



HAL
open science

Physiologie digestive de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) en croissance et impact des teneurs en fibres et céréales de la ration sur la santé et les performances zootechniques

Yapo Magloire Yapi

► **To cite this version:**

Yapo Magloire Yapi. Physiologie digestive de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) en croissance et impact des teneurs en fibres et céréales de la ration sur la santé et les performances zootechniques. Autre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2013. Français. NNT : 2013INPT0019 . tel-04314022

HAL Id: tel-04314022

<https://theses.hal.science/tel-04314022>

Submitted on 29 Nov 2023

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Pathologie, Toxicologie, Génétique et Nutrition

Présentée et soutenue par :
Yapo Magloire YAPI

le : jeudi 14 mars 2013

Titre :
Physiologie digestive de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) en croissance
et impact des teneurs en fibres et céréales de la ration sur la santé et les
performances zootechniques

Ecole doctorale :
Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :
UMR 1289 INRA-INP-ENVIT" TANDEM"

Directeur(s) de Thèse :
Francis ENJALBERT
Thierry GIDENNE

Rapporteurs :
Jean-François GRONGNET
Cécile MARTIN

Membre(s) du jury :
Théodore ALOGNINOUBA
Jean-François GRONGNET
Cécile MARTIN
Francis ENJALBERT
Thierry GIDENNE

REMERCIEMENTS

Ce projet de thèse a été pour moi une aventure très enrichissante. Je tiens à remercier tous ceux et toutes celles qui ont contribué à son aboutissement.

Je remercie M. Jean-François GRONGNET (professeur de nutrition animale, Agrocampus-Ouest, Rennes) et Dr Cécile MARTIN (Chargée de recherche à l'INRA, Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores, Theix) qui me font l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse. Je remercie également M. Théodore ALOGNINOVA (professeur à VetAgro Sup Lyon) pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je tiens à témoigner ma gratitude à mon directeur de thèse, le professeur Francis ENJALBERT sans qui cette thèse n'aurait peut-être pas vu le jour. Merci professeur pour m'avoir fait confiance et pour m'avoir encadré jusqu'à l'aboutissement de ce projet. Merci pour l'excellent encadrement scientifique et les encouragements même dans les moments les plus difficiles lors de l'exécution des travaux. Merci également pour avoir assuré d'excellentes conditions matérielles de travail qui m'ont permis d'atteindre les objectifs de cette étude. Je ne vous remercierai jamais assez.

Je voudrais témoigner également ma reconnaissance à M. Thierry GIDENNE pour avoir accepté de co-diriger cette thèse. Merci pour l'excellent encadrement scientifique dont j'ai bénéficié. Merci pour votre rigueur dans le travail et pour votre disponibilité. Vous m'avez transmis beaucoup de savoir faire qui je crois, m'aideront dans ma carrière futur. Merci pour tout.

Je voudrais remercier M. Daniel ZONGO (professeur à l'INP-HB de Yamoussoukro) pour avoir accepté d'encadrer mes travaux sur place en Côte-d'Ivoire. Merci professeur pour vos conseils et votre disponibilité. Merci pour m'avoir soutenu jusqu'au bout de ce projet.

Je suis reconnaissant à l'Agence Universitaire de la Francophonie pour m'avoir accordé une bourse d'étude pour le financement de mes différents séjours en France et en Côte-d'Ivoire au cours de mes travaux. Merci d'avoir ainsi contribué à la concrétisation de mon projet professionnel. Je voudrais remercier personnellement Mme Anne-Laure LEJEUNE, Assistante de projets Mobilités et FOAD, Rectorat et Services centraux - Paris qui a toujours prêté une oreille attentive à nos préoccupations, à Mme Fabar Sané Chargée de Projet

Mobilités Bureau Afrique de l'Ouest pour sa disponibilité, Mme Mambo Véronique et Mme Djané Clémentine responsables locales de l'Agence Universitaire de la Francophonie à Abidjan pour leur disponibilité.

Je tiens à remercier M. Xavier FERNANDEZ, directeur de l'UMR TANDEM pour m'avoir accueilli dans leur équipe de recherche et pour m'avoir ouvert les portes de leurs laboratoires. J'adresse mes remerciements à Mme Djamilia LEKHAL (Professeur EIPurpan) et à M. Théodore ALOGNINOUBA (professeur à VetagroSup Lyon) pour avoir participé au comité de pilotage de ma thèse.

Je remercie tout le personnel du laboratoire Alimentation de l'ENVT pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité tout au long de mes séjours. Merci à Annabelle TROEGELER-MEYNADIER, Nathalie PRIYMENKO et Céline DOMANGE pour leur disponibilité et leur convivialité. Merci à Marie-Luce CHEMIT pour sa disponibilité et pour son aide très précieuse dans l'analyse chimique de mes échantillons expérimentaux. Merci à Yves FARIZON et Jean-Philippe VERGNES pour leur disponibilité et leur sympathie.

Je remercie également le personnel de l'INRA Toulouse à Auzeville. Merci à Béatrice GABINAUD, à Carole BANNELIER et à Muriel SEGURA pour leur contribution à ce travail et leur aide pour certaines analyses chimiques et microbiologiques. Merci à Sylvie COMBES et à Laurent CAUQUIL pour avoir supervisé la partie microbiologique de cette étude, merci pour le traitement des données issues du pyroséquençage 454.

Merci à tous les collègues thésards avec qui j'ai vécu cette expérience unique en son genre. Je pense particulièrement à Asma ZENED et à Muhammad KALEEM. Je pense aussi à Julien ARROYO, à Mickael REY et à bien d'autres.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans penser à ma famille. Je remercie particulièrement mon épouse, Hermance Laure ALLO qui a accepté bien de sacrifices ces dernières années pour la réalisation de ce projet professionnel. Je fais un coucou à mes deux fils, Yanis et Noah qui ont été privés de l'amour paternel pendant mes longs séjours en France. Je remercie également Alphone YAPI, mon aîné pour son soutien indéfectible.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE

1) Yapi Y.M., Gidenne T., Farizon Y., Segura M., Zongo D. et Enjalbert F. Post-weaning changes in the digestive physiology and caecal fermentative activity in the greater cane rat (*Thryonomys swinderianus*), *African Zoology*, article accepté.

2) Yapi Y.M., Enjalbert F., Gidenne T. et Zongo D. 2011. Digestive anatomy and impact of dietary fibre on performances of the growing grasscutter (*Thryonomys swinderianus*). Congrès de l'European Society of Veterinary and Comparative Nutrition, Saragosse, Espagne.

L'article accepté et la communication à congrès sont présentés en annexe.

Participation à des journées scientifiques

- 1) Nutrition et physiologie digestive chez l'aulacode: rôle des fibres alimentaires. Communication, journée de l'école doctorale SEVAB, Toulouse, France, 2011.
- 2) Elevage de l'aulacode en Afrique : enjeux, acquis et perspectives. Communication, semaine de la Solidarité Internationale, ENVT, Toulouse, France, 2012.

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX	11
LISTE DES FIGURES	13
LISTE DES PHOTOS	15
LISTE DES ABREVIATIONS	16
INTRODUCTION	18
CONTEXTE SCIENTIFIQUE	22
1. Connaissances sur le grand aulacode	23
1.1. Généralités	23
1.1.2. Taxonomie	23
1.1.3. Morphologie	24
1.1.4. Répartition géographique et habitat	25
1.1.5. Rythmes biologiques et comportements sociaux	26
1.1.6. Reproduction	27
1.1.7. Performances de croissance	28
1.1.8. Pathologie de l'aulacode en élevage	30
1.2. Système digestif et alimentation de l'aulacode	31
1.2.1. Anatomie de l'appareil digestif	31
1.2.2. Répartition de quelques activités enzymatiques dans le tube digestif de l'aulacode	34
1.2.3. Phénomène de coprophagie	35
1.2.4. Alimentation	36
<i>1.2.4.1. Habitudes alimentaires en milieu naturel</i>	36
<i>1.2.4.2. Alimentation en élevage</i>	36
<i>1.2.4.3. Besoins nutritionnels de l'aulacode</i>	40

<i>1.2.4.4. Comportement alimentaire de l'aulacode et ingestion</i>	41
<i>1.2.4.5. Digestibilité</i>	41
<i>1.2.4.6. Indice de consommation</i>	42
2. Les fibres dans l'alimentation des monogastriques herbivores	43
2.1. Définition et structure des fibres	43
2.2. Méthodes de dosage	44
2.3. Rôles des fibres dans l'alimentation des monogastriques herbivores	45
2.3.1. Chez le lapin	45
<i>2.3.1.1. Particularités digestives du lapin</i>	45
<i>2.3.1.2. Impact des fibres sur l'ingestion volontaire du lapin</i>	46
<i>2.3.1.3. Impact des fibres sur la digestibilité chez le lapin</i>	47
<i>2.3.1.4. Rôle dans la régulation du transit digestif du lapin</i>	48
<i>2.3.1.5. Effet sur les fermentations et l'activité microbienne caecales chez le lapin</i>	49
<i>2.3.1.6. Effet sur la santé digestive du lapin</i>	50
2.3.2. Chez le cobaye	51
<i>2.3.2.1. Spécificités de la physiologie digestive du cobaye</i>	51
<i>2.3.2.2. Influence des fibres sur l'ingestion et la digestibilité chez le cobaye</i>	52
<i>2.3.2.3. Influence des fibres sur la croissance et la santé digestive chez le cobaye</i>	52
3. Microbiote du tube digestif chez les monogastriques herbivores	53
3.1. Chez le lapin	53
3.1.1. Caractérisation du microbiote caecal du lapin	53
3.1.2. Effets de quelques facteurs nutritionnels sur le microbiote caecal du lapin	55
3.2. Chez le cobaye	55
Conclusion	55

ETUDE EXPERIMENTALE	57
OBJECTIFS	58
MATERIELS ET METHODES	61
1. Présentation des protocoles expérimentaux	61
1.1. Protocole 1 : étude de l'impact du niveau de fibres alimentaires sur les performances zootechniques et la santé chez l'aulacode en croissance	61
1.1.1. Animaux, logement et mise en lots	61
1.1.2. Aliments expérimentaux	67
1.1.3. Contrôle de la croissance	69
1.1.4. Suivi de la santé	71
1.1.5. Mesure de l'ingestion et de la digestibilité	72
1.2. Protocole 2 : étude de la physiologie digestive et des performances de l'aulacode en croissance suite à une baisse simultanée des niveaux de fibres et de protéines brutes dans la ration	76
1.2.1. Lots d'animaux	76
1.2.2. Régimes alimentaires	77
1.2.3. Suivi des paramètres zootechniques et sanitaires	78
1.2.4. Détermination de l'ingestion et de la digestibilité	78
1.2.5. Etude des paramètres du système digestif	80
2. Méthodes d'analyses chimiques et microbiologiques	81
2.1. Analyses chimiques	81
2.1.1. Matière sèche	81
2.1.2. Dosage des fibres	81

2.1.3.	Dosage des protéines brutes	82
2.1.4.	Mesure de l'énergie brute	82
2.1.5.	Dosage de l'amidon	82
2.1.6.	Dosage des acides gras volatils	83
2.1.7.	Dosage de l'azote ammoniacal	83
2.2.	Analyses microbiologiques	83
2.2.1.	Extraction des ADN totaux	84
2.2.2.	Pyroséquençage 454 GS FLX	84
3.	Méthodes d'analyses statistiques	86
3.1.	Courbes de croissance	86
3.2.	Gain moyen quotidien, ingestion, indice de consommation et digestibilité	86
3.3.	Paramètres sanitaires	87
3.4.	Paramètres du tube digestif	87
	RESULTATS ET DISCUSSION	88
1.	Impact des fibres sur la croissance, l'efficacité digestive et la santé chez l'aulacode en croissance	88
1.1.	Fibres et santé digestive des animaux	88
1.1.1.	Taux de mortalité et morbidité	88
1.1.2.	Diagnostic des causes de morbidité et de mortalité	90
1.2.	Fibres et paramètres zootechniques	91
1.2.1.	Croissance des animaux	94
1.2.2.	Ingestion d'aliment et de nutriments	99
1.2.3.	Indice de consommation	102
1.3.	Digestibilité des rations	102
1.3.1.	Etude de la digestibilité des constituants de la ration en fonction du régime et	102

de la période de mesure	
<i>1.3.1.1. Effet du taux de fibres alimentaires</i>	103
<i>1.3.1.2. Effet de l'âge</i>	106
<i>1.3.1.3. Effet de l'interaction régime x période</i>	106
1.3.2. Relation entre digestion de la matière organique et teneur en fibres de l'aliment	108
2. Etude des performances zootechniques et de la physiologie digestive de l'aulacode en croissance suite à une réduction simultanée des taux de fibres et de protéines brutes	110
2.1. Paramètres zootechniques et santé digestive	110
2.1.1. Santé des animaux en fonction des régimes	110
2.1.2. Croissance des animaux	111
2.1.3. Ingestion et indice de consommation	114
2.1.4. Ingestion de constituants alimentaires	114
2.1.5. Digestibilité des rations	117
2.1.6. Teneurs en constituants digestibles des régimes expérimentaux	119
2.1.7. Quantités de nutriments digestibles ingérés	121
2.2. Anatomie descriptive des compartiments digestifs	123
2.3. Paramètres physico-chimique du tube digestif	123
2.3.1. Comparaison des paramètres physico-chimiques du tube digestif entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours	127
2.3.2. Effets du régime et de l'âge sur les animaux de 82 et 103 jours	128
<i>2.3.2.1. Poids du tube digestif</i>	128
<i>2.3.2.2. Poids des compartiments digestifs</i>	130
<i>2.3.2.3. Poids vides des compartiments digestifs</i>	131
<i>2.3.2.4. Teneur en matière sèche du contenu des compartiments digestifs</i>	132
<i>2.3.2.5. pH du contenu des compartiments digestifs</i>	133
2.4. Etude de l'activité fermentaire du caecum	137

2.4.1. Comparaison du profil fermentaire entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours	137
2.4.2. Etude de la variation du profil fermentaire en fonction du régime et de l'âge	138
2.5. Caractérisation du microbiote caecal	142
2.5.1. Description générale des résultats de l'analyse des communautés bactériennes caecales	142
2.5.2. Comparaison de l'abondance relative des communautés bactériennes entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours	145
2.5.2.1. <i>Abondance des phyla bactériens dans le microbiote caecal</i>	145
2.5.2.2. <i>Abondance des familles bactériennes du microbiote caecal</i>	148
2.5.2.3. <i>Abondance des genres bactériens dans le microbiote caecal de l'aulacode</i>	152
2.5.3. Abondance relative des communautés bactériennes du caecum de l'aulacode en fonction du régime et de l'âge.	158
DISCUSSION GENERALE	164
1. Méthode expérimentale et limites de notre étude	166
2. Anatomie et physiologie digestives comparées	166
2.1. Anatomie digestive	166
2.2. Profil fermentaire du contenu caecal	168
2.3. Caractérisation du microbiote caecal	170
3. Régime alimentaire et santé de l'aulacode en croissance	173
4. Régime alimentaire et croissance de l'aulacode	175
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	178

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	181
ANNEXES	204
ABSTRACT	225
RESUME	226

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Place de l'aulacode dans la classification taxonomique par rapport au rat au cobaye et au lapin	24
Tableau 2. Quelques paramètres de reproduction chez l'aulacode	28
Tableau 3. Performance pondérale de l'aulacode en fonction du régime alimentaire	30
Tableau 4. Quelques paramètres du tube digestif de l'aulacode adulte (d'après Van Zyl et al., 2005 ; sauf MS d'après van Zyl et Delpont, 2010)	34
Tableau 5. Composition chimique de quelques fourrages utilisable pour l'alimentation de l'aulacode (en % de la matière sèche) (Fantodji et Soro, 2004).	38
Tableau 6. Aliments complémentaires au fourrage en aulacodiculture (en % de la matière sèche) (Fantodji et Soro, 2004).	39
Tableau 7. Recommandations nutritionnelles pour l'aulacode adulte (Mensah, 1995)	40
Tableau 8. Ingrédients et composition chimique des aliments expérimentaux, protocole 1.	70
Tableau 9. Ingrédients et composition chimique des régimes expérimentaux, protocole 2	78
Tableau 10. Réactifs intervenant dans la réalisation du PCR préalable au pyroséquençage 454	85
Tableau 11. Mortalité observée pour les 4 régimes expérimentaux	89
Tableau 12. Paramètres de croissance et d'ingestion d'aliment en fonction du régime et de l'âge, expérimentation 1.	97
Tableau 13. Poids vif des animaux en fonction des régimes (en g)	98
Tableau 14. Quantité de constituants alimentaires ingérés en fonction du régime et de l'âge (en g/j), expérimentation 1.	101
Tableau 15: Coefficients de digestibilité (%) en fonction du régime et de la période de mesure, expérimentation 1.	105
Tableau 16. Poids vif des animaux en fonction du régime (en g)	112
Tableau 17: Ingestion, gain moyen quotidien et indice de consommation en fonction du régime et de l'âge, expérimentation 2.	113
Tableau 18: Ingestion de constituants alimentaires en fonction du régime et de l'âge, expérimentation 2 (en g/j sauf énergie en kcal/j).	116
Tableau 19. Coefficients de digestibilité des constituants alimentaires en fonction du régime et de la période, expérimentation 2 (%).	118
Tableau 20. Teneurs moyennes en constituants digestibles des régimes expérimentaux	120
Tableau 21. Quantités de constituants alimentaires digestibles ingérées en fonction du régime et de la période (en g/j sauf énergie en kcal/j)	122

Tableau 22: Comparaison des paramètres physico-chimiques du tube digestif entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours	129
Tableau 23. Poids des compartiments digestifs et de leurs contenus en fonction de l'âge et du régime.	134
Tableau 24. Poids vides des compartiments digestifs en fonction de l'âge et du régime.	135
Tableau 25. Taux de MS et pH du contenu des compartiments digestifs, en fonction du régime ou de l'âge.	136
Tableau 26: Comparaison des paramètres fermentaires entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours	138
Tableau 27 : Profil fermentaire en fonction de l'âge et du régime	141
Tableau 28. Liste des échantillons analysés pour la caractérisation du microbiote caecal	142
Tableau 29 : Abondances relatives (%) des phyla ayant varié entre les stades sevrage et post-sevrage	146
Tableau 30. Abondances relatives (%) des familles ayant varié entre les stades sevrans et animaux de 82 et 103 jours	152
Tableau 31. Abondance relative (%) des genres majoritaires chez les sevrans	155
Tableau 32. Abondance relative (%) des genres majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours	156
Tableau 33. Abondance relative (%) des genres ayant varié entre les stades sevrage et post-sevrage	157
Tableau 34. Abondances relatives (%) des familles ayant varié en fonction du régime ou de l'âge	161
Tableau 35. Abondances relatives (%) des genres ayant varié en fonction du régime ou de l'âge	162
Tableau 36. Paramètres physico-chimiques moyens du contenu caecal de l'aulacode du lapin et du cobaye en croissance.	168
Tableau 37. Comparaison de l'abondance relative (%) des phyla bactériens majoritaires, dans le caecum de l'aulacode, du lapin et du cobaye en croissance, déterminés par séquençage de l'ADN 16S.	171
Tableau 38. Recommandations de teneurs en protéines, fibres et amidon en vue d'une prévention des risques sanitaires et d'une bonne croissance de l'aulacode au stade post-sevrage (par rapport à l'aliment brut).	177

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Aire de répartition de l'aulacode en Afrique (Adoumbene, 1991)	26
Figure 2. Courbe de croissance pondérale de l'aulacode (Yewadan et Schrage, 1992)	29
Figure 3. Courbe de gain moyen quotidien de (Yewadan et Schrage, 1992)	29
Figure 4. Schéma du tube digestif de l'aulacode (Van Zyl et <i>al.</i> , 2005)	33
Figure 5. Les principales classes de fibres alimentaires (Gidenne 1996)	44
Figure 6. Méthodes gravimétriques de dosage des fibres et nature du résidu d'analyse (D'après Gidenne 1996)	45
Figure 7. Relation entre ingestion volontaire et composition de l'aliment, chez le lapin en croissance (Gidenne et Lebas, 2005)	47
Figure 8. Digestibilité de la matière organique et des matières azotées totales (MAT, N x 6,25) en fonction de la teneur en lignocellulose (ADF) du régime, chez le lapin en croissance (Gidenne, 1996)	48
Figure 9. Incidence d'une baisse de la quantité de fibres ingérée sur la durée de transit dans les différents compartiments digestifs du lapin (Gidenne, 1996).	49
Figure 10. Risque sanitaire chez le lapin en croissance, en fonction du taux de lignines dans la ration (Gidenne 2003)	51
Figure 11. Schéma du gros intestin du cobaye présentant les sillons d'accumulation des bactéries pour leur transport du côlon proximal vers le caecum (d'après Takahashi et Sakagushi, 2006)	52
Figure 12. Schéma explicatif des trois vagues d'animaux ayant servi à l'expérimentation 1.	62
Figure 13. Disposition des cages dans le bâtiment d'élevage	66
Figure 14. Schéma récapitulatif de l'alternance entre cages collectives et cages individuelles des animaux sélectionnés pour la mesure de la digestibilité dans l'expérimentation 1. Les âges mentionnés sont des âges moyens.	73
Figure 15 : Schéma récapitulatif des périodes de mesure de digestibilité dans l'expérimentation 2. Les âges mentionnés sont des âges moyens.	80
Figure 16: Taux de morbidité enregistré à la fin de l'expérimentation	89
Figure 17. Allure des courbes de croissance des lots animaux	98
Figure 18. Variation de la digestibilité en fonction du régime âge par âge	107
Figure 19. Relation entre la digestibilité de la matière organique (dMO) et les taux	109

d'ADF et NDF de l'aliment, expérimentation 1	
Figure 20. Taux de morbidité en fonction du régime	111
Figure 21. Courbes d'évolution du poids des animaux	112
Figure 22. Variation de la proportion d'acide acétique en fonction du régime âge par âge.	140
Figure 23. Heatmap et dendrogrammes avec regroupement bidirectionnel montrant l'abondance relative de tous les phyla détectés et les similarités entre les échantillons analysés. Le code de couleur rouge / jaune indique respectivement une haute / basse abondance relative de chaque phylum représenté ici en colonnes.	144
Figure 24. Phyla majoritaires chez les sevrans (% d'abondance relative)	147
Figure 25. Phyla majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours (% d'abondance relative)	147
Figure 26. Familles majoritaires chez les sevrans (% d'abondance relative)	150
Figure 27. Familles majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours (% d'abondance relative)	151
Figure 28. Comparaison entre les paramètres de croissance et de santé de l'aulacode au cours des deux essais (Risque sanitaire = mortalité + morbidité).	175

LISTE DES PHOTOS

Photo 1. Grand aulacode (<i>Thryonomys swinderianus</i>) (Yewadan et Schrage, 1995)	25
Photo 2. Vue des incisives (A) et des molaires de la mâchoire supérieure (B) de l'aulacode (Van De Velde, 1991)	31
Photo 3. Plantes fourragères couramment utilisées dans l'alimentation de l'aulacode en Côte-d'Ivoire : A) <i>Pennisetum purpureum</i> (Herbe à éléphant), B) <i>Panicum maximum</i> (Herbe de Guinée), C) <i>Pueraria phaseoloïdes</i> (Kudzu tropical) D), <i>Leucaena leucocephala</i> (Leucéna), (Lebas, 2012)	37
Photo 4. Bâtiment d'élevage	64
Photo 5. Identification des animaux au sevrage	64
Photo 6. Cages collectives (avec des mangeoires pour lapin)	65
Photo 7. Deux blocs de cages individuelles	65
Photo 8. Abreuvoir en ciment	65
Photo 9. Mangeoire en ciment	65
Photo 10. Récolte de <i>Pennisetum</i>	68
Photo 11. <i>Pennisetum</i> séché et broyé	68
Photo 12. Pesée des animaux à l'aide d'une cage de contention	71
Photo 13 : Tiroir et grille de collecte de fèces	72
Photo 14. Séance de collecte de fèces et de pesée de l'aliment gaspillé	74
Photo 15: Aspect des crottes en fonction du taux de fibres dans l'aliment	92
Photo 16. Tube digestif d'un animal du lot ADF8 mort puis autopsié	93
Photo 17. Vue d'ensemble du tube digestif de l'aulacode en croissance.	124
Photo 18. Etat de développement des compartiments digestifs de l'aulacode suivant l'âge: a,b,c) estomac (40 , 82, 103 jours d'âge) ; d,e,f) caecum (40 , 82, 103 jours d'âge) ; g,h,i) intestine grêle (40 , 82, 103 jours d'âge) ; j,k,l) colon proximal (40 , 82, 103 jours d'âge) ; m,n,o) colon distal (40 , 82, 103 jours d'âge)	125

LISTE DES ABREVIATIONS

ADF	Acid detergent fibre
ADL	Acid detergent lignin
ADN / DNA	Acide désoxyribonucléique
AGV	Acides gras volatils
AVMA	Association Américaine de Médecine Vétérinaire
ARNr	Acide ribonucléique ribosomique
CRO	Centre de recherche océanologique
dMO	Digestibilité de la matière organique
ED	Energie digestible
ETR	Écart-type résiduel
GMQ	Gain moyen quotidien
HPO ₃	Acide métaphosphorique
IC	Indice de consommation
IMG	Ingéré moyen quotidien
kcal	kilocalorie
LANADA	Laboratoire national d'appui au développement agricole
MAT	Matières azotées totales
MJ	Mégajoule
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
NADP	Nicotinamide-adenine dinucléotide phosphate
NADPH	Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate-oxidase
NB	Niveau bas en fibres et protéines brutes
NDF	Neutral detergent fibre
NH	Niveau haut en fibres et protéines brutes
NM	Niveau moyen en fibres et protéines brutes
NH ₃ -N	Azote ammoniacal
OTU	Operational taxonomic units
PB	Protéines brutes
PD	Protéines digestibles

PCR	Polymerase chain reaction
PNA	Polysaccharide non amylicé
SR	Risque sanitaire
TD	Tube digestif
TDF	Total dietary fibre
VSF	Vétérinaires sans Frontières
WICW	Water insoluble cell-wall

INTRODUCTION

Le grand aulacode (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827) est sans doute l'un des gibiers les plus chassés et les plus consommés dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne. En effet, le grand aulacode est un rongeur sauvage dont la viande est très prisée par les populations locales. Sa consommation annuelle a été estimée à environ 80 millions de têtes dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (Mensah, 1993; Fantodji et Mensah, 2000).

Pour réduire la pression exercée par la chasse sur l'espèce sauvage, la domestication de cet animal en vue de la production de viande a été envisagée à partir des années 1970 (Amany, 1973). Ce type de production devait non seulement constituer une bonne alternative à la chasse (voire au braconnage), mais aussi permettre l'exploitation d'un animal rustique bien adapté aux conditions environnementales locales, et ainsi apporter des revenus supplémentaires aux populations.

