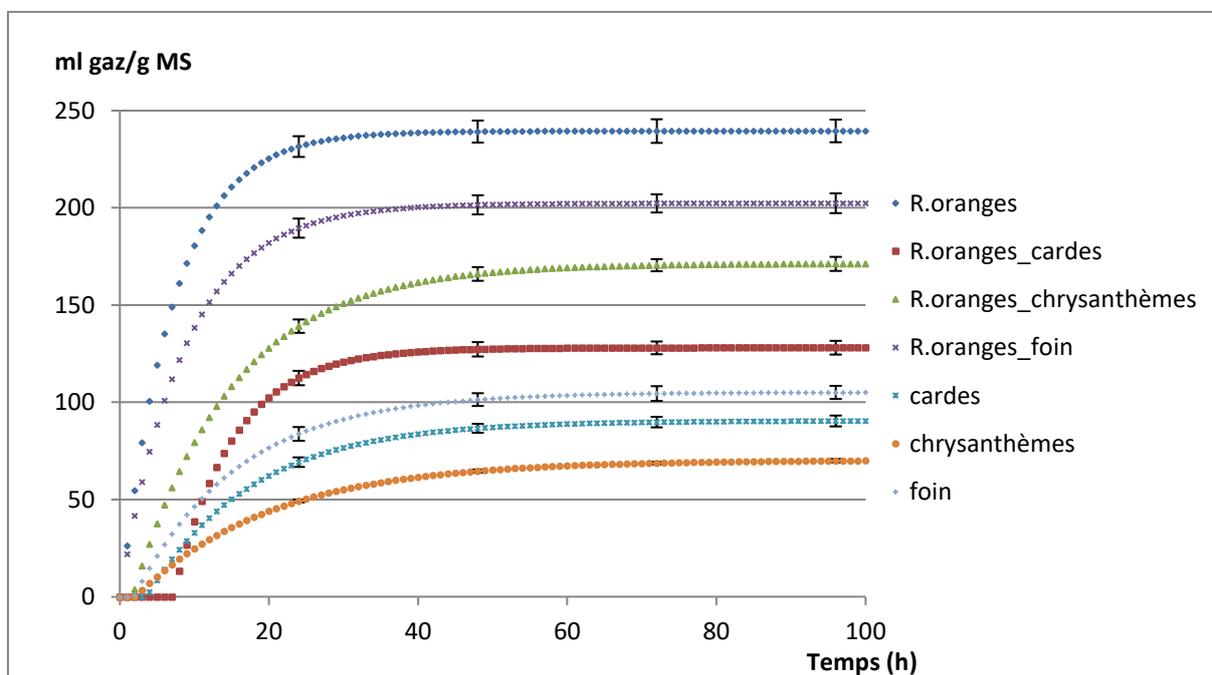


Fig.19 : Cinétiques de dégradation des résidus d'oranges et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire

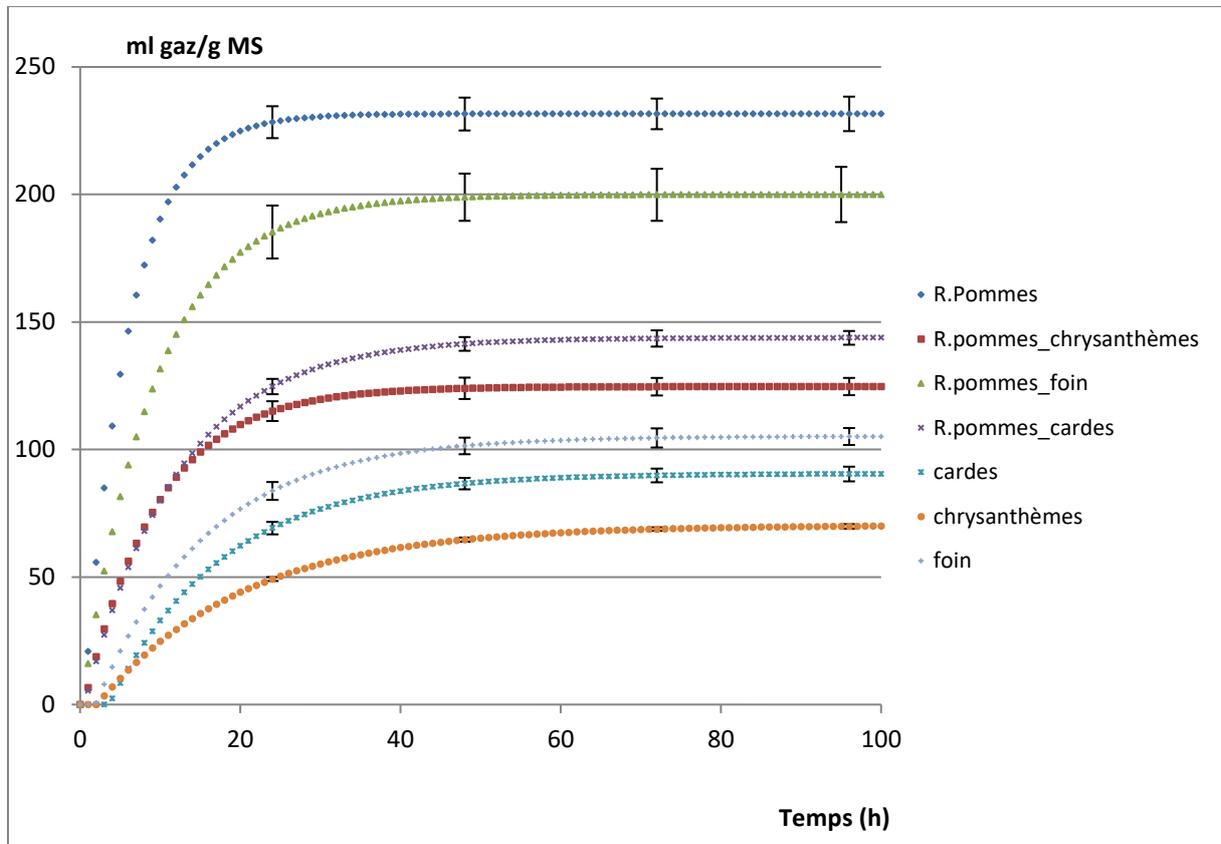


Fig.20 : Cinétiques de dégradation des résidus de pommes et de leurs mélanges avec les aliments fibreux par la flore ruminale de dromadaire

Résultats et discussion

La figure 20 montre que la cinétique de la production cumulée de gaz des résidus de pommes seul est bien distincte des autres mélanges. La dégradation des RP commence avec le début de la fermentation (lag très court), elle est plus rapide et largement plus intense que les mélanges avec les fourrages. Les courbes cinétiques des mélanges avec les cardes, les chrysanthèmes et le foin ont présenté des sigmoïdes régulières mais avec un temps de latence très court. Aux premières heures de fermentation ces courbes ont été très proches puis elles commencent à se dissocier.

Les courbes cinétiques de la production de gaz des mélanges des cardes avec les SPT ou les SPO ont montré une allure différente des autres courbes des mélanges, ils ont présentés des bosses après environ 5 h de fermentation. Cela est probablement dû à l'effet associatif de ces substrats avec les aliments fibreux.

5- pH finaux des substrats et de leurs mélanges

Les pH mesurés à la fin de l'incubation sont mentionnés dans le tableau 16. Les sous produits de l'industrie agro-alimentaires ont présenté le pH final le plus bas (6,64) en comparaison aux autres catégories, qui présentent des pH finaux relativement plus élevés et semblables, 6,72 (polymères); 6,74 (fourrages); 6,75 (mélanges) (tableau 16).

La fermentation des mélanges entre les résidus d'oranges et la plante fibreuse *Chrysanthemum coronarium* a conduit à la plus forte acidification du milieu d'incubation (pH final = 6,48). La dégradation de la cellulose (6,54), des SPO (6,56), de l'amidon (6,59) et des SPP (6,60) engendre des valeurs de pH finaux statistiquement différentes des autres substrats et mélanges mais similaires à celle de la mixture SPO + cardes. Delavar et *al.*, 2014 ont rapporté une valeur de pH pour des résidus de pommes inférieure à celle notée dans notre étude (6,35). Les faibles valeurs de pH enregistrées pour les sous-produits de pommes ou celles d'agrumes sont à relier à leur teneur relativement importante en pectine et en carbohydrates non structuraux (Delavar et *al.*, 2014, Lashkari et *al.*, 2014). La fermentation produit des AGV qui réduisent le pH lorsque leur production est plus rapide que leur absorption dans le rumen. Ainsi, le pH ruminal est souvent réduit après l'ingestion de glucides solubles en raison de leur fermentation rapide et la diminution du pH tend à être liée linéairement à leur niveau d'incorporation (Kennedy et Bunting 1992). La présence de substrats facilement fermentescibles dans la ration des ruminants entraîne des fermentations intenses et une production excessive d'AGV dont l'effet direct peut entraîner une acidose (Fonty et *al.*, 1994 ; Orskov et Ryle, 1990). Toutefois, il faut signaler que toutes les valeurs de

Résultats et discussion

pH finaux enregistrés dans cette étude ne sort pas des limites physiologiques requises pour un bon fonctionnement du microbiote ruminal (≥ 6), comme rapporté par Hoover (1986).

En outre, selon Jouany (2000), le pH des digesta des pré-estomacs de camélidés ne descend jamais en-dessous de la valeur de 6,5 même dans le cas de régimes supplémentés en glucides rapidement fermentescibles ou de régimes peu digestibles. Tandis que, cette aptitude des camélidés à maintenir le pH dans des limites physiologiques peut disparaître lorsque le contenu fermentaire est incubé *in vitro* (Jouany, 2000). Par ailleurs, Kayouli *et al.*, (1991) et Jouany *et al.*, (1994) ont montré que le dromadaire se distingue, par rapport aux autres ruminants, par son pouvoir tampon élevé à l'égard des conditions acides.

D'une manière générale, le mélange des sous-produits avec les fourrages améliore significativement leur pH finaux. Le mélange des tomates avec les cardes présente le pH final le plus haut (7,22). Ce résultat est lié d'une part à la teneur relativement importante en protéines des SPT, qui se dégradent au cours de la fermentation en NH_3 , et d'autre part à la nature fibreuse et au pouvoir tampon élevé noté avec ces deux substrats. Le mélange de la pâte d'oranges avec les cardes a conduit également à un milieu d'incubation relativement tamponné.

À l'exception des mélanges SPO + chrysanthèmes et SPT + cardes qui ont présenté le pH le plus bas (6,48) et le plus élevé (7,22), respectivement parmi les mixtures, tous les autres mélanges ont eu des pH après fermentation comparables à celui noté pour l'aliment de référence (6,71).

Bien qu'une diminution dans les valeurs de pH final des autres substrats par rapport à la valeur de pH initial de l'inoculum ait été enregistrée, la fermentation du mélange SPT + cardes et de la caséine, par la flore ruminale du dromadaire, a augmenté le pH du milieu d'incubation initial de 0,34 et 0,22 unités. Ly *et al.*, 1997 explique cette augmentation de pH après fermentation, soit par la libération de CO_2 à partir du système tampon, engendré par la production et l'accumulation des acides gras volatils, soit par une augmentation de la concentration d'ammonium résultant de la dissolution du bicarbonate d'ammonium de la salive artificielle et/ou de l'activité protéasique de la microflore ruminale.

6- Dégradabilité apparente des substrats et de leurs mélanges

La valeur de dégradabilité apparente est le résidu obtenu après incubation *in vitro* des substrats et filtration du liquide ruminal fermenté. Les valeurs de la dégradabilité apparente rapportés dans le tableau 16 sont significativement distinctes entre les substrats et leurs mélanges.

Les aliments fibreux sont les substrats les moins dégradés (56,7 %), suivi par les mélanges binaires (73,7 %), les sous-produits agro-alimentaires (91,5%) et les polymères végétaux (98,7 %). Ce résultat est pertinent et il est dû aux contenus élevés en fibres brutes des aliments fibreux en comparaison aux autres substrats qui sont moins riches en fibres, particulièrement en lignine, ce qui facilite l'accès des microorganismes aux polymères constituant la paroi des substrats et ainsi conduit à une dégradation plus complète (Goes et *al.*, 2010). La présence de lignine tend à augmenter la fraction non digestible, réduisant ainsi la fraction potentiellement digestible et provoquant un grand remplissage du rumen, limitant l'ingestion de la matière sèche (Mizubuti et *al.*, 2011).

Les résidus de pommes (dégradabilité apparente : 96,2 %) et d'oranges (96,0 %) sont potentiellement fermentés par la flore ruminale du dromadaire. Cette performance est le résultat d'une plus faible concentration en fibres NDF et ADF, en lignine et d'une concentration plus élevée en glucides et en pectine. La pulpe d'orange et le résidu de pomme présentent dans leur composition une teneur importante en pectine. La pectine est considérée comme une fibre soluble qui a une structure d'hydrate de carbone non liée de manière covalente aux parties lignifiées, est à 90-100 % dégradable dans le rumen (Nocek et Tamminga, 1991), augmentant ainsi les valeurs de dégradabilité. Selon Pirmohammadi et *al.* (2006) et Madrid et *al.* (2002), il est raisonnable de s'attendre à une bonne efficacité dans la dégradation ruminale lorsque les sous-produits de pommes ou d'agrumes sont étudiés car ces aliments sont hautement fermentescibles. Njidda et Nasiru (2010) affirment que la production de gaz reflète l'efficacité et l'étendue de la dégradabilité des aliments, car les fourrages qui ont une forte dégradabilité ruminale de la matière sèche ont tendance à produire beaucoup de gaz. Comme la production de gaz ne tient pas compte de la quantité de substrat convertie en biomasse microbienne, la mesure du gaz peut être considérée comme une estimation de la digestibilité apparente dans le rumen (Blümmel et Ørskov, 1993). Al-Masri (2003) a rapporté une relation hautement significative ($p < 0,0001$) entre la production de gaz et la matière organique fermentée réelle et apparente. En incubant des résidus de pommes et d'oranges par

Résultats et discussion

le liquide ruminal ovin, Paya et *al.* (2012) ont noté des pourcentages de dégradabilité inférieurs (77,5 % et 87,6 % pour les résidus de pomme et les résidus d'oranges, respectivement) à ceux enregistrés dans notre étude. L'utilisation de la méthode de mesure de la dégradabilité *in situ* et d'une autre espèce d'animal donneur peut justifier ces dissimilitudes. Delavar et *al.* (2014) ont noté après 24 h d'incubation *in vitro* des graines et d'écorces de grenades, des coques de noix, des coques d'amande et du marc de pomme que ce dernier possède le pourcentage de dégradabilité le plus fort (74 %). Toutefois, cette valeur reste bien inférieure à celle de notre étude. Delavar et *al.* (2014) ont attribué la haute dégradabilité des sous-produits de pommes à leur faible teneur en tannins.

Quant aux sous-produits de la tomate, ils présentaient le plus faible taux de dégradabilité (86,2 %) parmi les sous-produits, ce qui peut être associé à leur composition pariétale très proche de celle des aliments fibreux. Des valeurs élevées d'NDF, d'ADF et d'ADL peuvent entraîner une faible dégradabilité et induire une faible consommation (Chumpawadee et *al.*, 2009). Leur contenu en matière grasse (1,66 %) peut également diminuer leur taux de dégradation. Silva et *al.* (2013) signalent qu'une teneur élevée en NDF et en extrait étheré diminue la dégradabilité des régimes alimentaires, entraînant une défaunation (disparition des protozoaires) du rumen, en raison de l'action délétère des acides gras insaturés. Les résultats obtenus pour les résidus de tomates sont largement supérieurs à ceux enregistrés par Valizadeh et Sobhanirad (2009) et Mahersis et *al.* (2012). Ces auteurs, en étudiant la dégradabilité des résidus de tomates *in situ*, notent une dégradabilité de la MS de 54 % chez les vaches (Valizadeh et Sobhanirad, 2009), et de 40 % chez les moutons (Mahersis et *al.*, 2012).

En raison de leur nature et leur structure fibreuses le *Chrysanthemum coronarium* et le *Silybum marianum* ont été les substrats les moins dégradés (dégradabilité apparente : 49,6 % et 54,6 %, respectivement) par la flore ruminale de dromadaire. Amrani (2006) et Valente et *al.* (2003) ont rapporté des taux de dégradabilité apparente semblables à nos résultats, estimés à 54 et 51 % respectivement, pour les chrysanthèmes et les cardes.

L'association des SPIAA aux plantes fibreuses a significativement amélioré le pourcentage de dégradabilité apparente avec des taux allant de 13% pour la mixture SPO + foin à 52 % pour la mixture SPO + chrysanthèmes. Selon Silva et Orskov (1988), la présence d'une source de cellulose et d'hémicelluloses facilement fermentescibles dans le régime

Résultats et discussion

alimentaire augmente le nombre de microorganismes fibrolytiques, stimulant la digestibilité des autres sources de fibres moins dégradables.

Le taux d'augmentation de la dégradabilité le plus importants a été enregistré lorsque les SPO ont été associé aux chrysanthèmes en allant de 49,6 % pour les chrysanthèmes seuls à 75,4 % pour le mélange SPO + chrysanthèmes (tableau 16). Les mixtures des résidus d'oranges avec les cardes et le foin ont également enregistré un accroissement de la dégradabilité mais avec des taux moins important (32 et 13 % respectivement). Hernandez et *al.* (2012) confortent nos résultats et rapportent que la dégradabilité *in vitro* de la matière sèche et organique a été améliorée avec l'inclusion de niveaux croissants des sous-produits d'agrumes dans le régime alimentaire. Dans les rations basées sur des fourrages de faible digestibilité (foin ou paille) ou des fibres (ensilage de maïs ou de sorgho), la pulpe d'agrumes semble avoir un effet positif sur la digestibilité des fibres, peut-être en raison d'un temps de rétention plus long dans le rumen (Arthington et *al.*, 2002).

Les mélanges des résidus agro-alimentaires avec le foin de la vesce-avoine se démarquent par leurs pourcentages de dégradabilité supérieurs aux autres mélanges et statistiquement comparable à celui des SPT seuls. Cela peut être expliqué par deux hypothèses: la première implique la composition pariétale du foin renfermant moins de fibres par rapport aux autres fourrages et la seconde implique la parfaite adaptation du microbiote ruminal à sa dégradation car ce fourrage est l'aliment le plus couramment donné aux ruminants d'élevage en Algérie et est le plus communément utilisé comme aliment de référence.

Les polymères végétaux ont été presque complètement dégradés parce qu'ils présentent des particules très fines qui sont rapidement fermenté ou sont éliminées non fermenté du sac en nylon lors du lavage.

Enrichissement en protéines des sous- produits agroalimentaires et de leurs mélanges

1- Effet du substrat sur la concentration en ammoniac sur le bilan protéique, le bilan CNS, la perte en MS et le pH ruminal

1-1- Teneur en ammoniac

Les teneurs en ammoniac après fermentation des sous-produits et de leurs mixtures sont présentées dans le tableau 18. La production de l'ammoniac issue de la dégradation des sous-produits est plus élevée pour les épiluchures de tomates (SPT : 46,05 mg/l). Les résidus d'oranges (SPO) ont produit une quantité d'ammoniac beaucoup plus faible (16,51 mg/l), soit trois fois inférieure. Yuangklang *et al.* (2010) en substituant la farine de soja par la pulpe de tomate séchée, dans le régime alimentaire des chèvres, ont noté une augmentation de la concentration de l'ammoniac et du pH du contenu ruminal. Madrid *et al.* (2002) ont enregistré une teneur en NH₃ similaire à celle de notre étude, en incubant les épiluchures d'oranges durant 12 h (16 mg/l). Toutefois, cette teneur a augmenté au fil du temps. D'autres auteurs ont apporté pour les résidus d'oranges, des valeurs relativement supérieures à ceux notés dans notre expérience (Piquer *et al.*, 2009).

Les faibles concentrations en NH₃ observées avec les SPO, comparativement aux SPT, peuvent être dues à l'origine de leur faible teneur en protéines brutes. Un résultat similaire a été apporté par Oh *et al.* (2008) et Belanche *et al.* (2012), qui notent que les concentrations de l'ammoniac dans le rumen étaient nettement plus faibles lorsque les bovins consomment des régimes alimentaires faibles en protéines comparés à des régimes riches en protéines. Gutteridge et Shelton (1994) suggèrent que les aliments contenant moins de 8 % de protéines brute ne peuvent fournir les teneurs minimales en ammoniac requises. Hoover et Stokes (1991) ont fixé l'exigence de 14 à 15 % de protéines pour répondre aux exigences azoté de la microflore ruminale. Par ailleurs, Paengkoum *et al.* (2019), ont rapporté que 10 % de PB sont en mesure de répondre aux besoins nutritionnels des animaux et 6,5 % de RDP (protéines dégradables dans le rumen) fournissent un apport d'azote suffisant pour satisfaire les exigences de croissance des microorganismes du rumen. Sur la base d'une étude menée avec des niveaux variables de RDP, Fu *et al.* (2001) ont rapporté qu'en présence d'une teneur en N-NH₃ adéquate (>2 mg/dl), l'exigence en protéine vraie dégradable dans le rumen peut être aussi faible que 3,5 % MS sans effets négatifs sur l'efficacité microbienne. Les mêmes auteurs ont conclu que les régimes doivent être formulés à la fois pour les RDP et N-NH₃ afin de maximiser la croissance et l'efficacité microbienne.

Résultats et discussion

D'autre part, le taux et la quantité d'ammoniac produite dans le rumen reflètent la solubilité et la dégradabilité des protéines alimentaires (Huntington et Archibeque, 2000). Plusieurs études (Ventura *et al.*, 2009 ; Champawadee *et al.*, 2009 ; Fondevila *et al.*, 1994) ont signalé de faibles valeurs de dégradabilité (20, 34 et 37 % successivement) des protéines brutes du fruit et du sous-produits de la tomate dans le rumen. Ce résultats était justifié par la forte lignification de ces sous-produits (près de la moitié de la protéine de la tomate est liée à l'ADF) (Ventura *et al.*, 2009). En outre, Yuangklang *et al.* (2010) ont noté que l'intégration des sous-produits de tomates dans les rations alimentaires entraînait une diminution de la digestibilité apparente de la protéine brute. En revanche, Bampidis *et al.* (2006) ont rapporté une biodégradabilité ruminale de 59,1 à 70,04 % des protéines brutes des sous-produits d'agrumes. D'autres études rapportait une teneur plus élevée en RDP (protéines dégradables dans le rumen) pour les sous-produits d'orange (9,71 % ; Palangi *et al.*, 2013) que pour les sous-produits de tomates (2,92 % , Rahbapour *et al.*, 2012).