C'est au Ghana que des études sur la biologie et l'éco-éthologie de cet animal en vue de sa domestication ont été initiées (Asibey, 1974). Cette initiative a été poursuivie dans les années 1980 au Bénin à l'aide d'un projet de coopération Bénino-Allemand (Baptist et Mensah, 1985). Une dizaine d'années plus tard, en 1994, une ferme expérimentale fut créée par l'ONG Vétérinaires Sans Frontières (VSF) dans le but de promouvoir le développement de cet élevage en zone périurbaine de Libreville au Gabon. Ensuite, cet élevage s'est étendu à d'autres pays en Afrique de l'Ouest et Centrale. En 2001, il existait environ 800 élevages dans divers pays d'Afrique (Mensah, 2002). Le Gabon, l'un des pays où cet élevage a été longuement suivi, produisait à cette même période environ 2 tonnes de viande d'aulacodes (Jori et Chardonnet, 2001), comparés à 1200 tonnes de viande provenant de la chasse. Selon Wilkie et Carpenter (1999), même si la part de la production de viande des élevages reste encore marginale par rapport à celle de la chasse, des efforts visant à accroître le nombre d'éleveurs et la productivité des élevages, associés à d'autres mesures au niveau politique, devraient permettre de renverser la tendance.

L'évolution des paramètres zootechniques enregistrés au niveau des fermes expérimentales et la grande diversité des résultats obtenus par différents élevages de 1994 à 2000 suggèrent qu'il existe une grande marge de progrès dans les performances zootechniques de l'aulacodiculture (Jori, 2001). Selon cet auteur, les performances du grand aulacode sont fortement liées à une conduite d'élevage rigoureuse, une sélection génétique précise et une alimentation améliorée. Pour Adu et al. (2000), les standards alimentaires utilisés pour

l'élevage du grand aulacode restent rudimentaires et les stratégies pratiquées sont inadéquates quant à l'engraissement, à la reproduction et à la santé des animaux. Mensah (2002) indiquait, lors de la deuxième conférence sur la promotion de la diffusion de l'élevage d'aulacodes en Afrique, que l'un des problèmes restés jusque là sans approche était l'établissement de recommandations alimentaires pour le grand aulacode selon les stades physiologiques. A cet effet, différents travaux ont été initiés dans le domaine de l'alimentation et ont permis de faire un inventaire non exhaustif des différentes plantes fourragères et sous-produits agro-industriels consommés par cet animal (Mensah, 1992; Yéwadan, 1992). En effet, le grand aulacode étant herbivore, son alimentation de base est constituée de fourrages. D'ailleurs, après des expérimentations avec différents niveaux de fourrages dans l'aliment, Mensah et Ekué (2003), soutenaient que la ration du grand aulacode adulte devrait contenir au moins 70% de fourrage donc moins de 30% d'aliments concentrés. Une quantité de fourrage en deçà de ce taux aurait pour conséquence des troubles digestifs chez les animaux (Fantodji et Soro, 2004). Cette proportion de fourrage représente un peu plus de 30 %¹ de lignocellulose (Acid Detergent Fibre (ADF), Van Soest et *al.*, 1991) dans la ration d'après Traoré (2010). Le grand aulacode aurait ainsi besoin d'un niveau de fibres alimentaires très élevé dans sa ration, comparé aux besoins en fibres d'autres herbivores monogastriques comme le cobaye (10 à 15% de cellulose brute ; Villière, 1987) ou le lapin en croissance (16 à 18% d'ADF, Gidenne, 2003).

En tout état de cause, les besoins nutritionnels du grand aulacode sont loin d'être maîtrisés (Mensah, 2002). Néanmoins, les fibres semblent avoir un rôle important dans l'alimentation de cet animal comme c'est le cas chez les herbivores en général. Les fibres alimentaires ont un impact sur la régulation du transit digestif et sur l'équilibre du microbiote digestif, jouant ainsi un rôle important sur la santé de ces animaux. Chez le lapin en croissance par exemple, le rôle des fibres sur la prévention des troubles digestifs a été largement démontré (Gidenne, 2003 ; Gidenne et Garcia, 2006). Les fibres favoriseraient le développement d'un microbiote digestif commensal (Boulahrouf et *al.*, 1991) qui exerce un rôle de flore barrière vis-à-vis d'éventuels agents pathogènes (Gidenne et *al.*, 2008).

Vu le rôle des fibres dans l'alimentation des herbivores en général et, vu la proportion qu'elles occupent dans la ration de l'aulacode en particulier, il est essentiel de bien connaître l'impact de ces constituants alimentaires sur la santé digestive et la digestion de cet animal.

¹ Sauf indication contraire, les teneurs en constituants des aliments seront exprimées en % des aliments bruts

Par ailleurs, l'alimentation de l'aulacode telle que pratiquée dans les élevages utilise peu ou pas d'aliments concentrés azotés à cause de leurs coûts relativement élevés. Ainsi, les taux de protéines brutes dans la ration de l'aulacode dans les élevages se situent entre 8 et 12% de la matière sèche de l'aliment (Van Zyl et al., 1999 ; Traoré, 2010). Compte tenu du coût élevé des aliments riches en protéines, une des solutions est d'incorporer plus de céréales dans la ration, conduisant ainsi à des régimes riches en amidon et pauvres en protéines. Il serait donc intéressant de connaître le niveau maximum d'amidon et le niveau minimum de protéines dans la ration de l'aulacode sans que cela ne pénalise trop la croissance des animaux.

Sachant que les problèmes de mortalité dans les élevages sont rencontrés surtout après le sevrage (de 10 à plus de 40% de mortalité ; Jori, 2001 ; Adjahoutonon et al., 2007), notre étude s'est focalisée sur l'aulacode en croissance.

Sur un plan fondamental, notre travail vise à améliorer les connaissances sur l'anatomie et la physiologie digestives du jeune aulacode, alors que, sur le plan finalisé, il s'agira de préciser les recommandations en fibres, amidon et protéines brutes dans un aliment complet granulé, qui préserve la santé digestive et optimise la croissance de l'aulacode.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

1. Connaissances sur le grand aulacode

1.1. Généralités

1.1.1. Taxonomie

Le grand aulacode est un mammifère herbivore de l'ordre des rongeurs. Cette appartenance à l'ordre des rongeurs différencie le grand aulacode du lapin (*Oryctolagus cuniculus*) qui appartient à l'ordre des Lagomorphes. La denture des Lagomorphes, qui les distingue des rongeurs, est caractérisée par la présence de deux paires d'incisives à la mâchoire supérieure (une seule paire chez les rongeurs). Certains caractères morphologiques et anatomiques ont permis de classer le grand aulacode dans le sous-ordre des Hystricomorphes (Wood, 1955) comme le porc épic (*Hystrix cristata*), le cobaye (*Cavia porcellus*) et l'agouti (*Drasypocta agouti*). Cette appartenance au sous-ordre des Hystricomorphes différencie également le grand aulacode du rat (*Rattus rattus*) qui appartient au sous-ordre des Myomorphes. En effet, la plupart des rongeurs du sous-ordre *Hystricomorpha* diffèrent de ceux du sous-ordre *Myomorpha* (gerbille, hamster, souris et rat) en ce sens qu'ils possèdent une membrane qui recouvre l'orifice vaginal excepté au moment de l'œstrus et de la parturition (le coypou fait exception). D'autres caractéristiques des Hystricomorphes sont leur période de gestation relativement longue qui, chez la plupart d'entre eux, excède cent jours, et l'état de développement avancé de leurs petits à la naissance.

Par ailleurs, le grand aulacode appartient à la famille des *Thryonomyidae* et au genre *Thryonomys*, désigné parfois dans la littérature sous les noms *Aulacodus*, *Triaulacodus* ou *Choeromys* (Rosevaer, 1969 ; Vaughan, 1972). Le tableau 1 présente la place de l'aulacode dans la classification taxonomique par rapport au cobaye, au lapin et au rat.

On connaît deux espèces de ce rongeur : le grand aulacode (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827) et le petit aulacode (*Thryonomys gregorianus*, Thomas, 1894). La distinction entre ces deux espèces s'appuie sur des critères morphologiques, notamment sur la taille, *T. swinderianus* étant de plus grande taille. A titre comparatif, le grand aulacode de 2 ans d'âge peut peser environ 6 kg (Skinner and Smithers 1990) tandis que le petit aulacode de même âge pèse en moyenne 4,5 kg (Ajahi and Tewe (1980). Le petit aulacode a une zone de répartition plus étroite que le grand aulacode : on le trouve surtout en Afrique centrale et Afrique du Sud.

Certains auteurs ont décrit plusieurs sous-espèces de *T. swinderianus* mais, il s'agit en réalité du même animal qui a reçu des noms divers selon l'âge, la robe, la taille et l'habitat (Rosevaer, 1969). La totalité des recherches et activités d'élevage se sont développées avec *T. swinderianus* (Brescia et al., 2002), si bien que, par la suite de cette thèse, le grand aulacode sera désigné par le terme aulacode.

Tableau 1. Place de l'aulacode dans la classification taxonomique par rapport au rat, au cobaye et au lapin

	Aulacode	Cobaye	Rat	Lapin
Ordre	Rongeurs	Rongeurs	Rongeurs	Lagomorphes
Sous-ordre	Hystricomorphes	Hystricomorphes	Myomorphes	
Famille	Thryonomidés	Caviidae	Muridés	Léporidés
Genre	<i>Thryonomys</i>	<i>Cavia</i>	<i>Rattus</i>	<i>Oryctolagus</i>
Espèces	<i>Thryonomys swinderianus</i> (Temminck, 1827) <i>Thryonomys gregorianus</i> (Thomas, 1894)	<i>Cavia porcellus</i>	<i>Rattus rattus</i>	<i>Oryctolagus cuniculus</i>

1.1.2. Morphologie

L'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) est, après le porc-épic, le plus gros rongeur d'Afrique (Delany et Happold, 1979). Le poids moyen de l'animal sauvage adulte se situe le plus souvent entre 4 et 5 kg chez la femelle et de 5 à 6 kg chez le mâle. Toutefois, Amany (1973) a rapporté la capture d'un aulacode de plus de 10 kg en Côte-d'Ivoire. Par ailleurs, les poids les plus élevés obtenus en élevage avoisinent 7 kg (Ganmavo, 1992).

Le corps de l'aulacode est recouvert de poils sub-épineux (photo 1) dont les annelures donnent au pelage une nuance de teintes allant, selon la zone écologique, du gris brun clair au gris noir plus ou moins foncé avec des reflets plus ou moins violacés. La face ventrale du corps est recouverte de poils blanchâtres et soyeux qui s'opposent au pelage sub-épineux du reste du corps.

Les membres de l'aulacode, très courts et charnus, portent de fortes et puissantes griffes. Les pattes antérieures portent cinq doigts et servent à la préhension des aliments. Les pattes postérieures, tétradactyles, sont assez puissantes ce qui favorise les bonds de l'animal. L'aulacode possède en outre une queue longue de 18 à 25 cm. Elle est utilisée en élevage pour saisir l'animal, malgré les risques de cassure.



Photo 1. Grand aulacode (*Thryonomys swinderianus*) (Yewadan et Schrage, 1995)

1.1.3. Répartition géographique et habitat

L'aulacode se rencontre à l'état sauvage, uniquement en Afrique subsaharienne (Adoun, 1992), depuis le Sénégal jusqu'en Afrique du Sud et à la Somalie (Figure 1). En Afrique de l'Ouest, il est représenté au Bénin, au Burkina Faso, en Côte-d'Ivoire, au Ghana, au Libéria, au Mali, au Nigeria, au Sénégal et en Sierra Leone (Fantodji et Soro, 2004).

Dans les pays où il est présent, l'aulacode se rencontre particulièrement dans les clairières herbeuses et aux abords des cours d'eau. On le trouve aussi aux abords immédiats des cultures vivrières dans sa recherche de nourriture (Rosevaer, 1969).

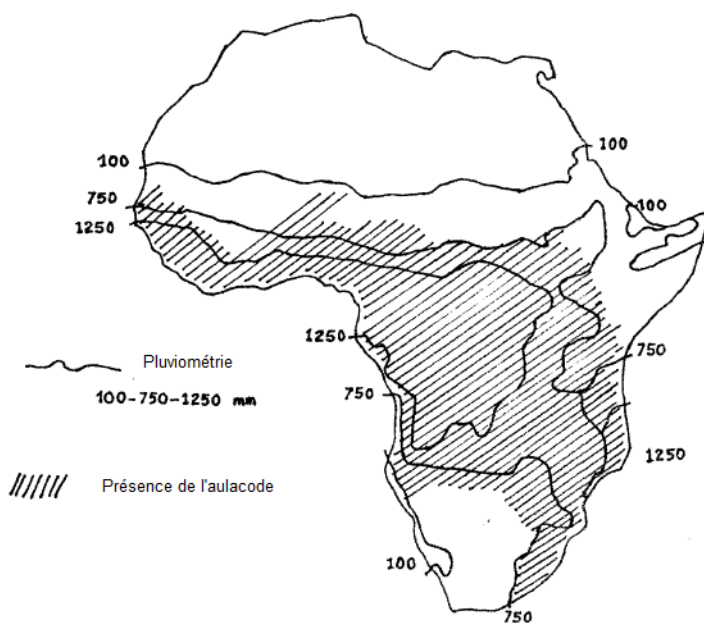


Figure 1. Aire de répartition de l'aulacode en Afrique (Adoumbene, 1991)

1.1.4. Rythmes biologiques et comportements sociaux

Dans la nature, l'aulacode est un animal nocturne. Il se déplace en petits groupes de 3 à 5 individus, composé parfois d'un mâle, de deux ou trois femelles et leurs petits; des mâles solitaires peuvent parfois suivre le groupe (Heymans et Mensah, 1984). Les travaux de Heymans (1992) ont montré que l'aulacode est très actif de 20 h à 23 h. De 0 h à 4 h du matin, l'animal se repose généralement. Dès 4 h et jusqu'à l'aube, il présente une seconde séquence d'activités consacrées presque exclusivement à l'alimentation. De 6 h du matin à 10-11 h, les activités se ralentissent et sont consacrées au nettoyage du nid et à l'allaitement des aulacodeaux. De 12 h à 16 h, l'animal se repose. A partir de 16 h, il recommence à s'activer notamment en explorant son territoire avec beaucoup de prudence.

En élevage, les périodes de consommation alimentaire intense se situent entre 8 h et 12 h (les aliments étant distribués à partir de 8 h). La période de 12 h à 20 h est consacrée en partie au repos. Durant cette période, l'animal ne dort pas profondément, il garde les yeux mi-clos. Entre 0 h et 6 h du matin, on observe plusieurs cycles veille-sommeil dont la durée n'excède pas 15 minutes (Heymans et Codjia, 1987).

1.1.5. Reproduction

La femelle de l'aulacode atteint la maturité sexuelle à l'âge de quatre mois et le mâle à cinq mois (Brescia et al., 2002). Mais, l'âge à la reproduction (où la nubilité est réelle) est en moyenne de 6 mois chez la femelle et 7 mois pour le mâle (Adjanohoun, 1988 ; Asibey, 1974a ; Mensah et Baptist, 1981). Dans la nature, l'activité sexuelle de l'aulacode se déroule toute l'année mais, le maximum de saillies est observé pendant les périodes d'abondance de nourriture si bien que les mises-bas coïncident souvent avec le début de la saison des pluies (Amany, 1978). L'Afrique de l'Ouest connaît quatre grandes saisons :

- l'hiver boréal (décembre à mars) qui correspond à la grande saison sèche ;
- le printemps boréal (avril à juin) qui correspond à la première saison des pluies de la partie guinéenne pendant que la saison sèche se prolonge au Sahel ;
- l'été boréal (de juillet à septembre) qui correspond à la saison des pluies au Sahel pendant que la zone guinéenne connaît sa petite saison sèche ;
- l'automne boréal (d'octobre à novembre) qui correspond à la seconde saison des pluies sur la Guinée et à une forte diminution des pluies sur le Sahel

La durée de la gestation de l'aulacode est relativement longue pour un rongeur, soit cinq mois (Adjanohoun, 1992 ; Schröder et Mensah, 1987 ; Asibey, 1974b).

Chez le mâle, la libido est permanente toute l'année. En revanche, le cycle sexuel de la femelle présente quelques particularités. Ce cycle comporte deux périodes distinctes :

- une période de repos au cours de laquelle les individus des deux sexes ne s'accordent aucun intérêt, c'est l'anœstrus qui peut durer quelques jours à douze mois selon les femelles
- une période d'activité composée d'une succession de cycles œstraux à deux phases (un pro-œstrus et un post-œstrus) (Alogninouwa, 1994).

En élevage, les animaux peuvent se reproduire pendant toute l'année. Le nombre annuel de mises bas maximum observé est de 2. La taille de la portée varie de 1 à 8 avec une moyenne de 4 petits et le sex-ratio à la naissance est de 1/1 (Asibey 1974b ; Ewer 1969). Le début d'allaitement a lieu 30 minutes environ après la naissance du dernier né. Le sevrage intervient lorsque les aulacodeaux sont âgés d'un mois à un mois et demi (Fantodji et Soro 2004). Le tableau 2 reprend quelques paramètres de reproduction selon certains auteurs.

Tableau 2. Quelques paramètres de reproduction chez l'aulacode

Paramètres	Yewadan Schrage (1992)	et Jori (1998)	Ntsame et Edderai (2000)
Nombre de mise bas observées	1553	130	243
Nombre de petits nés	6147	529	1337
Taille moyenne de la portée	4,0	4,1	5,5
Sex ratio (mâle : femelle)	1 : 1	1 : 1,2	1 : 1
Poids moyen à la naissance (g)	133	138	133
Taux de fertilité (%)	85	93	94

1.1.6. Performances de croissance

En élevage, le poids moyen de l'aulacode à la naissance se situe autour de 134 g pour le mâle et 128 g pour la femelle (Yéwadan et Schrage, 1992). A la naissance, les mâles sont donc plus lourds que les femelles et ce dimorphisme entre mâle et femelle s'accroît avec l'âge. Ainsi, à 18 mois d'âge, le poids du mâle avoisine 4 kg quand celui de la femelle atteint seulement 2,5 kg (Figure 2). D'après ces auteurs, les valeurs maximales de gain moyen quotidien (GMQ) sont obtenues vers le 10^e mois chez le mâle (9,7 g/j) et vers 7^e mois chez la femelle avec un GMQ de 6,9 g/j (Figure 3).

Cependant, les performances de croissance de l'aulacode dépendent fortement des rations alimentaires distribuées aux animaux et les GMQ observés varient de 3,4 à 16,7 g/j (Waikuwait, 1985 ; Fantodji et al., 2003 ; Fantodji et Soro, 2004 ; Zougou-Tovignon, 2005). Le tableau 3 présente les performances pondérales de l'aulacode obtenues en fonction de trois régimes alimentaires. Les animaux sont vendus entre 8 et 12 mois d'âge avec un poids moyen de 3,5 kg (Ntsame et Edderai, 2000 ; Jori, 2001).

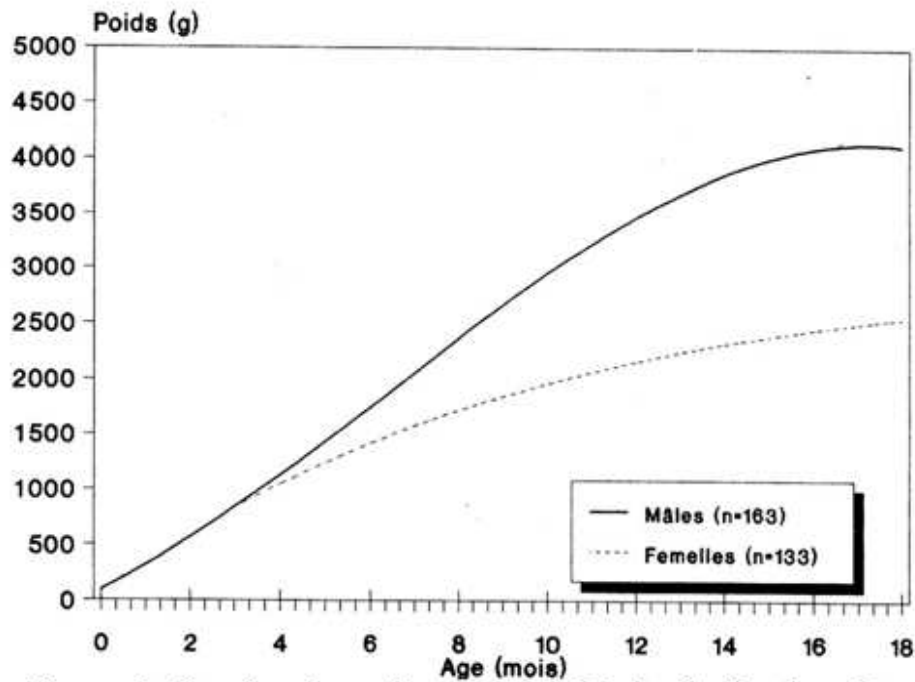


Figure 2. Courbe de croissance pondérale de l'aulacode (Yewadan et Schrage, 1992)

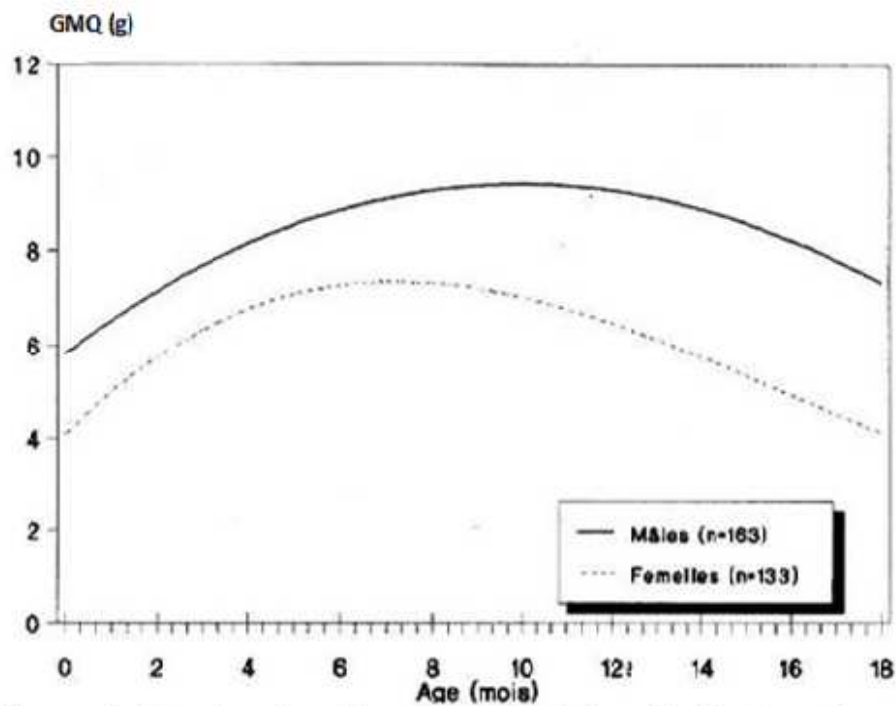


Figure 3. Courbe de gain moyen quotidien de l'aulacode (Yewadan et Schrage, 1992)

Tableau 3. Performance pondérale de l'aulacode en fonction du régime alimentaire

Age	Aliment 1		Aliment 2		Aliment 3	
	Poids (g)	Effectif	Poids (g)	Effectif	Poids (g)	Effectif
Naissance	134	163	137	226	133	730
Sevrage	-	-	493*	234	612**	609
4 mois d'âge	1114	163	1069	225	1679	338
8 mois d'âge	2417	163	2074	116	3565	76

* : sevrage à 35 jours, ** : sevrage à 45 jours

*Aliment 1 : son de blé 43%, drêche de brasserie 26%, maïs 21%, mélasse 5%, feuilles de *Leucaena leucocephala* 5%, vitamines et sel 2%, coquilles d'huitres 1%, (Yewadan et Schrage, 1992)*

Aliment 2 : maïs 60%, son de blé 30%, coquilles d'huitres 8%, vitamines et sel 2%, (Ntsame et Edderai, 2000)

Aliment 3 : son de blé 60%, maïs 30%, granulés pour lapin 10%, (Ntsame et Edderai, 2000)

1.1.7. Pathologie de l'aulacode en élevage

Dans le milieu naturel, l'aulacode ne semble pas présenter de spécificités pathologiques qui soient véritablement éloignées de celles des autres rongeurs domestiques ou sauvages. En élevage par contre, on observe des troubles psychosomatiques dus au stress (Alogninouwa, 1994). Ces troubles sont diagnostiqués par la présence de blessures occasionnées par les tentatives de fuites ou par les agressions par les autres animaux (Jori et al., 2001). Une cachette dans les enclos ou les cages permet de réduire le stress. Les maladies respiratoires et les septicémies sont des causes importantes de mortalité infectieuse, surtout chez les animaux jeunes. Les troubles digestifs sont dominés par des problèmes dentaires et des entérotoxémies (Brescia et al., 2002).

Jori et al. (2001) a étudié la mortalité chez l'aulacode en élevage sur une population de plus de 500 animaux pendant près de 2 ans. Il ressort de cette enquête que les causes de mortalité étaient par ordre d'importance décroissante les troubles psychosomatiques, la septicémie, les troubles respiratoires et les troubles digestifs avec respectivement 30%, 12%, 10% et 5% des cas. Près de 30% des cas de mortalité étaient dus à des causes inconnues.

1.2. Système digestif et alimentation de l'aulacode

1.2.1. Anatomie de l'appareil digestif

L'appareil digestif de l'aulacode commence par une cavité buccale réduite comme chez la plupart des rongeurs. Toutefois, selon Alogninouwa, (1994) cette réduction de l'ouverture de la bouche est accentuée chez l'aulacode par la présence de deux protubérances internes. Ces reliefs anatomiques internes pourraient expliquer l'important rejet alimentaire que l'on constate chez l'aulacode dans la nature et en élevage. La dentition de l'aulacode est complète vers l'âge de 6 mois. La formule dentaire définitive est : 1.0.4 / 1.0.4., soit par demi-mâchoire, 1 incisive, 0 canine, 1 prémolaire et 3 molaires. La dentition est à croissance continue. Les incisives sont fortes, puissantes, légèrement convexes (Alogninouwa, 1994). La dentition est illustrée par la photo 2.

Par ailleurs, l'étroitesse de l'isthme du gosier oblige l'aulacode à une longue mastication afin de rendre les aliments suffisamment fins et humides pour éviter les phénomènes d'obstruction et d'étouffement (Yewadan, 1988).