Par ailleurs, l'utilisation de l'ammoniac pour la synthèse des protéines microbiennes est étroitement liée à la quantité d'énergie fermentescible produite par la fermentation des glucides (Cabrita *et al.*, 2006; Hristov et Ropp, 2003). Il est également rapporté que l'augmentation des hydrates de carbones facilement fermentescibles dans la ration favorise la croissance microbienne et diminue les perte d'azote sous forme d'azote ammoniacal (Getachew *et al.*, 2000 ; Estrada-Liévano *et al.*, 2009)

D'après ces constats, on suggère que la faible concentration en NH_3 enregistrée avec les SPO est due à une bonne assimilation et incorporation de l'azote ammoniacal issu de la dégradation de ces résidus riche en glucides facilement dégradables. Nos données sont en accord avec la théorie selon laquelle la concentration plus faible de N-NH_3 dans le rumen est corrélée avec une utilisation plus élevée de N-NH_3 pour la synthèse des protéines microbiennes (Seo *et al.*, 2013 ; Nagadi *et al.*, 2000). L'estimation du gain en protéines marquée à la fin de la fermentation est en accord avec ces résultats.

Piquer *et al.* (2009) renforcent nos suggestions et associent la faible quantité de N-NH_3 produite par les régimes à base de sous-produits d'agrumes, au taux de fermentation et à la croissance microbienne plus élevés lors de l'alimentation avec ce résidu. En raison de l'apport plus important et plus rapide de glucides pour la croissance microbienne dans le rumen, une capture plus efficace de N-NH_3 aurait pu se produire (Nocek et Russel, 1988). Par ailleurs, Wallace (1996) a indiqué que le catabolisme des peptides peut conduire à une production

Résultats et discussion

excessive d' NH_3 si l'énergie fournie est insuffisante ou si le taux de dégradation des peptides est supérieur au taux d'utilisation des acides aminés pour la synthèse des protéines microbiennes. Plusieurs autres auteurs ont suggérés une meilleure synchronisation de l'énergie et de l'azote dans le rumen, avec une augmentation de l'assimilation de l'azote et une diminution de la production de l'ammoniac, lors de la fourniture d'aliments riches en énergie facilement fermentescible (Hristov *et al.*, 2005 ; Belanche *et al.*, 2012 ; Seo *et al.*, 2013).

Les mélanges 50:50 avec les cardes ont montré la même tendance, le mélange SPT + cardes (29,99 mg/l) a enregistré une valeur en ammoniac statistiquement supérieure du mélange SPO + cardes (20,82 mg/l) (tableau 18). D'après ce résultat, il est à noter que l'ajout des cardes aux SPT a divisé la teneur en ammoniac presque de moitié, ce qui peut être associé soit à une inhibition de la dégradation des protéines de la mixture SPT + cardes due à la nature fibreuse et ligneuse de cette plante, soit à l'utilisation plus efficace de l' N-NH_3 par la microflore ruminale, car les bactéries du rumen fermentant les fibres utilisent exclusivement l'azote provenant de l'ammoniac (Hristov et Ropp, 2003). La teneur en protéines enregistrée à la fin de l'incubation montre qu'il est susceptible de faire prévaloir la première hypothèse. L'association des cardes aux SPO n'a montré aucun effet sur la production de l'ammoniac, mais leur effet est apparu en diminuant l'utilisation de l' N-NH_3 pour la synthèse de nouvelles protéines.

Globalement les sous-produits et les mélanges étudiés dans notre expérience présentent des concentrations en N-NH_3 inférieures à la concentration adéquate (50 mg/l) préconisée par Satter et Slyter (1974) pour assurer une synthèse maximale des protéines microbiennes *in vitro*. La concentration limite précise est peut-être plus proche de 20 mg N-NH_3 /l. Les teneurs en ammoniac enregistrés sont encore beaucoup plus éloignées de la concentration 80 mg N/l, étant nécessaire pour obtenir une dégradation maximale des carbohydrates par les microorganismes du rumen (Dryhurst et Wood, 1998). Toutefois, Belanche *et al.* (2012) ont constaté que certaines bactéries non cellulolytiques présentaient une saturation en ammoniac relativement constante, ce qui leur permet de piéger et d'incorporer l'ammoniac même lorsque il est présent à de faibles concentrations.

1-2- Gain en protéines

Un gain en protéines significativement ($p < 0.001$) différent est noté entre les substrats et leurs mélanges. Malgré une teneur en protéines initiales beaucoup plus importante pour les résidus de tomates par rapport à celles d'oranges, un gain en protéines de 8,36 g/100 g de MO soit un apport de 75 % est noté avec les sous-produits d'oranges (tableau 18). Ce gain pourrait être attribué à la prolifération d'organismes microbiens qui utilisent l'azote du milieu de fermentation pour la synthèse de nouvelles protéines microbiennes. La sécrétion possible de certaines enzymes extracellulaires peut éventuellement influencer la teneur en protéines (Oboh, 2006). Certaines études suggèrent que la présence de sources de glucides rapidement fermentescibles améliorerait la croissance microbienne et la dégradabilité des aliments (Zicarelli et al. 2011), même en présence d'un apport en N sous-optimal en raison de l'adaptation des populations microbiennes du rumen (Belanche et al. 2012; Guadagnin et al. 2013).

Un résultat positif sur le rendement en protéines a été enregistré par d'autres chercheurs par la fermentation de sous produits de manioc par le filtrat du liquide ruminal (Adeyemi et al., 2007; Chumpawadee et Soychuta, 2009). Ces auteurs ont montré que les microorganismes du rumen ont un haut potentiel de production de protéines microbiennes en comparant la teneur en protéines obtenu avec le résidu naturellement fermenté et celui fermenté avec le microbiote ruminal (Chumpawadee et Soychuta, 2009).

En revanche, une perte en protéines est enregistrée avec les sous-produits de tomates (-0,57 mg/100g MS soit 3 %) (tableau 18). Cette perte est probablement le résultat de la dégradation des protéines de ce substrat en ammoniac par les microorganismes protéolytiques du rumen, sans pouvoir le réassimiler pour produire de nouvelles protéines. Suite à une diminution de la teneur en protéines dans la composition de lait de vache laitière, Yuangklang et al., (2005, 2007) ont suggéré une diminution de la fermentation ruminale et de la prolifération microbienne en substituant les tourteaux de soja par la pulpe de tomate séchée. Des études complémentaires (Yuangklang et al., 2010) ont affirmé que l'incorporation de différentes quantités de résidus de tomates dans la ration alimentaire de bovins influence la fermentation dans le rumen et le métabolisme azoté, mais aucun effet sur le nombre de bactéries et de protozoaires dans le liquide ruminal n'a été détecté.

Tableau 18: Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des substrats et de leurs mélanges ainsi que l'effet du substrat sur ces paramètres.

Substrat	NH3 (mg/l)	protéines initiales (g/100g MO)	Protéines finales (g/100g MO)	Gain en protéines (g/100g MO)	perte en soufre (% MS)	perte en azote (% MS)	Perte en carbone (% MS)	Perte en MS (%)	pH final
Résidus de tomates	46,05 ^a	16,93 ^a	16,35 ^b	-0,57 ^c (p)	-6,87 ^d (g)	-2,13 ^b (g)	0,64 ^a	4,62 ^a	5,91 ^b
Résidus de tomates-carde	29,99 ^b	11,53 ^b	10,34 ^d	-1,18 ^c (p)	27,81 ^b	-6,29 ^b (g)	-1,70 ^a (g)	0,62 ^a	6,42 ^a
Résidus d'orange	16,51 ^c	11,17 ^b	19,54 ^a	8,36 ^a	16,62 ^c	9,85 ^a	2,68 ^a	3,44 ^a	4,69 ^d
Résidus d'orange -carde	20,82 ^c	9,24 ^c	13,12 ^c	3,87 ^b	36,69 ^a	-0,93 ^b (g)	-2,08 ^a (g)	3,89 ^a	5,82 ^c
Effet substrat	***	***	***	***	***	***	ns	ns	***

^{a,b,c,d} les moyennes dans la même colonne affectées de lettres différentes sont significativement distinctes ($P < 0,05$) ; ns : non significatif.

(p) : perte ; (g) : gain

* : $p < 0,05$

** : $p < 0,01$

*** : $p < 0,001$

Résultats et discussion

Etant donné que la quantité de l'azote ammoniacal transformée en protéines bactériennes dépend surtout de la quantité d'énergie générée par la fermentation des hydrates de carbone, et que son taux de libération doit correspondre aussi étroitement que possible à la libération de l'énergie (effet de synchronisation) pour une synthèse protéique maximale (Chumpawadee et *al.*, 2006; Sinclair et *al.*, 1995), il semble que le taux de dégradation des protéines des SPT dépasse le taux de fermentation de ses carbohydrates, ce qui a conduit à un excès en NH_3 et une perte en protéines (tableau 18). Selon Brooks (2010) lorsque les protéines dégradées dans le rumen dépassent les besoins microbiens en fonction de l'approvisionnement en énergie disponible, la situation peut être considérée comme une surcharge d'azote. Cela conduit au catabolisme des sources d'azote, de sorte que les microorganismes peuvent utiliser les réseaux de carbone des acides aminés comme substrats énergétiques. Ce qui conduit à une augmentation de la production d'AGV sans augmentation de l'acide lactique et l'accumulation de NH_3 dans le rumen (Brooks, 2010).

Ben Salem et Znaidi (2008) confortent nos suppositions et suggèrent la nécessité d'un enrichissement énergétique en blocs alimentaires à base de pulpe de tomates pour une utilisation plus efficace de l'azote de ce résidu.

L'effet de l'association des sous-produits avec la plante fibreuse *Sylibum marianum* (cardes) montre une diminution du gain en protéine de 53,71 % pour la mixture SPO + cardes. À son tour, le taux de perte en protéines a augmenté de plus de 51% en allant de -0,57 mg/100 mg MO pour les SPT à -1,18 mg/100 mg MO pour la mixture SPT + cardes. Cet effet est lié à la teneur en fibres relativement élevée des cardes et à leur faible taux de dégradation par la flore du rumen. Ainsi, leur mélange avec les sous-produits d'oranges et de tomates a entraîné une chute des taux de dégradation de ces carbohydrates (résultats première partie), ce qui a entraîné probablement une carence d'énergie nécessaire pour la prolifération microbienne. Hoover et Stokes, (1991) ont rapporté que le taux du métabolisme microbien de l'azote dépend des taux de fermentation des hydrates de carbone. La fermentation dans le rumen peut être plus limitée par la disponibilité des hydrates de carbone ou des protéines que par le degré de synchronisation (Rotger et *al.*, 2006). Un apport énergétique suffisant provenant d'une source de glucides rapidement fermentescible peut permettre l'incorporation efficace de peptides, d'acides aminés libres et/ou d'azote ammoniacal dans les cellules microbiennes (Seo et *al.*, 2013).

Résultats et discussion

Une étude réalisée par Czerkawski et *al.* (1976) montre que les ovins nourris avec un régime composé d'un mélange de foin et de concentré avaient une croissance microbienne plus élevée dans le rumen par rapport à ceux nourris avec le concentré et le foin séparément. Pathak (2008) rapportait que l'efficacité de la synthèse des protéines microbiennes est plus élevée dans les régimes à base de mélange fourrage-concentré que pour les régimes à base de fourrages seul. Cela pour deux principales raisons : la première est que les sucres solubles et l'amidon fournissent des niveaux élevés d'ATP dans les premières heures de fermentation, mais ils ne fournissent que très peu d'ATP pour la croissance microbienne après 4 heures d'alimentation. À ce moment, la dégradation de la cellulose et de l'hémicellulose commence et continue pendant une longue période, procurant de l'ATP pour la croissance microbienne ultérieure. La seconde est qu'un environnement ruminal enrichi par plusieurs types de carbohydrates favorise la croissance de diverses espèces bactériennes. La synthèse de la protéine microbienne est améliorée en faisant varier la source et la dégradabilité de l'énergie incorporée dans l'alimentation (Sinclair et *al.*, 1995). Les régimes contenant un mélange de fourrages et de concentrés augmentent la synthèse de protéines microbiennes en raison d'une amélioration de la synchronisation de la libération des nutriments, d'un environnement ruminal plus riche en espèces bactériennes variées, d'une augmentation des quantités et des types de substrats utilisés, d'une consommation accrue et ainsi d'une augmentation du taux de passage dans le rumen (Pathak, 2008).

La synthèse des protéines microbienne dépend d'un apport adéquat en énergie mais aussi en azote. La teneur faible des cardes en matières azotées totales peut également limiter la prolifération microbienne, plus particulièrement dans le cas des sous-produits d'oranges qui sont pauvres en protéines. Une expérience menée par Villareall et *al.* (2006) révèle que la supplémentation de la ration de bovins par des niveaux élevés de pulpe d'agrumes augmente l'apport énergétique mais une telle supplémentation pourrait être plus bénéfique lorsque les résidus d'agrumes sont en combinaison avec des fourrages riches en protéines dégradables dans le rumen.

1-3- Bilan du carbone, de l'azote et du soufre

Les résultats des pourcentages de perte en carbone, en azote et en soufre figurent dans le tableau 18. Le carbone est perdu avec les deux résidus incubés seuls avec des proportions de 2,68 % et 0,46 % pour les sous-produits d'oranges et de tomates respectivement. Lorsque

Résultats et discussion

ces derniers ont été incubés avec les cardes, on note un gain en carbone de 2,08 % avec les SPO + cardes et 1,70 % avec les SPT + cardes. Les valeurs de perte ou de gain en carbone enregistrés avec les quatre aliments diffèrent légèrement et l'étude statistique les considère non significativement différentes. La diminution des pertes en carbone lorsque les résidus sont en mixtures peut être associée à la nature lignocellulosique des cardes qui sont dégradées beaucoup plus lentement. En général le carbone est perdu sous forme de gaz (CO_2 et CH_4) et d'acides gras volatils qui sont les principaux produits de la fermentation microbienne ruminale. Le carbone est aussi utilisé pour synthétiser de la biomasse microbienne riche en protéines. La fixation du carbone dans la cellule microbienne peut diminuer les pertes de carbone sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane (Blummel *et al.*, 1999).

Le type de substrat (résidus de tomates, résidus d'oranges ou leurs mélanges binaires avec les cardes) a présenté un effet significatif sur le pourcentage de perte en azote. L'azote n'est perdu qu'avec les sous produits d'oranges (9,85 %), cependant un gain en azote est noté pour les trois autres aliments avec des pourcentages allons de 0,93 à 6,29 % pour les mélange SPO + cardes et SPT + cardes, successivement. Les pertes d'azote se font sous forme d' NH_3 volatilisé. L'augmentation de l'azote est due à sa concentration engendrée par le développement de nouvelles cellules microbiennes. Le gain en protéines enregistré à la fin de la fermentation contredit ces résultats. Toutefois, un gain en azote très important a été noté avec les SPO en calculant le bilan azoté sur la base des résultats du dosage des protéines et de l'ammoniac (résultats non présentés) en comparaison au bilan azoté obtenu par l'analyse élémentaire.

Le carbone et l'azote sont deux éléments nécessaires en tant que source d'énergie et d'azote pour la croissance des micro-organismes. Un rapport C/N allant de 20 à 30 avec un optimum de 25 est le niveau recommandé dans le processus de digestion anaérobie pour une croissance microbienne maximale (Li *et al.*, 2011). Un rapport C/N proche de l'optimal a été enregistré avec le milieu d'incubation contenant les SPO seuls (C/N= 27) ou la mixture SPT + cardes (C/N=27). En revanche, un rapport C/N plus haut ou plus faible a été noté avec la mixture SPO+carde (C/N=31) et les SPT (C/N=17) (Tableau 20). Selon Noviadi *et al.* (2017) un faible rapport C/N ou une teneur élevée en N augmentera les émissions de l'azote sous forme d'ammoniac. Alors qu'une teneur en éléments C/N élevée ou relativement faible ralentit le processus de fermentation en raison de la diminution de la production d'enzymes microbiennes.

Résultats et discussion

Les coefficients moyens de **disparition du soufre** varient d'un résidu à un autre. Les deux sous produits ont perdu des quantités plus élevées quand ils ont été fermentés en combinaison avec 50 % de cardes (36,69 et 27,81 % pour les mélanges SPO + cardes et SPT + cardes respectivement). Les sous produits d'oranges perdent jusqu'à deux fois de moins de soufre que leur mélange (16,62 %). Toutefois les résidus de tomates seuls se comportent différemment, ils présentent un gain en soufre de 6,87 %. Ce gain peut être attribué à l'incorporation du soufre dans les acides aminés soufrés.

Tableau 19 : Ratio C/N et N/S des milieux d'incubations contenant les sous-produits d'oranges, les sous-produits de tomates et leurs mélanges avec les cardes

	C/N initial	C/N final	N/S initial	N/S final
Résidus d'oranges	27	30	15	21
Résidus d'oranges + cardes	31	30	12	33
Résidus de tomates	17	17	10	10
Résidus de tomates + cardes	24	23	11	23

Les microorganismes du rumen sont capables d'utiliser le soufre inorganique pour synthétiser les acides aminés soufrés, qui seront incorporés par la suite dans les protéines microbiennes. Un rapport N/S qui se situe entre 10: 1 et 15: 1 est enregistré pour les sous-produits et les mélanges de cette étude. Ces valeurs se situent dans la gamme de 9 à 16 citée dans la littérature comme valeur nécessaire pour un bon fonctionnement de la protéosynthèse. Un ratio N: S de 14.5: 1 est rapporté par Silva et *al.* (2014) comme valeur optimale pour une synthèse protéique maximale. D'après ces résultats, on peut dire que dans cette étude le soufre ne constitue pas un facteur limitant la croissance microbienne.

La disponibilité du soufre dans la ration devient plus importante lorsque la ration est enrichie en azote non protéique. Le soufre est également nécessaire pour éviter la diminution de la digestibilité des aliments et pour augmenter la rétention de l'azote. Promkot et Wanapat (2009) ont montré que l'ajout du soufre à la ration alimentaire des vaches laitières engendre une amélioration de la digestibilité, de la capacité de rétention d'azote, de la synthèse protéique microbienne dans le rumen et de la teneur en protéines laitières. Mcsweeney and Denman (2007) ont confirmé par des méthodes de biologie moléculaire *in vitro* et *in vivo* la

Résultats et discussion

stimulation de la croissance de la biomasse microbienne et fongique par l'addition de soufre, ainsi qu'une augmentation de l'activité fibrolytique et protéosynthétique de ces micro-populations.

1-4- Perte en matière sèche

Les deux sous produits ont perdu des quantités similaires de matière sèche quand ils ont été fermentés individuellement ou en combinaison avec 50 % de cardes. Les pertes en matière sèche sont faibles, elles s'échelonnent entre 0,62 (SPT + cardes) à 4,62 % (SPT). Il est communément connu que les variations de la perte en matière sèche sont liées aux différences de composition chimique ou aux variations de la structure physique, telles que la distribution des cellules lignifiées dans les tissus. Ainsi, il était plus raisonnable d'avoir une bonne efficacité dans la dégradation de la MS lorsque les sous-produits d'oranges sont fermentés, comme ils sont les résidus les plus fermentescibles. Toutefois, le gaz produit par la fermentation des résidus de tomates était plus élevé que le volume de gaz obtenu avec la pulpe d'orange (Moro, 2011). Ce résultat peut être lié à l'incorporation du carbone pour la production de la biomasse microbienne. Blummel et *al.* (1997) ont rapporté une relation négativement proportionnelle et hautement significative entre la production de gaz et le rendement en biomasse microbienne. Selon Gozho et Mutsvangwa (2008), la cinétique de dégradation des aliments dans le rumen est fonction de la nature et des constituants de l'aliment. Toutefois, l'utilisation de cette information pour manipuler la synthèse des protéines microbiennes ne donne pas toujours la réponse attendue.

Les faibles coefficients de disparition de la MS notés dans cette expérience signifient que les doses du liquide ruminal inoculés (5 ou 30 ml) pour la fermentation n'étaient pas suffisantes pour permettre la dégradation de 2 g de substrat.

1-5- Détermination du pH

D'une manière générale, les variations des pH des différents substrats seuls ou en mélanges sont importantes et hautement significatives ($p < 0.0001$). Les SPO présentent un pH acide (4,69) comparativement aux SPT qui ont un pH (5,91) qui tombe dans la gamme optimale de pH (5,8 à 6,4) préconisée pour une synthèse maximale de protéines microbiennes (Ishler, 1996). Toutefois, un faible pH ruminal peut diminuer la dégradation des protéines. Le pH élevé enregistré avec les épiluchures de tomates peut résulter de la concentration de

Résultats et discussion

l'ammoniac plus élevée notée avec ces résidus, ainsi qu'à leur capacité tampon relativement importante.

Compte tenu de leur capacité tampon et leur teneur en fibres considérablement élevée, l'ajout des cardes aux résidus agro-alimentaires tamponne le milieu de culture en améliorant les valeurs des pH à 5,82 et 6,42 pour le mélange SPO + cardes et SPT + cardes, successivement. L'augmentation du pH ruminal est principalement liée au taux de fermentation plutôt qu'à la croissance bactérienne et à la synthèse des protéines (Yuangklang et *al.*, 2010).