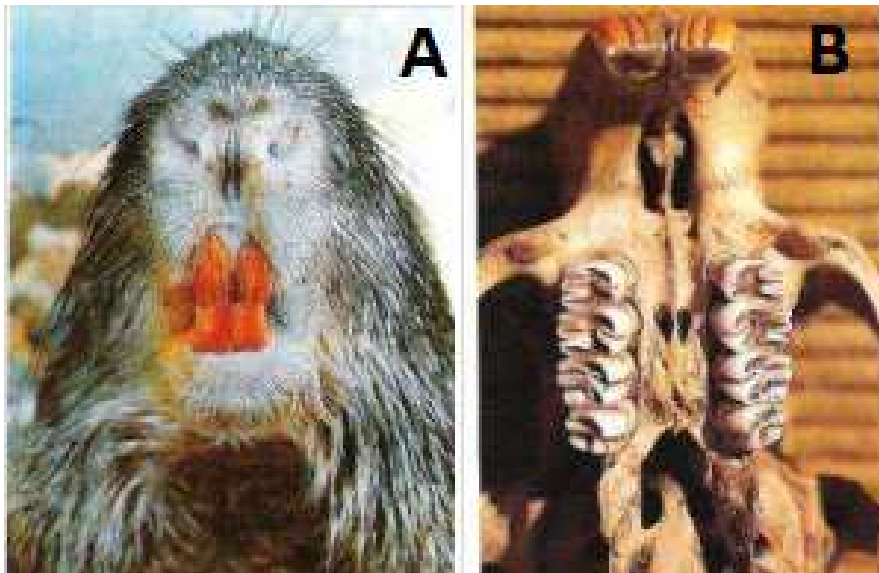


Photo 2. Vue des incisives (A) et des molaires de la mâchoire supérieure (B) de l'aulacode (Van De Velde, 1991)

L'aulacode est un monogastrique dont l'estomac uniloculaire en forme de poire (figure 4) est plaqué en arrière du diaphragme, comme chez les autres rongeurs. Il est constitué de deux parties (le cul de sac gauche coiffé par la rate et la tubérosité droite en position ventrale).

L'intérieur de l'estomac est tapissé d'une muqueuse passant progressivement du type œsophagien au type intestinal (Alogninouwa, 1994). Le pH à l'intérieur de l'estomac de l'aulacode adulte est très acide (pH = 2,2) avec un poids plein d'environ 63 g (Tableau 4 ; d'après Van Zyl et al., 2005) .

En raison de ses nombreux moyens de fixité d'une part, et de la pression exercée par le diaphragme et d'autres viscères d'autre part, l'estomac de l'aulacode est peu sujet aux mouvements. Il ressemble en cela à l'estomac de la plupart des monogastriques végétariens (Alogninouwa et al., 1992). Il est très extensible au niveau de sa grande courbure et de l'extrémité gauche dont le cul-de-sac correspond au fundus. Celui-ci est le plus important en volume. C'est également le lieu où s'accumulent les aliments ingérés pour y subir la première digestion enzymatique (Agossou, 1991).

Il n'existe pas de véritable sphincter pylorique qui sépare l'estomac du duodénum mais plutôt une large dilatation ampoulaire qui assure la continuité entre l'estomac et l'intestin grêle (Alogninouwa et al., 1992).

L'intestin grêle est la partie la plus longue du tube digestif. Il comprend le duodénum, le jéjunum et l'iléon. Il peut mesurer 140 à 160 cm, du pylore à l'ostium iléal, avec un diamètre de 0,6 à 1,4 cm selon le territoire anatomique (Alogninouwa, 1994). Son contenu est légèrement acide (pH = 5,2) (Van Zyl et al., 2005).

Au-delà de l'ampoule duodénale, le duodénum forme une anse dans laquelle vient se loger le pancréas. On observe sur toute sa longueur les glandes de LIEBERKUHN. C'est dans la sous-muqueuse du duodénum descendant que l'on note la présence des glandes tubuleuses ramifiées de BRUNNER (Alogninouwa et al., 1992).

Le gros intestin comprend le caecum, le côlon et le rectum. Le caecum présente 3 parties : un corps, une base et un apex. C'est le viscère le plus développé avec un volume de plus de 130 ml et un poids plein de l'ordre de 80 g chez l'animal adulte (tableau 4). Le caecum occupe 60% du volume de la cavité abdominale (Alogninouwa et al., 1996). Selon Alogninouwa et al. (1992), le développement important du caecum rapproche l'aulacode de deux autres monogastriques que sont le cheval et le lapin. Avec un pH légèrement acide (pH = 5,7 ; Van Zyl et al., 2005), le caecum est le siège d'une intense digestion d'origine microbienne (Lawani, 1989 ; Traoré, 2010). Le côlon fait suite au caecum et est aussi relativement bien développé puisqu'il mesure de 1,3 à 1,5 m. Il comprend le côlon proximal et le côlon distal. Le côlon proximal a un pH proche de celui du caecum (pH = 5,8).

Les glandes annexes du tractus digestif de l'aulacode sont constituées par les glandes salivaires, le foie et le pancréas. Les glandes salivaires sont bien développées comme chez l'ensemble des rongeurs. Le foie est relativement bien développé et l'étude histochimique montre que le glycogène est surtout présent au centre des lobules hépatiques (Alogninouwa, 1994) comme chez le lapin (Verne, 1963).

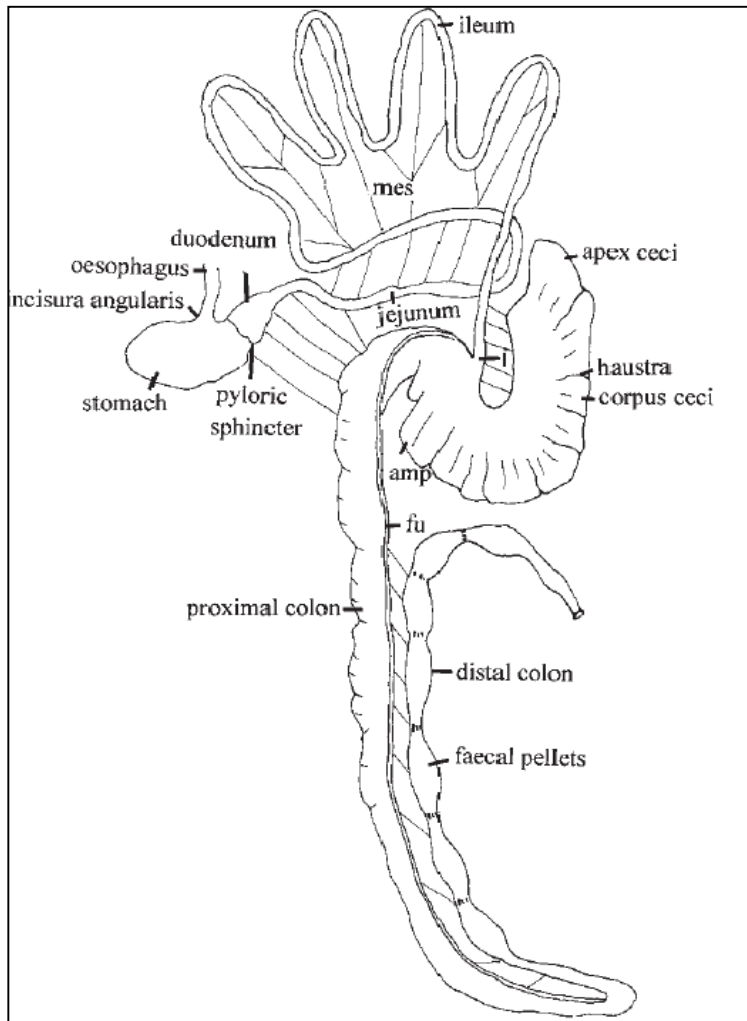


Figure 4. Schéma du tube digestif de l'aulacode (Van Zyl et al., 2005)

Tableau 4. Quelques paramètres du tube digestif de l'aulacode adulte

(d'après Van Zyl et al., 2005 ; sauf MS d'après van Zyl et Delpont, 2010)

Compartiments digestifs	Longueur (cm) n = 9	Largeur (mm) n = 9	Poids (g) n = 8	Volume (ml) n = 8	MS (%)	pH
Œsophage	12,9	6,2	12,3			
Estomac	9,8	46,5	63,6	94,3	20	2,2
Intestin grêle	194,2	9,5	58,1	113,0	14	5,2
Caecum	16,5	81,8	80,4	131,9	20	5,7
Côlon proximal	170,6*	21,9	42,1	90,0	16	5,8
Côlon distal		9,6	35,3	65,2	30	

* valeur représentant la longueur du côlon proximal et du côlon distal

1.2.2. Répartition de quelques activités enzymatiques dans le tube digestif de l'aulacode

Traoré (2010) a étudié les activités protéasiques, amylasiques, α -glucosidasiques, cellulases et β -glucosidasiques totales dans le contenu digestif de l'aulacode. Les contenus de l'estomac, du duodénum, de l'iléon, du caecum et du côlon ont été prélevés et conservés dans 100 ml de NaCl à 0,9 % (p/v) jusqu'à leur analyse. Cet auteur a observé que l'activité protéasique était représentée dans l'estomac, l'intestin grêle, très peu présente dans le côlon et absente dans le caecum. Les activités amylasiques et α -glucosidasiques étaient mieux représentées dans l'intestin grêle, moyennement dans le caecum et le côlon, mais absentes dans l'estomac. Par ailleurs, les activités cellulases et β -glucosidasiques ont été majoritairement identifiées dans le caecum et dans une moindre proportion au niveau du côlon. Les fibres seraient donc principalement digérées au niveau du caecum et accessoirement dans le côlon.

Toutefois, en l'état actuel de nos connaissances, aucune étude n'a été faite sur les activités fermentaires du caecum ni sur le microbiote impliqués dans la digestion dans ce compartiment digestif. Vu que les fibres semblent être digérées essentiellement au niveau du caecum (Traoré, 2010 ; Van Zyl et Delpont, 2010) il serait intéressant de confirmer ce résultat par l'étude du milieu caecal à travers l'analyse des activités fermentaires ainsi que la caractérisation du microbiote caecal. Vu qu'actuellement, aucune connaissance sur la flore

caecale de l'aulacode n'a été publiée, nous présenterons des données relatives au lapin et au cobaye à la fin de ce contexte scientifique.

1.2.3. Phénomène de coprophagie

Les animaux de certaines espèces produisent deux types de crottes au cours de la même journée, ingèrent systématiquement une de ces deux catégories de crottes (appelées caecotrophes) et rejettent systématiquement l'autre type (déjections vraies). Ce phénomène appelé caecotrophie est pratiqué généralement par les Lagomorphes (lapins, lièvres, ...) et aussi quelques autres espèces (castor, ...). Ce phénomène est très différent de la coprophagie qui consiste pour un animal à produire un seul type de crottes au cours de la journée et à ingérer une partie de ces crottes de manière systématique ou occasionnelle. La coprophagie est généralement observée chez les rongeurs. Elle permet à l'animal d'utiliser les nutriments synthétisés par les micro-organismes du cæcum mais qui ne sont pas absorbés directement : des protéines, mais surtout des vitamines du groupe B (vitamine B12 notamment) et la vitamine K. Les besoins vitaminiques B seraient ainsi totalement couverts, indépendamment de l'apport alimentaire (Boussarie, 2000).

Chez le cobaye, Sharkey (1971) a montré que si on empêche strictement cette pratique, d'une part on génère des répercussions substantielles sur l'efficacité de la digestion, et d'autre part on assiste à la mort de l'animal dans les dix jours qui suivent.

Le comportement de coprophagie a été observé chez l'aulacode en élevage (Holzer et al., 1986 ; Heymans, 1992). Les crottes sont récupérées par l'animal dès leur émission à l'anus. A cet effet, l'animal se retourne, met la bouche à l'anus et récupère les crottes dès qu'elles sortent.

Holzer et al. (1986) ont étudié cette pratique chez l'aulacode. D'après ces auteurs, les crottes prélevées dans le côlon distal et le rectum des aulacodes en train d'entamer une série de coprophagie ne se distinguent pas (visiblement et en composition) des crottes correspondantes des animaux en dehors des phases de coprophagie. Les aulacodes ingèreraient ainsi 10% en moyenne de leurs crottes par jour. Ce phénomène est observé en général entre 0 h et 6 h du matin, où 62,5% de l'ingestion circadienne des crottes a lieu. Contrairement au lapin qui ingère les crottes sans les mastiquer (Gidenne et Lebas, 2005), chaque crotte ingérée est mastiquée pendant en moyenne 42 s chez l'aulacode (Holzer et al., 1986). Cependant, pour ces derniers auteurs, l'effectif d'animaux utilisés pour leur étude sur la coprophagie de

l'aulacode était faible (6 animaux) et même si l'absence de différence significative entre les deux catégories de crottes étudiées ne soutient pas l'hypothèse d'un recyclage sélectif de crottes « riches », l'existence d'un tel mécanisme n'est pas à exclure totalement.

1.2.4. Alimentation

1.2.4.1. Habitudes alimentaires en milieu naturel

Le système digestif de l'aulacode, avec son caecum bien développé (Alogninouwa, 1994), est en accord avec le régime végétarien de cet animal. Dans la nature, l'aulacode se nourrit de graminées sauvages ou cultivées, de grains de céréales, de tubercules, de rhizomes, de racines et d'écorces. Sa préférence va aux graminées à tiges épaisses et succulentes comme *Pennisetum purpureum*. Plusieurs espèces végétales consommées par l'aulacode ont été identifiées (Tableau 5). En outre, l'aulacode consomme dans la nature des insectes et autres invertébrés. Il consomme également de la terre surtout lorsqu'elle est imbibée d'urine de mammifères (Rosevear, 1969 ; Amany, 1973).

1.2.4.2. Alimentation en élevage

En élevage, l'aulacode est nourri avec des fourrages verts complétés par des produits agricoles ou sous produits agro-industriels (Tableau 6). Les fourrages les plus utilisés sont des graminées, telles que *Pennisetum purpureum* (photo 3A) et *Panicum maximum* (photo 3B) (Toleba et al., 2007). Le complément énergétique est apporté par des céréales ou sous produits de céréales (maïs, mil, sorgho) et des tubercules et racines riches en énergie (cossettes ou épluchures de manioc, épluchures d'igname). Le complément azoté est souvent assuré avec *Pueraria phaseoloïdes* (photo 3C) et les feuilles de *Leucaena leucocephala* (photo 3D). Les tourteaux sont rarement utilisés en raison de leur coût relativement élevé. Les poudres de coquille de mollusques (escargots, huitres) ou d'os calcinés sont utilisées pour les compléments en minéraux.

La consommation d'eau est d'environ 90 ml par jour pour des sujets de 3 kg approximativement. Cette consommation augmente avec la quantité de matière sèche (MS) consommée.

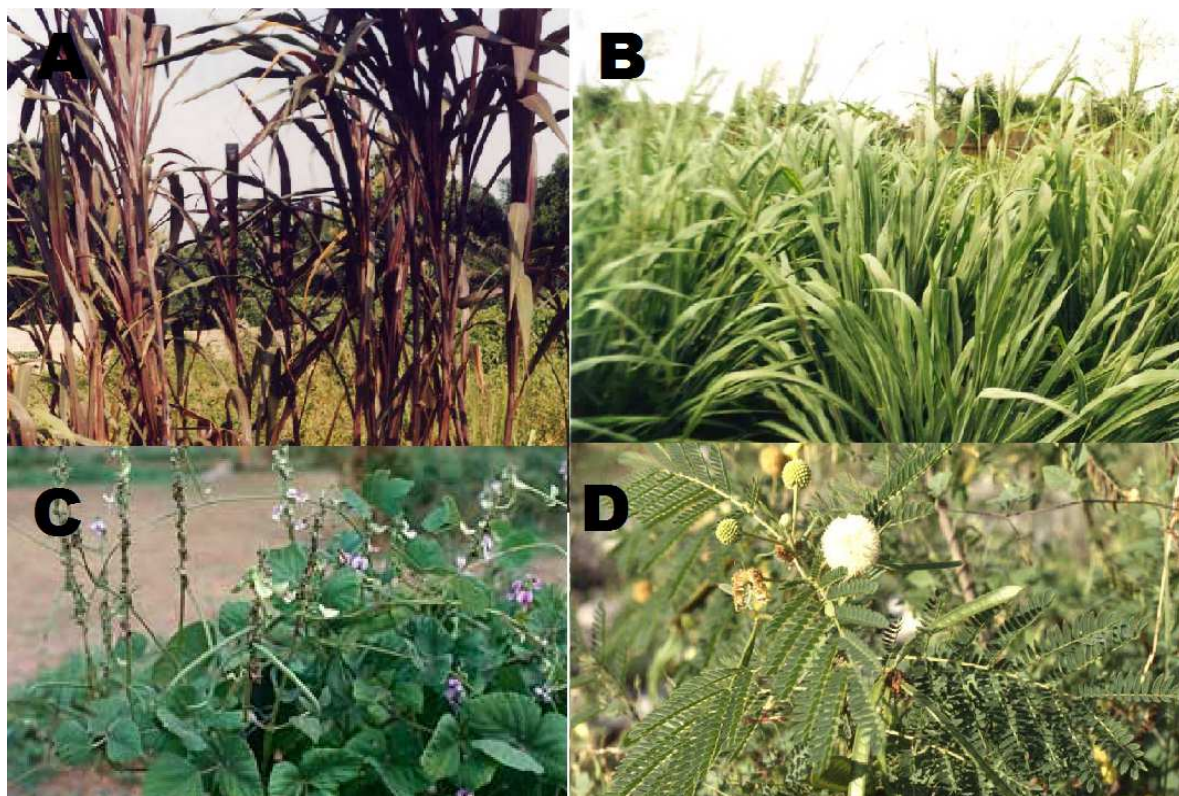


Photo 3. Plantes fourragères couramment utilisées dans l'alimentation de l'aulacode en Côte-d'Ivoire : A) *Pennisetum purpureum* (Herbe à éléphant), B) *Panicum maximum* (Herbe de Guinée), C) *Pueraria phaseoloides* (Kudzu tropical) D), *Leucaena leucocephala* (Leucéna), (Lebas, 2012)

Tableau 5. Composition chimique de quelques fourrages utilisables pour l'alimentation de l'aulacode (en % de la matière sèche), (Fantodji et Soro, 2004).

Echantillons	Matière Sèche (g/kg)	Protéines brutes	Matières grasses	Cellulose brute	Cendres brutes	Calcium	Phosphore
<i>Pennisetum purpureum</i>	219	8,9	2,1	33,7	-	0,37	0,29
<i>Panicum maximum</i>	269	9,7	2,5	35,1	11,9	0,43	0,37
<i>Andropogon gayanus</i>	280	8,3	2,4	34,8	9,1	0,59	0,36
<i>Imperata cylindrica</i>	292	6,4	2,3	39,2	-	-	-
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	261	9,4	2,7	30,1	10	0,45	0,33
<i>Pueraria phaseoloides</i>	277	16,1	2,3	38,6	7,6	0,74	0,15
<i>Stylosanthes hamata</i>	260	11,7	2,1	41,8	7,3	1,34	0,18
<i>Stylosanthes gracilis</i>	331	12,6	2,3	40,2	8,0	1,26	0,19
<i>Leucaena leucocephala</i> (feuilles)	276	23,5	4,0	24,9	9,1	1,76	0,19
<i>Ipomoea batatas</i> (feuilles)	137,7	22,4	3,5	16,2	16,2	0,93	0,41
<i>Zea mays</i> (paille)	902	7,2	2,0	33,9	8,6	0,5	0,10
<i>Saccharum sp.</i> (Tige)	214,4	3,5	1,1	28,7	1,91	0,07	0,07
<i>Manihot esculenta</i> (tige)	219	9,7	2,1	45,8	7,0	0,6	0,57

Tableau 6. Aliments complémentaires au fourrage utilisables en aulacodiculture (en % de la matière sèche), (Fantodji et Soro, 2004.)

Echantillons	Matière Sèche (g/kg)	Protéines brutes	Matières grasses	Cellulose brute	Cendres brutes	Calcium	Phosphore
Epluchures de manioc	298	4,2	2,1	18,6	10,1	0,6	0,13
Cossette de manioc	906	3,1	0,7	4,3	2,9	0,14	0,1
Drêche de brasserie séchée	864	32,1	9,5	15,0	5,2	0,29	0,21
Grain de maïs	881	11,0	4,4	2,6	1,9	0,05	0,18
Son de maïs	875	12,7	9,5	5,2	4,4	0,05	0,5
Tourteau de soja	893	49,8	2,1	7,0	8,0	0,39	0,7
Tourteau de coton	914	48,5	3,1	11,5	7,6	0,22	0,89
Tourteau de palmiste	916	17,4	8,4	21,2	5,0	0,27	0,57
Farine de coquilles d'escargot	906	-	-	-	97,4	32,2	0,08

1.2.4.3. Besoins nutritionnels de l'aulacode

Il existe très peu d'études sur les besoins nutritionnels de l'aulacode. Mensah, (1995) a été le premier à établir des recommandations nutritionnelles pour l'aulacode adulte (27 à 31 mois d'âge), avec 16 rations alimentaires composées de différents fourrages, complétées ou non avec des grains de maïs ou avec un aliment granulé pour lapins. Un total de 18 aulacodes randomisés en groupes de 6 animaux élevés individuellement a été utilisé. Cette étude a permis de montrer qu'une augmentation du concentré au-delà de 20 à 25 % dans la ration ne menait pas à une meilleure digestibilité de la matière sèche de la ration totale. Elle a permis d'établir, sur le critère de la digestibilité des constituants alimentaires, une plage concernant les apports recommandés pour l'aulacode adulte (Tableau 7). Ces travaux situent les besoins en fibres de l'aulacode adulte au-delà de 25% d'ADF dans la ration alimentaire.

Tableau 7. Recommandations nutritionnelles pour l'aulacode adulte (Mensah, 1995)

Nutriments	Besoins
	(en % MS de l'aliment)
Protéines brutes	12,0 à 18,5
Matières grasses	2,5 à 4,5
Cendres brutes	8,5 à 11,0
NDF	42 à 64
ADF	25 à 35
ADL	3 à 8

Chez l'aulacode en croissance (poids moyen = 1174 g), Karikari et Nyameasem (2009) ont étudié trois aliments granulés complets iso-protéiques (19,2% de protéines brutes) avec différents niveaux de fibres (16,3 ; 17,2 et 25,4 % d'ADF). Ces auteurs ont obtenu les meilleures performances de croissance et de digestibilité avec l'aliment à 16,3% d'ADF. Mais, Karikari et Nyameasem (2009) n'ont pas analysé l'impact des régimes étudiés sur la santé digestive des animaux.

Il ressort de ces études que si l'aulacode adulte peut satisfaire ses besoins d'entretien avec un aliment peu concentré, en revanche, l'animal en croissance aurait besoin d'un aliment plus riche. Toutefois, ces données sur les besoins nutritionnels de l'aulacode restent encore très partielles et l'aspect sanitaire n'a pas été suffisamment pris en compte. Aucune étude n'a été effectuée pour évaluer l'impact des fibres sur la santé digestive de l'aulacode alors que des

risques de troubles digestifs existent, surtout après le sevrage, si un apport de fibres minimum n'est pas respecté ainsi que cela a été montré chez d'autres herbivores monogastriques comme le lapin (Gidenne, 2003 ; Gidenne et Garcia, 2006).

1.2.4.4. Comportement alimentaires de l'aulacode et ingestion

Pour consommer le fourrage, l'aulacode le saisit d'abord avec la bouche, le coupe avec ses incisives puis s'assied sur ses membres postérieurs. Il relève les membres antérieurs pour attraper l'herbe qu'il débarasse de ses feuilles et autres couches superficielles. La tige ainsi dénudée est poussée progressivement dans la bouche et hachée avec les puissantes incisives de l'animal. L'aulacode commence toujours par manger les tiges succulentes avant de s'intéresser aux feuilles. Ce comportement alimentaire qui consiste à trier entre les particules de l'aliment fait de l'aulacode un gros gaspilleur de fourrage (Fantodji et Soro, 2004).

Chez l'aulacode, le mécanisme de régulation de l'ingestion reste encore peu connu. De façon générale, on admet que l'aulacode adulte consomme en moyenne entre 150 et 250 grammes de matière sèche par jour lorsqu'il est nourri avec des fourrages (Fantodji et Soro, 2004).

Van zyl *et al.* (1999) ont obtenu des niveaux d'ingestion de 51 g de MS contre 60 g de MS par kg de poids vif chez l'animal adulte avec des rations contenant respectivement 17 et 33 % d'ADF. Chez des aulacodes en croissance (plus de 3 mois d'âge), Karikari et Nyameasem (2009) ont obtenu une augmentation du niveau d'ingestion de 26 à 30 g de MS par kg de poids vif, lorsque le taux de fibres dans l'aliment a varié de 17 à 25 % d'ADF par rapport à la MS.

1.2.4.5. Digestibilité

Les valeurs de digestibilité de la matière sèche et des fibres alimentaires obtenues par Karikari et Nyameasem (2009) pour l'aulacode en croissance avec des aliments complets granulés sont proches de celles observées chez le lapin. Avec des aliments granulés contenant 16 à 25% d'ADF, ces auteurs ont obtenu une digestibilité de la matière sèche variant entre 80 et 64%. La digestibilité de l'ADF a varié de 66 à 61 % pour ces mêmes aliments.

Cependant, les valeurs de digestibilité fécale enregistrées chez l'aulacode avec des rations à base de fourrages sont généralement élevées (Mensah, 1992) comparées à celles observées chez le lapin (Gidenne, 1996). Ainsi, avec une ration contenant 18% d'ADF et 14% de protéines brutes, Van Zyl *et al.* (1999) ont obtenu chez des aulacodes adultes, une digestibilité

de 88% pour la matière sèche et 82% pour l'ADF. Ces valeurs de digestibilité élevées pour les aliments constitués de fourrages pourraient être expliquées par le comportement alimentaire de l'aulacode qui est un animal gaspilleur, et qui trie les particules d'aliment lorsque celui-ci est distribué sans mélange et granulation (Yewadan, 1992). Ce comportement alimentaire ne permet pas de connaître avec précision la proportion de chaque constituant alimentaire contenu dans le bol alimentaire ingéré par l'animal. Cette situation rend la détermination de la digestibilité des constituants alimentaires imprécise.

1.2.4.6. Indice de consommation

L'indice de consommation (IC) généralement rapporté chez l'aulacode est très élevé lorsque l'animal est nourri uniquement avec du fourrage. L'IC peut atteindre des valeurs de l'ordre de 20 à 30 (Zougou-Tovignon, 2005, Buagbe, 1986). Cependant, les fourrages servant à l'alimentation des aulacodes sont en général caractérisés par une grande richesse en fibres et une extrême pauvreté en protéines brutes (Fantodji et Soro, 2004), ce qui peut expliquer cette faible efficacité alimentaire. Avec des rations constituées uniquement d'aliments concentrés avec des taux de fibres allant de 16 à 25 % d'ADF, l'IC de l'aulacode en croissance atteint des valeurs allant de 5 à 7 (Karikari et Nyameasem, 2009).

La biologie et principalement l'alimentation de l'aulacode ont été étudiées dans le but d'améliorer les performances de production de cet animal. Les recherches sur l'alimentation ont révélé que les fibres occupaient une place importante dans la ration de cet animal comme chez tout herbivore. Mais, les études qui traitent de l'impact des fibres alimentaires sur les performances zootechniques et la santé de l'aulacode restent parcellaires et ne permettent pas d'établir des recommandations en matière de fibres pour cet animal.

2. Les fibres dans l'alimentation des monogastriques herbivores

2.1. Définition et structure des fibres

Les fibres en alimentation animale désignent les polymères végétaux présents pour la plupart dans les parois des cellules végétales. Ces composés sont constitués de polysaccharides non amylicés et des lignines. On distingue 5 classes majeures de fibres (figure 5) : lignines, celluloses, hémicelluloses insolubles dans l'eau, substances pectiques insolubles dans l'eau, et divers polysaccharides non amylicés hydrosolubles.

Les polysaccharides hydrosolubles comprennent plusieurs classes de molécules de degrés de polymérisation allant de 15 à plus de 2000 (β -glucanes). Les substances pectiques comprennent plusieurs classes de polymères : les pectines, composées d'une chaîne principale constituée d'un polymère d' α (1-4)-galacturonane et de chaînes latérales d'arabinose et de galactose, mais aussi des polysaccharides neutres (arabinanes, galactanes, arabinogalactanes). Les substances pectiques constituent les lamelles moyennes isolant les cellules végétales les unes des autres. Leurs chaînes sont constituées de maillons en C_6 , l'acide hexuronique. Elles sont aussi digestibles que les glucides cytoplasmiques (sucres et amidon) chez les ruminants (Soltner, 1994).

Les hémicelluloses regroupent plusieurs types de polysaccharides, tels que les xylanes, les mannanes, (chaînes linéaires, liaisons β 1-4), les arabino-galactanes (chaînes ramifiées, liaisons β 1-3 et β 1-6). Elles diffèrent de la cellulose par la nature des maillons qui constituent leurs chaînes. Ces maillons, au lieu d'être des sucres en C_6 comme le glucose, sont des sucres en C_5 . Leurs organisations leur confèrent une meilleure digestibilité par rapport à la cellulose.

La cellulose est un polymère linéaire de glucose (liaisons β 1-4) qui s'agrège en microfibrilles formant le squelette de la paroi végétale. Elle est quantitativement, le polysaccharide le plus abondant de la paroi cellulaire des végétaux (excepté pour les graines de la majorité des céréales). L'organisation de ses chaînes en réseau cristallin lui confère une résistance aux enzymes digestives, mais les enzymes des bactéries cellulolytiques de l'appareil digestif des herbivores peuvent la digérer.

La lignine est le dernier constituant majeur des parois cellulaires des végétaux. Cette molécule complexe est généralement rattachée aux glucides bien que n'appartenant pas au groupe des hydrates de carbone. La lignine provient de la copolymérisation de 3 alcools phénylpropinoïques (alcools coumarique, coniférylique et sinapylique). C'est une chaîne de maillons de coniférol. Cette molécule est très hétérogène (nature des unités, fréquence des liaisons...). Les liaisons qui soudent les chaînes sont tellement résistantes que même les enzymes microbiens des herbivores sont sans effet sur elles (Soltner, 1994).

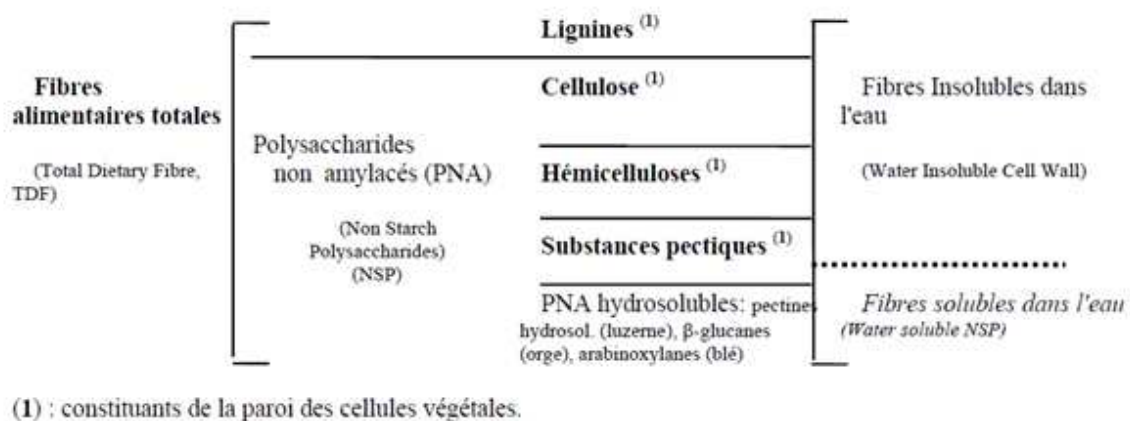


Figure 5. Les principales classes de fibres alimentaires (Gidenne 1996)

2.2. Méthodes de dosage

Compte tenu de la diversité des molécules composant les fibres alimentaires, il n'y a actuellement aucune méthode de dosage permettant une quantification globale ou un fractionnement précis des différentes classes de fibres. Il existe cependant des méthodes, plus ou moins précises, pour quantifier certaines classes de fibres dans les aliments (Figure 6).

La méthode de Weende est depuis longtemps utilisée en alimentation animale pour estimer la teneur en fibre des aliments, quoique le résultat de cette méthode d'analyse, appelé cellulose brute (CB) soit mal défini tant du point de vue chimique que du point de vue alimentaire. Cette méthode solubilise en effet de 30 à 100% de la cellulose, de 14 à 20% des pentosanes et de 16 à 50% de la lignine selon la matrice analysée.

La méthode de Van-Soest et al. (1991), plus récente, présente l'avantage d'estimer à partir d'un seul échantillon, plusieurs fractions fibreuses, telles que les hémicelluloses (NDF-ADF), la cellulose (ADF-ADL) et les lignines (ADL). Ces critères sont imparfaits au plan biochimique

mais constitue une bonne approche pour les analyses classiques des aliments pour animaux (Gidenne, 2003). Mais, cette méthode ne permet pas de doser les pectines insolubles (4-10%) et les fibres solubles (pectines, β -glucanes, α -galactosides, \approx 2-6%).

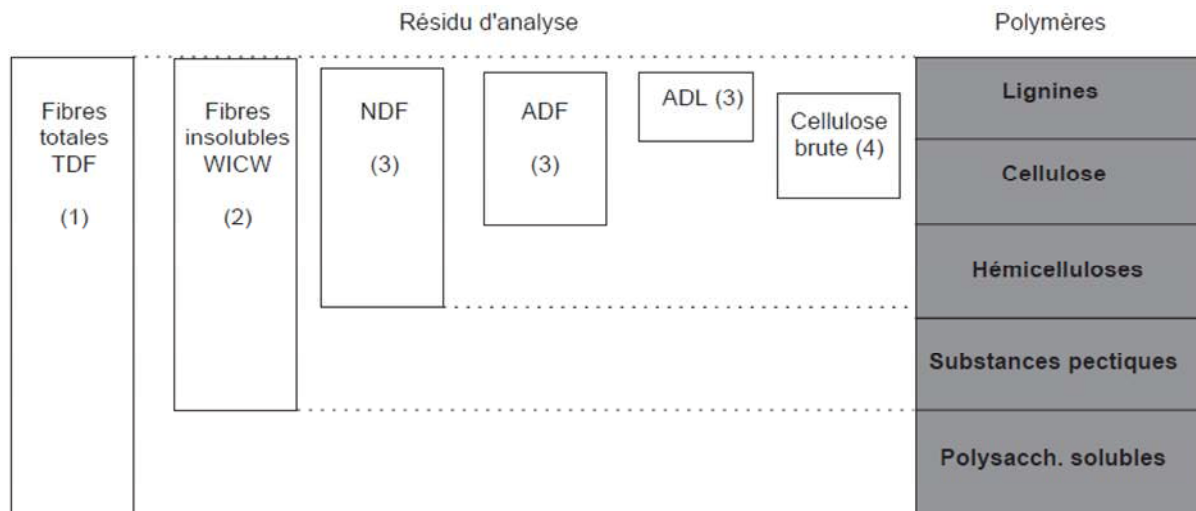


Figure 6. Méthodes gravimétriques de dosage des fibres et nature du résidu d'analyse (D'après Gidenne 1996) ; (1) TDF = total dietary fibre (Lee et al 1992) ; (2) WICW = water insoluble cell-wall (Carré et Brillouet 1989) ; (3) NDF = neutral detergent fibre, ADF = acid detergent fibre, ADL = acid detergent lignin (Van Soest et al 1991) ; (4) selon la méthode de Weende.

2.3. Rôles des fibres dans l'alimentation des monogastriques herbivores

Très peu d'études ont été consacrées aux fibres dans la digestion chez l'aulacode. Par conséquent nous présentons dans cette partie les résultats obtenus chez deux monogastriques herbivores bien connus à savoir le lapin et le cobaye dans l'objectif d'une étude de physiologie digestive comparée.

2.3.1. Chez le lapin

2.3.1.1. Particularités digestives du lapin

Le système digestif du lapin est adapté à un régime herbivore avec des spécificités. Dans la partie antérieure du tube digestif, c'est-à-dire jusqu'à la fin de l'intestin grêle, la digestion est

due, comme chez les autres monogastriques, à l'action combinée des enzymes pancréatiques et intestinales de l'animal. Les aliments séjournent en moyenne 2 à 4 h dans l'estomac et de 1 à 2 h dans l'intestin grêle. Cette digestion enzymatique est complétée dans le caecum et le côlon proximal par une digestion microbienne. Les particules alimentaires y séjournent plus longtemps, en moyenne 6 à 12 h (Gallouin, 1995 ; Gidenne et Lebas, 2005).

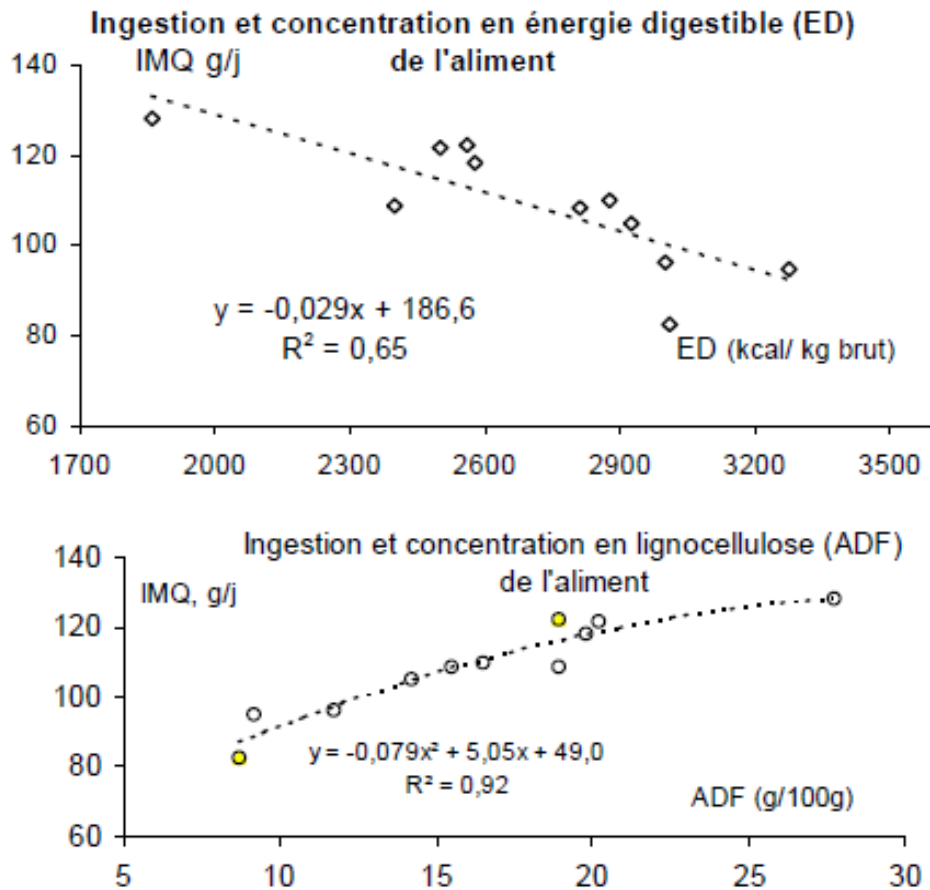
L'originalité principale de la physiologie digestive du lapin se situe dans le fonctionnement particulier du côlon proximal qui se comporte différemment selon le moment de la journée. Ce fonctionnement a été décrit par Björnhag (1972). Si le contenu caecal s'engage dans le côlon à la fin de la nuit ou au début de la matinée, il y subit peu de transformations biochimiques. Sous l'effet du péristaltisme du côlon, il forme de petites boulettes et transite vers le rectum. En même temps, la paroi colique secrète un mucus qui les enrobe progressivement. Ces boulettes sont appelées « crottes molles » ou « caecotrophes ». Si le contenu caecal se déverse dans le côlon dans la journée (ou en début de nuit), il progresse dans le côlon sous l'action d'un double péristaltisme dans des directions opposées (successivement vers le caecum puis vers le rectum). Ces contractions ont pour effet de presser le contenu digestif comme une éponge. Il y a séparation entre une fraction solide renfermant surtout de grosses particules (plus de 0,3 mm) et une autre fraction plus liquide contenant les petites particules (moins de 0,1 mm) et les éléments solubles. Sous l'effet des contractions antipéristaltiques, la fraction liquide remonte vers le caecum tandis que les contractions péristaltiques maintiennent les grosses particules au centre de la lumière intestinale avant de les évacuer vers le rectum sous forme de « crottes dures ».

Les caecotrophes sont systématiquement ingérées lors de leur émission tandis que les crottes dures sont rejetées dans les litières. La caecotrophie présente un réel intérêt nutritionnel chez le lapin et fournit chez l'animal sain nourri avec un aliment équilibré, de 15 à 25% des protéines ingérées (Gidenne et Lebas, 1987).

2.3.1.2. Impact des fibres sur l'ingestion volontaire du lapin

Le lapin régule son ingestion volontaire en fonction de la teneur en énergie digestible (ED) contenue dans la ration (Cheeke 1987) comme la plupart des autres petits mammifères herbivores (Petersen et Baumgardt 1971, Kanarek et al., 1977). Une augmentation de la teneur en fibres, qui équivaut à une baisse de la teneur en ED, entraîne une hausse de l'ingestion volontaire. Par exemple, Bellier et Gidenne (1996) ont observé une réduction de 25 % de l'ingestion volontaire lorsque le taux de fibres dans la ration est passé de 400 à 220 g de

NDF/kg d'aliment. Quand le taux de fibres est situé entre 10 et 25% d'ADF, le niveau d'ingestion est mieux corrélé avec la concentration en fibres de l'aliment qu'avec la concentration en ED (Figure 7).



IMQ: ingéré moyen quotidien mesuré entre le sevrage (4 semaines) et 11 semaines d'âge.

* données obtenues pour des lapins de lignée commerciale hybride, après sevrage, et nourri à volonté avec un aliment granulé.

Figure 7. Relation entre ingestion volontaire et composition de l'aliment, chez le lapin en croissance (Gidenne et Lebas, 2005)

2.3.1.3. Impact des fibres sur la digestibilité chez le lapin

Les fibres peu ou non digestibles (cellulose et lignines) ont un effet dépresseur sur la digestibilité de la ration à cause de leur effet de barrière physique à l'attaque microbienne (Jung et Fahey, 1983). Chez le lapin, la digestibilité de la matière organique (MO) varie en fonction du taux de fibres dans la ration : elle est fortement corrélée au taux d'ADF (Gidenne,

1996). Des travaux ont montré que la digestibilité de la MO augmentait de 1,35 point lorsque la teneur en ADF diminuait de 1 point (Figure 8). Mais, l'effet des fibres sur la digestibilité de l'aliment dépend de la proportion des différentes fractions pariétales en présence. L'effet dépresseur des fibres sur la digestibilité de la MO apparaît plus marqué pour les lignines que pour la cellulose. Ainsi, Gidenne et Perez (1994) ont obtenu une baisse linéaire de la digestibilité de la MO de -2 points par point d'ADL supplémentaire alors qu'une hausse du taux de cellulose a entraîné une baisse linéaire de -1,7 points par point de cellulose (Gidenne et al., 1996).

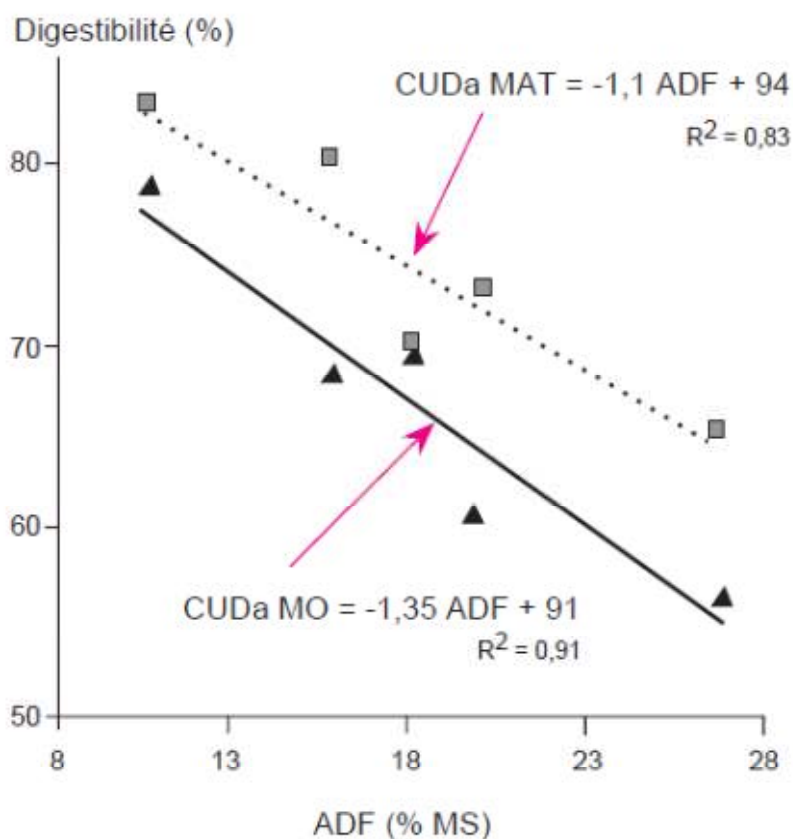


Figure 8. Digestibilité de la matière organique et des matières azotées totales (MAT, N x 6,25) en fonction de la teneur en lignocellulose (ADF) du régime, chez le lapin en croissance (Gidenne, 1996)

2.3.1.4. Rôle dans la régulation du transit digestif du lapin

Les fibres ont pour effet de réduire le temps de séjour moyen (TSMt) des aliments dans l'ensemble du tube digestif (Lebas et Laplace, 1977 ; Fraga et al., 1984 ; Gidenne et al.,

1991). Par exemple, pour une baisse de l'ingestion de NDF de 57 à 22 g/j, le TSMt passe de 17 à 33 h chez le lapin en croissance (Bellier et Gidenne 1996). Cependant, l'effet des fibres est différent en fonction du segment digestif concerné. Ainsi, la baisse de l'apport de fibres entraîne un allongement important du transit caecal et un transit stomacal plus court (Figure 9).

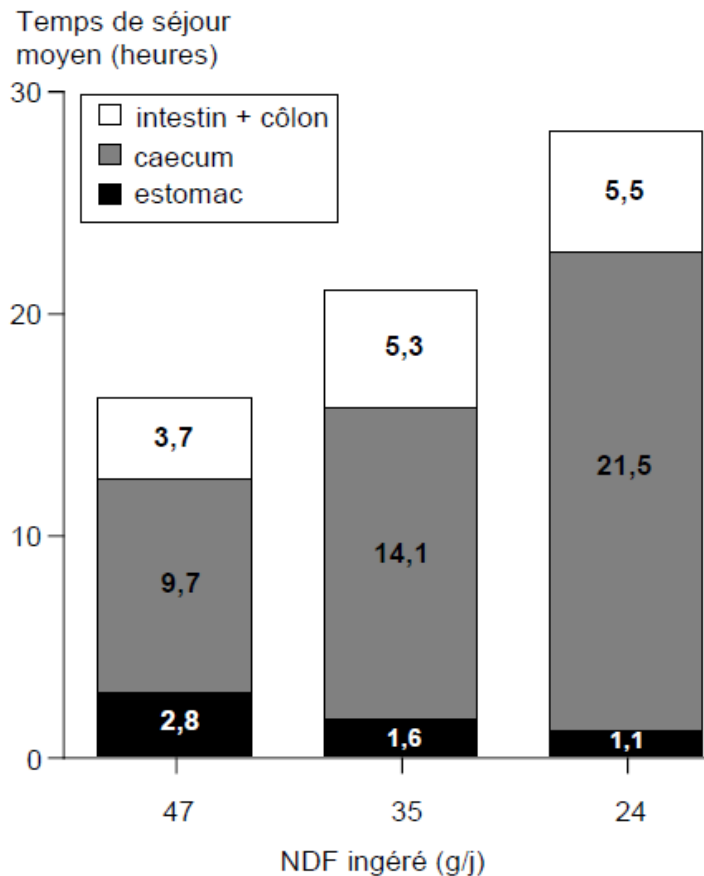


Figure 9. Incidence d'une baisse de la quantité de fibres ingérée sur la durée de transit dans les différents compartiments digestifs du lapin (Gidenne, 1996).

2.3.1.5. Effet sur les fermentations et l'activité microbienne caecales chez le lapin

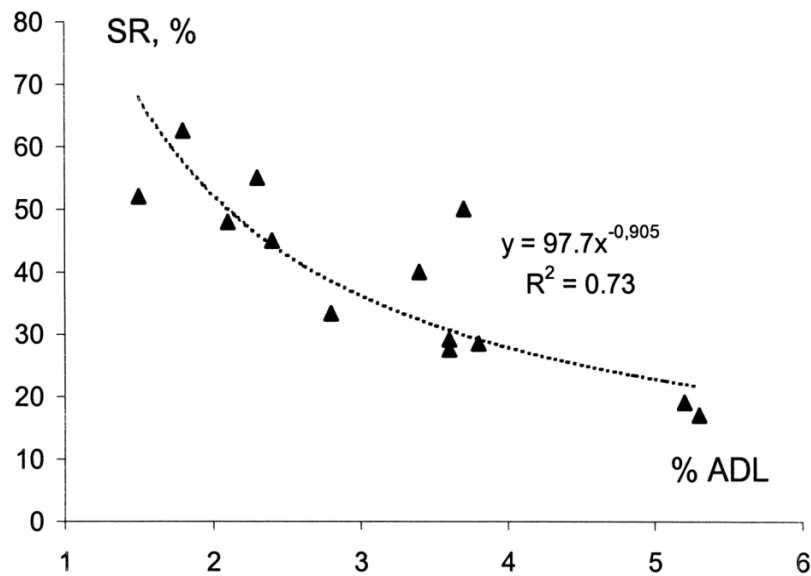
L'augmentation de l'ingestion de fibres (sans modification de leur nature) augmente ou n'a aucun effet sur la concentration caecale en AGV totaux et sur l'activité fibrolytique microbienne (Bellier et Gidenne, 1996 ; Gidenne et al., 2008). Elle agit principalement sur l'orientation des fermentations caecales avec pour effet une hausse de la proportion molaire d'acétate et surtout une diminution de celle du butyrate (Yu et Chiou, 1992 ; Bellier et Gidenne, 1996). Ainsi, lors d'une baisse du taux de fibres de 20 à 12 % d'ADF, une diminution de la proportion molaire d'acétate passant de 82,1 à 78,0 mol/100 mol et une

hausse de celle du butyrate passant de 13,6 à 16,9 mol/100 mol ont été observées (Gidenne et al., 2000). Par ailleurs, la hausse du taux de fibres agit également sur le microbiote caecal en favorisant les bactéries cellulolytiques (Boulahrouf et al 1991) telles que *Ruminococcus albus* et les *archaea* au dépens des bactéries (Bennegadi et al., 2003).

Quant à la nature des fibres, l'ingestion de fibres digestibles (pectines et hémicelluloses) stimule l'activité du microbiote caecal, ce qui a pour effet d'élever la concentration caecale en AGV et d'augmenter la quantité d'azote d'origine microbienne recyclé par caecotrophie (García et al., 2000 ; Gidenne, 2008).

2.3.1.6. Effet sur la santé digestive du lapin

Les fibres peu digestibles ont un effet favorable sur la santé digestive du lapin. Maître et al. (1990) ont obtenu, avec une augmentation du taux d'ADF dans la ration de 15,3 à 21,2%, une baisse de la mortalité de 14,4 à 7,5 % chez le lapin en engraissement. Gidenne et al. (1998) ont observé une augmentation du risque sanitaire (mortalité + morbidité) de 18 à 28% lorsque le taux d'ADF dans la ration a diminué de 19 à 15%. Toutefois, si la cellulose est aussi favorable à l'état de santé du lapin, un rôle majeur est attribué aux lignines, puisque la réduction du ratio lignines / cellulose entraîne une hausse des troubles digestifs (Gidenne et al., 2001). L'effet favorable de l'apport en lignines sur la santé est illustré par la figure 10. Il est ainsi recommandé approximativement 5 à 7 g de lignines par jour et 11 à 12 g de cellulose par jour pour une bonne santé digestive chez le lapin en croissance (soit % lignine \geq 5,5 et % cellulose \geq 13 % de la ration ; Gidenne, 2000 ; Gidenne 2003). Par ailleurs, une trop forte proportion de fibres digestibles (FD) (pectines et hémicelluloses) par rapport à l'ADF peut accroître l'index de risque sanitaire. Ainsi, le ratio FD/ADF ne doit pas dépasser 1,3 si l'on veut un faible risque de troubles digestifs (Gidenne, 2003).



SR = risque sanitaire ; ADL = lignines

Figure 10. Risque sanitaire chez le lapin en croissance, en fonction du taux de lignines dans la ration (Gidenne 2003)

2.3.2. Chez le cobaye

2.3.2.1. Spécificités de la physiologie digestive du cobaye

Le cobaye est un rongeur dont le système digestif est adapté à une ingestion élevée de fibres (Franz et al., 2010). Le caecum de cet animal est volumineux comme chez le lapin et son contenu atteint environ 65 % du contenu digestif total (O'Malley, 2005) contre 40 % chez le lapin (Gidenne et al., 2007). Selon Holtenius et Björnhag (1985), le cobaye produit deux types de crottes comme observé chez les Lagomorphes. Le fonctionnement du côlon proximal du cobaye dans la pratique de la caecotrophie ressemble à celui décrit chez le lapin (Björnhag, 1972). Le côlon proximal du cobaye comporte des plis qui forment des sillons entre eux. Les bactéries et quelques fines particules alimentaires sont piégées par un mucus dans ces sillons. Ce mélange de bactéries, particules alimentaires et mucus est ensuite transporté à partir du côlon proximal vers le caecum par un mouvement antipéristaltique du côlon proximal (Sperber et al., 1983 ; Sakaguchi, 2003).