2- Effet de la source d'azote et de la dose d'inoculum sur la concentration en ammoniac, le bilan protéique, le bilan CNS, la perte en MS et le pH ruminal

L'effet des différentes sources d'azote (organique et inorganique) a été étudié pour rechercher la source d'azote appropriée qui maximalise le rendement en protéines. Une synthèse protéique est enregistrée avec les deux sources d'azote testées (NH₄HCO₃ pour le Milieu Menke et l'urée pour milieu simplifié), toutefois elle est plus élevée avec le milieu simplifié qu'avec le milieu Menke, 30,7 contre 19,1 % et 9,8 contre 5,2 % pour le MSN1, MMN1, MSN2 et MMN2 respectivement (p<0,005) (tableau 20). Le milieu simplifié se présente comme le milieu le plus efficace et qui favorise mieux la croissance microbienne. Cela est dû probablement à la composition de ce milieu, qui englobe l'urée comme source d'azote. L'urée est hydrolysée en NH₃ qui sera utilisée par les microorganismes pour produire de nouvelles protéines, et comme la majorité de la flore ruminale a une affinité pour l'ammoniac cela conduit à une meilleure utilisation de l'azote et une hausse synthèse protéique. Plusieurs auteurs ont enregistré que l'ajout de l'urée aux aliments pour bétail entraîne une digestibilité accrue (Demirel et *al.*, 2003), un accroissement de la dégradation ruminale des aliments et de leurs teneurs en protéines brutes solubles (Rahbarpur et *al.*, 2013), ainsi qu'une augmentation de la synthèse protéique microbienne (Boucher et *al.*, 2007).

Parmi les deux doses d'inocula étudiés (5 ml et 30 ml), la dose la plus faible a donné le rendement maximum en protéines avec les deux milieux de fermentation. Le MSN1 apporte trois fois plus de protéines que le MSN2. Le milieu Menke répond de la même manière et montre un rendement en protéines quatre fois de plus pour le MMN1 par rapport

Tableau 20 : Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des substrats et de leurs mélanges ainsi que l'effet de la source d'azote et de la dose de l'inoculum sur ces paramètres.

Milieu	NH3 (mg/l)	protéines initiales (g/100g MO)	Protéines finales (g/100g MO)	Gain en protéines (g/100g MO)	perte en soufre (%)	perte en azote (%)	Perte en carbone (%)	Perte en MS (%)	pH final
MMN1	24,48 ^b	9,31 ^c	11,51 ^d	2,2 ^b	19,61 ^a	-3,26 ^a (g)	-6,25 ^b (g)	2,19 ^a	5,99 ^a
MMN2	30,86 ^a	15,71 ^b	16,58 ^b	0,86 ^b	16,64 ^a	3,26 ^a	10,62 ^a	3,57 ^a	5,54 ^c
MSN1	30,89 ^a	9,36 ^c	13,51 ^c	4,15 ^a	19,66 ^a	-2,54 ^a (g)	-3,60 ^b (g)	2,05 ^a	5,95 ^b
MSN2	35,08 ^a	16,6 ^a	18,4 ^a	1,8 ^b	17,25 ^a	4,25 ^a	-0,16 ^b (g)	4,88 ^a	5,33 ^d
Effet milieu	**	***	***	*	ns	ns	***	ns	***

a,b,c,d les moyennes dans la même colonne affectées de lettres différentes sont significativement distinctes ($P < 0,05$) ; (g) : gain ; ns : non significatif.

* : $p < 0.05$

** : $p < 0.01$

*** : $p < 0.001$

MMN1 : 55 ml du milieu Menke + 5 ml d'inoculum

MMN2 : 30 ml du milieu Menke + 30 ml d'inoculum

MSN1 : 55 ml du milieu simplifié + 5 ml d'inoculum

MSN2 : 30 ml du milieu simplifié + 30 ml d'inoculum

Résultats et discussion

au MMN2. Avec une concentration plus élevée d'inoculum, les nutriments contenus dans le milieu de croissance peuvent être consommés plus rapidement se qui peut entraîner une réduction du rendement de la biomasse cellulaire. Le suivi de la production cumulée de gaz affirme ce constat. Moro (2011) a enregistré une diminution significative ($p = 0,007$) de la production de gaz lors de la combinaison d'une dose élevée de liquide ruminal par rapport à la dose réduite (146 contre 135 ml/ 2 g MS, respectivement).

En outre, le pH à la fin de l'incubation était plus élevé lorsqu'on utilisait une faible dose d'inoculum. En présence d'une forte dose d'inoculum le pH devient plus acide (MMN2 : 5,5 ; MSN2 : 5,3). Cet effet peut être dû à la présence d'un nombre plus important de microorganismes, qui utilisent rapidement les carbohydrates du milieu et libèrent des AGV qui acidifie le milieu de culture, réduit le pH et entraîne ainsi des effets négatifs sur l'activité de certaines souches microbiennes.

Les pertes en azote, en soufre et en matière sèche n'ont pas été affectées par la dose et le type du milieu de fermentation. La perte en carbone est plus élevée avec le MMN2 se qui peut signifie une forte libération de gaz et une faible production de biomasse microbienne. Le faible rendement en protéines noté en utilisant le MMN2, en comparaison aux autres milieux d'incubations, rend cette hypothèse plus susceptible.

Globalement, le milieu classique Menke avait une plus grande capacité à tamponner les variations de pH par rapport au milieu simplifié, comme le témoigne les valeurs de pH plus élevés enregistrés avec le MMN1 comparativement au MSN1 et le MMN2 comparativement au MSN2. Toutefois, il est à signaler que tous les pH finaux enregistrés sont faibles et reflètent l'incompatibilité des systèmes tampons utilisés.

3- Effet de la re-fermentation sur la concentration en ammoniac, le bilan protéique, le bilan CNS, la perte en MS et le pH ruminal

Tous les paramètres ont été significativement affectés par la fermentation répétée. La concentration en ammoniac augmente en allant de la première à la deuxième fermentation. Ce résultat peut être justifié par une activité protéolytique plus intense de la microflore du liquide ruminal préalablement fermenté. En étudiant l'effet de la pré-incubation du liquides ruminal sur l'activité protéolytique *in vitro*, Velásquez et Pichard (2010) ont comparé l'activité

Tableau 21 : Teneur en ammoniac, gain en protéines, bilan CNS, perte en MS et pH finaux des substrats et de leurs mélanges ainsi que l'effet de la re-fermentation sur ces paramètres

Fermentation	NH3 (mg/l)	protéines initiales (g/100g MO)	Protéines finales (g/100g MO)	Gain en protéines (g/100g MO)	perte en soufre (%)	perte en azote (%)	Perte en carbone (%)	Perte en MS (%)	pH final
1	25,65 ^b	10,87 ^c	16,91 ^a	6,04 ^a	18,83 ^a	-1,71 ^b	6,73 ^a	0,98 ^b	5,81 ^a
2	35,81 ^a	14,11 ^a	15,67 ^a	1,56 ^b	11,49 ^b	-4,98 ^b	-8,68 ^b	-2,42 ^b	5,67 ^b
3	29,68 ^b	13,32 ^b	12,47 ^b	-0,85 ^c	24,11 ^a	7,11 ^a	1,48 ^a	12,29 ^a	5,63 ^c
Effet re-fermentation	***	***	***	***	*	**	***	***	***

^{a,b,c,d} les moyennes dans la même colonne affectées de lettres différentes sont significativement distinctes ($P < 0,05$) ; (p) : perte ; (g) : gain ; ns : non significatif.

* : $p < 0,05$

** : $p < 0,01$

*** : $p < 0,001$

Résultats et discussion

protéolytique d'extraits enzymatiques obtenus à partir de liquide ruminal frais directement après la collecte, ou après une incubation dans des milieux enrichis en énergie et en N. Les résultats ont montré que la pré-incubation *in vitro* du liquide ruminal a permis la collecte d'extraits enzymatiques ayant une activité protéolytique supérieure à celle d'extraits obtenus à partir de liquide ruminal frais. Cet effet s'est produit pour la vitesse et l'étendue de la dégradation des protéines brutes. De ce fait, Velásquez et Pichard (2010) ont conclu que la stratégie de pré-incubation a permis d'obtenir une bonne répétabilité du test de protéolyse.

En revanche, la protéosynthèse a suivi une tendance opposée et la synthèse des protéines a diminué progressivement de la première (4,6 g/100g MO) à la troisième incubation (-0,85 g/100g MO) (tableau 21). Ceci suggère que l'activité des micro-organismes est en déclin au fil du temps. Malgré l'ajout d'une quantité importante de substrat et de liquide ruminal au début de chaque fermentation, la microflore ruminale ne peut plus en tirer profit pour croître et se multiplier. Plusieurs auteurs (Blümmel et *al.*, 1997; Makkar et Becker, 1999; Getachew et *al.*, 2000) ont noté que la production de gaz et des AGV était inversement liée à la quantité de protéines microbiennes et que lorsque le temps d'incubation augmente, la production de gaz augmente alors que la protéine microbienne diminue, à cause de la lyse microbienne. En outre, Cone et *al.* (1997), en incubant *in vitro* un substrat rapidement fermentescible (glucose pur), ont noté la poursuite de la production de gaz pendant des durées d'incubation prolongées (> 15 h), même si le substrat était complètement fermenté, et ont attribué ce résultat à une fermentation secondaire de la population microbiennes. Par conséquent, Blümmel et *al.* (1997) ont suggéré que la protéine microbienne doit être évaluée à des durées d'incubation spécifiques au substrat, plus courtes que les durées fixes (24 et 48 h), utilisées pour prédire la valeur énergétique des aliments. Plusieurs auteurs (Blümmel et *al.*, 2003; Grings et *al.*, 2005; Cattani et *al.*, 2012) ont suggéré la mesure de la croissance microbienne et des produits finaux de la fermentation dans le rumen (ammoniac, AGV) au moment où la moitié de gaz est produite (définie par «t_{1/2}»), car l'activité microbienne est maximale et la lyse microbienne est minimale à ce stade (Cattani et *al.*, 2013).

Par ailleurs, le taux de synthèse des protéines microbiennes dans le rumen est proportionnel à la quantité d'énergie disponible lors de la fermentation de la MO dans le rumen, à condition que les autres conditions soient favorables (Uddin et *al.*, 2016). La synchronisation de la fermentation des glucides dégradables et des protéines dégradables dans le rumen, la disponibilité de l'ammoniac, le pH et la vitesse de passage sont les facteurs majeurs affectant l'évolution et l'efficacité de la synthèse microbiennes dans le rumen (Fu et

Résultats et discussion

al., 2001). Dans notre expérience, le pH du milieu de fermentation semble être le principal facteur inhibant la croissance microbienne, il diminue hautement d'une fermentation à une autre (5,81 ; 5,67 ; 5,63 pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} fermentation). Cette chute du pH est causée par l'accumulation des AGV dans le milieu de fermentation. Le faible pH ruminal réduit l'efficacité de la croissance microbienne et inhibe la dégradation des fibres (Hoover, 1986). Ce constat nous oriente vers la supposition que l'augmentation de la production de l'ammoniac durant la deuxième fermentation est plutôt le résultat d'une inefficacité de l'intégration de l'azote ammoniacal pour la production de nouvelles protéines et /ou le résultat d'un catabolisme des cellules microbienne. Comme la fermentation c'est déroulée dans un système *in vitro*, la diminution de la synthèse protéique d'une incubation à une autre peut aussi être due à l'accumulation de certains produits toxiques qui inhibent la croissance bactérienne.

Les pertes en MS, en carbone, en azote et en soufre sont généralement plus élevées à la troisième fermentation. Un gain en carbone est enregistré durant la deuxième fermentation. Cela peut indiquer un ralentissement de la fermentation et ainsi une diminution de la libération des gaz ou une intégration du carbone dans de nouvelles cellules bactériennes. Une teneur en ammoniac plus importante est notée durant cette incubation, ainsi la liaison du CO₂ à l'ammoniac peut justifier en partie la diminution du gaz produit (Khazaal *et al.* (1995). Un gain en azote est noté au cours de la première et de la deuxième fermentation. Ce gain résulte probablement de la synthèse de nouvelles protéines. L'augmentation de la teneur en protéines au cours de ces deux fermentations confirme cette supposition.

Discussion générale

Discussion générale

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'aptitude de certains sous-produits de fruits et légumes à servir comme aliments alternatifs pour les ruminants et l'impact qu'ils produisent sur l'écosystème ruminal. Dans ce contexte trois sous-produits de l'industrie agroalimentaires comprenant les épluchures de tomates, la pâte d'oranges et les résidus de pommes sont étudiés à travers plusieurs aspects : 1/ la détermination de leurs caractéristiques physico-chimiques 2/ l'évaluation de leur potentiel nutritif par la mesure de leur digestibilité *in vitro* par la méthode de gaz-test lorsque ils sont fermentés seuls ou en mélanges avec trois plantes fibreuses (*Chrysanthemum coronarium*, *Silybum marianum* et le foin de la vesce avoine); 3/ l'étude de la possibilité de leurs enrichissement en protéines microbiennes en utilisant les microorganismes du rumen comme source d'inoculum, quatre milieux d'incubations différents par la source d'azote et/ou la dose d'inoculum et trois fermentations successives.

L'analyse chimique a montré que les sous-produits de l'industrie agroalimentaire (SPIAA) renferment des taux en sucres totaux beaucoup plus élevés en comparaison aux aliments fibreux. En revanche, ces derniers sont plus riches en fibres brutes, NDF, ADF, cellulose et hémicellulose. Parmi les sous-produits étudiés, les résidus de pommes et d'oranges sont les plus pauvres en fibres mais ils renferment plus de 77 % et 50 % de sucres totaux. Plusieurs auteurs (Lashkari et Taghizadeh, 2015 ; Tagliapietra et *al.*, 2015) ont signalé des teneurs importantes en pectine pour ces deux sous-produits. De ce fait et suite à leur contenu en sucres solubles ou insolubles mais facilement fermentescibles, on suppose que les résidus de pommes et d'oranges peuvent constituer un bon supplément énergétique dans la ration alimentaire des ruminant. Quant aux sous-produits de tomates, ils ont une composition pariétale intermédiaire entre celle des fourrages naturels et des sous-produits. Toutefois, ils sont relativement lignifiés, ce qui peut limiter leur valeur nutritive. Par ailleurs, les résidus de tomates se démarquent des autres substrats par une teneur modérément élevée en protéines (12,1 %), teneur qui est pratiquement quatre fois supérieure à l'aliment standard habituellement offert aux animaux d'élevage. De ce fait et vu que la littérature (Van Soest et *al.*, 1994) stipule une teneur minimale en MAT de 7-8 % de MS pour un bon fonctionnement du microbiote ruminal et une alimentation convenable des ruminants on peut envisager ce sous-produit comme un complément additif en azote avec des fourrages ou des résidus déficitaires en azote. Ce résidu a été utilisé efficacement comme source de protéines quant il est administré en mélanges avec des résidus de pommes (Abdollahzadeh et *al.*, 2010).

Discussion générale

D'une manière globale, la composition chimique est très distincte d'un substrat à un autre. Nos résultats montrent que les deux espèces végétales et le foin sont très riches en fibres mais moins en sucres solubles en comparaison aux sous-produits agro-alimentaires. Cette composition chimique différente conduit à une valeur nutritive différente, parce que la composition chimique est l'un des indices les plus importants de la valeur nutritive des aliments. La variation des composants chimiques des aliments peut entraîner une variation du volume de production de gaz *in vitro* (Maheri-Sis et al., 2008). Sur la base de ces résultats on peut conclure que les sous-produits et les aliments fibreux possèdent une composition chimique différente mais complémentaire. De ce fait, leur mixture peut conduire à la création d'aliments localement produits, équilibrés et riche en éléments nutritifs.

Les valeurs de la capacité tampon enregistrées dans cette expérience varient considérablement. Elles sont plus élevées avec les aliments fibreux. Les sous-produits et les mélanges binaires ont donné des valeurs inférieures mais statistiquement comparables aux capacités tampons des fourrages. Les polymères végétaux sont dotés d'un pouvoir tampon plus bas. Le *Sylibum marianum* a une capacité tampon relativement élevée, soit comparable au pouvoir tampon du mélange salive artificielle + liquide ruminal. Malgré leur pH initial relativement bas, les sous produits de tomates ont également montré une forte capacité tampon. Les sous-produits de pommes, d'oranges et les chrysanthèmes ont des capacités tampons inférieures à celle du foin. Le mélange des sous-produits aux aliments fibreux a variablement affecté les valeurs du pouvoir tampon selon le mélange effectué. Néanmoins, il est à noter que les mélanges contenant les cardes ou les résidus de tomates sont fortement tamponnés en comparaison aux autres mélanges. Les recherches antérieurement effectuées révèlent que le pouvoir tampon est principalement associé au contenu en sels organiques et en protéines (Plane et McDonald, 1960). La teneur en fibres et en matière minérale semble également jouer un rôle important dans le système tampon. Quels que soient les valeurs de capacités tampons rapportées dans cette expérience, tous les pH finaux obtenus en incubant les sous produits seuls, les fourrages ou leurs mixtures en utilisant le liquide ruminal de dromadaires comme inoculum sont restés dans les limites physiologiques compatibles avec l'activité de l'écosystème ruminal.

L'étude de la fermentescibilité *in vitro* des substrats seuls a révélé une production intense dans les premières heures d'incubation lorsque les sous-produits agro-alimentaires sont fermentés. Cette production était plus importante en fermentant les résidus de pommes ou

Discussion générale

d'oranges qui atteignent leur demi-production au bout d'un temps très court par rapport aux épiluchures de tomates qui ne libèrent une quantité de gaz statistiquement identique aux autres résidus qu'après 24 h d'incubation. Les SPIAA sont rapidement colonisés et intensément dégradés. En revanche, les aliments fibreux sont fermentés beaucoup plus longuement, ils produisent moins de gaz avec une vitesse et un $t_{1/2}$ plus faibles. Ces résultats sont particulièrement liés à la composition chimique différente entre les substrats étudiés. Le prétraitement par mélange des résidus aux fourrages a considérablement abaissé les vitesses et les quantités de gaz produites par les sous-produits, et ainsi il permet de limiter le risque de ballonnement lié à un excès de gaz de fermentation libéré en un temps très réduit. L'association aux fourrages naturels a aussi allongé les temps de demi-production de gaz. Un temps de demi-production plus long permet d'augmenter le temps de rétention dans le rumen et ainsi une dégradation microbienne plus lente.

Les pourcentages de dégradabilité apparente de la MS concordent avec les résultats de la production *in vitro* de gaz. Une dégradation plus complète est notée lorsque les sous-produits sont incubés seuls. Les résidus de pommes et la pâte d'oranges sont significativement plus dégradés par la flore ruminale mixte de dromadaire (96,2 et 96 %), les épiluchures de tomates sont dégradés à un degré moins (86 %). Alors que les plantes fibreuses *Sylibum marianum* et *Chrysanthemum coronarium* ne sont dégradées qu'à 50 %. La mixture entre les deux catégories de substrats testés permet d'un côté de ralentir la dégradabilité intense des sous-produits et contrôler ainsi l'acidité dans le rumen et d'un autre côté d'améliorer la faible dégradabilité des aliments fibreux. À l'exception des mixtures foin + résidus de tomates et foin + résidus de pommes qui sont plus dégradables, tous les mélanges binaires avaient des taux de dégradabilité semblables à l'aliment standard (foin de la vesce avoine). Ce résultat dépend en partie de la richesse des cardes et des chrysanthèmes en fibres totales, mais surtout à l'adaptation de la microflore ruminale à la dégradation du foin, aliment le plus couramment offert aux animaux d'élevage en Algérie.

En récapitulant on peut dire que l'effet de l'association entre les aliments fibreux et les SPIAA est une relation mutuelle, dans laquelle les fourrages ramènent la fibre nécessaire qui ralentit la dégradation rapide et intense des sous-produits, qui peut conduire à des risques de ballonnement et d'acidose. À leur tour, les sous-produits assurent l'apport énergétique nécessaire pour maintenir une digestion normale des fibres. À partir de là on peut estimer que tous les mélanges sous-produits + cardes, sous-produits de tomates + chrysanthèmes, sous-produits de tomates + foin et sous-produits de pommes + chrysanthèmes constituent des aliments alternatifs compatibles qui amènent l'énergie et la fibre nécessaire au

Discussion générale

fonctionnement adéquat de la flore ruminale tout en maintenant l'équilibre physiologique de l'animal. Des études *in vivo* devraient être envisagées en vue de mieux connaître la réaction de l'animal vis-à-vis de ces mélanges. Pour les mixtures sous produits d'oranges + foin ; sous produits de pommes + foin et sous produits d'oranges + chrysanthèmes, il serait intéressant de faire une étude en augmentant la proportion des fibres dans les mélanges afin de mieux améliorer leurs caractéristiques cinétiques notamment leur production de gaz encore élevée avant de tester leur alimentation à un autre échelle.

L'essai de l'enrichissement en protéines des sous-produits et de leurs mélanges a révélé un effet important du type du substrat, de la source d'azote, de la concentration de l'inoculum et de la fermentation répétée sur la teneur en ammoniac, le gain en protéine, le bilan CNS et le pH final du milieu d'incubation. En dépit de leur apport faible en protéines initial, la pâte d'oranges produit plus de protéines que les épluchures de tomates. Un gain important en protéine de 75 % a été enregistré lorsque les sous-produits d'oranges ont été incubés. Par contre, les sous-produits de tomates et malgré leur teneur relativement importante en protéines, ils entraînent une perte en protéines de 3 %. Ce constat peut être justifié par une meilleure assimilation et incorporation de l'azote dans les cellules microbiennes lorsque les résidus d'oranges sont utilisés. L'estimation de la teneur en ammoniac à la fin de la fermentation appuie ces résultats. Malgré les concentrations en ammoniac insuffisantes et largement plus faibles que de la teneur de 50 mg/l préconisée par Satter et Slyter (1974) pour une synthèse protéique maximale, un rendement important en protéines est obtenu en fermentant les sous-produits d'oranges. Cela peut être associé à une meilleure synchronisation entre la libération de l'azote et du carbone lors de la dégradation de ce résidu. Beaucoup d'études ont rapporté un effet positif sur l'apport en protéines lors de la synchronisation de la libération de ces deux nutriments (Hristov et al., 2005 ; Seo et al., 2013). D'autres chercheurs ont rapporté que la meilleure synthèse protéique dépend surtout de la disponibilité des carbohydrates facilement disponibles qu'au degré de synchronisation. Le résultat du gain en protéines obtenu avec la mixture résidu de tomates : cardes, qui révèle un rendement très bas en protéines en comparaison aux sous-produits d'oranges malgré un apport similaire en protéines initiales et la chute du pourcentage de gain en protéines à plus de 50 % quand les résidus d'oranges sont mélangés aux cardes, est en accord avec ce constat. En outre, les sous-produits d'oranges ont eu des ratios C/N et N/S très proches des valeurs optimales recommandées par Li et al. (2001) et Silva et al. (2014) pour une synthèse protéique maximale. Quant aux résidus de tomates, ils apportent des rapports C/N et N/S beaucoup plus

Discussion générale

faibles. Un faible rapport C/N augmente les émissions de l'azote sous forme d'ammoniac et ralentie le processus de fermentation (Noviadi et *al.*, 2017). D'après ces résultats on peut conclure que la pâte d'oranges représente une matière première potentiellement utile pour la production de substrats enrichis en protéines. Toutefois, un contrôle du pH au cours de leur fermentation est nécessaire pour assurer une activité microbienne optimale. Par ailleurs, on suggère un complément énergétique aux sous-produits de tomates en vue d'une optimisation de la synthèse protéique.

Le milieu d'incubation contenant l'urée comme source d'azote (milieu simplifié) a permis un rendement plus important en protéines comparativement au milieu apportant l'azote sous forme minérale (milieu Menke). Cette constatation est probablement due à l'affinité des microorganismes du rumen pour l'azote ammoniacal comme première source d'azote, notamment les bactéries cellulolytiques. La dose du liquide ruminal a significativement affecté le gain en protéines, qui était plus élevé lorsqu'une faible dose (5 ml) est inoculée comparativement à une forte dose (30 ml). Ce résultat peut être expliqué par l'épuisement du substrat lorsqu'une dose importante de microorganismes est inoculée. Toutefois, les faibles pourcentages de perte en matière sèche notés dans cette expérience signifient que les deux doses d'inocula testés n'ont pas permis d'assurer une utilisation complète de la quantité de substrat utilisé. Cela nous a conduits vers la supposition que la flore microbienne responsable de la dégradation de la matière organique est inhibée par les fortes chutes de pH notées avec les doses élevées d'inoculum. De ce qui précède on peut dire que les milieux d'incubations testés sont des milieux convenables à la production de protéines microbiennes avec une préférence pour le milieu simplifié. Cependant, plusieurs paramètres doivent être reconsidérés y compris, la quantité de substrat et les solutions tampons utilisées.

La synthèse des protéines diminue proportionnellement en allant de la première à la troisième fermentation. Comme l'expérience a été mise en place dans un système *in vitro*, l'accumulation des produits de fermentation ou le changement des conditions physico-chimiques, plus précisément le pH, du milieu d'incubation ont conduit à un déclin dans la capacité de prolifération de la flore microbienne. Il est à noter que les pH enregistrés au cours des trois fermentations sont faibles et ne permettent pas une croissance optimale de la flore responsable de la dégradation des fibres. De ce fait, on préconise l'utilisation de plus de tampons ou de quantité plus importante de liquide ruminal à l'égard de leur pouvoir tampon naturel.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Cette étude a été menée afin de chercher des aliments alternatifs aux aliments conventionnels, des aliments équilibrés et compatibles avec la flore ruminale et la physiologie digestive de l'animale. Pour atteindre cet objectif nous avons effectué une panoplie d'études des caractéristiques physico-chimiques et fermentaires de certains sous-produits (les épiluchures de tomates, la pâte d'oranges et les résidus de pomme). Nous avons également testé de produire des aliments à valeur ajoutée (sous-produits enrichis en protéines). A la fin de cette étude on peut conclure que les sous-produits de l'industrie agro-alimentaires utilisés dans cette étude constituent de bons aliments alternatifs aux aliments conventionnels. Toutefois, plusieurs considérations doivent être prises avant leur utilisation.

D'après l'étude des caractéristiques physico-chimiques les sous-produits de tomates représentent un aliment plus complet en raison de leur composition chimique (apport en glucide simples, en fibres et en protéines) plus ou moins équilibrée. Vue leur teneur importante en énergie et leur carence en protéines brutes, l'utilisation des sous-produits d'oranges et de pommes nécessite un complément en fibres et en azote.

La fermentation *in vitro* des sous-produits a montré qu'ils sont des substrats facilement dégradables. Leurs mélanges binaires avec les aliments fibreux (cardes, chrysanthème et foin) a permis de corriger leur caractéristiques cinétiques en atténuant l'excès de la production de gaz, le temps de sa demi-production et la vitesse avec laquelle ce gaz s'accumule tout en augmentant le temps de latence et en améliorant le pH ruminal.

L'essai de l'enrichissement des sous-produits de tomates et d'oranges en protéines a révélé que les sous-produits d'oranges sont des substrats attrayants pour la production d'aliments enrichis en protéines. En combinaison avec l'urée comme source d'azote et une faible dose d'inoculum, ces résidus ont présentés le meilleur rendement en protéines. En revanche, et malgré leur teneur relativement importante en protéines, les sous-produits de tomates entraînent une perte en protéines lors de la fermentation répétée. De ce fait, l'ajout d'une source d'énergie est recommandé pour une meilleure synchronisation entre énergie : protéines et ainsi une optimisation de la synthèse des protéines microbienne lors de l'utilisation de ce résidu.

Conclusion et perspectives

Des études complémentaires doivent être envisagées. Pour cela, quelques suggestions sont avancées :

- Augmenter la proportion des fibres dans les mélanges des sous produits d'oranges + foin; sous produits de pommes + foin et sous produits d'oranges + chrysanthèmes afin de mieux améliorer leurs caractéristiques cinétiques de fermentation.
- Etudier la composition microbienne du rumen par des techniques de biologie moléculaire et l'effet de l'intégration des sous-produits et de leurs mélanges sur la composition et la prédominance des différents groupes de la population microbienne ruminale responsable de la dégradation des fibres et de la synthèse protéique.
- Approfondir les études *in vivo* en vue de mieux connaître la réaction de l'animal vis-à-vis de l'ingestion des différents sous-produits agro-alimentaires et de leurs mélanges avec des plantes fibreuses.
- Reprendre l'essai de l'enrichissement en protéines en prenant en considération les différents points critique notés (quantité de substrat incubé, solutions tampons utilisées, complément énergétique des sous-produits de tomates, durée d'incubation).
- Fractionner les différentes composantes des protéines des sous-produits étudiés (protéines dégradables dans le rumen, protéines non dégradables dans le rumen mais digestibles dans l'intestin et les protéines non digestibles) afin de mieux caractériser leur dégradabilité et leur taux de digestion.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

Abdel-Aziz, N.A., Salem, A.Z.M., El-Adawy, M.M., Camacho, L.M., Kholif, A.E., Elghandour, M.M.Y., and Borhami, B.E. (2015). Biological treatments as a mean to improve feed utilization in agriculture animals—An overview. *Journal of Integrative Agriculture* 14, 534–543.

Abdelguerfi A., Laouar M., and M’Hammedi Bouzina M. (2008). Les production fourragères et pastorales en Algérie : Situation et Possibilités d’Amélioration. *Revue Semestrielle ‘Agriculture & développement’* (INVA, Alger), janvier 2008, n°6 : 14-25.

Abdollahzadeh, F., and Abdulkarimi, R. (2012). Tomato pomace as a protein supplement for growing Markhoz goat. *Life science journal acta Zhengzhou university overseas edition*, 9, 2157-2161.

Abdollahzadeh, F., Pirmohammadi, R., Fatehi, F., and Bernousi, I. (2010). Effect of feeding ensiled mixed tomato and apple pomace on performance of Holstein dairy cows. *Slovak J. Anim. Sci.* 43, 31–35.

Adem, R., and Ferrah, A. (2002). Les ressources fourragères en Algérie: déficit structurel et disparité régionale, analyse du bilan fourrager pour l’année 2001.

Adeyemi, O.A., Eruvbetine, D., Oguntona, T., Dipeolu, M.A., and Agunbiade, J.A. (2007). Enhancing the nutritional value of whole cassava root meal by rumen filtrate fermentation. *Archivos de Zootecnia* 56, 261–264.

Agbagla-Dohnani, A., Nozière, P., Gaillard-Martinie, B., Puard, M., and Doreau, M. (2003). Effect of silica content on rice straw ruminal degradation. *The Journal of Agricultural Science* 140, 183–192.

Aghajanzad, A., Maheri-Si, N., Mirzaei-A, A., and Baradaran-, A. (2010). Comparison of Nutritional Value of Tomato Pomace and Brewer’s Grain for Ruminants Using in vitro Gas Production Technique. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances* 5, 43–51.

Ahmadi, F., Zamiri, M.J., Khorvash, M., Banihashemi, Z., and Bayat, A.R. (2015). Chemical composition and protein enrichment of orange peels and sugar beet pulp after fermentation by two *Trichoderma* species. *Iranian Journal of Veterinary Research* 16, 25–30.

Ahn, J.H., Jo, I.H., and Lee, J.S. (2002a). The Use of Apple Pomace in Rice Straw Based Diets of Korean Native Goats (*Capra hircus*). *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 15, 1599–1605.

Akinfemi, A., Adesanya, A. O., & Aya, V. E. (2009). Use of an in vitro gas production technique to evaluate some Nigerian feedstuffs. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 4, 240-245.

Al-Masri, M.R. (2003). An in vitro evaluation of some unconventional ruminant feeds in terms of the organic matter digestibility, energy and microbial biomass. *Tropical Animal*

Référence bibliographique

Health and Production 35, 155–167.

Alvarado, A., Pacheco-Delahaye, E., and Hevia, P. (2001). Value of a tomato byproduct as a source of dietary fiber in rats. *Plant Foods for Human Nutrition* 56, 335–348.

Amellal, R. (1995). La filière lait en Algérie: entre l'objectif de la sécurité. *Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches* 229–238.

Amokrane S. (2010). Etude des prétraitements microbiologiques des résidus agro-alimentaires lignocellulosiques en vue de leur valorisation en alimentation animale. Mémoire de Magistère. Université Mentouri, Constantine.

Amrani, O. (2006). Valeur nutritive du chardon marie (*Silybum marianum* (L) Gaerthn)«Tawra». Mémoire de Magistère. Université El Hadj Lakhdar, Batna.

A.O.A.C, 1990. Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, AOAC, Arlington, VA. ed. USA.

Aregheore, E.M. (2000). Chemical composition and nutritive value of some tropical by-product feedstuffs for small ruminants — in vivo and in vitro digestibility. *Animal Feed Science and Technology* 85, 99–109.

Aregheore, M.E. (1993). Chemical composition of some Zambian crop residues for ruminant nutrition. *Zambian Journal of Agricultural Science* 7–10.

Arhab R. (1999). Etude de la digestibilité in vitro de sous produits agro-industriels et de celluloses purifiée par la microflore ruminale de camélidés. Utilisation de gaz fermentaire comme marqueurs de fermentation. Mémoire de Magistère, Université de Constantine.

Armstead, I.P., and Ling, J.R. (1993). Variations in the uptake and metabolism of peptides and amino acids by mixed ruminal bacteria in vitro. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 3360–3366.

Aro, N., Pakula, T., and Penttilä, M. (2005). Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi. *FEMS Microbiology Reviews* 29, 719–739.

Arthington, J.D., Kunkle, W.E., and Martin, A.M. (2002). Citrus pulp for cattle. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice* 18, 317–26.

Assis, A.J. de, Campos, J.M. de S., Valadares Filho, S. de C., Queiroz, A.C. de, Lana, R. de P., Euclides, R.F., Mendes Neto, J., Magalhães, A.L.R., and Mendonça, S. de S. (2004). Polpa cítrica em dietas de vacas em lactação. 1. Consumo de nutrientes, produção e composição do leite. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33, 242–250.

Attwood, G.T., and Reilly, K. (1995). Identification of proteolytic rumen bacteria isolated from New Zealand cattle. *Journal of Applied Bacteriology* 79, 22–29.

Référence bibliographique

Ayhan, V., and Aktan, S. (2004a). Using Possibilities of Dried Tomato Pomace in Broiler Chicken Diets. *Hayvansal Üretim* 45, 19–22.

Aylward, J.H., Gobius, K.S., Xue, G.-P., Simpson, G.D., and Dalrymple, B.P. (1999). The *Neocallimastix patriciarum* cellulase, CelD, contains three almost identical catalytic domains with high specific activities on Avicel. *Enzyme and Microbial Technology* 24, 609–614.

Bach, A., Calsamiglia, S., and Stern, M.D. (2005). Nitrogen metabolism in the rumen. *Journal of Dairy Science* 88, E9–E21.

Baloyi, J.J., Ngongoni, N.T., Topps, J.H., and Ndlovu, P. (1997). Chemical composition and degradability of *Brachystegia spiciformis* (musasa) leaves and stems harvested over 4 months from three sites in Zimbabwe. *Animal Feed Science and Technology* 69, 179–186.

Bampidis, V.A., and Robinson, P.H. (2006). Citrus by-products as ruminant feeds: A review. *Animal Feed Science and Technology* 128, 175–217.

Barichievich, E.M., and Calza, R.E. (1990). Supernatant protein and cellulase activities of the anaerobic ruminal fungus *Neocallimastix frontalis* EB188. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 43–48.

Bauchop, T., & Mountfort, D. O. (1981). Cellulose fermentation by a rumen anaerobic fungus in both the absence and the presence of rumen methanogens. *Appl. Environ. Microbiol.*, 42, 1103-1110.

Belanche, A., Doreau, M., Edwards, J.E., Moorby, J.M., Pinloche, E., and Newbold, C.J. (2012). Shifts in the Rumen Microbiota Due to the Type of Carbohydrate and Level of Protein Ingested by Dairy Cattle Are Associated with Changes in Rumen Fermentation. *The Journal of Nutrition* 142, 1684–1692.

Ben Salem, H., and Znaidi, I.-A. (2008). Partial replacement of concentrate with tomato pulp and olive cake-based feed blocks as supplements for lambs fed wheat straw. *Animal Feed Science and Technology* 147, 206–222.

Benjamin, R.W., Lavie, Y., Forti, M., Barkai, D., Yonatan, R., and Hefetz, Y. (1995). Annual regrowth and edible biomass of two species of *Atriplex* and of *Cassia sturtii* after browsing. *Journal of Arid Environments* 29, 63–84.

Béra-Maillet, C., Devillard, E., Cezette, M., Jouany, J.-P., and Forano, E. (2005). Xylanases and carboxymethylcellulases of the rumen protozoa *Polyplastron multivesiculatum*, *Eudiplodinium maggii* and *Entodinium* sp. *FEMS Microbiology Letters* 244, 149–156.

Bergman, E.N. (1990). Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews* 70, 567–590.

Besle, J.M., and Jouany, J.P. (1990). La biomasse pariétale des fourrages et sa valorisation par les herbivores. *INRA Productions Animales* 3, 39–50.

Référence bibliographique

Beuvink, J. M. W., Spoelstra, S. F., and Hogendorp, R. J. (1992). An automated method for measuring time-course of gas production of feed-stuffs incubated with buffered rumen fluid. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, *40*, 401-401.

Blu, M., and Ørskov, E.R. (1993). Comparison of in vitro gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting feed intake in cattle. *Animal Feed Science and Technology* *40*, 109–119.

Blümmel, M., and Bullerdieck, P. (1997). The need to complement in vitro gas production measurements with residue determinations from in sacco degradabilities to improve the prediction of voluntary intake of hays. *Animal Science* *64*, 71–75.

Blümmel, M., Makkar, H.P.S., and Becker, K. (1997). In vitro gas production: a technique revisited. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* *77*, 24–34.

Blümmel, M., Aiple, K.-P., Steingabeta, H., and Becker, K. (1999). A note on the stoichiometrical relationship of short chain fatty acid production and gas formation in vitro in feedstuffs of widely differing quality. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* *81*, 157–167.

Blümmel, M., Karsli, A., and Russell, J.R. (2003). Influence of diet on growth yields of rumen micro-organisms in vitro and in vivo: influence on growth yield of variable carbon fluxes to fermentation products. *British Journal of Nutrition*. *90*, 625–634.

Bonnefont C. 2008. Le potentiel Redox et le milieu ruminal. Ecole Nationale Vétérinaire, Toulouse, pp : 4-24.

Bonhomme, A. (1990). Rumen ciliates: their metabolism and relationships with bacteria and their hosts. *Animal Feed Science and Technology* *30*, 203–266.

Borneman, W.S., Ljungdahl, L.G., Hartley, R.D., and Akin, A.D.E. (1992). Purification and Partial Characterization of *Two* Feruloyl Esterases from the Anaerobic Fungus *Neocallimastix* Strain MC-2. *Appl. Environ. Microbiol.*, *58*, 3762-3766.

Boucher, S.E., Ordway, R.S., Whitehouse, N.L., Lundy, F.P., Kononoff, P.J., and Schwab, C.G. (2007). Effect of Incremental Urea Supplementation of a Conventional Corn Silage-Based Diet on Ruminal Ammonia Concentration and Synthesis of Microbial Protein. *Journal of Dairy Science* *90*, 5619–5633.

Boval, M., Coates, D.B., Lecomte, P., Decruyenaere, V., and Archimède, H. (2004). Faecal near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess chemical composition, in vivo digestibility and intake of tropical grass by Creole cattle. *Animal Feed Science and Technology* *114*, 19–29.

Brock, F.M., Forsberg, C.W., and Buchanan-Smith, J.G. (1982). Proteolytic activity of rumen microorganisms and effects of proteinase inhibitors. *Appl. Environ. Microbiol.* *44*, 561–569.

Référence bibliographique

- Brodowski, D., & Geisman, J. R. (1980). Protein content and amino acid composition of protein of seeds from tomatoes at various stages of ripeness. *Journal of Food Science*, *45*, 228-229.
- Brooks, M. A. (2010). Ruminal degradation of protein and carbohydrate in the domestic and wild ruminant. Thèse de doctorat. University of Missouri--Columbia.
- Broudiscou, L.-P., Papon, Y., and F. Broudiscou, A. (1999). Effects of minerals on feed degradation and protein synthesis by rumen micro-organisms in a dual effluent fermenter. *Reproduction Nutrition Development* *39*, 255–268.
- Bryant, M.P., Robinson, I.M., and Lindahl, I.L. (1961). A note on the flora and fauna in the rumen of steers fed a feedlot bloat-provoking ration and the effect of penicillin. *Appl. Environ. Microbiol.* *9*, 511–515.
- Cabiddu, A., Addis, M., Pinna, G., Spada, S., Fiori, M., Sitzia, M., Pirisi, A., Piredda, G., and Molle, G. (2006). The inclusion of a daisy plant (*Chrysanthemum coronarium*) in dairy sheep diet. 1: Effect on milk and cheese fatty acid composition with particular reference to C18:2 cis-9, trans-11. *Livestock Science* *101*, 57–67.
- Cabrera, A.R.J., Dewhurst, R.J., Abreu, J.M.F., and Fonseca, A.J.M. (2006). Evaluation of the effects of synchronising the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows – a review. *Animal Research* *55*, 1–24.
- Cattani, M., Tagliapietra, F., Maccarana, L., Hansen, H. H., Bailoni, L., & Schiavon, S. (2014). In vitro total gas and methane production measurements from closed or vented rumen batch culture systems. *Journal of Dairy Science*, *97*, 1736-1741.
- Chapoutot, P. (1998). Etude de la dégradation in situ des constituants pariétaux des aliments pour ruminants. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France.
- Chehat, F., and Bir, A. (2008). Le développement durable de systèmes d'élevage durables en Algérie: Contraintes et perspectives. In Colloque «Durabilité Du Secteur Des Productions Animales. Enjeux, Évaluation et Perspectives». Alger, INA-El Harrach, pp. 20–21.
- Chehma, A., & Longo, H. F. (2001). Valorisation des sous-produits du palmier dattier en vue de leur utilisation en alimentation du bétail. *Rev. Energ. Ren.: Production et Valorisation-Biomasse*, 59-64.
- Chenost, M. and Kayouli C. (1997). Roughage Utilisation in Warm Climates. *FAO Animal Production and Health Paper* 135, Rome.
- Chenost, M., Aufrère, J., and Machebœuf, D. (2001). The gas-test technique as a tool for predicting the energetic value of forage plants. *Animal Research* *50*, 349–364.
- Chesson, A., and Forsberg, C.W. (1997). Polysaccharide degradation by rumen microorganisms. In *The Rumen Microbial Ecosystem*, (Springer, Dordrecht), pp. 329–381.

Référence bibliographique

- Chikhi, K., and Bencharif, A (2016). La consommation de produits carnés en Méditerranée: quelles perspectives pour l'Algérie ?. In : Napoléon e M. (ed.), Ben Salem H. (ed.), Bou ton n et J.P. (ed.), López-Fran cos A. (ed.), Gabiñ a D. (ed.). *The value chains of Mediterranean sheep and goat products. Organisation of the industry, marketing strategies, feeding and production systems*. Zaragoza : CIHEAM. p. 435-440 (Option s Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n . 115)
- Chumpawade, S., and Soychuta, S. (2009). Nutrient Enrichment of Cassava Starch Industry By-Product Using Rumen Microorganism as Inoculums Source. *Pakistan Journal of Nutrition* 8, 1380–1382.
- Chumpawadee, S. (2009). Degradation Characteristic of Tomato Pomace, Soybean Hull and Peanut Pod in the Rumen Using Nylon Bag Technique. *Pakistan Journal of Nutrition* 8, 1717–1721.
- Chumpawadee, S., Sommart, K., Vongpralub, T., and Pattarajinda, V. (2005). Effects of Synchronizing the Rate of Dietary Energy and Nitrogen Release on Ruminal Fermentation, Microbial Protein Synthesis, Blood Urea Nitrogen and Nutrient Digestibility in Beef Cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 19, 181–188.
- Chumpawadee, S., Chantiratikul, A., and Chantiratikul, P. (2007). Chemical Compositions and Nutritional Evaluation of Energy Feeds For Ruminant Using In vitro Gas Production Technique. *Pakistan Journal of Nutrition* 6, 607–612.
- Ciqual (2017). Table de composition nutritionnelle des aliments. <https://ciqual.anses.fr/>.
- Cone, J.W., van Gelder, A.H., Visscher, G.J., and Oudshoorn, L. (1996). Influence of rumen fluid and substrate concentration on fermentation kinetics measured with a fully automated time related gas production apparatus. *Animal Feed Science and Technology* 61, 113–128.
- Cone, J.W., and van Gelder, A.H. (1999). Influence of protein fermentation on gas production profiles. *Animal Feed Science and Technology* 76, 251–264.
- Cone, J.W., van Gelder, A.H., Bachmann, H., and Hindle, V.A. (2002). Comparison of organic matter degradation in several feedstuffs in the rumen as determined with the nylon bag and gas production techniques. *Animal Feed Science and Technology* 96, 55–67.
- Cone, J.W., Rodrigues, M.A.M., Guedes, C.M., and Blok, M.C. (2009). Comparison of protein fermentation characteristics in rumen fluid determined with the gas production technique and the nylon bag technique. *Animal Feed Science and Technology* 153, 28–38.
- Cornou, C., Storm, I.M.L.D., Hindrichsen, I.K., Worgan, H., Bakewell, E., Ruiz, D.R.Y., Abecia, L., Tagliapietra, F., Cattani, M., Ritz, C. and Hansen H. (2013). A ring test of a wireless in vitro gas production system. *Anim. Prod. Sci.* 53, 585–592.
- Cotta, M.A. (1988). Amylolytic activity of selected species of ruminal bacteria. *Appl.*

Référence bibliographique

Environ. Microbiol. 54, 772–776.