Les caecotrophes produits chez le cobaye sont plus riches en azote que le contenu cæcal (45 contre 30 mg / g de MS). Cependant, le niveau d'azote des caecotrophes est le même que celui

trouvé dans le contenu des sillons du côlon proximal (Holtenius et Björnhag, 1985). Tout se passe comme si les caecotrophes étaient produits à partir du contenu des sillons du côlon proximal (Björnhag et Snipes, 1999). Cette stratégie alimentaire permet au cobaye de maintenir les bactéries dans le caecum et de bien valoriser les protéines microbiennes (Sakaguchi, 2003).

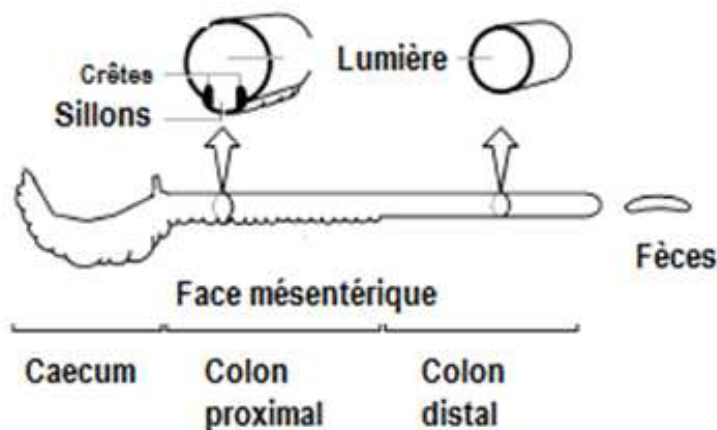


Figure 11. Schéma du gros intestin du cobaye présentant les sillons d'accumulation des bactéries pour leur transport du côlon proximal vers le caecum (d'après Takahashi et Sakagushi, 2006)

2.3.2.2. Influence des fibres sur l'ingestion et la digestibilité chez le cobaye

Une hausse du taux de fibres dans l'aliment a pour effet d'augmenter l'ingestion volontaire (Meyer et al., 2010). Il s'agit d'une stratégie alimentaire pour compenser la faible valeur nutritive de l'aliment (Barboza et Hume, 2006). Chez le cobaye, Sakaguchi et al. (1997) ont observé une hausse de l'ingestion passant de 40 g/j à plus de 60 g/j lorsque le taux de fibres dans l'aliment a augmenté de 10 à 22% d'ADF.

Par ailleurs, la digestibilité décroît lorsque le taux de fibres augmente dans la ration, comme classiquement observé chez les monogastriques. Ainsi, la digestibilité de la matière sèche a baissé de 76,6 à 67,0 % lorsque le taux de fibres dans l'aliment est passé de 10 à 22% d'ADF (Sakaguchi et al., 1997).

2.3.2.3. Influence des fibres sur la croissance et la santé digestive chez le cobaye

Il est reconnu depuis longtemps que les fibres sont importantes dans l'alimentation du cobaye (Booth et al., 1949). Alors qu'un régime alimentaire normal contenant 15 % de cellulose brute

engendre un gain moyen quotidien (GMQ) de l'ordre de 5 à 7 g/j (National Research Council, 1995) chez le cobaye croissance, Booth et al. (1949) ont observé avec un régime synthétique sans source de fibres, un GMQ de 1,9 g/j. Un apport de 30% de pulpe de betterave à ce même régime synthétique a permis un GMQ de 6,8 g/j. En fait, comme chez les autres herbivores monogastriques (Meyer et al., 2010), les fibres interviennent dans la régulation du transit digestif du cobaye (Villière, 1987).

Ainsi, au plan sanitaire, une déficience en fibres (moins de 10 % de cellulose brute) chez le cobaye provoque des diarrhées et la trichophagie (Broussarie 2000 ; Hillyer et Quesenberry 1997 ; Tobin 1996).

3. Microbiote du tube digestif chez les monogastriques herbivores

Le caecum est le plus grand compartiment digestif chez certains monogastriques herbivores comme le lapin ou le cobaye et le microbiote caecal est un élément clé dans la physiologie digestive de ces animaux tant du point de vue de la santé digestive que du point de vue de l'efficacité de la digestion. C'est pourquoi des travaux ont été consacrés à l'étude des communautés microbiennes caecales du lapin et du cobaye. En revanche, aucune étude n'a encore été effectuée jusqu'à ce jour sur le microbiote caecal de l'aulacode. Dans cette partie, nous présenterons les connaissances actuelles sur le microbiote caecal du lapin et du cobaye dans le but d'une étude comparée avec l'aulacode dans la partie expérimentale.

3.1. Chez le lapin

3.1.1. Caractérisation du microbiote caecal du lapin

L'analyse du microbiote caecal par les méthodes classiques de culture a permis de savoir que la colonisation bactérienne du caecum débute chez le lapereau âgé de 2 ou 3 j (Gouet et Fonty, 1973). A la fin de la première semaine postnatale le caecum héberge de 10^7 à 10^9 bactéries/g de contenu, puis cette densité passe à 10^9 - 10^{10} bactéries/g au cours de la seconde semaine de vie. Dès 14 j d'âge, les bactéries amylolytiques sont fortement implantées dans le caecum et ne diminuent pas ensuite. Les streptocoques (*S. faecium*, *S. faecalis*) atteignent un maximum chez le lapereau de 1 à 2 semaines d'âge, puis diminuent (Gouet et Fonty, 1979). *Escherichia Coli* est généralement absent chez le lapereau de 2 ou 3 j d'âge ; il apparaît à 7 jours chez les lapins (Padilha et al., 1995), et atteint un maximum (10^7 bact./g) à la fin de la

troisième semaine d'âge, puis chute brusquement. Les bactéries cellulolytiques augmentent dès que l'animal ingère de l'aliment solide (vers 18 j) pour atteindre 10^7 bact./g après le sevrage (Boulahrouf et al., 1991). Quelques bactéries fibrolytiques ont été identifiées au niveau caecal : *Eubacterium cellulosolvens* et *Bacteroides sp.* pour la cellulolyse, *Bacteroides ruminicola* et *Butyrivibrio fibrisolvens* pour l'hydrolyse de pectines et de xylanes (Boulahrouf et al., 1991). Les bactéries xylanolytiques et pectinolytiques s'implanteraient avec une densité supérieure à celle des bactéries cellulolytiques (10^8 - 10^9 vs 10^5 - 10^6).

Des données récentes sur la biocénose caecale du lapin ont été obtenues par des méthodes moléculaires. La plupart de ces méthodes sont basées sur l'analyse d'une partie du génome des microorganismes (gène codant pour l'ARN ribosomal 16S).

Ainsi, à l'aide d'une technique d'hybridation (dot blot ARNr 16S), Bennegadi et al. (2003) a montré qu'avant sevrage (à 18 j) le microbiote caecal total du lapin est constitué majoritairement d'*archaea* (> 60%), les bactéries n'en représentant que 40% ; après sevrage (> 28 j) cet équilibre est inversé. Cet auteur a observé que les Bacteroidetes représentaient 42% des séquences totales chez le lapin au sevrage (28 jours d'âge) et que cette proportion diminuait avec l'âge pour atteindre 18% à 42 jours d'âge. Il a également été observé chez le lapin la présence de quatre espèces bactériennes cellulolytiques, déjà identifiées dans le caecum du rat ou le rumen : *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus* et *Ruminococcus flavefasciens* (rumen) *Fibrobacter intestinalis* (caecum de rat). Cependant, ces bactéries fibrolytiques ne représentent qu'environ 5% du microbiote caecal, sachant qu'environ 40% des bactéries totales restent non identifiés.

Les méthodes récentes de microbiologie moléculaire ont permis de montrer que le microbiote caecal du lapin adulte est dominé par les Firmicutes avec plus de 90 % des séquences et les Bacteroidetes avec seulement 4 % (Monteils et al., 2008 ; Massip et al., 2012). Actinobacteria et Proteobacteria représentent respectivement 0,9 et 0,7 % des séquences. Les familles bactériennes sont dominées par les *Ruminococcaceae* et *Lachnospiraceae* avec 45 et 35% des séquences respectivement (Massip et al., 2012).

Contrairement au rumen, le microbiote caecal du lapin ne contiendrait ni protozoaires, ni champignons anaérobies (Bennegadi et al., 2003).

3.1.2. Effets de quelques facteurs nutritionnels sur le microbiote caecal du lapin

La nature et la quantité des aliments ingérés influencent l'écosystème caecal, notamment la communauté microbienne. Une hausse du taux de fibres dans l'aliment favoriserait les bactéries cellulolytiques (Boulahrouf et al., 1991) telles que *Ruminococcus albus*, mais aussi les *archaea* (au dépens des bactéries) (Bennegadi et al., 2003). L'apport de fibres solubles dans une solution de détergent neutre (Hall et al 1997) réduirait la proportion de lapereaux porteurs de *Clostridium perfringens* (bactérie opportuniste souvent associée à des pathogènes), ou porteurs de bactéries pathogènes telles que *Campylobacter* dans l'iléon et dans le caecum (Gómez-Conde et al., 2007). Un excès de protéines entraînerait une disponibilité plus élevée de substrats azotés dans le caecum, ce qui favoriserait la prolifération de certains pathogènes tels que *E. Coli* (Catala et Bonnafous 1979, Cortez et al., 1992).

3.2. Chez le cobaye

Le cobaye tout comme la souris et le rat sont fréquemment utilisés par l'homme comme animaux de laboratoire. A ce titre, le microbiote du tube digestif de ces animaux a souvent fait l'objet d'étude (Fonty et Chaucheyras-Durand, 2007). Chez le cobaye, une approche moléculaire récente a mis en évidence l'abondance au sein du microbiote digestif des phyla Bacteroidetes et Firmicutes qui représentent respectivement 15 et 29% des séquences microbiennes de l'ADNr 16S (Hildebrand et al., 2012). Contrairement au lapin chez qui les phyla majoritaires sont très peu nombreux, chez le cobaye plusieurs phyla majoritaires sont rencontrés. Ainsi, les Proteobacteria, Spirochaetes et Actinobacteria sont présents avec des abondances relatives respectives de 9 ; 1,2 et 1%. On compte également la présence des phyla Verrucomicrobia et Chlorobi avec respectivement 2,1 et 1,2 % d'abondance relative.

Conclusion

Il ressort de cette revue de littérature que les connaissances de base sur la biologie et le système digestif de l'aulacode adulte sont relativement bien connues. Cet animal herbivore a un système digestif adapté à l'ingestion de quantités relativement élevées d'aliments fibreux, qu'il semble digérer avec une efficacité similaire à celle observée chez le cobaye ou le lapin.

Les fibres alimentaires jouent un rôle important dans le fonctionnement digestif du lapin et du cobaye et ont une influence sur la croissance et la santé de ces animaux. Chez l'aulacode, leurs impacts sur les performances zootechniques, la physiologie et la santé digestive restent encore peu connus chez l'animal en croissance.

Aussi, les expérimentations que nous présentons dans cette thèse auront pour objectifs principaux d'étudier l'impact du niveau de fibres sur les performances zootechniques et la santé digestive chez l'animal en croissance. Les carences de connaissances sur la physiologie digestive nous amèneront à étudier l'écosystème caecal à travers l'analyse des fermentations microbiennes caecales et la caractérisation du microbiote bactérien caecal impliqué dans la digestion chez cet animal.

ETUDE EXPERIMENTALE

OBJECTIFS

La biologie et la physiologie de l'aulacode ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche appliquée dans le but de réussir sa domestication. Plusieurs études ont ainsi porté sur l'alimentation de cet animal. Il est communément admis dans la littérature (Fantodji et Soro, 2004) que cet animal a besoin d'une proportion importante de fibres dans sa ration alimentaire pour éviter des troubles digestifs comme cela a été démontré chez d'autres herbivores. Mais en l'état actuel de nos connaissances, aucune étude n'a évalué l'impact réel des fibres sur les taux de mortalité et de morbidité chez l'aulacode en élevage. D'autre part, l'essentiel des investigations sur l'alimentation de cet animal ont porté sur des animaux adultes et très peu d'études ont été consacrées aux jeunes animaux. Or, les taux de mortalité annuels signalés chez l'aulacode adulte dans les élevages n'excèdent pas 15 % alors celui des jeunes peut aller jusqu'à plus de 40 % dans certains cas (Jori, 2001 ; Adjahoutonon et al., 2007)

Par ailleurs, en dépit de quelques travaux antérieurs, la physiologie digestive de l'aulacode reste peu connue, puisque aucune donnée n'a encore été fournie ni sur l'activité fermentaire caecale ni sur les communautés bactériennes présentes dans le caecum, malgré l'importance de ce dernier dans la digestion chez cet animal herbivore et monogastrique.

Notre travail a porté sur des aulacodes en croissance, à partir du sevrage, avec trois objectifs majeurs. Il se propose d'acquérir des connaissances originales en anatomie et physiologie digestives. Plus particulièrement, nous nous focaliserons sur l'activité microbienne de l'écosystème caecal, en caractérisant le biotope caecal (acidité, concentration en produits terminaux de la fermentation), et la biocénose bactérienne présente dans le caecum. Pour la caractérisation du microbiote, nous avons choisi d'employer des méthodes modernes de microbiologie moléculaire, pour caractériser plus largement les communautés bactériennes, sans être restreint aux bactéries cultivables qui dans la plupart des écosystèmes digestifs ne représentent que 10 à 30% de la biocénose (Zoedenthal *et al.*, 2004).

Sur un plan plus finalisé, nous nous proposons également de préciser les limites de teneurs en fibres qui permettent de préserver la santé digestive de l'aulacode en croissance, et de maintenir une efficacité digestive optimale. De plus, nous nous proposons de préciser les éventuelles limites zootechniques et sanitaires de ration très riches en amidon, suite à

l'incorporation de céréales dans la ration, moins coûteuses que des sources de protéines (tourteau de soja, etc.).

Pour atteindre ces objectifs, deux expérimentations ont été réalisées. Afin d'assurer une meilleure maîtrise de la ration, nous nous sommes placés dans un cadre d'alimentation par un aliment complet, présenté sous forme de granulé. Dans la première expérimentation, quatre aliments iso-protéiques présentant des taux de fibres différents ont été étudiés sur des animaux à partir du sevrage. Cette expérimentation avait pour objectif de comprendre l'impact des fibres sur les paramètres de croissance, d'ingestion, de digestibilité et de santé, afin de définir une fourchette de taux de fibres alimentaires qui optimise les performances zootechniques sans nuire à la santé digestive des animaux.

La seconde expérimentation a eu pour but "finalisé" de déterminer des rations alimentaires peu coûteuses pour répondre aux besoins des éleveurs. Aussi, nous avons formulé des aliments expérimentaux, avec une gamme croissante d'apport d'amidon (via une céréale) en substitution d'apports protéiques et de fibres. Ainsi, il est possible de réduire le coût de l'aliment en diminuant les concentrés protéiques, très chers pour les éleveurs, mais aussi en substituant en partie les aliments fibreux par une céréale, nettement moins onéreuse que les tourteaux, pour limiter l'effet dépressif des fibres sur la digestion des nutriments. Notre étude avait donc pour objectif de comprendre jusqu'à quel niveau d'incorporation de céréales il est possible de monter, sans compromettre dangereusement les performances des animaux en raison de l'abaissement de la teneur de la ration en protéines brutes, et sans compromettre la santé en raison de l'abaissement du taux de fibres. Cette expérimentation revient également à tester l'effet du ratio protéines digestibles / énergie digestible sur les performances de l'animal.

Au cours de cette même expérimentation, l'anatomie digestive, les activités fermentaires ainsi que le microbiote du caecum ont été étudiés dans le but d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement digestif de cet animal.

Nous présenterons dans une première partie les matériels et méthodes de ces deux expérimentations à travers la description des protocoles mis en œuvre, ainsi que les méthodes d'analyses utilisées. Ensuite, dans une seconde partie, nous présenterons les résultats obtenus au cours de chacune des expérimentations en les discutant point par point. Enfin, dans une

discussion générale qui constitue la troisième partie de ce travail, nous reprendrons de façon synthétique les principaux résultats obtenus pour en tirer des enseignements.

MATERIELS ET METHODES

Dans cette partie sera présentée la description détaillée des deux protocoles expérimentaux mis en œuvre pour répondre aux objectifs de cette étude. Les méthodes d'analyses chimiques, microbiologiques et statistiques utilisées seront également expliquées.

1. Présentation des protocoles expérimentaux

1.1. Protocole 1 : étude de l'impact du niveau de fibres alimentaires sur les performances zootechniques et la santé chez l'aulacode en croissance

Ce protocole a été mise en place courant 2009 - 2010, avec pour objectif de définir des limites inférieure et supérieure de taux de fibres dans la ration qui assurent de bonnes performances zootechniques sans compromettre la santé digestive de l'aulacode en phase de croissance.

Les expériences sur les animaux ont été exécutées à la ferme expérimentale de l'Ecole Supérieure d'Agronomie de Yamoussoukro (ESA), en Côte-d'Ivoire. Les autopsies sur les animaux morts ont été effectuées par les services du Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole (LANADA, Côte-d'Ivoire). Les analyses chimiques ont été menées dans les laboratoires ENVT et INRA de l'UMR TANDEM (Toulouse, France).

1.1.1. Animaux, logement et mise en lots

L'élevage des animaux au cours de cette étude s'est effectué dans un bâtiment d'élevage couvert (photo 4), suffisamment aéré et exposé à une photopériode et une température naturelles. Il avait une superficie de 54 m² (9 m x 6 m) et une hauteur de 2,8 m avec des parois en plaques métalliques surmontées de grillage. La partie grillagée du bâtiment a été en partie recouverte par une bâche en plastique pour limiter l'effet du vent. L'expérimentation a été mise en œuvre pendant la saison humide. La température et l'hygrométrie ont varié de 20 à 30 °C et de 80 à 85 % respectivement.

Un total de 72 jeunes aulacodes mâles, nés en captivité à la ferme expérimentale de l'ESA, a été utilisé pour cette expérimentation. Ces aulacodeaux étaient issus de 35 portées. Pendant la

gestation, les femelles étaient logées dans des cages collectives de 4 femelles et 1 mâle. Chaque femelle était isolée dans une cage avec ses petits le lendemain de la naissance. Les mises bas se sont étalées sur 3 semaines. Ainsi, de la naissance jusqu'au sevrage, les aulacodeaux étaient logés avec leurs mères (une femelle par cage) et avaient accès à la nourriture solide de celles-ci composée de forrage vert de *Panicum maximum* complété avec du maïs grain à volonté. Le maïs n'était pas broyé si bien que les aulacodeaux ne consommaient que la partie molle du grain, du côté de l'embryon.

Au sevrage, les animaux ont été identifiés par des boucles numérotées à l'oreille (photo 5) et partagés en 4 lots de 18 animaux qui correspondaient au 4 aliments expérimentaux étudiés (ADF8, ADF14, ADF22 et ADF26, voir 1.1.2). Le poids au sevrage a été pris en compte afin de constituer des lots homogènes. Les petits d'une même portée ont été répartis dans des lots différents pour contrôler l'effet portée. Les animaux ont intégré l'expérimentation juste après le sevrage à des âges variant de 31 à 45 jours. Pour simplifier la gestion quotidienne, les animaux ont intégré l'expérimentation en trois vagues successives de 6 animaux comme expliquées sur la figure 12. L'âge à l'entrée en expérimentation était en moyenne de 37 ± 6 jours. Les différentes mesures ont donc été effectuées à intervalle fixe par rapport à l'entrée en expérimentation et non à âge fixe, mais pour simplifier la présentation, nous ne mentionnerons par la suite que l'âge moyen des animaux lors de ces mesures. Les poids moyens des animaux des quatre lots au début de l'expérimentation étaient respectivement de 334 ± 72 , 328 ± 75 , 338 ± 74 et 331 ± 65 g (moyenne \pm écart-type). Ils n'étaient pas statistiquement différents ($P = 0,992$). Les quatre lots d'animaux ainsi constitués sont présentés en annexe 1.

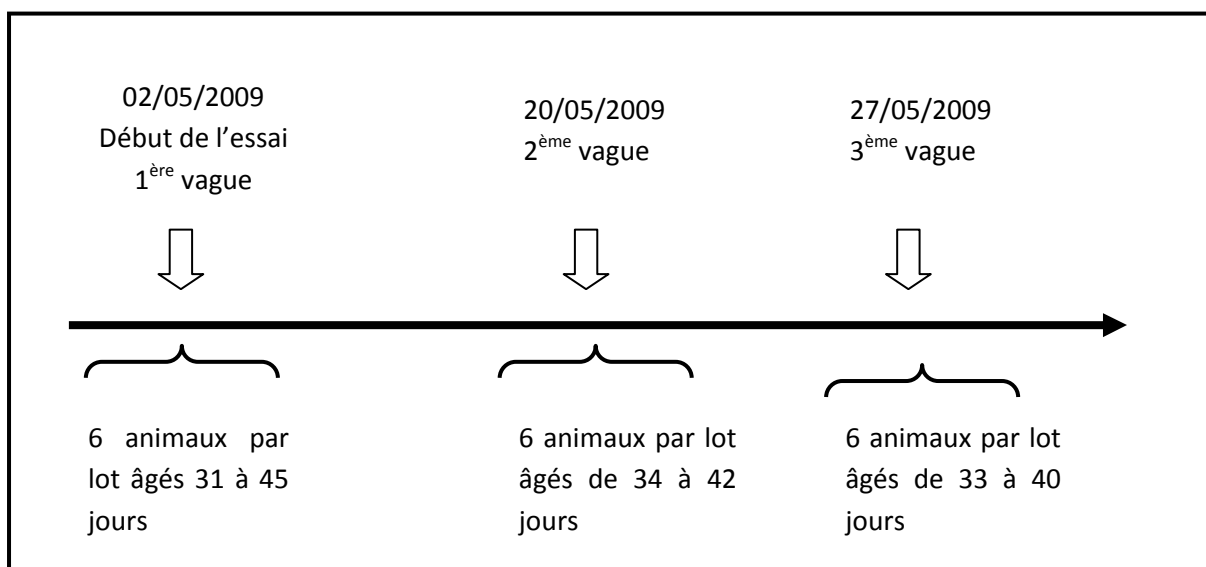


Figure 12. Schéma explicatif des trois vagues d'animaux ayant servi à l'expérimentation 1.

Après le sevrage, les animaux ont été nourris avec les aliments expérimentaux sous forme de granulés. La distribution des aliments aux sevrans s'est faite de façon progressive en complément du fourrage sur une période de transition qui a duré une semaine.

Les animaux étaient logés dans des cages collectives entièrement grillagées. Les cages étaient disposées sur des briques permettant de les maintenir à une hauteur de 40 cm du sol. Chaque cage mesurait 100 cm de longueur, 50 cm de largeur et 40 cm de hauteur et contenait 6 animaux chacune soit une densité de 12 individus par m². Chacune des cages collectives était équipée de trois mangeoires d'une place pour lapin et de deux abreuvoirs en ciment.

En plus des cages collectives, quarante cages individuelles ont été utilisées pour les mesures de digestibilité (voir 1.1.5). Les cages individuelles étaient constituées de 2 blocs de 20 cages sur 5 niveaux, chacune ayant pour dimensions 60 cm de longueur, 50 cm de largeur et 30 cm de hauteur. Dix animaux par lot ont été sélectionnés au hasard pour ces mesures sur trois périodes de 15 jours chacune. Pendant ces périodes, les animaux sélectionnés étaient logés dans ces cages individuelles et revenaient en cages collectives en fin de période de mesure. Chaque cage individuelle disposait d'un abreuvoir et d'une mangeoire en ciment. Les cages collectives, individuelles ainsi que les abreuvoirs et mangeoires sont présentés sur les photos 6, 7, 8, 9.

Les trois cages collectives de chaque lot étaient contigües dans le but d'éviter les erreurs pendant la distribution des différentes rations. Les 10 cages individuelles de chaque lot étaient également contigües pour la même raison. La disposition de ces cages dans le bâtiment d'élevage est illustrée par la figure 13.



Photo 4. Bâtiment d'élevage



Photo 5. Identification des animaux au sevrage



Photo 6. Cages collectives (avec des mangeoires pour lapin)



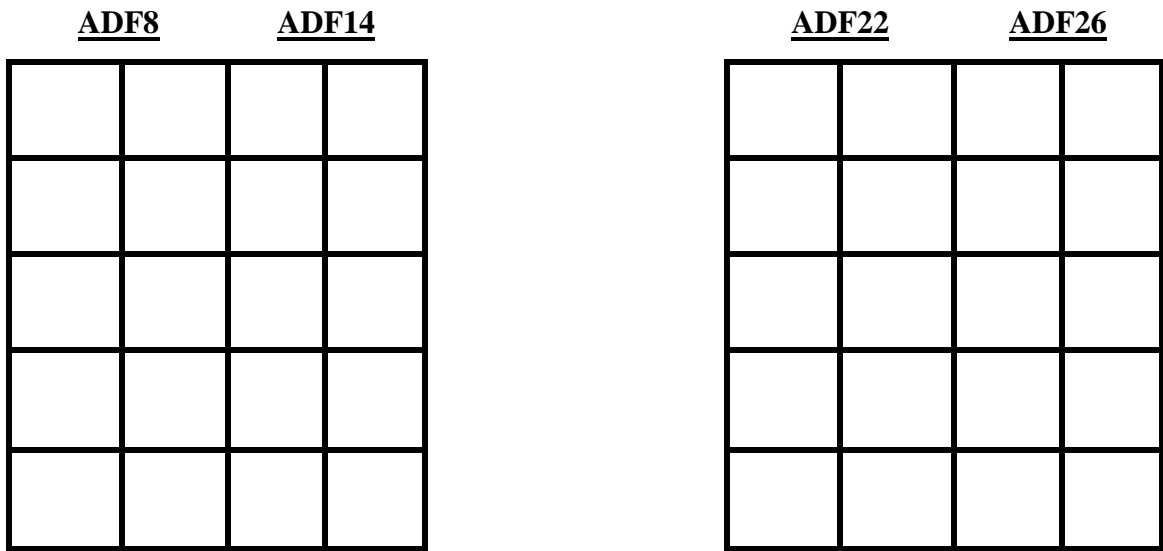
Photo 7. Deux blocs de cages individuelles



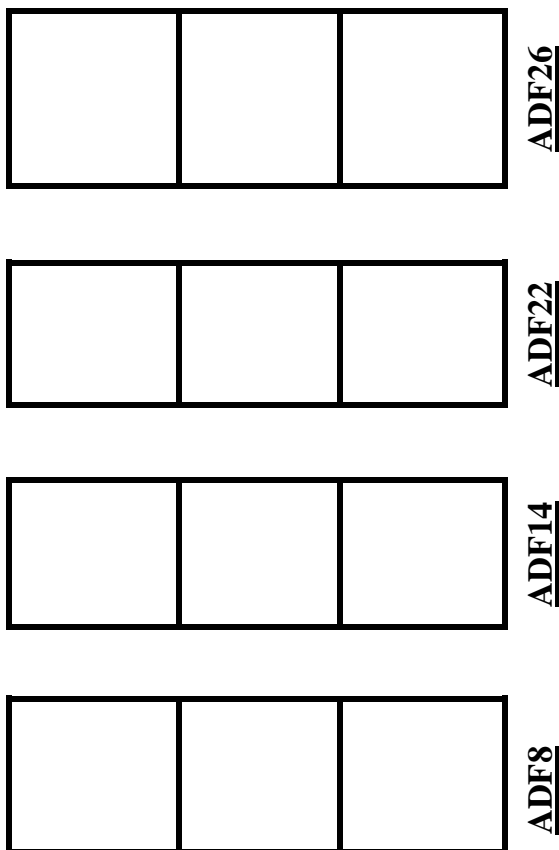
Photo 8. Abreuvoir en ciment



Photo 9. Mangeoire en ciment



Blocs de cages individuelles à 5 niveaux (vue de face)



Cages collectives (vue de dessus)

Figure 13. Disposition des cages dans le bâtiment d'élevage

1.1.2. Aliments expérimentaux

Quatre aliments composés complets expérimentaux granulés, contenant différents niveaux de fibres, ont été formulés pour des teneurs en ADF (acid detergent fibre) croissantes comprenant une large gamme d'apport de fibres, encadrant les teneurs en fibres préconisées chez le lapin en période post-sevrage (Gidenne, 2003 ; Gidenne et Garcia, 2006). Ainsi, ces aliments ont été désignés par les termes ADF8, ADF14, ADF22 et ADF26 en référence à leurs teneurs en ADF respectivement proches de 8, 14, 22 et 26 % d'ADF (% de la MS).