Crawford, R.J., Shriver, B.J., Varga, G.A., and Hoover, W.H. (1983). Buffer Requirements for Maintenance of pH during Fermentation of Individual Feeds in Continuous Cultures. *Journal of Dairy Science* 66, 1881–1890.

Czerkawski, J.W. (1976). Chemical composition of microbial matter in the rumen. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 27, 621–632.

Deville, E.R., and Givens, D.I. (2001). Use of the automated gas production technique to determine the fermentation kinetics of carbohydrate fractions in maize silage. *Animal Feed Science and Technology* 93, 205–215.

De Boever, J. L., Cottyn, B. G., Andries, J. I., Buysse, F. X., & Vanacker, J. M. (1988). The use of a cellulase technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of forages. *Animal Feed Science and Technology*, 19, 247-260

Dehority, B.A., and Scott, H.W. (1967). Extent of cellulose and hemicellulose digestion in various forages by pure cultures of rumen bacteria. *Journal of Dairy Science* 50, 1136–1141.

Del Valle, M., Cámara, M., and Torija, M.-E. (2006). Chemical characterization of tomato pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, 1232–1236.

Delavar, M. H., Tahmasbi, A. M., Danesh-Mesgaran, M., & Valizadeh, R. (2014). In vitro rumen fermentation and gas production: Influence of different by-product feedstuffs. *Annual Research & Review in Biology*, 1121-1128.

Delfosse-Debusscher, J., Thines-Sempoux, D., Vanbelle, M., and Latteur, B. (1979). Contribution of protozoa to the rumen cellulolytic activity. In *Annales de Recherches Vétérinaires*, 10, 255-257.

Demeyer, D., and Doreau, M. (1999). Targets and procedures for altering ruminant meat and milk lipids. *Proceedings of the Nutrition Society* 58, 593–607.

Demeyer, D., and Fievez, V. (2000). Ruminants et environnement: la méthanogenèse. In *Annales de Zootechnie*, (EDP Sciences), 49, 95–112.

Demirel, M., Yilmaz, İ., Deniz, S., Kaplan, O., and Akdeniz, H. (2003). Effect of Addition of Urea or Urea Plus Molasses to Different Corn Silages Harvested at Dough Stage on Silage Quality and Digestible Dry Matter Yield. *Journal of Applied Animal Research* 24, 7–16.

Denek, N., and Can, A. (2006). Feeding value of wet tomato pomace ensiled with wheat straw and wheat grain for Awassi sheep. *Small Ruminant Research* 65, 260–265.

DePeters, E. J., Fadel, J. G., Arana, M. J., Ohanesian, N., Etchebarne, M. A., Hamilton, C. A., Hinders R.G., Maloney M.D., Old C.A., Riordan T.J., Perez-Monti, H. and Pareas J.W. (2000). Variability in the chemical composition of seventeen selected by-product feedstuffs

Référence bibliographique

used by the California dairy industry. *The Professional Animal Scientist* 16, 69-99.

Devillard, E., Newbold, C.J., Scott, K.P., Forano, E., Wallace, R.J., Jouany, J.-P., and Flint, H.J. (1999). A xylanase produced by the rumen anaerobic protozoan *Polyplastron multivesiculatum* shows close sequence similarity to family 11 xylanases from gram-positive bacteria. *FEMS Microbiology Letters* 181, 145–152.

Devillard, E., Christel, B.-M., Flint, H.J., Scott, K.P., Newbold, C.J., Wallace, R.J., Jouany, J.-P., and Forano, E. (2003). Characterization of XYN10B, a modular xylanase from the ruminal protozoan *Polyplastron multivesiculatum*, with a family 22 carbohydrate-binding module that binds to cellulose. *Biochemical Journal* 373, 495–503.

Dhanao, M.S. (1988). On the analysis of dacron bag data for low degradability feeds. *Grass and Forage Science* 43, 441–444.

Dhanao, M.S., France, J., and Siddons, R.C. (1989). On using a double-exponential model for describing faecal marker concentration curves. *Journal of Theoretical Biology* 141, 247–257.

DiCostanzo, A., Meiske, J.C., and Chester-Jones, H. (1994). Efficient use of alternative feedstuffs in beef cattle diets. *MN Cattle Feeders Rep.* B-415.

Dijkstra, J. (1994). Simulation of the dynamics of protozoz in the rumen. *British Journal of Nutrition* 72, 679–699.

Djekrif-Dakhmouche, S., Gheribi-Aoulmi, Z., Meraihi, Z., and Bennamoun, L. (2006). Application of a statistical design to the optimization of culture medium for α -amylase production by *Aspergillus niger* ATCC 16404 grown on orange waste powder. *Journal of Food Engineering* 73, 190–197.

Djilas, S., Canadanovic-Brunet, J., and Cetkovic, G. (2009). By-products of fruits processing as a source of phytochemicals. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly* 15, 191–202.

Doran, M.P., Laca, E.A., and Sainz, R.D. (2007). Total tract and rumen digestibility of mulberry foliage (*Morus alba*), alfalfa hay and oat hay in sheep. *Animal Feed Science and Technology* 138, 239–253.

Drackley, J.K. (2004). Overview of fat digestion and metabolism in dairy cows. University of Illinois, Urbana.

Drouliscos, N.J. (1976). Nutritional evaluation of the protein of dried tomato pomace in the rat. *British Journal of Nutrition* 36, 449.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P. t, and Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry* 28, 350–356.

Référence bibliographique

- Durand, M. and Kawashima, R. (1980). Influence of minerals in rumen microbial digestion. In *Digestive physiology and metabolism in ruminants* (pp. 375-408). Springer, Dordrecht.
- Durand, M., and Komisarczuk, S. (1988). Influence of Major Minerals on Rumen Microbiota. *The Journal of Nutrition* *118*, 249–260.
- Elbadrawy, E., and Sello, A. (2016). Evaluation of nutritional value and antioxidant activity of tomato peel extracts. *Arabian Journal of Chemistry* *9*, S1010–S1018.
- Estrada-LiÃ, J. M., Sandoval-Castro, C. A., AvilÃ, L. R., & Capetillo-Leal, C. M. (2009). In vitro fermentation efficiency of mixtures of *Cynodon nlemfuensis*, *Leucaena leucocephala* and two energy sources (maize or sugar cane molasses). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *10*, 497-503.
- FAO (2011). *Global food losses and food waste. Extent, causes and prevention*. Rome, Italy.
- FAO (2012). *Citrus Fruit - Fresh and Processed. Statistical Bulletin 2012*. Rome, Italy.
- FAO (2017). *Citrus Fruit - Fresh and Processed. Statistical Bulletin 2016. Market and Policy Analysis of Raw Materials, Horticulture and Tropical (RAMHOT). Products Team Trade and Markets Division*. Rome, Italy.
- FAOstat (2017). *Crops Production*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Fazaeli, H., Mahmodzadeh, H., Azizi, A., Jelan, Z.A., Liang, J., Rouzbhan, Y., and Osman, A. (2004). Nutritive Value of Wheat Straw Treated with *Pleurotus* Fungi. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* *17*, 1681–1688.
- Fegeros, K., Zervas, G., Stamouli, S., and Apostolaki, E. (1995). Nutritive value of dried citrus pulp and its effect on milk yield and milk composition of lactating ewes. *J. Dairy Sci.* *78*, 1116–1121.
- Ferrand A. (2010). *Digestion microbienne chez les ruminants. Cours de physiologie Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse*.
- Fondevila, M., Guada, J.A., Gasa, J., and Castrillo, C. (1994). Tomato pomace as a protein supplement for growing lambs. *Small Ruminant Research* *13*, 117–126.
- Fonty, G., and Forano, É. (1999). Ecologie de la dégradation et de la fermentation des polyholosides constitutifs des parois végétales dans le rumen. *Cahiers Agricultures* *8*, 21–35.
- Freixo, M. do R., Karmali, A., Frazão, C., and Arteiro, J.M. (2008). Production of laccase and xylanase from *Coriolus versicolor* grown on tomato pomace and their chromatographic behaviour on immobilized metal chelates. *Process Biochemistry* *43*, 1265–1274.
- Gasmi-Boubaker, A., Kayouli, C., and Buldgen, A. (2005). In vitro gas production and its relationship to in situ disappearance and chemical composition of some Mediterranean browse

Référence bibliographique

species. *Animal Feed Science and Technology* 123, 303–311.

Gawad, A.M.A., Mahmoud, A.E.M., and Slibi, Y.H.A. (2013). Response of Growing Bulls Fed Ration Containing Different Levels of Citrus Pulp. *World Applied Sciences Journal* 28, 1476–1480.

Gasa, J., Castrillo, C., Baucells, M. D., & Guada, J. A. (1989). By-products from the canning industry as feedstuff for ruminants: digestibility and its prediction from chemical composition and laboratory bioassays. *Animal Feed Science and Technology* 25, 67-77.

Getachew, G., Makkar, H.P.S., and Becker, K. (2000). Effect of polyethylene glycol on in vitro degradability of nitrogen and microbial protein synthesis from tannin-rich browse and herbaceous legumes. *British Journal of Nutrition* 84, 73–83.

Getachew, G., DePeters, E.J., and Robinson, P.H. (2004). *In vitro* gas production provides effective method for assessing ruminant feeds. *California Agriculture* 58, 54–58.

Ghoreishi, S. F.; Pirmohammadi, R.; Yansari, A. T., 2007. Effects of ensiled apple pomace on milk yield, milk composition and DM intake of Holstein dairy cows. *J. Anim. Vet. Sci.*, 6. 1074-1078.

Gierus, M., Schiborra, A., Südekum, K.-H., Rave, G., and Taube, F. (2008). Comparison of gas accumulation profiles of several feeds using manual or automated gas production methods. *Animal Feed Science and Technology* 147, 310–325.

Gierus, M., Schiborra, A., Südekum, K. H., Rave, G., & Taube, F. (2008). Comparison of gas accumulation profiles of several feeds using manual or automated gas production methods. *Animal feed science and technology*, 147, 310-325.

Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C., Sauvant, D., Martin, O., Nunes do Prado, I., and Müller, R. (2002). Intrinsic buffering capacity of feedstuffs. *Animal Feed Science and Technology* 96, 83–102.

Giger-Reverdin S., Duvaux-Ponter C., Sauvant D., Rihan N., Sos-Dahbi E., Baraka A (2004). Assessment of nutritional characteristics of conventional and non-conventional feedstuffs for small ruminants using physical, chemical and in vitro methods. In : Ben Salem H. (ed.), Nefzaoui A. (ed.), Moran d-Feh r P. (ed.). *Nutrition and feeding strategies of sheep and goats under harsh climates*. Zaragoza : CIHEAM. p. 111 -118 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 59)

Gihad, E.A., and Shaer, H.M.E. (1994). Utilization of halophytes by livestock on rangelands: Problems and prospects. In *Halophytes as a Resource for Livestock and for Rehabilitation of Degraded Lands*, V.R. Squires, and A.T. Ayoub, eds. (Dordrecht: Springer Netherlands), pp. 77–96.

Girard, C.L. (2017). New approaches, development, and improvement of methodologies for the assessment of B-vitamin requirements in dairy cows. *Revista Brasileira de Zootecnia* 46,

Référence bibliographique

614–620.

Givens, D.I., and Barber, W.P. (1987). Nutritive value of apple pomace for ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 16, 311–315.

Givens, D.I., Baker, C.W., Moss, A.R., and Adamson, A.H. (1991). A comparison of near-infrared reflectance spectroscopy with three *in vitro* techniques to predict the digestibility *in vivo* of untreated and ammonia-treated cereal straws. *Animal Feed Science and Technology* 35, 83–94.

Goel, G., Dagar, S.S., Raghav, M., and Bansal, S. (2015). Rumen: An Underutilised Niche for Industrially Important Enzymes. In *Rumen Microbiology: From Evolution to Revolution*, A.K. Puniya, R. Singh, and D.N. Kamra, eds. (New Delhi: Springer India), pp. 247–263.

Goering, H. K., & Van Soest, P. J. (1970). Forage fiber analysis. *Agricultural handbook no. 379*. US Department of Agriculture, Washington, DC, 1-20.

Gomaa, R., Gado, H., El-Sayed, H., and Abd El Mawla, S. (2012). Usage of treated rice straw with exogenous anaerobic bacterial enzymes (ZAD) for Ossimi sheep. *Annals of Agricultural Sciences* 57, 183–190.

Gordon, G.L.R., and Phillips, M.W. (1992). Extracellular pectin lyase produced by *Neocallimastix* sp. LM1, a rumen anaerobic fungus. *Letters in Applied Microbiology* 15, 113–115.

Guadagnin, M., Tagliapietra, F., Cattani, M., Schiavon, S., Worgan, H.J., Belanche, A., Newbold, C.J., and Bailoni, L. (2013). Rumen fermentation and microbial yield of high- or low-protein diets containing ground soybean seeds or homemade rapeseed expellers evaluated with RUSITEC. *Canadian Journal of Animal Science* 93, 363–371.

Guetitcha H. (2001). Etude de la fermentescibilité *in vitro* de sous produits industriels par la microflore ruminale de caprins. Mémoire de magistère. Université de Constantine.

Haddi, M. L., Filacorda, S., and Susmel, P. (1999). Comparison of different inocula to describe some halophyte shrubs using the gas-test [Algeria]. In *Proceeding of the ASPA Congress-Recent Progress in Animal Production Science (Italy)*.

Haddi, M.L., Meniai, K., Kassem, M.M., Filacorda, S., and Susmel, P. (2000). Comparison between exponential and logistic models for estimation of kinetic parameters of *in vitro* fermentation of *Atriplex halimus* by mixed rumen microflora of dromedary camel and cattle. *Annals of Agricultural Science (Cairo)* 2, 575–593.

Haddi, M.L. (2003). Caractéristiques de la cinétique de fermentation *in vitro* des polymères de la paroi cellulaire végétale par la flore ruminale mixte de dromadaire. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Constantine, Algérie.

Référence bibliographique

- Hadjigeorgiou, I.E., Gordon, I.J., and Milne, J.A. (2003). Comparative preference by sheep and goats for Graminaeae forages varying in chemical composition. *Small Ruminant Research* 49, 147–156.
- Han, S.-K., and Shin, H.-S. (2002). Enhanced acidogenic fermentation of food waste in a continuous-flow reactor. *Waste Management & Research* 20, 110–118.
- Harfoot CG. and Hazlewood GP (1997) Lipid metabolism in the rumen. In *The Rumen Microbial Ecosystem*, 2nd edn. Hobson PN and Stewart CS (eds). London: Chapman & Hall, pp. 140–197.
- Hernández, J., Rojo, R., Salem, A., Mirzaei, F., Gonzalez, A., Vázquez, J., Montañez, O., and Lucero, F. (2012). Influence of different levels of dried citrus pulp on *in vitro* ruminal fermentation kinetics of total mixed ration in goat rumen inocula. *Journal of Animal and Feed Sciences* 21, 458–467.
- Hespell, R.B. (1988). Microbial digestion of hemicelluloses in the rumen. *Molecular Microbiology* 5, 362–365.
- Hino, T., Andoh, N., and Ohgi, H. (1993). Effects of beta-carotene and alpha-tocopherol on rumen bacteria in the utilization of long-chain fatty acids and cellulose. *J. Dairy Sci.* 76, 600–605.
- Hoover, W.H., and Stokes, S.R. (1991). Balancing Carbohydrates and Proteins for Optimum Rumen Microbial Yield. *Journal of Dairy Science* 74, 3630–3644.
- Hristov, A.N., Ropp, J.K., Grandeen, K.L., Abedi, S., Etter, R.P., Melgar, A., and Foley, A.E. (2005). Effect of carbohydrate source on ammonia utilization in lactating dairy cows. *Journal of Animal Science* 83, 408–421.
- Hu, Z.-H., and Yu, H.-Q. (2005). Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic fermentation of corn stover. *Process Biochemistry* 40, 2371–2377.
- Hughes, P.E., and Tove, S.B. (1982). Occurrence of alpha-tocopherolquinone and alpha-tocopherolquinol in microorganisms. *Journal of Bacteriology* 151, 1397–1402.
- Hungate R.E. (1966). *The rumen and its microbes*. New York and London, Academic press.
- Huntingdon, J.A., and Givens, D.I. (Feed E.U. (1995). The *in situ* technique for studying the rumen degradation of feeds: a review of the procedure. *Nutrition Abstracts and Reviews. Series B, Livestock Feeds and Feeding* (United Kingdom).
- Huntington, G.B., and Archibeque, S.L. (2000). Practical aspects of urea and ammonia metabolism in ruminants. *Journal of Animal Science* 77, 1–8.
- Ibrahim, M.R., El-Banna, H.M., Omara, I.I., and Suliman, M.A. (2011). Evaluation of

Référence bibliographique

Nutritive Value of Some Citrus Pulp as Feedstuffs in Rabbit Diets. *Pakistan Journal of Nutrition* 10, 667–674.

Idele (2016). Institut De L'élevage. Comité National des Coproduits. Fiches techniques n° 13, 14, 15. Ecarts de Fruits et Légumes et Coproduits de conserverie. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/fiches-a-votre-disposition-coproduits.html. Date de consultation: 23/06/2019.

Iqbal, A., and Khan, B.B. (2001). Feeding behaviour of camel..... Review. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 38, 58–63.

Iqbal, M.W., Zhang, Q., Yang, Y., Zou, C., Li, L., Liang, X., Wei, S., and Lin, B. (2018). Ruminant fermentation and microbial community differently influenced by four typical subtropical forages in vitro. *Animal Nutrition* 4, 100–108.

Ishler, V.A., Varga, G.B., and Heinrichs, A.J. (1996). From feed to milk: understanding rumen function (University Park, Pa.: Pennsylvania State University).

Isik, F., and Topkaya, C. (2016). Effect of tomato pomace supplementation on chemical and nutritional properties of crackers. *Ital. J. Food Sci.* 28, 525–535.

Jalč, D. (2002). Straw Enrichment for Fodder Production by Fungi. In *The Mycota XI Agricultural Applications*, F. Kempken, ed. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), pp. 19–38.

Jarvis, G., and Moore, E. (2009). Lipid Metabolism and the Rumen Microbial Ecosystem. *Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology*, 2245-2257.

Jasaitis, D.K., Wohlt, J.E., and Evans, J.L. (1987). Influence of Feed Ion Content on Buffering Capacity of Ruminant Feedstuffs In Vitro. *Journal of Dairy Science* 70, 1391–1403.

Javed, M., Sharif, M., Bhatti, S.A., Bilal, M.Q., Ahmed, F., Ahmad, F., Saif-ur-Rehman, M., and Tariq, M. (2016). Nutrient intake, nitrogen balance and growth performance in buffalo calves fed citrus pulp as a concentrate source. *African Journal of Agricultural Research*, 11, 2562-2568.

Jenkins, T.C., Wallace, R.J., Moate, P.J., and Mosley, E.E. (2008). Board-invited review: Recent advances in biohydrogenation of unsaturated fatty acids within the rumen microbial ecosystem. *Journal of Animal Science* 86, 397–412.

Joshi, V.K., and Attri, D. (2006). Solid state fermentation of apple pomace for the production of value added products. *Natural Product Radiance* 5, 289–296.

Joshi, V.K., and Sandhu, D.K. (1996). Preparation and evaluation of an animal feed byproduct produced by solid-state fermentation of apple pomace. *Bioresource Technology* 56, 251–255.

Référence bibliographique

- Jouany J.P. (1994). Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. *INRA Prod Anim*, 7, 207-225.
- Jouany, J.-P. (1996). Effect of Rumen Protozoa on Nitrogen Utilization by Ruminants. *The Journal of Nutrition* 126, 1335S-1346S.
- Jouany, J.P. (2000). The digestion in camelids; a comparison to ruminants. *Productions Animales* 13, 165–176.
- Júnior, R.A.B., Minervino, A.H.H., Rodrigues, F.A.M.L., Antonelli, A.C., Sucupira, M.C.A., Mmori, C.S., and Ortolani, E.L. (2008). Avaliação do potencial da polpa cítrica em provocar acidose láctica ruminal aguda em bovinos. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 45, 421–428.
- Kali, S., Benidir, M., Ait Kaci, K., Belkheir, B., and Benyoucef, M.T. (2011). Situation de la filière lait en Algérie: Approche analytique d'amont en aval. *Livestock Research for Rural Development* 23, 1–12.
- Karabulut, A., Canbolat, O., Kalkan, H., Gurbuzol, F., Sucu, E., and Filya, I. (2007). Comparison of In vitro Gas Production, Metabolizable Energy, Organic Matter Digestibility and Microbial Protein Production of Some Legume Hays. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 20, 517–522.
- Karsli, M.A., and Russell, J.R. (2001). Effects of Some Dietary Factors on Ruminal Microbial Protein Synthesis. *Turk J Vet Anim Sci* 25, 681–686.
- Kayouli, C., Jouany, J.P., and Amor, J.B. (1991). Comparison of microbial activity in the forestomachs of the dromedary and the sheep measured in vitro and in sacco on Mediterranean roughages. *Animal Feed Science and Technology* 33, 237–245.
- Kayouli C., Jouany J.P., Dardillat C. and Tisserand J. (1992). Particularités physiologiques du dromadaire et conséquences sur son alimentation. Douz, Tunisie: 26-65
- Kazi Tani C. (2014) : “Les plantes dangereuses pour le bétail. Une première synthèse pour la flore d’Algérie”, *Fourrages*, 217, 105-114.
- Kennedy, M., List, D., Lu, Y., Foo, L.Y., Newman, R.H., Sims, I.M., Bain, P.J.S., Hamilton, B., and Fenton, G. (1999). Apple Pomace and Products Derived from Apple Pomace: Uses, Composition and Analysis. In *Analysis of Plant Waste Materials*, H.F. Linskens, and J.F. Jackson, eds. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), pp. 75–119.
- Khatooni, M., Nobar, R., and Cheraghi, H. (2014). Evaluating Possibility Replacement of Apple Pomace with Barley Grain for Ruminants with In Vitro Gas Production Technique. *Journal of Animal Science Advances* 4, 839.
- Khazaal, K., Dentinho, M.T., Ribeiro, J.M., and Ørskov, E.R. (1995). Prediction of apparent digestibility and voluntary intake of hays fed to sheep: comparison between using fibre

Référence bibliographique

components, in vitro digestibility or characteristics of gas production or nylon bag degradation. *Animal Science* 61, 527–538.

Khezri, A., Rezayazdi, K., Mesgaran, M.D., and Moradi-Sharbabk, M. (2009). Effect of Different Rumen-degradable Carbohydrates on Rumen Fermentation, Nitrogen Metabolism and Lactation Performance of Holstein Dairy Cows. *Asian-australasian journal of animal sciences* 22, 651-658

Kim, Y.J., Liu, R.H., Rychlik, J.L., and Russell, J.B. (2002). The enrichment of a ruminal bacterium (*Megasphaera elsdenii* YJ-4) that produces the trans-10, cis-12 isomer of conjugated linoleic acid. *J. Appl. Microbiol.* 92, 976–982.

King, A., and Zeidler, G. (2004). Tomato pomace may be a good source of vitamin E in broiler diets. *California Agriculture* 58, 59–62.

Knoblich, M., Anderson, B., and Latshaw, D. (2005). Analyses of tomato peel and seed byproducts and their use as a source of carotenoids. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 1166–1170.

Knudsen, K.E.B. (1997). Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Animal Feed Science and Technology* 67, 319–338.

Kotarski, S.F., Waniska, R.D., and Thurn, K.K. (1992). Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *The Journal of Nutrition* 122, 178–190.

Krause, D.O., Denman, S.E., Mackie, R.I., Morrison, M., Rae, A.L., Attwood, G.T., and McSweeney, C.S. (2003). Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiology Reviews* 27, 663–693.

Krishnamoorthy, U., Soller, H., Steingass, H., and Menke, K.H. (1995). Energy and protein evaluation of tropical feedstuffs for whole tract and ruminal digestion by chemical analyses and rumen inoculum studies in vitro. *Animal Feed Science and Technology* 52, 177–188.

Lalman, D. (2007). Nutrient Requirements of Beef Cattle. E-974. Department of Animal Science. Oklahoma Cooperative Extension Service. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. Oklahoma State University. <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-1921/E-974web.pdf> (date de consultation: 22/06/2019).

Lam, T.B., Kadoya, K., and Iiyama, K. (2001). Bonding of hydroxycinnamic acids to lignin: ferulic and p-coumaric acids are predominantly linked at the benzyl position of lignin, not the beta-position, in grass cell walls. *Phytochemistry* 57, 987–992.

Lammers B. P., Heinrichs A. J. and Ishler V. A (1994). Use of total mixed rations (TMR) for dairy cows. *Dairy and Animal Science* 25, 1-10.

Référence bibliographique

- Landau, S., Glasser, T., and Dvash, L. (2006). Monitoring nutrition in small ruminants with the aid of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technology: A review. *Small Ruminant Research* 61, 1–11.
- Lanza, M., Priolo, A., Biondi, L., Bella, M., and Ben Salem, H. (2001). Replacement of cereal grains by orange pulp and carob pulp in faba bean-based diets fed to lambs: effects on growth performance and meat quality. *Animal Research* 50, 21–30.
- Lashkari, S., and Taghizadeh, A. (2015). Digestion kinetics of carbohydrate fractions of citrus by-products. *Vet Res Forum* 6, 41–48.
- Lashkari, S., Taghizadeh, A., Seifdavati, J., and Salem, A.Z.M. (2014). Qualitative characteristics, microbial populations and nutritive values of orange pulp ensiled with nitrogen supplementation. *Slovak J. Anim. Sci* 47, 90–99.
- Le Ruyet, P., and Tucker, W.B. (1992). Ruminant buffers: Temporal effects on buffering capacity and pH of ruminal fluid from cows fed a high concentrate diet. *Journal of Dairy Science* 75, 1069–1077.
- Leschine, S.B. (1995). Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annual Review of Microbiology* 49, 399–426.
- Li, Y., Park, S.Y., and Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 821–826.
- Lifa, M., HADDI, M.L., Tagliapietra, F., Cattani, M., Guadagnin, M., Sulas, L., Muresu, R., Schiavon, S., Bailoni, L., and Squartini, A. (2018). Chemical and fermentative characteristics of agricultural byproducts and their mixtures with roughages incubated with rumen fluid from slaughtered dromedaries. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 42, 590–599.
- Liu, J.X., Susenbeth, A., and Südekum, K.H. (2002). In vitro gas production measurements to evaluate interactions between untreated and chemically treated rice straws, grass hay, and mulberry leaves. *Journal of Animal Science* 80, 517–524.
- Ljungdahl, L.G. (2008). The Cellulase/Hemicellulase System of the Anaerobic Fungus *Orpinomyces* PC-2 and Aspects of Its Applied Use. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1125, 308–321.
- Long, R.J., Apori, S.O., Castro, F.B., and Ørskov, E.R. (1999). Feed value of native forages of the Tibetan Plateau of China. *Animal Feed Science and Technology* 80, 101–113.
- Lopes, H. O. S., & Perry, T. W. (1986). Effect of dietary phosphorus and roughage levels on calcium, magnesium and potassium utilization by sheep. *Journal of animal science* 63, 1983–1989.
- Ly, J., Van Lai, N., and Preston, T.R. (1997). A study of washing losses and in vitro gas production characteristics of nine leaves from tropical trees and shrubs for ruminants.

Référence bibliographique

Livestock Research for Rural Development 9, 26–33.

Maccarana, L., Cattani, M., and Bailoni, L. (2013). Rumen in vitro Gas Production of Combinations Between Slowly and Rapidly Fermentable Fibre Sources. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 78, 229–233.

MADR (2018). Assises Nationale de l'Agriculture. ANAGRICULTURE Statistique. http://www.anagriculture2018.dz/?page_id=4290&lang=fr. Date de consultation: 25-03-2019.

Madrid, J., Dolores Megías, M., and Hernández, F. (2002). In vitro determination of ruminal dry matter and cell wall degradation, and production of fermentation end-products of various by-products. *Animal Research* 51, 189–199.

Madsen, J. (1985). The basis for the proposed Nordic protein evaluation system for ruminants. The AAT-PBV system. *Acta Agri. Scand* 25, 9–20.

Madsen, J., and Hvelplund, T. (1994). Prediction of in situ protein degradability in the rumen. Results of a European ringtest. *Livestock Production Science* 39, 201–212.

Maghsoud, B., Akbar, T., Hossein, J., and Ali, M.G. (2008). Evaluation of some by-Products using In situ and In vitro Gas Production Techniques. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences* 3, 7–12.

Maheri-Sis, N., Chamani, M., Sadeghi, A.A., Mirzaaghaz, A., Nazeradl, K., and Aghajanzad, A. (2012). Effects of Drying and Ensiling on In situ Cell Wall Degradation Kinetics of Tomato Pomace in Ruminant. *Asian Journal of Animal Sciences* 6, 196–202.

Mamma, D., and Christakopoulos, P. (2008). Citrus peels : an excellent raw material for the bioconversion into value-added products. *Tree and Forestry Science and Biotechnology* 2, 83–97.

Mansoori, B., Modirsanei, M., Radfar, M., Kiaei, M.M., Farkhoy, M., and Honarзад, J. (2008). Digestibility and metabolisable energy values of dried tomato pomace for laying and meat type cockerels. *Animal Feed Science and Technology* 141, 384–390.

Mathison, G. W. (1994). *Forage tree legumes in tropical agriculture* (No. SB 203.3. T76. F67). R. C. Gutteridge, & H. M. Shelton (Eds.). Wallingford: Cab International.

McAllister, T.A., Bae, H.D., Jones, G.A., and Cheng, K.-J. (1994). Microbial attachment and feed digestion in the rumen. *Journal of Animal Science* 72, 3004–3018.

McSweeney, C.S., and Denman, S.E. (2007). Effect of sulfur supplements on cellulolytic rumen micro-organisms and microbial protein synthesis in cattle fed a high fibre diet. *J. Appl. Microbiol.* 103, 1757–1765.

Melaku, S., Peters, K.J., and Tegegne, A. (2003). In vitro and in situ evaluation of selected multipurpose trees, wheat bran and *Lablab purpureus* as potential feed supplements to tef

Référence bibliographique

(*Eragrostis tef*) straw. *Animal Feed Science and Technology* 108, 159–179.

Menke, K.H., and Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development* 28, 7–55.

Menke, K.H., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D., and Schneider, W. (1979). The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. *The Journal of Agricultural Science* 93, 217–222.

Merdjane, L., & Yakhlef, H. (2016). Le déficit fourrager en zone semi-aride: une contrainte récurrente au développement durable de l' élevage des ruminants. *Revue Agriculture. Numéro spécial, 1*, 43-51.

Michalet-Doreau, B., Fernandez, I., Peyron, C., Millet, L., and Fonty, G. (2001). Fibrolytic activities and cellulolytic bacterial community structure in the solid and liquid phases of rumen contents. *Reproduction Nutrition Development* 41, 187–194.

Minato, H., Endo, A., Ootomo, Y., and Uemura, T. (1966). Ecological treatise on the rumen fermentation. *The Journal of General and Applied Microbiology* 12, 53–69.

Minato, H., Mitsumori, M., Cheng, K.J., 1993. Attachment of microorganisms to solid substrates in the rumen. *Genet. Biochem. Ecol. Lignocellul. Degrad.* Shimada K Ohmiya K Kobayashi Hoshino Sakka K Karita Eds 139–145.

Miron, J., Ben-Ghedalia, D., Morrison, M. (2001a). Invited Review : Adhesion Mechanisms of Rumen Cellulolytic Bacteria. *J. Dairy Sci.* 84, 1294–1309.

Miron, J., Yosef, E., and Ben-Ghedalia, D. (2001b). Composition and *in Vitro* Digestibility of Monosaccharide Constituents of Selected Byproduct Feeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49, 2322–2326.

Mirzaei-Aghsaghali, A., and Maheri-Sis, N. (2008). Nutritive Value of Some AgroIndustrial By-products for Ruminants - A Review. *World J. Zool.* 3, 40–46.

Mirzaei-Aghsaghali, A., Maheri-sis, N., Mansouri, H., Razeghi, M.E., Safaei, A.R., Aghajanzadeh-Golshani, A., and Alipoor, K. (2011a). Estimation of the nutritive value of tomato pomace for ruminant using *in vitro* gas production technique. *African Journal of Biotechnology* 10, 6251–6256.

Mirzaei-Aghsaghali, A., Maheri-Sis, N., Mansouri, H., Razeghi, E., Shayegh, J., and Aghajanzadeh-Golshani, A. (2011b). Evaluating nutritional value of apple pomace for ruminants using *in vitro* gas production technique. *Annals of Biological Research* 2, 100–106.

Mj, U., Zh, K., Mj, K., and Mmh, K. (2015). Dynamics of microbial protein synthesis in the

Référence bibliographique

rumen - A Review -. *Annals of Veterinary and Animal Science* 2, 116–131.

Moharrery, A. (2007). The Determination of Buffering Capacity of Some Ruminant's Feedstuffs and their Cumulative Effects on TMR Ration. *Animal Journal of Animal and Veterinary Science* 2, 72–78.

Montañez-Valdez, O.D., Solano-Gama, J. de J., Martínez-Tinajero, J.J., Guerra-Medina, C.E., Ley de Coss, A., and Orozco-Hernandez, R. (2013). Buffering capacity of common feedstuffs used in ruminant diets. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 26, 37–41.

Moro, A. (2011). Effetto del medium e della proporzione di inoculo ruminale sulla fermentazione di sottoprodotti agroalimentari. Tesi di laurea triennale in scienze e tecnologie animali. Università degli studi di Padova.

Mould, F.L. (2003). Predicting feed quality—chemical analysis and in vitro evaluation. *Field Crops Research* 84, 31–44.

Mould, F.L., and Ørskov, E.R. (1983). Manipulation of rumen fluid pH and its influence on cellulolysis in sacco, dry matter degradation and the rumen microflora of sheep offered either hay or concentrate. *Animal Feed Science and Technology* 10, 1–14.

Mould, F.L., Kliem, K.E., and Morgan, R. (2005). Alternative methodologies – stretching the in vitro box. *Animal Feed Science and Technology* 123–124, 501–515.

Mountfort, D.O., and Asher, R.A. (1989). Production of xylanase by the ruminal anaerobic fungus *Neocallimastix frontalis*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55, 1016–1022.

Nagadi, S., Herrero, M., and Jessop, N.S. (2000). The effect of fermentable nitrogen availability on in vitro gas production and degradability of NDF. *Animal Feed Science and Technology* 87, 241–251.

Nagpal, R., Puniya, A.K., Griffith, G.W., Goel, G., Puniya, M., Sehgal, J.P., and Singh, K. (2009). Anaerobic rumen fungi: potential and applications. In *Agriculturally Important Microorganisms (Vol. I)*, (Academic World International), pp. 375–393.

Nagy, T., Tunnicliffe, R.B., Higgins, L.D., Walters, C., Gilbert, H.J., and Williamson, M.P. (2007). Characterization of a Double Dockerin from the Cellulosome of the Anaerobic Fungus *Piromyces equi*. *Journal of Molecular Biology* 373, 612–622.

Nam, I.S., and Garnsworthy, P.C. (2007). Biohydrogenation of linoleic acid by rumen fungi compared with rumen bacteria. *Journal of Applied Microbiology* 103, 551–556.

Nasehi, M., Torbatinejad, N.M., Zerehdaran, S., and Safaie, A.R. (2017). Effect of solid-state fermentation by oyster mushroom (*Pleurotus florida*) on nutritive value of some agro by-products. *Journal of Applied Animal Research* 45, 221–226.

Nawirska, A., & Kwaśniewska, M. (2005). Dietary fibre fractions from fruit and vegetable

Référence bibliographique

processing waste. *Food Chemistry* 91, 221-225.

Nedjraoui, D. (2003). Profil fourrager. Université Des Sciences et de La Technologie H. Boumediène (USTHB). Alger. Dernière modification en 2012.

Niderkorn, V., and Baumont, R. (2009). Associative effects between forages on feed intake and digestion in ruminants. *Animal* 3, 951–960.

Nitipot, P., and Sommart, K. (2003). Evaluation of ruminant nutritive value of cassava starch industry by products, energy feed sources and roughages using in vitro gas production technique. In *Proceeding of Annual Agricultural Seminar for Year*, pp. 27–28.

Njidda, A.A., and Nasiru, A. (2010). In vitro gas production and dry matter digestibility of tannin-containing forages of semi-arid region of north-eastern Nigeria. *Pakistan Journal of Nutrition* 9, 60–66.

Nocek, J.E. (1985). Evaluation of Specific Variables Affecting In Situ Estimates of Ruminal Dry Matter and Protein Digestion. *J Anim Sci* 60, 1347–1358.

Nocek, J.E., and Russell, J.B. (1988). Protein and Energy as an Integrated System. Relationship of Ruminal Protein and Carbohydrate Availability to Microbial Synthesis and Milk Production. *Journal of Dairy Science* 71, 2070–2107.

Nocek, J.E., and Tamminga, S. (1991). Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *Journal of Dairy Science* 74, 3598–3629.

Norris, K.H., Barnes, R.F., Moore, J.E., and Shenk, J.S. (1976). Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Animal Science* 43, 889–897.

Noviadi, R., Zairiful, Z., and Candra, A.A. (2017). Improvement of carbon-to-nitrogen (c/n) ratio by making cassava leaf silage and its implications in digestibility in goat. *Bangladesh Journal of Veterinary Medicine* 15, 127-132.

Noziere, P., and Michalet-Doreau, B. (2000). In sacco methods. *Farm Animal Metabolism and Nutrition* 233–253.

Oboh, G. (2006). Nutrient enrichment of cassava peels using a mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* spp solid media fermentation techniques. *Electronic Journal of Biotechnology* 9, 46–49.

OECD (2008). Consensus Document on Compositional Considerations for New Varieties of TOMATO: Key Food and Feed Nutrients, Anti-nutrients, Toxicants and Allergens. OECD Environment, Health and Safety Publications Series on the Safety of Novel Foods and Feeds No. 17, p. 1-42.

Offner, A., Bach, A., and Sauvant, D. (2003). Quantitative review of in situ starch degradation

Référence bibliographique

in the rumen. *Animal Feed Science and Technology* 106, 81–93.

Oh, Y.-K., Kim, J.-H., Kim, K.-H., Choi, C.-W., Kang, S.-W., Nam, I.-S., Kim, D.-H., Song, M.-K., Kim, C.-W., and Park, K.-K. (2008). Effects of Level and Degradability of Dietary Protein on Ruminal Fermentation and Concentrations of Soluble Non-ammonia Nitrogen in Ruminal and Omasal Digesta of Hanwoo Steers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 21, 392–403.

ONS (2018). Indice des prix à la consommation : Evolution des prix de quelques produits enquêtes durant le mois de Décembre 2017. *Statistiques Economiques*, N° 265, Alger, p. 1-8.

Olivo, P. M., Santos, G. T. D., Ítavo, L. C. V., Junior, S., Leal, E. S., & Prado, R. M. D. (2017). Assessing the nutritional value of agroindustrial co-products and feed through chemical composition, in vitro digestibility, and gas production technique. *Acta Scientiarum. Animal Sciences* 39, 289-295.

Oreopoulou, V., and Tzia, C. (1970). Utilization of Plant By-Products for the Recovery of Proteins, Dietary Fibers, Antioxidants, and Colorants. In *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*, pp. 209–232. Springer, Boston, MA.

Orpin, C.G. (1984). The role of ciliate protozoa and fungi in the rumen digestion of plant cell walls. *Animal Feed Science and Technology* 10, 121–143.

Orpin, C.G., and Joblin, K.N. (1997). The rumen anaerobic fungi. In *The Rumen Microbial Ecosystem*, (Springer), pp. 140–195.

Orskov, E. (2000). The in situ technique for the estimation of forage degradability in ruminants. *Forage Evaluation in Ruminant Nutrition* 175–188.

Ørskov, E.R., and McDonald, I. (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science* 92, 499–503.

Ouda, J., Nsahlai, I., and Mahundu, P. (2006). In vitro degradability and gas production parameters of *Sericea lespedeza* (*Lespedeza cuneata*) mixed with varying types and levels of roughages. *South African Journal of Animal Science* 36, 111–121.

Oussadi M.I., and Kitouni M. (2015). Statistical optimization of cultural conditions of an halophilic alpha-amylase production by halophilic *Streptomyces* sp. grown on orange waste powder. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 4, 685–693.

Paengkoum, P., Chen, S., and Paengkoum, S. (2019). Effects of crude protein and undegradable intake protein on growth performance, nutrient utilization, and rumen fermentation in growing Thai-indigenous beef cattle. *Tropical Animal Health and Production*.1-9.

Palangi, V., Taghizadeh, A., and Sadeghzadeh, M.K. (2013). Determine of nutritive value of

Référence bibliographique

dried citrus pulp various using in situ and gas production techniques. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 3, 8–16.

Pathak, A.K. (2008). Various factors affecting microbial protein synthesis in the rumen. *Veterinary World* 1, 186–189.

Patra, A.K., and Yu, Z. (2013). Effects of gas composition in headspace and bicarbonate concentrations in media on gas and methane production, degradability, and rumen fermentation using in vitro gas production techniques. *J. Dairy Sci.* 96, 4592–4600.

Paya, H., Taghizadeh, A., Lashkari, S., and Shirmohammadi, S. (2012). Evaluation of rumen fermentation kinetics of some by-products using in situ and in vitro gas production technique. *Slovak Journal of Animal Science* 45, 127–133.

Pell, A.N., and Schofield, P. (1993). Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion in vitro. *J. Dairy Sci.* 76, 1063–1073.

Persson Waller, K., Hallén Sandgren, C., Emanuelson, U., and Jensen, S.K. (2007). Supplementation of RRR- α -Tocopheryl Acetate to Periparturient Dairy Cows in Commercial Herds with High Mastitis Incidence. *Journal of Dairy Science* 90, 3640–3646.

Pettipher, G. L., & Latham, M. J. (1979). Characteristics of enzymes produced by *Ruminococcus flavefaciens* which degrade plant cell walls. *Microbiology*, 110, 21-27.

Piquer, O., Ródenas, L., Casado, C., Blas, E., and Pascual, J.J. (2009). Whole citrus fruits as an alternative to wheat grain or citrus pulp in sheep diet: Effect on the evolution of ruminal parameters. *Small Ruminant Research* 83, 14–21.

Pires, A.J.V., Carvalho, G.G.P. de, and Ribeiro, L.S.O. (2010). Chemical treatment of roughage. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39, 192–203.