La principale source de fibres alimentaires utilisée pour la formulation des aliments complets granulés était la graminée fourragère *Pennisetum purpureum* aussi appelée herbe à éléphant (Photo 10). *Pennisetum purpureum* a été choisi pour cette étude parmi plusieurs autres plantes fourragères parce qu'elle est très appréciée par l'aulacode. En outre, c'est une plante abondante dans la nature et c'est le fourrage le plus utilisé dans les élevages d'aulacode en Côte-d'Ivoire. Pour cette étude, ce fourrage a été récolté (tiges et feuilles) dans la nature, aux alentours de la station de recherche de l'ESA. Les plantes récoltées avaient en moyenne entre 2 et 3 mois d'âge et étaient au stade montaison. Après la récolte, elles ont été découpées, séchées au soleil et broyées (photo 11).

Après broyage, ce produit a été mélangé à d'autres ingrédients dont le maïs, le son de blé, le tourteau de coton, le tourteau de soja et des sources de vitamines et minéraux selon les proportions indiquées au tableau 8. Le maïs a été retenu comme céréale pour sa disponibilité et son coût relativement bas par rapport aux autres céréales. C'est le principal complément concentré distribué dans les élevages d'aulacodes en Côte-d'Ivoire.



Photo 10. Récolte de *Pennisetum*



Photo 11. *Pennisetum* séché et broyé

Après broyage et mélange des ingrédients, les aliments obtenus ont été granulés. La granulation des rations a été retenue dans le cadre de cette étude pour éviter le tri des particules alimentaires par les animaux. L'aulacode a en effet un comportement alimentaire qui le conduit à trier entre les particules alimentaires lorsque les aliments sont distribués en l'état, sans broyage, mélange et granulation. La granulation permet de maîtriser les proportions des différents constituants alimentaires ingérés par l'animal ce qui permet de déterminer la digestibilité de chaque constituant alimentaire avec plus de précision que lorsque les aliments sont distribués en l'état. Les aliments ont été fabriqués dans la station de recherche du CRO (Centre de Recherche Océanologique) à Abidjan en Côte-d'Ivoire en un seul lot pour chaque régime, et stockés dans des sacs dans le bâtiment d'élevage.

Chaque régime alimentaire a été attribué à un lot d'animaux de façon aléatoire. Les animaux ont été nourris avec ces aliments expérimentaux du sevrage jusqu'à 114 jours d'âge. Après la phase de transition d'une semaine, la ration journalière distribuée était de 200 g d'aliment granulé par animal ce qui représente plus de 300 % de l'ingestion journalière de l'aulacode adulte exprimée en g/kg de poids vif d'après les résultats de Van Zyl et *al.* (1999). La distribution d'aliment s'est effectuée en une seule fois par jour entre 7 h et 8 h le matin. L'eau était servie dans des abreuvoirs le matin pendant la distribution de l'aliment et renouvelée une fois dans la journée. L'eau était ainsi disponible à volonté.

Durant cette expérimentation, les animaux n'ont reçu aucune médication.

1.1.3. Contrôle de la croissance

La croissance pondérale a été suivie par la pesée des animaux, une fois par semaine, du sevrage jusqu'à la fin de l'expérience (114 jours d'âge). En raison de l'agitation des animaux, leur pesée a nécessité l'utilisation d'une cage de contention pour les maintenir tranquilles sur la balance (photo 12).

Tableau 8. Ingrédients et composition chimique des aliments expérimentaux, protocole 1.

	Aliments expérimentaux			
	ADF 8	ADF 14	ADF 22	ADF 26
Ingrédients (%)				
Pennisetum ¹	7,5	16,2	28,3	34,1
Son de blé	6,6	14,3	24,5	29,6
Tourteau de coton	4,6	10,2	17,5	21,4
Mais grain	63,9	47	24,2	12,6
Tourteau de soja	15,0	10,0	3,2	0,0
Farine de coquilles d'huîtres	0,9	0,8	0,8	0,8
Sel	0,5	0,5	0,5	0,5
Prémix lapin ²	1,0	1,0	1,0	1,0
Composition chimique (% du produit brut)				
Matière sèche	91,3	91,5	91,8	92,5
Protéines brutes	14,8	13,9	14,5	15,4
Cendres brutes	5,1	8,0	7,9	7,6
NDF	18,4	27,3	39,8	45,2
ADF	6,9	12,4	20,5	24,1
ADL	1,6	2,5	4,4	4,9
Hémicelluloses (NDF-ADF)	11,5	14,9	19,4	21,1
Cellulose (ADF-ADL)	5,3	9,9	16,1	19,2
Cendres brutes	5,0	8,0	7,9	7,6

¹: Tiges et feuilles de *Pennisetum purpureum* séchées au soleil et broyées.

²: Vitamines et minéraux: A : 1,000,000 UI/kg ; D₃ : 100,000 UI/kg ; E : 3,000 mg/kg ; K₃ : 200 mg/kg, B₁ : 200 mg/kg ; B₂ : 500 mg/kg ; B₅ : 1000 mg/kg ; B₆ : 200 mg/kg ; B₁₂ : 1,14 mg/kg ; PP : 2500 mg/kg ; Chlorure de Choline : 12000 mg/kg, Biotine : 5 mg/kg, Acide Folique : 200 mg/kg, Calcium : 187 g/kg, NaCl (Sel) : 400 g/kg, Sodium (Na) : 154 g/kg, Magnésium (Mg) : 21198 mg/kg, Cuivre (Cu) : 1051 mg/kg, Fer (Fe) : 9515 mg/kg, Zinc (Zn) : 8020 mg/kg, Manganèse (Mn) : 3144 mg/kg, Iode (I) : 30 mg/kg, Sélénium : 9 mg/kg, Cobalt (Co) : 13 mg/kg ; (Support : carbonate de calcium).



Photo 12. Pesée des animaux à l'aide d'une cage de contention

1.1.4. Suivi de la santé

Pour l'aspect sanitaire, un contrôle de mortalité quotidien des animaux a été effectué tout au long de l'expérimentation. Lors de ce contrôle, les animaux dont la mort était récente ont été autopsiés pour décrire les symptômes et lésions au niveau du tube digestif. En fonction des lésions observées, des prélèvements ont été effectués pour des analyses au laboratoire.

Un contrôle de morbidité a été également effectué à l'occasion de chaque pesée des animaux, soit une fois par semaine. Ce contrôle a consisté en un examen global de l'animal (vif ou prostré), suivi par la recherche de signes cliniques caractéristiques de troubles digestifs. Parce que les signes cliniques comme la diarrhée, la constipation ou la présence de mucus dans les fèces ont été difficilement identifiables dans cette étude, et aussi parce que les animaux étaient en phase de croissance, nous avons considéré comme malades les sujets qui présentaient un trouble de la croissance ponctuel, matérialisé par une croissance nulle ou une perte de poids entre deux pesées consécutives. Ce critère est d'ailleurs utilisé chez le lapin en croissance en complément aux critères classiques de morbidité (Gidenne, 2010).

1.1.5. Mesure de l'ingestion et de la digestibilité

La digestibilité a été mesurée à l'aide de 40 cages individuelles. Chaque cage était équipée d'un dispositif de collecte de fèces composé d'un tiroir et d'une grille de maille 1 mm (photo 13). La grille, séparée du fond du tiroir d'environ 3 cm servait à retenir les crottes tout en laissant passer l'urine. L'urine était ensuite absorbée par le tiroir en bois.



Photo 13. Tiroir et grille de collecte de fèces

La digestibilité a été déterminée en suivant les lignes directrices de la méthode de référence européenne de mesure de digestibilité *in vivo* établie pour le lapin (Perez et al., 1995). Selon cette méthode, la mesure de la digestibilité chez le lapin nécessite au moins 8 lapins par régime et la période de collecte de fèces, qui dure 4 jours minimum doit être précédée d'une période d'adaptation d'au moins 7 jours.

Dans cette expérimentation, 10 aulacodes ont été sélectionnés au hasard par lot pour la mesure de la digestibilité pendant trois périodes successives : de 47 à 62 jours, 72 à 87 jours et 97 à 112 jours d'âge. Chacune des périodes de mesure était constituée d'une phase d'adaptation de 10 jours suivie d'une phase de mesure de 5 jours. Les animaux sélectionnés à la première période ont été reconduits pour les deux autres périodes de mesure. Pendant ces mesures, les animaux sélectionnés étaient logés dans les cages individuelles et retournaient en cages collectives à la fin de chaque période (Figure 14).

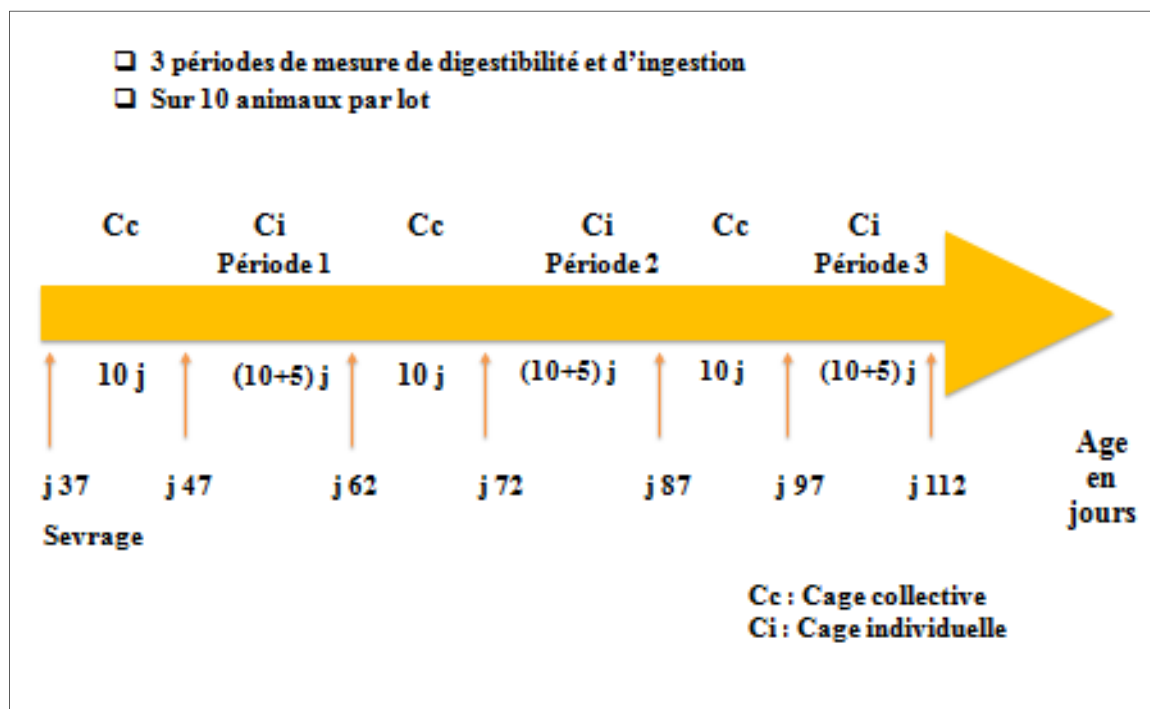


Figure 14. Schéma récapitulant l'alternance entre cages collectives et cages individuelles pour les animaux sélectionnés pour la mesure de la digestibilité dans l'expérimentation 1. Les âges mentionnés sont des âges moyens.

Durant les phases de mesure de 5 jours, le point essentiel était de déterminer avec précision les quantités de MS ingérée et fécale, pour chaque animal, en état stable du point de vue ingestion et excrétion. Pour s'assurer de cette stabilité, l'ingestion moyenne a été déterminée sur chaque animal en deux périodes pendant les 10 jours d'adaptation : entre le jour d'entrée en cage individuelle et le 5^{ème} jour, puis entre le 6^{ème} jour et le 10^{ème} jour. Ces deux déterminations d'ingestion moyenne permettaient d'apprécier la variation du niveau d'ingestion ce qui permettait d'avoir une idée sur l'état sanitaire des animaux avant la phase de mesure. Après cette phase d'adaptation, les fèces étaient collectées, en totalité pour chaque aulacode et, chaque jour durant cinq jours consécutifs, congelées à -20°C et accumulées pour chaque aulacode dans un même sachet plastique, conservé à -20°C jusqu'à analyse.

Parallèlement, les quantités d'aliment distribuées et les refus ont été pesés chaque jour. Pour le calcul des quantités d'aliment effectivement consommées par les animaux, il a été tenu compte du gaspillage d'aliment, l'aliment gaspillé étant présent sur la grille de collecte des fèces placée en dessous des cages. Les mangeoires utilisées au cours de cette expérimentation ont occasionné un gaspillage important d'aliment sur les grilles si bien que la pesée

quotidienne de la quantité d'aliment gaspillée n'a été possible qu'après le tri de toutes les crottes (photo 14).



Photo 14. Séance de collecte de fèces et de pesée de l'aliment gaspillé

L'aliment gaspillé a été régulièrement mouillé par l'eau de boisson et les urines de sorte qu'il a été nécessaire de faire sécher l'aliment gaspillé à l'étuve pour pouvoir déterminer la quantité de MS gaspillée. En raison de la quantité énorme de travail et du nombre de personnes insuffisant, nous avons opté pour la détermination du taux de MS moyen du gaspillage de chaque aulacode sur 5 jours au cours de la première période de mesure. Pour cela, nous avons pour chaque aulacode collecté tous les jours tout l'aliment gaspillé, cumulé sur 5 jours et déterminé le taux de MS sur ce cumul. Ces taux de MS ont été ensuite utilisés pour les différents calculs sur toute la période de l'étude.

Les pesées de l'aliment distribué, des refus et des aliments gaspillés pendant les périodes de mesure de digestibilité ont permis de déterminer l'ingestion sur ces 3 périodes de 15 jours chacune. L'indice de consommation (IC) a été également calculé sur ces périodes à partir de ces valeurs.

Pour les différents calculs de digestibilité et d'ingestion, le taux de MS a été déterminé sur les aliments et les fèces. Pour les aliments, nous avons prélevé un échantillon de chaque aliment granulé pour en déterminer la teneur en MS, sur le produit granulé tel quel, sans broyage, à partir d'un échantillon en triple d'au moins 50 g (soit 3 déterminations sur 50 g de granulé pour chaque aliment, 24 h à 103°C). Pour les fèces, la totalité des crottes de chaque aulacode conservées à -20°C a été séchée pendant 24 h à 80°C puis pesée. La moitié a été ensuite séchée complètement à 103°C pendant 24 h, et pesée (puis jetée). Ensuite, l'autre moitié (séchée seulement à 80°C et partiellement) a été conservée après broyage, dans des flacons étanches, pour des analyses chimiques ultérieures. La quantité de MS des fèces est donnée par la formule : $QMS = (P1-T) \times ((P3-T) / (P2-T))$

T = poids vide du plateau de pesée,

P1 = poids du plateau + poids total des fèces séchés à 80°C,

P2 = poids du plateau + poids de la moitié des fèces séchés à 80°C,

P3 = poids du plateau + poids de la moitié des fèces séchés à 103°C.

De plus, un échantillon de chaque aliment expérimental a été prélevé au début de chacune des trois périodes de mesures, en vue de déterminer sa composition chimique. Ces échantillons (100 à 200 g) ont été broyés (grille de 1 mm), puis stockés tels quel sans séchage, en flacon étanche. L'analyse chimique de ces échantillons a servi pour les calculs de digestibilité.

En raison de probables imprécisions sur la détermination du gaspillage, les valeurs d'ingestion donc de digestibilité obtenues dans cette expérimentation semblent avoir été surestimées. Toutefois, elles ont été présentées pour étudier l'effet fibres par comparaison entre les régimes.

1.2. Protocole 2 : étude de la physiologie digestive et des performances de l'aulacode en croissance suite à une baisse simultanée des niveaux de fibres et de protéines brutes dans la ration

Ce deuxième protocole a été réalisé en 2010-2011 sur le même site que le protocole 1. L'objectif principal était d'approfondir les connaissances sur la physiologie digestive de l'aulacode à travers l'analyse du microbiote caecal et de l'activité microbienne caecale et de comprendre le fonctionnement digestif de cet animal suite à une réduction du niveau de fibres et de protéines brutes dans le régime alimentaire. Cette étude avait aussi un objectif plus finalisé : préciser le niveau maximum d'incorporation de céréales dans un aliment que l'aulacode en croissance peut tolérer, sans compromettre les performances ou la santé des animaux, du fait de la réduction conjointe de la concentration en protéines brutes et du taux de fibres.

1.2.1. Lots d'animaux

Cette expérience a utilisé 60 aulacodeaux mâles et femelles sevrés à 40 ± 7 jours (moyenne \pm écart-type). Ils ont intégré l'expérimentation après le sevrage entre 32 à 46 jours d'âge. Les différentes mesures ont été effectuées à intervalle fixe par rapport à l'entrée en expérimentation et non à âge fixe, mais pour simplifier la présentation, nous ne mentionnerons par la suite que l'âge moyen des animaux lors de ces mesures. Six animaux ont été immédiatement euthanasiés au sevrage pour des prélèvements digestifs. Les 54 restants ont été identifiés par des boucles numérotées à l'oreille et partagés en 3 lots homogènes de 18 individus chacun. Les animaux d'une même portée ont été mis dans des lots différents pour contrôler l'effet portée. Les lots ont été constitués en tenant compte du poids et du sexe comme indiqué en annexe 2. Les poids moyens des animaux des trois lots ainsi constitués étaient : 443 ± 152 , 445 ± 167 et 439 ± 120 . Ces poids moyens n'étaient pas statistiquement différents ($P = 0,993$).

Les animaux ont ensuite été logés dans les cages collectives décrites dans l'expérimentation 1, par groupes de 6 pendant une période d'adaptation de 15 jours. Après cette période d'adaptation, 12 animaux ont été sélectionnés au hasard par lot pour des mesures de digestibilité et d'ingestion en cages individuelles. Les animaux restants ont été euthanasiés à un âge de 82 jours pour l'étude du système digestif. A la fin de la période de mesure de la

digestibilité, c'est-à-dire à 103 jours, 6 des animaux ayant servi aux mesures de digestibilité ont aussi été euthanasiés dans chaque lot pour des prélèvements digestifs. Les animaux n'ont reçu aucune médication pendant l'étude.

1.2.2. Régimes alimentaires

Trois aliments expérimentaux granulés ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Un premier aliment, avec des teneurs en ADF et protéines brutes (respectivement 18 et 14,1 % de la MS) proches des teneurs usuelles d'aliments complets destinés au lapin en croissance (Gidenne, 1996), a été considéré dans cette expérimentation comme ayant un niveau haut en fibres et protéines brutes. Il sera désigné par l'abréviation (NH) dans la suite de l'étude. Deux autres régimes avec des niveaux en ADF et protéines brutes moyens (14 et 12,1 % de la MS) et bas (9 et 10,8 % de la MS) ont été désignés par les abréviations NM et NB respectivement. A titre indicatif, il convient de signaler que les rations alimentaires distribuées aux aulacodes dans les élevages en Côte-d'Ivoire contiennent en moyenne entre 8 et 12 % de protéines brutes (Van Zyl et al., 1999 ; Soro, 2010). Les matières premières qui ont servi à la fabrication de ces aliments granulés ainsi que les compositions chimiques correspondantes sont présentées dans le tableau 9.

Avant le sevrage, les aulacodeaux étaient logés avec leurs mères et avaient accès à la nourriture solide de celles-ci. Elle était constituée de fourrage vert de *Panicum maximum* et de maïs grain non broyé. Dès le sevrage, les animaux ont été nourris ad libitum avec les aliments expérimentaux jusqu'à 3,5 mois d'âge. Ils recevaient en moyenne 200 g d'aliment par animal et par jour. Chaque régime alimentaire a été attribué à un lot d'animaux de façon aléatoire. La distribution d'aliment s'est effectuée en une seule fois par jour entre 7 h et 8 h du matin. L'eau était servie dans des abreuvoirs le matin pendant la distribution de l'aliment et renouvelée une fois dans la journée. L'eau était ainsi disponible à volonté.

Tableau 9. Ingrédients et composition chimique des régimes expérimentaux, protocole 2

	Aliments expérimentaux		
	NB	NM	NH
Ingrédients (%)			
Pennisetum	11	18,9	26,5
Son de blé	8,7	14,7	20,7
Tourteau de coton	4,9	8,4	11,8
Maïs grain	70,4	54,0	39,0
Tourteau de soja	3,0	2,0	0,0
Farine de coquillages d'huîtres	1,0	1,0	1,0
Sel	0,5	0,5	0,5
Prémix lapin ¹	0,5	0,5	0,5
Composition chimique (% du produit brut)			
Matière sèche	91,1	90,7	91,6
Protéines brutes	9,8	11,0	12,9
Energie brute (kcal/kg de produit brut)	3957	3977	3943
Cendres brutes	5,2	5,7	8,4
NDF	19,9	27,1	33,4
ADF	8,4	12,7	16,8
ADL	1,2	1,9	2,8
Hémicellulose	11,6	14,5	16,7
Cellulose	7,1	10,7	14,0
Amidon	40,8	35,3	26,0

¹ : Vitamines : A : 2,000,000 UI/kg ; D₃ : 160,000 UI/kg ; E : 3,000 mg/kg ; B₁ : 100 mg/kg ; oligo-éléments: Cu²⁺: 2200 mg/kg ; I⁻ : 40 mg/kg ; Zn²⁺ : 9600 mg/kg ; Mn²⁺ : 400 mg/kg ; Co²⁺ : 40 mg/kg ; Se : 10 mg/kg; coccidiostatique: robénidine (E 758) : 13,200 mg/kg ; (support: carbonate de calcium)

1.2.3. Suivi des paramètres zootecniques et sanitaires

Pour le contrôle de la croissance et des paramètres sanitaires, les animaux ont été suivis du sevrage jusqu'à 96 jours d'âge. Ils ont été pesés une fois par semaine. Les critères d'étude des aspects santé ont été identiques à ceux du protocole 1.

1.2.4. Détermination de l'ingestion et de la digestibilité

Douze animaux par lot ont été sélectionnés au hasard pour l'étude de l'ingestion et de la digestibilité. Les animaux sélectionnés ont intégré les cages individuelles de mesure après 15

jours de transition et d'adaptation aux régimes alimentaires en cages collectives. Pour limiter les risques d'imprécision rencontrés au cours du premier protocole dans la détermination de l'aliment gaspillé, quelques modifications ont été apportées au dispositif expérimental. D'abord, les mangeoires en ciment qui étaient placées à l'intérieur de la cage ont été remplacées par des mangeoires pour lapin accrochées à l'arrière des cages. Ces mangeoires ont l'avantage de limiter le gaspillage. Ces mangeoires sont présentées sur la photo 6 des cages collectives. En plus, les abreuvoirs ont été placés à l'opposé des mangeoires pour éviter que les aliments gaspillés soient humidifiés. Par ailleurs, le taux de MS a été déterminé systématiquement sur tous les aliments gaspillés collectés.

Les fèces ont été collectées sur deux périodes de 4 jours chacune : de 65 à 69 jours et de 89 à 93 jours d'âge. Chaque période de collecte a été précédée de 10 jours d'adaptation pendant lesquels l'ingestion moyenne a été déterminée deux fois, du premier jour d'entrée en cage individuelle au 5^{ème} jour, puis du 6^{ème} au 10^{ème} jour. Pendant les périodes de collecte de fèces, l'ingestion a été déterminée chaque jour. Pour cela, les quantités d'aliment distribuées ont été pesées quotidiennement. Les refus et les gaspillages cumulés ont été déterminés le 5^{ème} et le 10^{ème} jour d'entrée en cage individuelle, puis tous les jours pendant les périodes de collecte de fèces.

Les animaux sélectionnés au cours de la première période pour les mesures d'ingestion et de digestibilité ont été reconduits pour la deuxième période de mesure. Dès leur sélection, ces animaux ont séjourné dans les cages individuelles jusqu'à la fin de l'étude.