Pirmohammadi, R., Rouzbehan, Y., Rezayazdi, K., and Zahedifar, M. (2006a). Chemical composition, digestibility and in situ degradability of dried and ensiled apple pomace and maize silage. *Small Ruminant Research* 66, 150–155.

Pirondini, M., Malagutti, L., Colombini, S., Amodeo, P., and Crovetto, G.M. (2012). Methane yield from dry and lactating cows diets in the Po Plain (Italy) using an in vitro gas production technique. *Italian Journal of Animal Science* 11, e61.

Playne, M.J., and McDonald, P. (1966). The buffering constituents of herbage and of silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 17, 264–268.

Prins, R.A., Lankhorst, A., Van der Meer, P., and Van Nevel, C.J. (1975). Some characteristics of *Anaerovibrio lipolytica*, a rumen lipolytic organism. *Antonie Van Leeuwenhoek* 41, 1–11.

Promkot, C., and Wanapat, M. (2009). Effect of Elemental Sulfur Supplementation on Rumen

Référence bibliographique

Environment Parameters and Utilization Efficiency of Fresh Cassava Foliage and Cassava Hay in Dairy Cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 22, 1366–1376.

Quin, J.I. (1943). Studies on the alimentary tract of merino sheep in South Africa. VII. Fermentation in the forestomachs of sheep.

Quin, J.I., Van Der Wath, J.G., and Myburgh, S. (1939). Studies on the alimentary tract of Merido sheep in South Africa. 4. Description of experimental technique. *Onderstepoort Journal of Veterinary Science* 11, 341–360.

Rabetafika, H.N., Bchir, B., Blecker, C., and Richel, A. (2014). Fractionation of apple by-products as source of new ingredients: Current situation and perspectives. *Trends in Food Science & Technology* 40, 99–114.

Raghuwanshi, S., Misra, S., and Saxena, R.K. (2014). Treatment of wheat straw using tannase and white-rot fungus to improve feed utilization by ruminants. *J Anim Sci Biotechnol* 5, 13.

Rahbarpur, A., Taghizadeh, A., and Mehmannaavaz, Y. Determination of nutritive value of tomato pomace using in vitro gas production technique. *Online Journal of Animal and Feed Research* 3, 20–22.

Ramin, M., and Huhtanen, P. (2012). Development of an in vitro method for determination of methane production kinetics using a fully automated in vitro gas system—A modelling approach. *Animal feed science and technology*, 174, 190-200.

Ranilla, M.J., Carro, M.D., López, S., Newbold, C.J., and Wallace, R.J. (2001). Influence of nitrogen source on the fermentation of fibre from barley straw and sugar beet pulp by ruminal micro-organisms in vitro. *British Journal of Nutrition* 86, 717–724.

Reddy, M.R., and Reddy, G.V.N. (1992). Effect of processing on the nutritive value of eight crop residues and two forest grasses in goats and sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 5, 295–301.

Reeves III, J.B. (2000). Use of near infrared reflectance spectroscopy. *Farm Animal Metabolism and Nutrition* 184–209.

Restaino, E.A., Fernández, E.G., La Manna, A., and Cozzolino, D. (2009). Prediction of the Nutritive Value of Pasture Silage by Near Infrared Spectroscopy (NIRS). *Chilean Journal of Agricultural Research* 69, 560–566.

Rihani N. (1991). Valeur alimentaire des sous-produits des agrumes en alimentation animale. *Options méditerranéennes. Série séminaires*, 16, 113-117.

Rojas-Bourrillon, A., Gamboa, L., Villarreal, M., Viquez, E., Castro, R. and Poore, M. (2001). La Sustitucion de Maiz por pulpa de citricos deshidratada sobre la produccion y composicion l´actea de vacas encastadas Holstein en el tropico humedo de Costa Rica. *Agronomia Costarricense* 25, 45–52.

Référence bibliographique

- Russell, J.B., O'connor, J.D., Fox, D.G., Van Soest, P.J., and Sniffen, C.J. (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminant fermentation. *Journal of Animal Science* 70, 3551–3561.
- Rymer, C., Huntington, J.A., Williams, B.A., and Givens, D.I. (2005). In vitro cumulative gas production techniques: History, methodological considerations and challenges. *Animal Feed Science and Technology* 123–124, 9–30.
- Safamehr, A., Malek, H., & Nobakhat, A. (2011). The effect of different levels of tomato pomace with or without multi-enzyme on performance and egg traits of laying hens. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 1, 39-47.
- Samsudin, A.A., Wright, A.-D.G., and Al Jassim, R. (2012). Cellulolytic Bacteria in the Foregut of the Dromedary Camel (*Camelus dromedarius*). *Applied and Environmental Microbiology* 78, 8836–8839.
- Sarnklong, C., Cone, J.W., Pellikaan, W., and Hendriks, W.H. (2010). Utilization of Rice Straw and Different Treatments to Improve Its Feed Value for Ruminants: A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 23, 680–692.
- Sato, M. F., Vieira, R. G., Zardo, D. M., Falcão, L. D., Nogueira, A., & Wosiacki, G. (2010). Apple pomace from eleven cultivars: an approach to identify sources of bioactive compounds. *Acta Scientiarum. Agronomy* 32, 29-35.
- Satter, L.D., and Slyter, L.L. (1974). Effect of ammonia concentration on rumen microbial protein production in vitro. *British Journal of Nutrition* 32, 199-208.
- Scerra, V., Caparra, P., Foti, F., Lanza, M., and Priolo, A. (2001). Citrus pulp and wheat straw silage as an ingredient in lamb diets: effects on growth and carcass and meat quality. *Small Rumin. Res.* 40, 51–56.
- Schieber, A., Stintzing, F.C., and Carle, R. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds — recent developments. *Trends in Food Science & Technology* 12, 401–413.
- Schofield, P. (2000). Gas production methods. *Farm Animal Metabolism and Nutrition*. 209–232.
- Schwab, C. G., and Ordway, R. S. (2004). Balancing diets for amino acids: Implications on production efficiency and feed costs. In *Proc. Penn State Dairy Cattle Nutrition Workshop, Grantville, PA*, 1-16.
- Schwarz, W.H. (2001). The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology* 56, 634–649.
- Selim, A.S.M., Pan, J., Takano, T., Suzuki, T., Koike, S., Kobayashi, Y., and Tanaka, K. (2004). Effect of ammonia treatment on physical strength of rice straw, distribution of straw

Référence bibliographique

particles and particle-associated bacteria in sheep rumen. *Animal Feed Science and Technology* 115, 117–128.

Senoussi, A., and Behir, T. (2010). Etude des disponibilités des aliments de bétails dans les régions sahariennes.-Cas de la Région du Souf. *Revue Du Chercheur* 8, 65–74.

Seo, J.K., Kim, M.H., Yang, J.Y., Kim, H.J., Lee, C.H., Kim, K.H., and Ha, J.K. (2013). Effects of Synchronicity of Carbohydrate and Protein Degradation on Rumen Fermentation Characteristics and Microbial Protein Synthesis. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 26, 358–365.

Shalini, R., and Gupta, D.K. (2010). Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology* 47, 365–371.

Shao, G. G. Atungulu, Z. Pan, T. Yue, A. Zhang, and X. Chen (2013). Separation Methods and Chemical and Nutritional Characteristics of Tomato Pomace. *Transactions of the ASABE* 56, 261–268.

Silva, A.T., and Ørskov, E.R. (1988). The effect of five different supplements on the degradation of straw in sheep given untreated barley straw. *Animal Feed Science and Technology* 19, 289–298.

Silva, C.J. da, Leonel, F. de P., Pereira, J.C., Costa, M.G., Moreira, L.M., Oliveira, T.S. de, and Abreu, C.L. de (2014). Sulfur sources in protein supplements for ruminants. *Revista Brasileira de Zootecnia* 43, 537–543.

Silva, E.C. da, Ferreira, M. de A., Vêras, A.S.C., Bispo, S.V., Conceição, M.G. da, Siqueira, M.C.B. de, Salla, L.E., and Souza, A.R.D.L. (2013). Replacement of corn meal by corn germ meal in lamb diets. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 48, 442–449.

Sinclair, L.A., Garnsworthy, P.C., Newbold, J.R., and Buttery, P.J. (1995). Effects of synchronizing the rate of dietary energy and nitrogen release in diets with a similar carbohydrate composition on rumen fermentation and microbial protein synthesis in sheep. *The Journal of Agricultural Science* 124, 463–472.

Si Ziani Y., 2001. Bilan fourrager 1998, comparaison offre/ besoins. In « Actes de l'atelier national sur la stratégie de développement des cultures fourragères en Algérie », Ed. A.Khaldoun, F.Bellah, M. Amrani, F. Djennadi, ITGC, Alger; 10-12 juin ; 2001 : 20-26.

Sommart, K., Parker, D.S., Rowlinson, P., and Wanapat, M. (2000). Fermentation characteristics and microbial protein synthesis in an in vitro system using cassava, rice straw and dried ruzi grass as substrates. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 13, 1084–1093.

Spear, J., 1994. Mineral in forages. In: Forage Quality, Evaluation, and Utilisation, in: National Conference on Forage Quality, Lincoln,. Faher J.R. (Eds.), pp. 281–317.

Référence bibliographique

Spears, J. W., & Weiss, W. P. (2014). Invited review: Mineral and vitamin nutrition in ruminants. *The professional animal scientist* 30, 180-191.

Stanton, T.B., and Canale-Parola, E. (1980). *Treponema bryantii* sp. nov., a rumen spirochete that interacts with cellulolytic bacteria. *Archives of Microbiology* 127, 145–156.

Steen, R.W.J., Gordon, F.J., Dawson, L.E.R., Park, R.S., Mayne, C.S., Agnew, R.E., Kilpatrick, D.J., and Porter, M.G. (1998). Factors affecting the intake of grass silage by cattle and prediction of silage intake. *Animal Science* 66, 115–127.

Steenbakkers, P.J.M., Freelove, A., Van Cranenbroek, B., Sweegers, B.M.C., Harhangi, H.R., Vogels, G.D., Hazlewood, G.P., Gilbert, H.J., and Op den Camp, H.J.M. (2002). The major component of the cellulosomes of anaerobic fungi from the genus *Piromyces* is a family 48 glycoside hydrolase. *DNA Sequence* 13, 313–320.

Sulas, L., Re, G.A., Bullitta, S., and Piluzza, G. (2016). Chemical and productive properties of two Sardinian milk thistle (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.) populations as sources of nutrients and antioxidants. *Genetic Resources and Crop Evolution* 63, 315–326.

Taasoli, G., and Kafilzadeh, F. (2008). Effects of Dried and Ensiled Apple Pomace from Puree Making on Performance of Finishing Lambs. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11, 294–297.

Tagliapietra, F., Cattani, M., Bailoni, L., and Schiavon, S. (2010). In vitro rumen fermentation: effect of headspace pressure on the gas production kinetics of corn meal and meadow hay. *Animal Feed Science and Technology*, 158, 197-201.

Tagliapietra, F., Cattani, M., Hansen, H.H., Bittante, G., and Schiavon, S. (2013). High doses of vitamin E and vitamin C influence in vitro rumen microbial activity. *Animal Feed Science and Technology* 183, 210-214.

Tagliapietra, F., Cattani, M., Guadagnin, M., Haddi, M.L., Sulas, L., Muresu, R., Squartini, A., Schiavon, S., and Bailoni, L. (2015). Associative effects of poor-quality forages combined with food industry byproducts determined in vitro with an automated gas-production system. *Animal Production Science* 55, 1117-1122.

Taherzadeh, M.J., and Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *Int J Mol Sci* 9, 1621–1651.

Takenaka, A., D’Silva, C.G., Kudo, H., Itabashi, H., and Cheng, K.-J. (1999). Molecular cloning, expression, and characterization of an endo- β -1, 4-glucanase cDNA from *Epidinium caudatum*. *The Journal of General and Applied Microbiology* 45, 57–61.

Tamminga, S. (1979). Protein degradation in the forestomachs of ruminants. *Journal of Animal Science* 49, 1615–1630.

Tamminga, S., and Doreau, M. (1991). Lipids and rumen digestion. *Rumen Microbial*

Référence bibliographique

Metabolism and Ruminant Digestion. Paris: Institut National de La Recherche Agronomique 151–164.

Tessema, Z., and Baars, R.M.T. (2004). Chemical composition, in vitro dry matter digestibility and ruminal degradation of Napier grass (*Pennisetum purpureum* (L.) Schumach.) mixed with different levels of *Sesbania sesban* (L.) Merr. *Animal Feed Science and Technology* 117, 29–41.

Theodorou, M.K., Williams, B.A., Dhanoa, M.S., McAllan, A.B., and France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology* 48, 185–197.

Thirumalesh, T., and Krishnamoorthy, U. (2013). Rumen microbial biomass synthesis and its importance in ruminant production. *Int. J. Livest. Res* 3, 5–26.

Thivend, P., Fonty, G., Jouany, J.P., Durand, M., and Gouet, P. (1985). Le fermenteur rumen. *Reproduction Nutrition Développement* 25, 729–753.

Tijani, I.D.R., Jamal, P., Alam, M.Z., and Mirghani, M.E.S. (2012). Optimization of cassava peel medium to an enriched animal feed by the white rot fungi *Panus tigrinus* M609RQY. *International Food Research Journal* 19, 427–432.

Tilley, J.M.A., and Terry, R.A. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science* 18, 104–111.

Tiret, L. (2001). *Physiologie de la digestion*. Polyco pié. Alfort: Ecole Nationale Vétérinaire, Unité Pédagogique de Physiologie et Thérapeutique.-69 p.

Toor, R.K., and Savage, G.P. (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food Research International* 38, 487–494.

Triki S., Benmessaoud N.E. and Ghozlane F. (2010). Valeur alimentaire comparée de la paille de céréales traitées à l'urée ou à l'ammoniac. *Livestock Research for Rural Development*. 22, Article 17. Retrieved May 25, 2019, from <http://www.lrrd.org/lrrd22/1/trik22017.htm>

Udén, P. (1992). The influence of leaf and stem particle size in vitro and of sample size in sacco on neutral detergent fibre fermentation kinetics. *Animal Feed Science and Technology* 37, 85–97.

Uddin, M., Khandaker, Z., Khan, J., and Islam, M. (2015a). Nutritional Evaluation and Chemical Compositions of Feedstuffs for Ruminant Using in vitro Gas Production Technique. *Annals of Veterinary and Animal Science* 2, 34–44.

Uddin, M., Khandaker, Z. H., Khan, M., and Khan, M. M. H. (2015b). Dynamics of microbial protein synthesis in the rumen-A review. *Annals of Veterinary and Animal Science*, 2, 116–131.

Référence bibliographique

Ülger, I., Kaliber, M., Ayaşan, T., and Küçük, O. (2018). Chemical composition, organic matter digestibility and energy content of apple pomace silage and its combination with corn plant, sugar beet pulp and pumpkin pulp. *South African Journal of Animal Science* 48, 497–500.

USDA (2014). National Nutrient Database for Standard Reference Release 27 Software v.2.0b. The National Agricultural Library. Chrysanthemum, garland, raw. Data Type: SR Legacy. Food Category: Vegetables and Vegetable. Products FDC ID: 169995. NDB Number: 11157. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169995/nutrients>. Date de consultation: 20-06-2019.

USDA (2016). Food Composition Databases. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/>. Date de consultation: 20-06-2019.

Ushida, K., Kayouli, C., De Smet, S., and Jouany, J.P. (1990). Effect of defaunation on protein and fibre digestion in sheep fed on ammonia-treated straw-based diets with or without maize. *British Journal of Nutrition* 64, 765–775.

Valente, M.E., Borreani, G., Caredda, S., Cavallarin, L., and Sulas, L. (2003). Ensiling forage garland (*Chrysanthemum coronarium* L.) at two stages of maturity and at different wilting levels. *Animal Feed Science and Technology* 108, 181–190.

Valizadeh, R., and Sobhanirad, S. (2009). The Potential of Agro-Industrial By-Products as Feed Sources for Livestock in Khorasan Razavi Province of Iran. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 8, 2375–2379.

Van Nevel, C.J., and Demeyer, D.I. (1996). Influence of pH on lipolysis and biohydrogenation of soybean oil by rumen contents in vitro. *Reproduction Nutrition Development* 36, 53–63.

Van Soest, P. (1967). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. Determination of plant cell wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50, 50–55.

Van Soest, P.J. (1994). Nutritional ecology of the ruminant. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd Ed. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY.

Van Soest, P. van, Robertson, J.B., and Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74, 3583–3597.

Vendruscolo, F., da Silva Ribeiro, C., Esposito, E., and Ninow, J.L. (2009). Protein Enrichment of Apple Pomace and Use in Feed for Nile Tilapia. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 152, 74–87.

Référence bibliographique

- Ventura, M.R., Pieltain, M.C., and Castanon, J.I.R. (2009). Evaluation of tomato crop by-products as feed for goats. *Animal Feed Science and Technology* 154, 271–275.
- Vérité, R., Michalet-Doreau, B., Chapoutot, P., Peyraud, J.L., and Poncet, C. (1987). Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin (PDI). *Bull. Tech. CRZV Theix INRA* 70, 19–34.
- Villarreal, M., Cochran, R.C., Rojas-Bourrillón, A., Murillo, O., Muñoz, H., and Poore, M. (2006). Effect of supplementation with pelleted citrus pulp on digestibility and intake in beef cattle fed a tropical grass-based diet (*Cynodon nlemfuensis*). *Animal Feed Science and Technology* 125, 163–173.
- Villas-Bôas, S.G., Esposito, E., and de Mendonça, M.M. (2003). Bioconversion of apple pomace into a nutritionally enriched substrate by *Candida utilis* and *Pleurotus ostreatus*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 19, 461–467.
- Volanis, M., Zoiopoulos, P., and Tzerakis, K. (2004). Effects of feeding ensiled sliced oranges to lactating dairy sheep. *Small Ruminant Research* 53, 15–21.
- Volanis, M., Zoiopoulos, P., Panagou, E., and Tzerakis, C. (2006). Utilization of an ensiled citrus pulp mixture in the feeding of lactating dairy ewes. *Small Ruminant Research* 64, 190–195.
- Von Keyserlingk, M.A.G., Swift, M.L., Puchala, R., and Shelford, J.A. (1996). Degradability characteristics of dry matter and crude protein of forages in ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 57, 291–311.
- Wallace, R.J. (1994). Amino acid and protein synthesis, turnover, and breakdown by ruminal microorganisms. *Principles of Protein Nutrition of Ruminants*, 71–111.
- Wallace, R.J. (1996). Ruminal microbial metabolism of peptides and amino acids. *The Journal of nutrition*. 126, 1326S-1334S.
- Wanapat, M., Chenost, M., Munoz, F., and Kayouli, C. (1996). Methods for improving the nutritive value of fibrous feed: treatment and supplementation. *Ann. Zootech.* 45, 89–103.
- Warner, A.C.I. (1956). Proteolysis by rumen micro-organisms. *Microbiology* 14, 749–762.
- Wei, C., Lin, S.X., Wu, J.L., Zhao, G.Y., Zhang, T.T., and Zheng, W.S. (2018). Effects of supplementing vitamin E on in vitro rumen gas production, volatile fatty acid production, dry matter disappearance rate, and utilizable crude protein. *Czech Journal of Animal Science* 60, 335–341.
- Wing, J.M., Van Horn, H.H., Sklare, S.D., and Harris, B. (1988). Effects of Citrus Molasses Distillers Solubles and Molasses on Rumen Parameters and Lactation. *Journal of Dairy Science* 71, 414–420.

Référence bibliographique

Wood, C.D., and Badve, V.C. (2001). Recent developments in laboratory methods for the assessment of ruminant feeds. Booklet. 500 copies. 14 pp. BAIF Development Research Foundation, Pune, India and Natural Resources Institute (NRI), Chatham, UK.(Science).

Yanke, L.J., Dong, Y., McAllister, T.A., Bae, H.D., and Cheng, K.-J. (1993). Comparison of amylolytic and proteolytic activities of ruminal fungi grown on cereal grains. *Canadian Journal of Microbiology* 39, 817–820.

Yattoo, M.I., Saxena, A., Deepa, P.M., Habeab, B.P., Devi, S., Jatav, R.S., and Dimri, U. (2013). Role of trace elements in animals: a review. *Veterinary World* 6, 963–967.

Younis, K., and Ahmad, S. (2015). Waste utilization of apple pomace as a source of functional ingredient in buffalo meat sausage. *Cogent Food & Agriculture* 1, 1119397.

Yuangklang, C., Vasupen, K., S, W., Bureenok, S., Panyakaew, P., Alhaidary, A., Mohamed, H., and Beynen, A. (2010). Effect of Replacement of Soybean meal by Dried Tomato Pomace on Rumen Fermentation and Nitrogen Metabolism in Beef Cattle. *American Journal of Agricultural and Biological Science* 5, 256–260.

Yue, Z.-B., Yu, H.-Q., Hu, Z.-H., Harada, H., and Li, Y.-Y. (2008). Surfactant-enhanced anaerobic acidogenesis of *Canna indica* L. by rumen cultures. *Bioresource Technology* 99, 3418–3423.

Zayed, M.S. (2018). Enhancement the feeding value of rice straw as animal fodder through microbial inoculants and physical treatments. *Int J Recycl Org Waste Agricult* 7, 117–124.

Zhong-Tao, S., Lin-Mao, T., Cheng, L., and Jin-Hua, D. (2009). Bioconversion of apple pomace into a multienzyme bio-feed by two mixed strains of *Aspergillus niger* in solid state fermentation. *Electronic Journal of Biotechnology* 12, 1–13.

Zhou, L., Xue, G.P., Orpin, C.G., Black, G.W., Gilbert, H.J., and Hazlewood, G.P. (1994). Intronless *celB* from the anaerobic fungus *Neocallimastix patriciarum* encodes a modular family A endoglucanase. *Biochemical Journal* 297, 359–364.

Zhu, J., Wan, C., and Li, Y. (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresource Technology* 101, 7523–7528.

Zicarelli, F., Calabrò, S., Cutrignelli, M.I., Infascelli, F., Tudisco, R., Bovera, F., and Piccolo, V. (2011). In vitro fermentation characteristics of diets with different forage/concentrate ratios: comparison of rumen and faecal inocula. *J. Sci. Food Agric.* 91, 1213–1221.

Annexes

Annexe 1

Dosage des sucres totaux

1- Principe

Les sucres totaux sont déterminés selon la méthode décrite par Dubois et *al.* (1956). Les sucres simples, oligosaccharides, polysaccharides et leurs dérivés réagissent avec le phénol et l'acide sulfurique concentré et donnent une coloration jaune-orange. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses à une longueur d'onde de 488 nm.

2- Méthode

Cent milligramme de chaque substrat sont pesés dans des flacons en verre, 100 ml d'eau bi-distillé sont ajoutés. Le mélange est homogénéisé et une aliquote de chaque solution est diluée quatre fois afin d'avoir des concentrations dans l'intervalle des concentrations standards. 1 ml d'échantillon dilué est mélangé à 1 ml de phénol 5% et 5 ml d'acide sulfurique concentré (95%). Le mélange est agité et laissé reposer 10 min à température ambiante, puis incubé au bain marie à 30°C pendant 20 min. La densité optique est lue à une longueur d'onde de 488 nm. La concentration des sucres totaux est déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage d'une solution de glucose à des concentrations allant de 10 à 100 µg/l (figure 13). Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport à la MS.

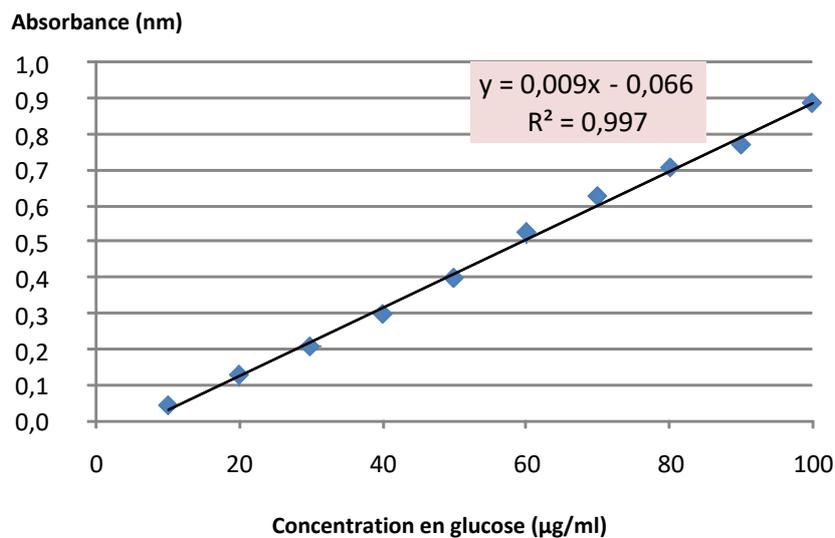


Fig.21 : Courbe étalon des sucres totaux

Le taux en protéines brutes est en suite calculé en multipliant par 6,25 la teneur en azote total.

Annexe 3

Dosage des constituants pariétaux

Le but de cette analyse est de distinguer les différents constituants pariétaux des échantillons. La procédure appliquée est celle de Van Soest et *al.* (1991).

1- Estimation de la fraction NDF (Neutral Detergent Fibre)

La fraction **NDF** est la fraction insoluble dans un détergent neutre, elle correspond à la teneur en cellulose, hémicellulose et lignine.

- **Préparation de la solution du détergent neutre**

Pour 1 litre d'eau distillée, la solution du détergent neutre est composée de 30 g de sodium dodécyl sulfate; 18,61 g d'éthylène diamine tétra acétique disodique dihydraté; 6,81 g de borate de sodium; 4,56 g de phosphate disodique anhydre et 10,0 ml de tri éthylène glycol.

- **Dosage des fibres NDF**

Dans un matras, sont introduit 100 ml de la solution du détergent neutre et 1 g de matière sèche. La solution est portée à ébullition pendant une heure puis filtrée à travers un creuset en verre N°2. Le creuset est alors rincé avec de l'eau distillée chaude et mis à sécher pendant 8 heures dans une étuve réglée à 105°C. Le résidu obtenu constitue la fraction NDF. Le résultat est exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche.

2- Estimation de la fraction ADF (Acid Detergent Fibre)

La fraction ADF de l'aliment est la partie insoluble dans un détergent acide, elle contient la lignine et la cellulose. L'hémicellulose et le reste des constituants sont solubilisés dans la solution du détergent acide.

- **Préparation de la solution du détergent acide**

Dans une fiole jaugée de 1000 ml, 20 g de bromure de triméthylammonium cétylique sont introduits avec 30 ml d'acide sulfurique pur (96-98%). La solution est complétée au trait de jauge par l'eau distillée.

- **Dosage des fibres ADF**

Le creuset contenant le résidu obtenu après le traitement de l'échantillon avec la solution du détergent neutre est introduit dans un matras avec 75 ml de la solution du détergent acide et portée à ébullition pendant une heure. La solution est filtrée à travers le

même creuset, qui est ensuite lavé à l'eau distillée chaude et séché 8h à 105°C. La concentration en ADF est exprimée exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche.

3- Estimation de la fraction ADL

La fraction ADL est la fraction insoluble dans l'acide sulfurique à 72%. Le résidu correspond, en plus des cendres, à la lignine brute. Dans le creuset contenant l'ADF sont versés quelques millilitres d'acide sulfurique à 72% de manière à recouvrir le résidu et au moyen d'une baguette de verre, on agite jusqu'à l'obtention d'une masse homogène. Le creuset est mis dans un bécher de manière que l'acide ne soit pas perdu. Après 3 heures de contact avec l'acide, la solution est filtrée sous vide. Le lavage à l'eau distillée chaude se poursuit jusqu'à disparition de la réaction acide. Le résultat est exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche.

Annexe 4

Préparation de la salive artificielle

1- Composition

La salive artificielle se compose d'un mélange de différentes solutions :

a) Solution des éléments majeurs: (composition par litre d'eau distillée)

5.7 de Na_2HPO_4

6.2 de KH_2PO_4

0.6 g de $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$

b) Solution des éléments traces: (composition par 100 ml d'eau distillée)

13.2 g de $\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$

10.0 g de $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$

1.0 g de $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$

0.8 g de $\text{FeCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$

c) Solution tampon: (composition par litre d'eau distillée)

35.0 g de NaHCO_3

4.0 g de $(\text{NH}_4) \text{HCO}_3$

d) Solution de Resazurine: (composition par 100ml d'eau distillée)

100 mg de $\text{C}_{12}\text{H}_6\text{-NO}_4$

e) Solution réductrice: (composition par 50ml d'eau distillée)

2.0 ml de NaOH (1N)

285 mg de $\text{Na}_2\text{S} \times 7\text{H}_2\text{O}$

La solution de réduction doit être fraîchement préparée juste avant l'arrivée du liquide ruminal. Les autres solutions peuvent être préparées et conservées.

2- Constitution

Pour un litre de salive, les solutions sont mélangées dans une fiole dans l'ordre suivant:

474.0 ml d'eau distillée;

0.12 ml de solution d'éléments traces;

237.0 ml de solution tampon;

237.0 ml de solution d'éléments majeurs;

et 1.22 ml de résazurine;

Après autoclavage, la solution reconstituée est refroidie et la solution réductrice est ajoutée progressivement. Le mélange est barboté avec un flux continu de CO₂, ce qui entraîne la réduction de la salive artificielle indiquée par le virage de la couleur du bleu au rose à l'incolore.

Résumés

Résumé

Cette étude a été menée pour évaluer la possibilité de la valorisation des sous-produits agro-alimentaires et leur intégration comme aliments alternatifs dans l'alimentation des ruminants. Dans ce contexte trois résidus de l'industrie agroalimentaire: les épiluchures de tomate, la pâte d'oranges et les résidus de pomme ont été testés seuls et en mélange avec des aliments fibreux : cardes (*Sylibum marianum* L. Gaertn.), chrysanthèmes (*Chrysanthemum coronarium* L.) et foin de la vesce-avoine. L'aspect physico-chimique a été évalué par la détermination de la composition chimique, la mesure de la capacité tampon et du pH. L'aspect métabolique a été évalué par la cinétique de dégradation *in vitro* des substrats et par la dégradabilité apparente. Un essai d'enrichissement des sous-produits en protéines microbiennes a été évalué en utilisant quatre types de milieux de culture et trois fermentations successives.

Les résultats de la composition chimique montrent que les sous-produits agro-alimentaires renferment des taux en fibres relativement faibles (7,48- 26,02 %), ils sont riches en sucres totaux (31,25- 77,76 %) mais faibles en protéines (2,26- 5,75 %), à l'exception des résidus de tomates qui se démarquent des autres substrats par une teneur modérément élevée en protéines (12,1 % MS).

L'étude de la fermentescibilité *in vitro* des substrats seuls par la microflore ruminale montre que les sous-produits sont facilement métabolisés. En comparaison aux plantes fibreuses, ils produisent significativement ($p < 0.05$) plus de gaz (203,4- 239,5 ml/g MS), a des vitesses plus élevées (0,108- 0,144 b/h), des temps de demi-production de gaz (3,89- 6,41 h) et des temps de latences plus courts (0,19- 0,48 h). Le mélange avec les aliments fibreux a amélioré la dégradabilité de ces derniers (19,5 %) tout en abaissant le volume total (29,6 %) et la vitesse de production de gaz (28,6 %) et en améliorant le temps de demi-production de gaz (28,77 %) et le pH final (0,10 unités) des sous-produits.

Le bilan protéique montre qu'un gain en protéines plus important est enregistré lorsque les sous-produits d'oranges sont incubés seuls (74,8 %) ou en mélange avec les cardes (41,9 %). En revanche, une perte en protéines est signalée pour les résidus de tomates (3,4 %) et leur mélange avec les cardes (10,2 %). La synthèse des protéines est plus élevée lorsque le milieu de culture est composé d'une source d'azote organique (milieu simplifié) (27,6 %) que lorsque l'azote minéral est utilisé (milieu Menke) (14,5 %). La dose du liquide ruminal a également affecté le gain en protéines, qui est plus élevé (34 %) quand une faible dose d'inoculum est utilisée (5 ml). La fermentation répétée a hautement ($P < 0.0001$) affecté la synthèse des protéines, qui a diminué progressivement de la première (55,6 %) à la troisième incubation (-6,4 %).

En conclusion, à l'exception des mélanges des résidus agroalimentaires avec foin et du mélange sous-produits d'oranges : chrysanthèmes tous les mélanges binaires (50 :50) avec le *Sylibum marianum* et le *Chrysanthemum coronarium* constituent des aliments alternatifs qui peuvent subvenir aux besoins nutritionnels de la flore ruminale tout en étant compatibles avec son activité. En outre, les sous-produits d'oranges constituent un substrat prometteur pour la production d'aliments enrichis en protéines.

Mots clés : Résidus de l'industrie agroalimentaire, valorisation, alimentation des ruminants, fermentescibilité *in vitro*, microflore ruminale, enrichissement en protéines.

ملخص

أجريت هذه الدراسة لتقييم إمكانية تثمين مخلفات الصناعات الغذائية وإدماجها كأعلاف بديلة في حمية المجترات. في هذا السياق ، تم اختيار ثلاثة بقايا ناتجة عن الصناعات الغذائية (قشور الطماطم ، لب البرتقال وبقايا التفاح) بمفردها أو بعد خلطها مع النباتات الليلية: السليبين المريمي (*Sylibum marianum* L. Gaertn.) ، الأقحوان (*Chrysanthemum coronarium* L.) و القش (*vesce-avoine*). تم تقييم الجانب الفيزيو-كيميائي من خلال تحديد التركيب الكيميائي ، وقياس قدرة امتصاص الحموضة ودرجة الحموضة. تم تقييم الجانب الأيضي عن طريق حركية تدهور الركائز في المختبر و درجة التحلل الظاهرية. تم تقييم اختبار تخصيب المنتجات بالبروتين الميكروبي باستخدام أربعة أنواع من الأوساط وثلاثة تخمرات متتالية.

تظهر نتائج التركيب الكيميائي أن بقايا الصناعات الغذائية تحتوي على كمية منخفضة نسبياً من الألياف (7.48-26.02%) ، غنية بالسكر الكلي (31.25-77.76%) ولكنها تحتوي على نسبة منخفضة من البروتين (2.26-5.75%) ، باستثناء بقايا الطماطم التي تبرز من بين الركائز الأخرى باحتوائها على كمية عالية نسبياً من البروتينات (12.1% مادة جافة).

إن دراسة قابلية التخمر المخبري للركائز على حدا من قبل ميكروبات الكرش توضح أن مخلفات الصناعات الغذائية يتم استقلالها بسهولة مقارنة بالنباتات الليلية ، حيث أنها تنتج كمية أكبر من الغاز (203.4-239.5 مل / جم مادة جافة) ، بمعدلات أعلى (0.108-0.144 ساعة/ b) ، وقت أطول لإنتاج نصف الغاز (3.89-6.41 سا) ، وأوقات كمون أقصر (0.19-0.48 سا). أدى مزجها بالنباتات الليلية إلى تحسين قابلية تحلل هذه الأخيرة (19.5%) مع خفض الحجم الكلي للغاز (29.6%) ومعدل إنتاجه (28.6%) وتحسين وقت إنتاج نصف الغاز (28.77%) ودرجة الحموضة النهائية (0.10 وحدة) لبقايا الصناعات الغذائية.

يُظهر توازن البروتين أنه يتم تسجيل زيادة في نسبة البروتين عندما يتم تحضين المنتجات الثانوية للبرتقال بمفردها (74.8%) أو بعد خلطها مع *Sylibum marianum* (41.9%). من ناحية أخرى ، يتم فقدان البروتين عند استعمال مخلفات الطماطم (3.4%) ومزجها مع *Sylibum marianum* (10.2%). يكون تخليق البروتين أعلى عندما يحوي وسط الاستزراع النيتروجين العضوي (*milieu simplifié*) (27.6%) منه عند استخدام النيتروجين المعدني (14.5%) (*milieu Menke*). أثرت جرعة سائل الكرش أيضاً على اكتساب البروتين ، الذي كان أكبر (34%) عند استعمال جرعة منخفضة من سائل الكرش (5 مل). أثر التخمر المتكرر على تخليق البروتين ($P < 0.0001$) ، الذي انخفض تدريجياً من الحضانة الأولى (55.6%) إلى الثالثة (-6.4%).

في الختام ، باستثناء مزيج القش مع بقايا الصناعات الغذائية و مزيج بقايا البرتقال والأقحوان جميع الخلائط الثنائية (50:50) مع *Sylibum marianum* و *Chrysanthemum coronarium* هي أغذية بديلة يمكنها تلبية احتياجات ميكروبات الكرش في حين تتوافق مع نشاطها. بالإضافة إلى ذلك ، تعتبر المنتجات الثانوية للبرتقال ركائز واعدة لإنتاج الأغذية الغنية بالبروتين.

الكلمات المفتاحية: بقايا الصناعات الغذائية ، التثمين ، تغذية المجترات ، التخمر المخبري ، ميكروبات الكرش ، تخصيب البروتين.

Abstract

This study was conducted in order to evaluate the possibility of valorization of agro-industrial by-products and their integration as alternative feeds for ruminants. In this context, three residues from food industry: tomato peels, orange pulp, and apple pomace were tested alone and mixed with fibrous forage: milk thistle (*Sylibum marianum* L. Gaertn.), crown daizy (*Chrysanthemum coronarium* L.), and Hay. The physico-chemicals aspects were evaluated by the determination of chemical composition and the measurement of buffering capacity and pH. The metabolic aspects were evaluated by the *in vitro* degradation kinetics of substrates and the apparent degradability. A test for microbial protein enrichment of by-products was evaluated using two types of culture media and three successive fermentations, and various levels of nitrogen.

Chemical composition results show that by-products contain relatively low fiber content (7.48-26.02%), high total sugars (31.25-77.76%) but low protein (2.26-5.75%), with the exception of tomato residues, which are different from the other substrates by moderately high protein content (12.1%).

The study of *in vitro* fermentability of substrates alone by rumen microflora shows that by-products are easily metabolized. In comparison to fibrous plants, they produce significantly ($P < 0.05$) more gas (203.4- 239.5 ml / g DM) with higher rates (0.108-0.144 b/h), and half-times gas production (3.89-6.41 hrs), and shorter lag times (0.19- 0.48 h). The mixture (50 % : 50 %) with fibrous forage improved degradability of the latter (19.5%) while reduced the total volume gas (29.6%), gas production rate (28.6%) , and improved half-time of gas production (28.77%) and final ruminal pH (0.10 units) of by-products.

Protein balance shows that a greater protein gain is recorded when oranges by-products were incubated alone (74.8%) or mixed with milk thistle (41.9%). In contrast, a protein loss is reported for tomato residues (3.4%) and for their mixture with milk thistle (10.2%). Microbial protein synthesis was higher when the culture medium is composed of an organic nitrogen source (simplified media) (27.6%) only when mineral nitrogen is used (Menke media) (14.5%). The amount (ml) of ruminal fluid also affected protein gain, which is higher (34%) when a low amount of inoculum is incubated (5 ml). Repeated fermentation strongly affected ($P < 0.0001$) microbial protein synthesis which decreased gradually from the first (55.6%) to the third incubation (-6.4%).

In conclusion, with the exception of mixtures of hay with a residues and mixture of oranges by-product: crown daizy all binary mixtures (50:50) with *Sylibum marianum* and *Chrysanthemum coronarium* could used as alternative feeds that can meet needs of ruminal flora while being compatible with its activity. In addition, oranges by-products are a promising substrate for the production of protein-enriched feeds.

Keywords: Agro-industrial by-products, valorization, ruminants feeding, *in vitro* fermentability, rumen microflora, micrabial protein enrichment.

Année universitaire : 2019/2020

Présentée par : LIFA Maroua

Intitulé : Conversion microbienne des résidus de biomasse agro-alimentaire et leur valorisation en alimentation animale

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat

Résumé

Cette étude a été menée pour évaluer la possibilité de la valorisation des sous-produits agro-alimentaires et leur intégration comme aliments alternatifs dans l'alimentation des ruminants. Dans ce contexte trois résidus de l'industrie agroalimentaire: les épiluchures de tomate, la pâte d'oranges et les résidus de pomme ont été testés seuls et en mélange avec des aliments fibreux : cardes (*Sylibum marianum* L. Gaertn), chrysanthèmes (*Chrysanthemum coronarium* L.) et foin de la vesce-avoine. L'aspect physico-chimique a été évalué par la détermination de la composition chimique, la mesure de la capacité tampon et du pH. L'aspect métabolique a été évalué par la cinétique de dégradation *in vitro* des substrats et par la dégradabilité apparente. Un essai d'enrichissement des sous-produits en protéines microbiennes a été évalué en utilisant quatre types de milieux de culture et trois fermentations successives.

Les résultats de la composition chimique montrent que les sous-produits agro-alimentaires renferment des taux en fibres relativement faibles (7,48- 26,02 %), ils sont riches en sucres totaux (31,25- 77,76 %) mais faibles en protéines (2,26- 5,75 %), à l'exception des résidus de tomates qui se démarquent des autres substrats par une teneur modérément élevée en protéines (12,1 % MS).

L'étude de la fermentescibilité *in vitro* des substrats seuls par la microflore ruminale démontre que les sous-produits sont facilement métabolisés. En comparaison aux plantes fibreuses, ils produisent significativement ($p < 0.05$) plus de gaz (203,4- 239,5 ml/g MS), a des vitesses plus élevées (0,108- 0,144 b/h), des temps de demi-production de gaz (3,89- 6,41 h) et des temps de latences plus courts (0,19- 0,48 h). Le mélange avec les aliments fibreux a amélioré la dégradabilité de ces derniers (19,5 %) tout en abaissant le volume total (29,6 %) et la vitesse de production de gaz (28,6 %) et en améliorant le temps de demi-production de gaz (28,77 %) et le pH final (0,10 unités) des sous-produits.

Le bilan protéique montre qu'un gain en protéines plus important est enregistré lorsque les sous-produits d'oranges sont incubés seuls (74,8 %) ou en mélange avec les cardes (41,9 %). En revanche, une perte en protéines est signalée pour les résidus de tomates (3,4 %) et leur mélange avec les cardes (10,2 %). La synthèse des protéines est plus élevée lorsque le milieu de culture est composé d'une source d'azote organique (milieu simplifié) (27,6 %) que lorsque l'azote minéral est utilisé (milieu Menke) (14,5 %). La dose du liquide ruminal a également affecté le gain en protéines, qui est plus élevé (34 %) quand une faible dose d'inoculum est utilisée (5 ml). La fermentation répétée a hautement ($P < 0,0001$) affecté la synthèse des protéines, qui a diminué progressivement de la première (55,6 %) à la troisième incubation (-6,4 %).

En conclusion, à l'exception des mélanges des résidus agroalimentaires avec foin et du mélange sous-produits d'oranges : chrysanthèmes tous les mélanges binaires (50 :50) avec le *Sylibum marianum* et le *Chrysanthemum coronarium* constituent des aliments alternatifs qui peuvent subvenir aux besoins nutritionnels de la flore ruminale tout en étant compatibles avec son activité. En outre, les sous-produits d'oranges constituent un substrat prometteur pour la production d'aliments enrichis en protéines.

Mots clés : Résidus de l'industrie agroalimentaire, valorisation, alimentation des ruminants, fermentescibilité *in vitro*, microflore ruminale, enrichissement en protéines.

Laboratoire de recherche : Laboratoire de Mycologie, de Biotechnologie et de l'Activité Microbienne

Membres du jury :

Président : Prof. HAMIDECHI Mohamed-Abdelhafid	(Université FM, Constantine 1)
Rapporteur : Prof. HADDI Mohamed Laid	(Université FM, Constantine 1)
Examineur : Prof. BEKHOUCHE Farida	(Université FM, Constantine 1)
Examineur : Prof. MEZIANE Toufik	(Université de Batna)
Examineur : Prof. ARHAB Rabah	(Université d'Oum El-Bouaghi)