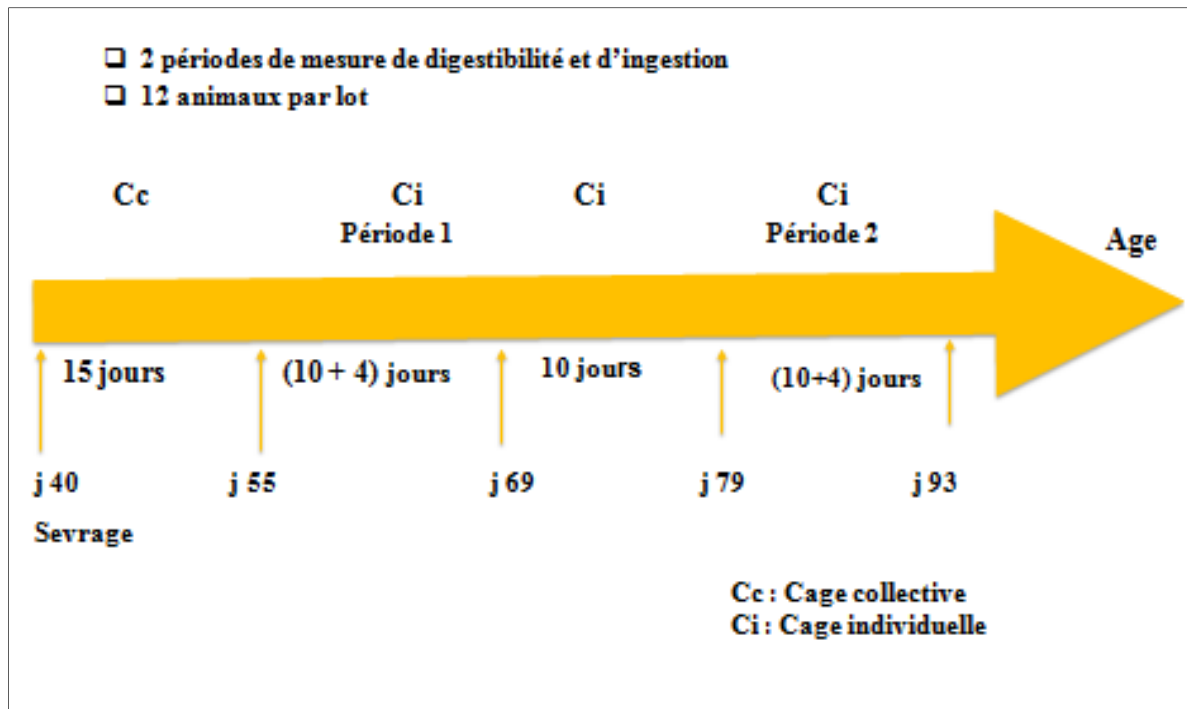


Figure 15. Schéma récapitulatif des périodes de mesure de digestibilité dans l'expérimentation 2. Les âges mentionnés sont des âges moyens.

1.2.5. Etude des paramètres du système digestif

Des paramètres physiques, chimiques et microbiologiques du tube digestif ont été étudiés à trois âges différents. Au sevrage (40 jours) 6 animaux par lot ont été choisis au hasard pour les prélèvements. Puis, à 82 jours d'âge les 6 animaux par lot restés en cages collectives ont été prélevés. Enfin, au terme de l'expérimentation, 6 animaux par lot ont été choisis au hasard parmi ceux qui avaient servi à l'étude de la digestibilité puis prélevés à 103 jours d'âge. Les animaux ont été pesés puis euthanasiés le matin entre 9 h et 12 h par saignée précédée d'un coup sec sur le crâne en conformité avec les lignes directives de l'Association Américaine de Médecine Vétérinaire (AVMA, 2007) sur l'euthanasie des animaux de laboratoire.

Après avoir sacrifié l'animal, l'ensemble du tube digestif a été prélevé et pesé plein. Ensuite, chaque compartiment (estomac, intestin grêle, caecum, côlon proximal et côlon distal) a été sectionné après avoir été ligaturé aux deux extrémités, puis pesé plein. Pour l'ensemble des compartiments digestifs, le pH a été mesuré par l'insertion d'une électrode (pH-meter CG 805, Schott Gerate, Allemagne) dans le digesta à travers une petite incision. Enfin, chaque

organe a été vidé, le contenu pesé et des échantillons d'environ 10 g du contenu ont été prélevés pour la mesure du taux de MS. Pour le caecum, des échantillons ont été prélevés pour l'étude des activités fermentaires (concentrations en acides gras volatils (AGV) et NH₃-N) et des communautés bactériennes présentes.

Pour le dosage des AGV, 1 g du contenu caecal (environ mais pesé avec une précision de 0,01 g) a été prélevé et mis dans des tubes polypropylène de 10 ml contenant 2 ml d'une solution d'acide sulfurique à 2 % (conservateur). En vue du dosage de l'azote ammoniacal, 1 g de contenu caecal (environ mais pesé avec une précision de 0,01 g) a été prélevé et mis dans des tubes polypropylène de 10 ml contenant 3 ml d'une solution d'acide sulfurique à 2 % (conservateur). Ces échantillons ont été ensuite conservés au congélateur à - 20°C.

Pour l'étude du microbiote, le contenu caecal a été prélevé dans des tubes polypropylène 10 ml (échantillon + 2 volumes d'éthanol à 90°) et conservé au réfrigérateur à 4°C.

2. Méthodes d'analyses chimiques et microbiologiques

2.1 Analyses chimiques

2.1.1. Matière sèche

Le taux de MS (24 h à 103 ° C) a été déterminé sur les aliments, les refus, l'aliment gaspillé, les fèces et les contenus digestifs.

2.1.2. Dosage des fibres

Les résidus fibreux NDF (neutral detergent fibre), ADF (acid detergent fibre) et ADL (acid detergent lignin) ont été dosés sur les aliments et les fèces selon la méthode séquentielle de Van Soest et al. (1991), avec un pré-traitement à l'alpha amylase pour les échantillons d'aliment.

2.1.3. Dosage des protéines brutes

La teneur en azote a été déterminée pour les aliments et les fèces selon la méthode de combustion Dumas à l'aide d'un auto-analyseur Leco (modèle FP-428, Leco Coporation, St Joseph, MI, USA) et convertie en protéines brutes ($PB = N \times 6,25$).

2.1.4. Mesure de l'énergie brute

L'énergie brute (kcal/kg de MS) a été déterminée pour les aliments et les fèces à l'aide d'un calorimètre adiabatique (PARR 1281, Illinois, USA). Le principe est basé sur la détermination de la quantité de chaleur dégagée par un échantillon lors d'une combustion complète.

2.1.5. Dosage de l'amidon

L'amidon a été dosé sur les aliments et les fèces uniquement au cours de l'expérimentation 2, par une méthode enzymatique (UV-method Kit D-Glucose BOEHRINGER MANNHEIM/R-BIOPHARM). Cette méthode est basée sur le dosage du D-glucose contenu dans les denrées alimentaires, les fèces et digesta. Selon cette méthode, le D-glucose est phosphorylé en D-glucose-6-phosphate (G-6-P) en présence de l'enzyme hexokinase et de l'adénosine-5'-triphosphate. En présence de l'enzyme glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6P-DH), le G-6-P est oxydé en D-gluconate-6 phosphate par le nicotinamide-adenine dinucléotide phosphate (NADP) avec la formation du nicotinamide-adenine dinucléotide phosphate réduit (NADPH). La quantité de NADPH formé dans cette réaction est stœchiométrique à la quantité de D-glucose. L'augmentation de la concentration en NADPH est mesurée à travers son absorption de la lumière à 334, 340 ou 365 nm.

Cette méthode comporte en réalité 3 phases: la dispersion de l'amidon, l'hydrolyse et le dosage du glucose. La dispersion de l'amidon est obtenue par attaque de l'échantillon par une solution alcaline (120 mg d'échantillon + 5 ml d'eau distillée + 15 ml de KOH 4M). La solution hydrolysée à partir de laquelle le glucose sera dosé est obtenue après attaque de 0,5 ml de surnageant de la solution dispersée par 5 ml d'une solution (acide acétique 0,5 M + CaCl_2 1 M). Le glucose est enfin dosé selon le principe ci-dessus décrit à l'aide d'un colorimètre en lisant les densités optiques avant et après ajout de 10 μl d'un mélange

d'hexokinase et de glucose phosphate déshydrogénase à la solution composée de 0,5 ml de la solution d'hydrolysée plus 0,5 ml (d'un tampon + NADP/ATP), plus 0,5 ml d'eau distillée.

2.1.6. Dosage des acides gras volatils

Les concentrations en AGV caeaux ont été déterminées au cours de l'expérimentation 2 par chromatographie en phase gazeuse (HP7890, Network GC System, Etats-Unis, équipé d'un auto-injecteur 7683B, Network GC System, États-Unis, et d'une colonne capillaire en silice, CPSil88, 100 m x 0,25 mm, épaisseur de film 0,20µm, Chrompack-Varian, Pays-Bas) selon une méthode de dosage par étalon interne. Après décongélation, les échantillons stockés ont été centrifugés à 4000 tr/min à 4°C pendant 20 min. Un ml du surnageant a été mélangé avec 0,2 ml de HPO3 (25 % p/v). Ce mélange a été centrifugé à 14770 tr/min à 4° C pendant 15 min, et 100 µl du surnageant a été transféré dans un flacon en verre avec 75 µl d'un étalon interne (4-méthyl valérique à 2 % p/v) et 900 µl de l'eau. Un µl de ce mélange a été injecté dans le chromatographe en phase gazeuse. Les concentrations en AGV ont été exprimées en mmol/L de la phase liquide du contenu caecal.

2.1.7. Dosage de l'azote ammoniacal

La concentration en azote ammoniacal (NH₃-N) a été mesurée sur les contenus caeaux de l'expérimentation 2 suivant la procédure de Verdouw et al. (1977) en utilisant un auto-analyseur (Technicon, Domont, France). Après centrifugation de l'échantillon du contenu caecal, une étape de dialyse installée au début de la chaîne d'analyse permet la séparation du NH₃-N. Par la suite, le NH₃-N est mesuré dans le dialysat. Les concentrations en ammoniac ont été exprimées en mmol/L de la phase liquide du contenu caecal.

2.2. Analyses microbiologiques

Deux étapes de traitement des échantillons de contenus caeaux de l'expérimentation 2 ont été réalisées pour l'étude des communautés bactériennes du caecum : l'extraction de l'ADN total et le pyroséquençage 454 GS FLX.

2.2.1. Extraction des ADN totaux

Les ADN totaux ont été extraits à l'aide d'un kit QIAamp® DNA Stool Mini (Qiagen Ltd, Sussex de l'Ouest, Angleterre) à partir des échantillons du contenu caecal conservé dans l'éthanol à 90° au réfrigérateur. Le mode de conservation dans l'alcool a été préféré à la congélation pour prévenir les risques éventuels de coupure d'électricité et pour garantir une bonne conservation des échantillons lors de leur transport de Côte-d'Ivoire en France. Les ADN totaux ont été obtenus après une lyse mécanique des cellules par un choc mécanique (utilisation d'un Fastprep), thermique (incubation à 95°C) et chimique dans un tampon, suivi de l'élimination des impuretés (débris cellulaires et inhibiteurs) et la purification des ADN sur colonne de centrifugation. L'ADN ainsi extrait (repris dans 50 µl à partir d'environ 200 mg d'échantillon) était conservé à -20°C. Avant l'extraction, les échantillons ont été purifiés de l'alcool selon le mode de reconditionnement utilisé par l'INRA (Toulouse, France) ci-dessous décrit :

Reconditionnement des échantillons conservés dans l'alcool avant l'extraction :

- Vortexer le tube contenant l'échantillon conservé dans l'alcool,
- Prélever 1 ml d'échantillon,
- Centrifuger pendant 5 mn à 14000 g
- Eliminer le surnageant,
- Ajouter 1 ml de PBS stérile,
- Centrifuger pendant 5 mn à 14000 g
- Eliminer le surnageant,
- Ajouter 1 ml de PBS stérile,
- Centrifuger pendant 5 mn à 14000 g
- Eliminer le surnageant,
- Transvaser dans un tube vissant à billes de verre taré

2.2.2. Pyroséquençage 454 GS FLX

Le pyroséquençage 454 GS FLX est une technique de séquençage à très haut débit, pouvant séquencer environ 5 millions de bases par heure. Cette technique a été utilisée dans cette étude pour la caractérisation du microbiote caecal de l'aulacode.

La méthode commence par une amplification par PCR des régions hypervariables V3 et V4 de l'ADNr 16S. Cette PCR utilise deux amorces ciblant ces régions chez les bactéries, une amorce forward 5'-TACGGRAGGCAGCAG-3' (343F) (Liu et al., 2007) et une amorce reverse 5'-TACCAGGGTATCTAATCCT-3' (784R) (Andersson et al., 2008). L'amplicon produit qui contient les régions variables V3 et V4 sélectionnées fait 440 paires de bases, tenant compte de la taille maximum compatible avec le séquenceur (environ 450 paires de bases). Les PCR ont été réalisées dans une solution de volume total par tube égal à 50 µl, réalisé en double contenant les réactifs énumérés dans le tableau 10.

Tableau 10. Réactifs intervenant dans la réalisation de la PCR préalable au pyroséquençage 454

Réactifs	Volume par tube (µl)
tampon ISIS 10X	5
dNTP mix à 10mM	1
amorce 343F à 50µM	2,5
amorce 784R à 50µM	2,5
ISIS DNA polymérase (1U/µl)	0,5
H ₂ O ppi	37,5
ADN (dilué au 1/200)	1,0
Volume total	50

Le programme d'amplification consistait en une étape de dénaturation initiale à 94°C pendant 2 min; 32 cycles comprenant une étape de dénaturation à 94°C pendant 30 s, hybridation à 60°C pendant 30 s et élongation à 72°C pendant 30 s. Le programme d'amplification se concluait par une étape d'extension finale à 72°C pendant 7 min. Les produits de PCR obtenus ont été purifiés avec le kit de purification PCR QIAquick (Qiagen, France), suivi par la quantification du rendement de l'ADN et l'estimation de la qualité à l'aide d'un spectrophotomètre (NanoDrop ND-1000). La taille des produits de PCR a été confirmée par électrophorèse sur gel. Les produits de PCR purifiés ont été quantifiés en utilisant le kit Quant-iT dsDNA PicoGreen Assay (Invitrogen, France) sur un système de détection de séquence ABI Prism 7900HT (Applied Biosystems).

Les amplicons ont été séquencés par pyroséquençage à l'aide de l'appareil 454 GS FLX Titanium (454 Life Sciences - a Roche Company, Branford, CT, USA) à la plateforme

génomique «Genotoul » de l'INRA de Toulouse. Les séquences brutes issues du séquenceur ont subis trois étapes successives nécessaires à leur analyse : le nettoyage, l'alignement et l'affiliation taxonomique. L'étape de nettoyage des séquences consiste à supprimer toutes les séquences qui ont une base non identifiée, sont trop courtes (< 150 bases), ont des homopolymères (segment d'ADN composé d'une base répétée (ex: AAAAAA > 10) ou contiennent des amorces qui ont plus de 2 mésappariements. Après le nettoyage, l'alignement des séquences s'est fait sur la base de données SILVA (Pruesse et al., 2007) à l'aide du logiciel MOTHUR (V1.12; Schloss et al., 2009). Les séquences présentant une mauvaise qualité d'alignement ont été éliminées. Après l'alignement, deux approches ont été considérées :

- soit un regroupement en OTU (Unité taxonomique opérationnelle) après calcul de matrices de distance entre chaque paire de séquences, ce qui permet de calculer des indices de diversité,
- soit une affiliation taxonomique en utilisant l'algorithme défini par le Ribosomal Database Project (RDP classifier). Un bootstrap de 60 % à été retenu.

Pour notre étude, l'affiliation taxonomique des séquences a été réalisée à l'aide de la base SILVA.

3. Méthodes d'analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de la version 2.15.1 du logiciel R (R Development Core Team, 2012).

3.1. Courbes de croissance

L'allure des courbes de croissance a été testée suivant un modèle linéaire exprimant le poids (en grammes) des animaux en fonction de leur âge (en jours).

3.2. Gain moyen quotidien, ingestion, indice de consommation et digestibilité

Les valeurs de gain moyen quotidien (GMQ), d'ingestion, d'IC et la digestibilité ont été soumises à l'analyse de variance à deux facteurs avec le régime et la période de mesure comme facteurs de variation. L'effet de l'interaction entre les deux facteurs a été testé. Lorsqu'une différence significative était identifiée, les moyennes ont été comparées deux à

deux à l'aide du test de Tukey pour les facteurs à 3 modalités. En outre, une relation a été recherchée entre la digestibilité de la matière organique et les teneurs en ADF et NDF des aliments, par régression linéaire.

Au cours de l'expérimentation 1, l'expérience ayant été arrêté pour le lot ADF8 juste après la première période de mesure d'ingestion et de digestibilité pour cause de mortalité et morbidité élevées, le GMQ, l'ingestion et l'IC des animaux de ce lot ont été comparés par analyse de variance aux valeurs des trois autres lots sur cette première période de mesure uniquement.

3.3. Paramètres sanitaires

Les taux de mortalité et de morbidité ont été analysés suivant la méthode de Karl Pearson (test du χ^2).

3.4. Paramètres du tube digestif

Les paramètres du tube digestif (poids vide, poids du contenu, taux de MS et pH du contenu des compartiments digestifs, concentrations en AGV et NH₃-N au niveau du caecum, abondance relative des communautés bactériennes) obtenus au cours de l'expérimentation 2 ont été soumis à une analyse de variance à deux facteurs : le facteur régime (3 niveaux) et le facteur âge (2 niveaux : 82 et 103 jours). Les valeurs moyennes de ces mêmes paramètres au sevrage (40 jours d'âge) ont été comparées à celles des animaux de 82 et 103 jours d'âge à l'aide du test de Student. En effet, les sevrans ayant été abattus dès le début de l'expérimentation, il n'était pas possible de les affecter à un des trois régimes expérimentaux. Concernant l'analyse statistique de l'abondance relative des communautés bactériennes, les données ont été transformées au préalable par la fonction racine de racine pour obtenir l'homoscédasticité des résidus et la normalité de la distribution des résidus. Les analyses statistiques ont donc été faites sur les valeurs transformées, mais les moyennes présentées dans les tableaux ou les figures sont des moyennes non transformées.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Impact des fibres sur la croissance, l'efficacité digestive et la santé chez l'aulacode en croissance

Cette partie présente les résultats du premier protocole expérimental. Ces résultats concernent la santé, l'évolution dans le temps des performances de croissance, de l'ingestion, de l'IC et de la digestibilité des nutriments en fonction du taux de fibres dans l'aliment.

1.1. Fibres et santé digestive des animaux

1.1.1. Taux de mortalité et morbidité

La mortalité par trouble digestif n'a été observée que dans le lot ADF8, et a débuté quatre semaines après le début de l'expérimentation, avec un premier animal mort. Trois semaines plus tard, c'est-à-dire sept semaines après le début de l'expérimentation, le nombre de morts dans ce lot avait atteint 6 animaux sur 18 tandis qu'aucune mortalité n'avait été encore enregistrée dans les trois autres lots. Parallèlement, la morbidité avait commencé à être observée dès la troisième semaine avec deux animaux malades dans chacun des lots ADF8 et ADF14 contre un animal malade dans chacun des lots ADF22 et ADF26.

Après sept semaines d'expérimentation, le lot ADF8 affichait un taux de mortalité de 33,3 %, et les animaux encore vivants de ce lot étaient malades (baisse de l'ingestion, prostration, perte de poids). Par conséquent, l'expérimentation a été arrêtée pour ce lot à 86 jours d'âge moyen. En raison de l'état de santé de ces animaux pendant la deuxième période de mesure de digestibilité, ces résultats n'ont pas été pris en compte.

Pour les trois autres lots, aucune mortalité n'a été observée jusqu'à la fin de l'expérimentation (Tableau 11). Par contre, 8 animaux sur 18 étaient malades dans le lot ADF14 contre 3 et 4 pour les lots ADF22 et ADF26 respectivement. Cependant, l'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative entre ces trois lots ($P = 0,14$, Figure 16), mais une comparaison de la mortalité du lot ADF14 avec la moyenne des lots ADF22 et ADF26 a montré que la mortalité dans le lot ADF14 avait eu tendance à être plus élevée ($P = 0,053$), ce qui semble indiquer l'existence d'un seuil de teneur en ADF, compris entre 14 et 22% de la MS.

Tableau 11. Mortalité observée pour les 4 régimes expérimentaux

Régimes expérimentaux	Taux de mortalité
ADF8	33,3 (6/18)*
ADF14	0
ADF22	0
ADF26	0

* : mortalité dans le lot ADF8, après 7 semaines d'expérimentation

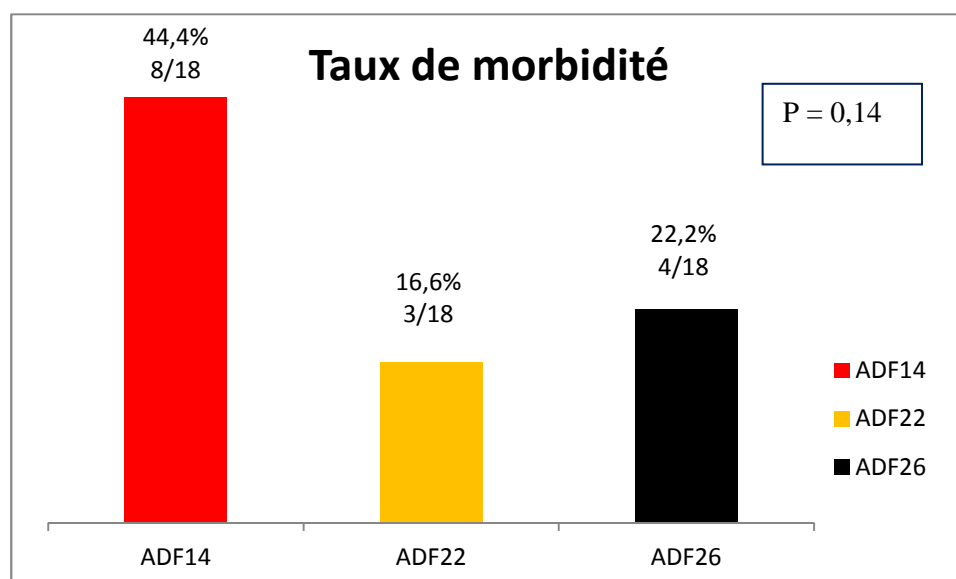


Figure 16. Taux de morbidité enregistré à la fin de l'expérimentation

L'effet des fibres sur la santé observé chez l'aulacode au cours de cette étude est cohérent avec ce qui a été observé chez le lapin puisque une diminution du taux d'ADF de 19 à 15 %² a entraîné une hausse du risque sanitaire (mortalité + morbidité) de 18 à 28 % (Gidenne et al., 1998). Bien qu'il soit difficile de conclure sur la base d'une seule expérimentation, cet effet semble plus marqué chez l'aulacode. En effet, alors que Perez et al. (1996) ont obtenu 12 % de mortalité avec un aliment contenant 9,3 % de cellulose (ADF-ADL, critère Van Soest) chez le lapin du sevrage (28 - 32 jours d'âge) à l'abattage (68-72 jours d'âge), notre aliment

² Comme indiqué dans l'introduction, sauf indication contraire, les teneurs en constituants des aliments seront exprimées en % des aliments bruts

ADF8 qui contenait 9,8 % de cellulose a engendré plus de 33 % de mortalité chez l'aulacode, du sevrage (37 jours d'âge) à 79 jours d'âge.

1.1.2. Diagnostic des causes de morbidité et de mortalité

Durant cette étude, aucun régime alimentaire n'a provoqué de diarrhée chez les animaux. Toutefois, l'examen visuel des crottes a révélé que les fèces des animaux nourris avec les régimes ADF22 et ADF26 présentaient un sillon central. En revanche, toutes les crottes des animaux du lot ADF8 et la majorité des fèces des animaux du lot ADF14 en étaient dépourvus (photo 15). Il est couramment admis dans la littérature (Fantodji et Soro, 2004 ; Menye et Nkolo, 2009) que les crottes normales de l'aulacode ressemblent à un grain de café avec un sillon central comme celui observé sur les fèces des aulacodes nourris avec régimes ADF22 et ADF26 dans cette expérimentation. Si elles sont pâteuses ou liquides, c'est que l'animal a la diarrhée. Dans tous les cas, la disparition du sillon central sur les crottes traduit un trouble digestif (Menye et Nkolo, 2009). En se fondant sur l'aspect visuel des crottes, on peut donc conclure que tous les animaux du lot ADF8 et la majorité de ceux du lot ADF14 ont eu des troubles digestifs.

Par ailleurs, des autopsies ont été réalisées sur les animaux morts du lot ADF8. Ces examens ont révélé une entérite hémorragique caractérisée par un estomac et un intestin grêle vides et enflammés (photo 15). Les segments postérieurs du tube digestif (côlon, caecum) ont présenté un aspect normal. Des analyses parasitologiques sur les contenus intestinaux (intestin grêle et caecum) n'ont pas révélé de parasites gastro-intestinaux y compris de coccidies. Des analyses bactériologiques ont permis un isolement massif d'*Escherichia coli* au niveau du foie, des poumons et de la rate, ainsi que de *Streptococcus* spp. au niveau du foie et des poumons. Il n'a pas été possible d'établir un lien de causalité avec la mort des animaux, sachant que ces bactéries peuvent correspondre à un développement opportuniste suite à la perturbation digestive. En comparaison, chez le lapin en croissance, la plupart des troubles digestifs en lien avec une déficience en fibres correspondent à une modification du milieu intestinal des segments postérieurs (caecum principalement, et côlon proximal; Gidenne et al., 2010) ; en revanche chez l'aulacode ce sont les segments antérieurs qui sont touchés.

En résumé, les morbidités constatées dans les lots ADF8 et ADF14 ont été causées par des troubles digestifs de type inflammatoires dans la partie proximale du tube digestif. Dans le lot

ADF8, ces troubles digestifs se sont accentués provoquant des entérites hémorragiques mortelles.

1.2. Fibres et paramètres zootechniques

Le GMQ, l'ingestion et l'IC ont été déterminés sur trois périodes de mesure : première période (47 à 62 jours d'âge), deuxième période (72 à 87 jours d'âge) et troisième période (97 à 112 jours d'âge). L'expérimentation ayant été stoppée pour le lot ADF8 pour cause de mortalité et morbidité élevées après la première période de mesure, nous avons comparé les paramètres des lots ADF14, ADF22 et ADF26 sur les trois périodes en fonction du régime et de l'âge, avec l'analyse d'une éventuelle interaction entre ces deux facteurs. Les performances du lot ADF8 ont été comparées à celles des autres lots sur la première période uniquement. L'ensemble de ces résultats est présenté dans le tableau 12. Les poids moyens de tous les lots ont été comparés au moment de l'arrêt de l'expérimentation pour le lot ADF8 puis, à la fin de l'expérimentation pour les trois lots ADF14, ADF22 et ADF26 (Tableau 13).



Photo 15. Aspect des crottes en fonction du taux de fibres dans l'aliment

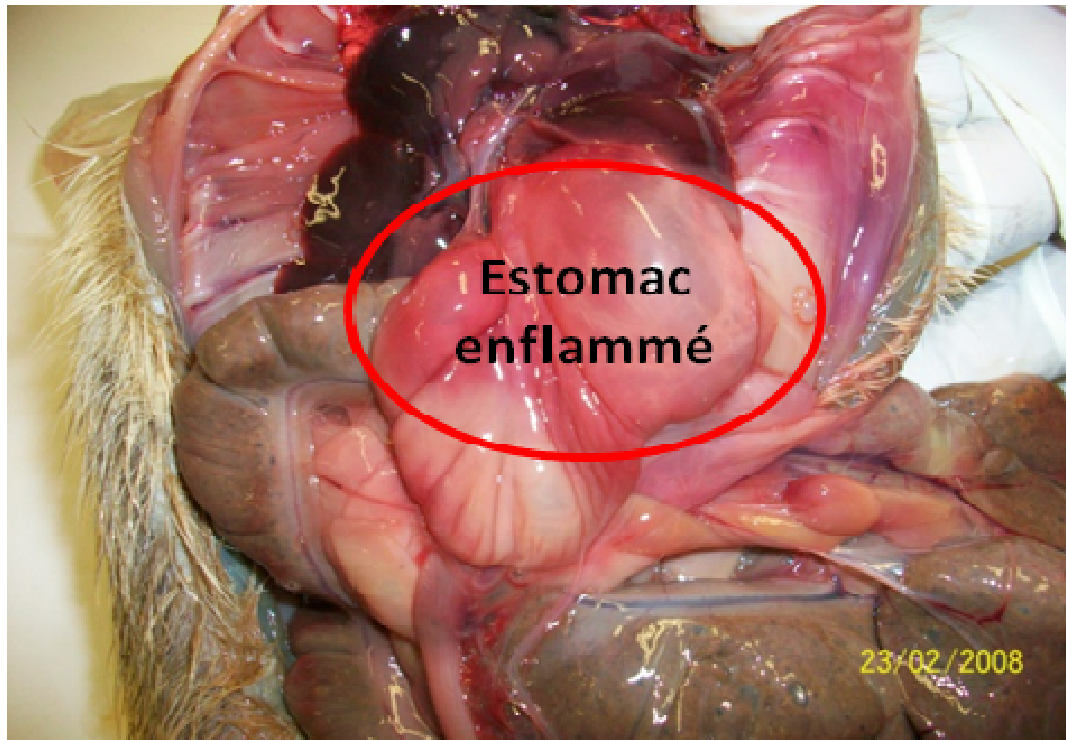


Photo 16. Tube digestif d'un animal du lot ADF8 mort puis autopsié

Résumé : Une faible concentration en fibres alimentaires (8 % d'ADF) a provoqué des entérites hémorragiques mortelles chez l'aulacode en croissance

1.2.1. Croissance des animaux

L'analyse statistique (Tableau 12) n'a pas permis de détecter une différence significative entre les GMQ des trois lots ADF14, ADF22 et ADF26 sur les trois périodes considérées ($P = 0,30$) et il n'y a pas eu d'interaction entre les deux facteurs régime et âge pour la vitesse de croissance. La comparaison des poids vifs (Tableau 13) montre qu'au début de l'expérimentation les poids vifs moyens des animaux des quatre lots étaient identiques ($P = 0,99$).

Au moment de l'arrêt de l'expérimentation pour le lot ADF8 (86 jours d'âge), le poids vif moyen des animaux de ce lot avait atteint 721 g. Il était plus faible que ceux des trois autres lots et il n'y avait pas de différence significative entre ces derniers. A la fin de l'expérimentation (114 jours d'âge), les poids vifs moyens des animaux des lots ADF14 et ADF22 n'étaient pas significativement différents et avaient atteint 1404 et 1325 g respectivement. Le poids vif moyen permis par le régime ADF26 à la fin de l'expérimentation (1251 g) était plus faible que celui du lot ADF14, mais n'était pas significativement différent de celui du régime ADF22 (Tableau 13). Le fait que les poids les plus élevés aient été observés avec le régime ADF14 laisse supposer que les animaux ont toléré les niveaux de fibres contenus dans ces régimes, malgré la présence de troubles digestif chez les animaux du lot ADF14.

L'analyse des résultats de croissance des animaux a ainsi montré qu'un très faible apport en fibres (groupe ADF8) a influencé négativement l'évolution pondérale, en lien avec une détérioration de l'état sanitaire. A l'inverse, les apports plus élevés de fibres (groupes ADF14 ou ADF22 ou ADF26) n'ont pas conduit à des différences de vitesse de croissance.

Toutefois, l'analyse des poids vifs a révélé que le régime ADF26 a conduit à un poids final plus faible (-10 %) que celui obtenu avec le régime ADF14, probablement en raison d'une moindre ingestion d'énergie digestible (en relation avec le taux élevé fibres) pour le lot ADF26, probable quoique la teneur en énergie des régimes n'ait pas été déterminée dans cette expérimentation. En effet, certains monogastriques herbivores comme le lapin augmentent leur niveau d'ingestion lors d'une hausse du niveau de fibres dans l'aliment pour compenser la plus faible concentration en nutriments digestibles de la ration (Gidenne et Lebas, 2010 ; Meyer, 2010). Ainsi, la croissance reste inchangée tant que l'animal peut adapter son ingéré d'énergie digestible, c'est-à-dire accroître sa consommation d'aliment. En revanche, si l'animal ne peut plus accroître son ingestion d'aliment (ce qui est le cas au delà d'environ 20 à 23 % de fibres pour le lapin ; Gidenne et Lebas, 2010), alors l'ingéré d'énergie digestible baisse, et en

conséquence la croissance est ralentie. En étudiant, l'effet de quatre niveaux de fibres (15 à 21 % d'ADF) sur la croissance du lapin, Maître et Lebas (1990) ont observé que la vitesse de croissance était plus faible avec le régime le plus riche en ADF (21 %) et meilleure avec le régime à 15 % d'ADF. Chez le cobaye, Sakaguchi et al. (1997) a observé en étudiant trois niveaux de fibres dans l'aliment (10, 16 et 22 % d'ADF) que la croissance pondérale était meilleure avec 16 %, moyenne avec 22 % et mauvaise avec 10 % d'ADF.

Les analyses statistiques du tableau 12 ont aussi révélé que le GMQ a augmenté avec l'âge des animaux. Le GMQ a ainsi augmenté de 12 à 17 g/j de la première (47-63 j) à la troisième période de mesure (97-112 j). Ce résultat confirme celui de Yewadan et Schrage (1992) qui ont montré avec des rations à base de fourrage que le GMQ de l'aulacode augmentait depuis la naissance pour atteindre son maximum aux alentours de 6 à 8 mois d'âge.

Les vitesses de croissance enregistrées au cours de notre étude sont plutôt supérieures à celles publiées auparavant. Ainsi, avec des régimes à base de fourrages, Yewadan et Schrage (1992) ont enregistré un GMQ d'environ 8 g/j avec des animaux de 4 mois d'âge. Karikari et Nyameasem (2009) ont enregistré avec des animaux de poids moyen 1174 ± 8 g, des GMQ de 7 et 13 g/j avec des aliments granulés complets contenant 23 et 16 % d'ADF, respectivement. Comparée aux performances de croissance du lapin domestique (sélectionné) qui atteint plus de 40 g/j en phase de croissance en cuniculture rationnelle d'Europe occidentale (Gidenne et al., 2000 ; Gidenne et al., 2009 ; Gidenne et al., 2012), la vitesse de croissance de l'aulacode est relativement modeste.

L'allure des courbes de croissance est présentée sur la figure 17. Les courbes de croissance des animaux des lots ADF14, ADF22 et ADF26 ont présenté une allure similaire du début jusqu'à la fin de l'expérimentation. Par ailleurs, l'allure linéaire des courbes de croissance pour ces trois lots montre que les animaux étaient encore en phase de pleine croissance à la fin de l'expérimentation. En effet, de la naissance jusqu'à 12 mois d'âge, la courbe de croissance de l'aulacode suivrait une courbe sigmoïde selon Van Der Merwe et Van Zyl (2001), et la vitesse de croissance maximale serait atteinte autour de 6 à 8 mois d'âge (Yewadan et Schrage, 1992). Pour le lot ADF8, la courbe a eu tendance à s'infléchir à partir de la 6^{ème} semaine. Le déclin de la courbe de croissance pour ce lot signifie un ralentissement de la croissance et un début de perte de poids pour certains animaux, en raison des troubles digestifs liés au taux de fibres insuffisant de ce régime.

Les moyennes de poids vifs obtenues à la fin de l'expérimentation à 114 jours d'âge sont donc cohérentes avec celles observées en général chez l'aulacode à 4 mois d'âge, sachant que ce poids peut varier de 1000 g à 1600 g selon le type d'aliment (fourrage ou aliment concentré) (Yewadan et Schrage, 1992 ; Ntsame et Edderai, 2000).

Tableau 12. Croissance et ingestion d'aliment granulé en fonction du taux de fibres alimentaire et de l'âge (expérimentation 1).

	Régimes				Age			Valeurs de P*			
	ADF8 47-62j [#]	ADF14	ADF22	ADF26	47-62j	72-87j	97-112j	ETR	Régime	Age	Régime x Age
GMQ (g/j)	7,9 ^x	15,1	14,8	13,5	11,6 ^b	15,6 ^a	17 ^a	3,49	0,23	< 0,001	0,98
Ingestion (g MS/kg PV/j)	51,8 ^{yz}	65,7 ^b	87,6 ^a	86,1 ^a	104,3 ^a	75,5 ^b	59,2 ^c	14,59	< 0,001	< 0,001	0,57
Ingestion (g d'aliment brut/j)	24,3 ^{xyz}	54 ^b	67,1 ^a	68 ^a	53,4 ^b	68,5 ^a	70,2 ^a	9,37	< 0,001	< 0,001	0,86
Indice de consommation (g de d'aliment / g de croît)	3,22 ^z	3,74 ^b	4,88 ^a	5,38 ^a	4,95	4,59	4,44	1,33	< 0,001	0,31	0,98

* : Analyse de variance sur les données des régimes ADF14, ADF22 et ADF26 au cours des trois périodes de mesure.

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : Écart-type résiduel.

: Analyse de variance sur les données des quatre régimes au cours de la période 47-62j, suivie d'une comparaison 2 à 2 à l'aide du test de Tukey

x : différent de ADF14 période 47-62j

y : différent de ADF22 période 47-62j

z : différent de ADF26 période 47-62j

Tableau 13. Poids vif des animaux en fonction du taux de fibres alimentaires

	Aliments expérimentaux				ETR	Valeur de P
	ADF8	ADF14	ADF22	ADF26		
Poids initial, g	334	327	328	331	71,8	0,99
Poids à 86 jours d'âge, g	727 ^b	969 ^a	931 ^a	872 ^a	107,9	< 0,001
Poids à 114 jours d'âge, g	-	1404 ^a	1325 ^{ab}	1251 ^b	118,3	0,03

^{a,b} : Pour la même ligne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

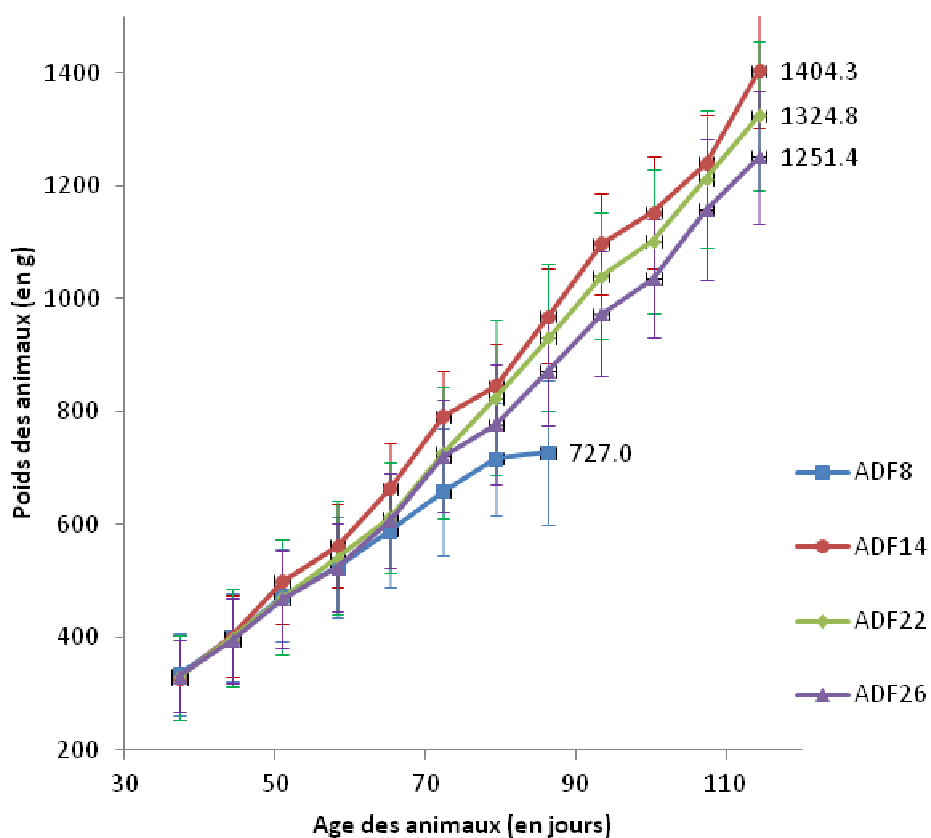


Figure 17. Croissance de l'aulacode en fonction du taux de fibres alimentaires (ADF = lignocellulose)

1.2.2. Ingestion d'aliment et de nutriments

Les quantités d'aliment ingérées par période et par régime sont données dans le tableau 12. Les ingestions de constituants alimentaires sont présentées dans le tableau 14. Au cours de la première période, le lot ADF8 a eu un niveau d'ingestion significativement plus faible que les lots ADF22 et ADF26. Sur l'ensemble des trois périodes, le lot ADF14 a eu l'ingestion la plus faible avec une moyenne de 56,3 g d'aliment granulé par jour ($P < 0,001$). La quantité d'aliment ingérée n'a pas varié entre les lots ADF22 et ADF26. Elle s'est située à une moyenne de 70 g d'aliment granulé par jour pour ces deux lots. Le passage de l'aliment ADF14 à l'aliment ADF22 correspondait à une hausse 65 % de la teneur en ADF dans la ration. Cette augmentation du taux de fibres dans la ration a engendré une hausse de l'ingestion de 24 %, ce qui a fait doubler l'ingestion d'ADF (6,6 à 13,7 g/j, tableau 14). En revanche, l'augmentation du taux d'ADF dans la ration de 17 % entre ADF22 et ADF26 n'a pas engendré d'augmentation du niveau d'ingestion, et ainsi la hausse d'ingestion de l'ADF a été faible (13,7 à 16,4 g/j). Il semble donc que l'aulacode en croissance ne pourrait augmenter son ingestion au delà d'un seuil d'environ 20 à 22% d'ADF dans la ration. Ce seuil de capacité d'ingestion volontaire maximale serait à préciser à l'aide d'une gamme d'apport de fibres alimentaires plus étroite. Néanmoins, ce seuil serait très proche de celui décrit chez le lapin (Gidenne et Lebas, 2010).

L'augmentation de l'ingestion avec la hausse du taux de fibre observée dans cette étude est cohérente avec ce qui est observé chez le lapin en croissance. Par exemple, chez le lapin, Bellier et Gidenne (1996) ont observé une réduction de l'ingestion volontaire de 25 % lorsque le taux de NDF a baissé de 40 à 22 % de la MS dans la ration. Chez le cobaye, Sakaguchi et al. (1997) ont également observé une augmentation de l'ingestion volontaire avec la hausse du niveau de fibres dans l'aliment. Ces auteurs ont obtenu une hausse linéaire de l'ingestion lorsqu'ils ont fait varier le taux d'ADF de 10 à 22 % dans la ration du cobaye.

L'ingestion d'aliment a varié de façon significative ($P < 0,001$) entre périodes. Elle a augmenté de 57 à 70 g d'aliment de la première à la deuxième période ce qui correspond à une hausse de l'ingestion de 23 %. Par contre, l'ingestion entre la deuxième et la troisième période est restée identique. Mais, exprimée en g d'aliment par kg de poids vif, l'ingestion a diminué régulièrement avec l'âge passant de 104 à 59 g/kg de poids vif, de la première à la troisième période ($P < 0,001$). En l'absence de données similaires sur la même tranche d'âge chez l'aulacode dans la littérature, nous avons comparé ces données à celles observées chez le

lapin. Chez le lapin en croissance, l'ingestion volontaire peut varier de 84 g (sevrage à 42 jours d'âge) à 120 g (42 à 70 jours d'âge) pour un aliment à 20 % d'ADF (Gidenne et al., 2000). Exprimée en g/kg de poids vif, l'ingestion volontaire du lapin diminue légèrement de 91 (28 jours d'âge) à 89 (53 jours d'âge) pour un aliment à 20 % d'ADF (Martignon et al., 2009). Le niveau d'ingestion de l'aulacode est ainsi plus faible que celui du lapin domestique (issu de lignées sélectionnées), ce qui peut être mis en relation avec la croissance modérée de l'aulacode.

Tableau 14. Quantité de constituants alimentaires ingérés en fonction du taux de fibres alimentaire et de l'âge (en g/j), expérimentation 1.

	Régimes				Age			Valeur de P*			
	ADF8 47-62j [#]	ADF14	ADF22	ADF26	47-62j	72-87j	97-112j	ETR	Régime	Age	Régime x Age
Matière organique	20,9 ^{xyz}	44,8 ^b	56,2 ^a	57,7 ^a	44,6 ^b	57,6 ^a	59,1 ^a	7,9	< 0,001	< 0,001	0,86
Protéines brutes	3,6 ^{xyz}	7,4 ^b	9,7 ^a	10,5 ^a	7,8 ^b	10,1 ^a	10,3 ^a	1,4	< 0,001	< 0,001	0,76
NDF	4,5 ^{xyz}	14,6 ^c	26,7 ^b	30,8 ^a	20 ^b	26,6 ^a	27 ^a	3,7	< 0,001	< 0,001	0,30
ADF	1,7 ^{xyz}	6,6 ^c	13,7 ^b	16,4 ^a	10,1 ^b	13,6 ^a	13,8 ^a	1,9	< 0,001	< 0,001	0,18
ADL	0,4 ^{xyz}	1,3 ^c	3 ^b	3,3 ^a	2,1 ^b	2,8 ^a	2,9 ^a	0,4	< 0,001	< 0,001	0,18

* : Analyse de variances sur les données des régimes ADF14, ADF22 et ADF26 au cours des trois périodes de mesure

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : Écart-type résiduel.

: Analyse de variance sur les données des quatre régimes au cours de la période 47-62j, suivie d'une comparaison 2 à 2 à l'aide du test de Tukey

x: différent de ADF14 période 47-62j

y : différent de ADF22 période 47-62j

z : différent de ADF26 période 47-62j

1.2.3. Indice de consommation

Au cours de la période 1, l'aliment ADF8 a conduit à un meilleur IC (3,22 contre 5,15 et 5,80) que les régimes ADF22 et ADF26, en raison d'une ingestion nettement plus faible (- 50 %) associée à un GMQ à peine plus faible. Pour les trois autres régimes en considérant les trois périodes, l'aliment ADF14 a permis un meilleur IC avec une valeur moyenne de 3,7 contre 4,9 et 5,4 respectivement pour les lots ADF22 et ADF26. Toutefois, il n'y a pas eu de différence significative entre les IC des lots ADF22 et ADF26. Un effectif plus élevé d'animaux aurait peut être conduit à observer une différence significative. L'augmentation de la valeur de l'IC du lot ADF14 par rapport à celui du lot ADF26 correspond à une hausse de 36 %.

Les valeurs moyennes d'IC obtenues dans cette étude sont cohérentes avec celles observées par Karikari et Nyameasem (2009). Ces derniers ont obtenus des IC variant de 5,1 à 7,5 avec des aliments contenant respectivement 14,6 et 22,5 % d'ADF sur des animaux un peu plus âgés (4 - 5 mois) que ceux utilisés dans cette étude. Cette différence d'âge pourrait expliquer nos valeurs d'IC un peu plus basses. Chez le lapin, Gidenne et al. (2000) ont observé une hausse de l'IC de 1,9 à 3,4 du sevrage (28 jours) à 70 jours d'âge. Dans notre étude, l'IC n'a pas varié de façon significative avec l'âge.

Par ailleurs, l'augmentation de l'IC avec l'accroissement du taux de fibres dans la ration observée dans cette étude est cohérente avec ce qui a été déjà observé chez le lapin. Gidenne et al. (2000) ont observé une hausse de l'IC de 26 % lors d'une augmentation du niveau d'ADF de 12 à 20 % dans l'aliment.

1.3. Digestibilité des rations

1.3.1. Etude de la digestibilité des constituants de la ration en fonction du régime et de la période de mesure

La digestibilité des constituants alimentaires des régimes ADF8, ADF14, ADF22 et ADF26 est présentée dans le tableau 15. Le régime ADF8 a été comparé aux autres régimes uniquement au cours de la première période de mesure (57-62j). Les régimes ADF14, ADF22 et ADF26 ont été comparés sur les trois périodes de mesure.

1.3.1.1. Effet du taux de fibres alimentaires

Au cours de la première période de mesure de digestibilité (47-62 j), la digestibilité de la MO a été plus élevée (+ 20%) avec le régime ADF8 par rapport au régime ADF26. Il n'y a pas eu de différence significative avec les autres régimes. La digestibilité des fibres a été globalement moins élevée (- 20 % pour l'ADF) avec le régime ADF8 par rapport aux autres régimes à l'exception des hémicelluloses pour lesquelles il n'y a pas eu de différence significative entre les régimes. Par ailleurs, la digestibilité des protéines brutes n'a pas varié de façon significative en fonction des régimes.

Pour les lots ADF14, ADF22 et ADF26 qui ont terminé les trois périodes de mesure de digestibilité, ainsi qu'attendu, la digestibilité des constituants alimentaires a varié de façon hautement significative en fonction du régime (tableau 15). La digestibilité de la MO a diminué lorsque la concentration en fibres du régime s'accroissait. Il n'y a pas eu de différence significative entre les régimes ADF14 et ADF22 pour les valeurs de digestibilité, à l'exception de celle de la MO. La digestibilité de la MO a diminuée de 79,6 à 64,1 %, du régime ADF14 au régime ADF26, ce qui correspond à une baisse relative de 19,5 %. La digestibilité des protéines brutes a baissé de 76,6 à 72,1 % du régime ADF14 au régime ADF26 ($P < 0,001$), soit une baisse relative de digestibilité de 6 %.

Les coefficients de digestibilité des fractions fibreuses ont globalement baissé avec l'augmentation du niveau de fibres dans le régime ($P < 0,001$). Le régime ADF26 a conduit aux coefficients de digestibilité les plus faibles, alors qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les régimes ADF14 et ADF22. Le passage du régime ADF14 au régime ADF26 a conduit à une baisse relative de la digestibilité de 18 et 19 % respectivement pour les critères NDF et ADF, et une baisse relative de respectivement 14 et 18 % pour les hémicelluloses et la cellulose.

Les coefficients de digestibilité des fibres ont montré que les animaux ont digéré les fractions fibreuses avec la même efficacité dans les régimes ADF14 et ADF22. Or, le passage de l'aliment ADF14 à l'aliment ADF22 correspondait à une hausse de 65 % de la teneur en ADF dans la ration. Ce résultat rappelle celui de Van Zyl et al. (1999) qui ont observé que des aulacodes adultes avaient digéré les fractions fibreuses avec la même efficacité après une augmentation du niveau de fibres de 17 à 33 % dans la ration. Mais, le fait que la digestibilité de la MO ait baissé du régime ADF14 au régime ADF22 et que celles des PB et des fractions

fibreuse aient été identiques suggère que la digestion d'autres nutriments a été dégradée, par exemple, les lipides, les sucres ou encore l'amidon. Des études supplémentaires sur la digestion des nutriments permettront de répondre à cette question.

Avec le régime ADF26, les animaux ont moins bien digéré les fibres qu'avec les régimes ADF14 et ADF22. Ce résultat était inattendu puisque le passage de l'aliment ADF22 à l'aliment ADF26 correspondait seulement à une hausse relative de 17 % de la proportion d'ADF et le ratio ADL/NDF était sensiblement identique dans les quatre rations, indiquant des niveaux de lignification similaires des fibres. Cette baisse de digestibilité pourrait être liée à une accélération du transit digestif, en particulier dans le caecum : un temps de contact réduit entre microbiote et fibres aurait entraîné une réduction de digestibilité.

La baisse générale de la digestibilité de la MO, des PB et des fibres avec la hausse du niveau de fibres dans l'aliment est commune aux herbivores monogastriques. Chez le lapin, Bellier et Gidenne (1996) ont observé une baisse de la digestibilité de la MO de 18 % lors d'une hausse du taux d'ADF de 10,6 à 20 % (par rapport à la MS) de la ration. Cette baisse de la digestibilité de la MO était aussi accompagnée d'une baisse de la digestibilité des PB de 11 %. Chez le cobaye, la digestibilité de la MS a baissé de 12,5 % et celle des PB de 10,8 % lorsque le taux d'ADF dans la ration a augmenté de 10 à 22 % (Sakaguchi et al., 1997).

La diminution de la digestibilité des fractions fibreuses avec l'augmentation du taux de fibres dans la ration a été également observée chez le lapin et le cobaye. Chez le lapin, la digestibilité du NDF a baissé de 16 % et celle de l'ADF de 20 % lorsque le taux d'ADF a augmenté de 88 % (Bellier et Gidenne, 1996). Chez le cobaye, une augmentation du taux d'ADF de 50 % a conduit à une baisse de la digestibilité de l'ADF de 15 %. Toutefois, la digestibilité des fractions fibreuses dépend de leur qualité, elle même en lien direct avec leur origine botanique, ce qui explique des effets d'amplitudes différentes selon les expérimentations.

Tableau 15. Coefficients de digestibilité (%) en fonction du taux de fibres alimentaire et de l'âge (expérimentation 1).

	Régime				Age			Valeur de P*			
	ADF8 [#]	ADF14	ADF22	ADF26	57-62j	82-87j	107-112j	ETR	Régime	Age	Régime x Age
Matière organique	84,7 ^z	79,6 ^a	75,0 ^b	64,1 ^c	78,8 ^a	69,8 ^b	68,5 ^b	4,41	< 0,001	< 0,001	0,015
Protéines brutes	81,4	76,6 ^a	77,6 ^a	72,1 ^b	82,4 ^a	71,7 ^b	71,1 ^b	4,47	< 0,001	< 0,001	0,36
Neutral detergent fibre (NDF)	52,3 ^y	54,0 ^a	57,8 ^a	44,2 ^b	62,1 ^a	46,9 ^b	45,1 ^b	7,40	< 0,001	< 0,001	0,12
Acid detergent fibre (ADF)	37,9 ^{xyz}	45,7 ^a	51,5 ^a	37,0 ^b	56,4 ^a	39,4 ^b	36,2 ^b	8,12	< 0,001	< 0,001	0,087
Hemicelluloses (NDF-ADF)	61	60,9 ^a	64,5 ^a	52,5 ^b	67,8 ^a	54,4 ^b	54,1 ^b	6,89	< 0,001	< 0,001	0,23
Cellulose (ADF-ADL)	39,3 ^{yz}	48,3 ^a	53,4 ^a	39,8 ^b	57,9 ^a	42,3 ^b	39,4 ^b	8,16	< 0,001	< 0,001	0,078

* : Analyse de variances sur les données des régimes ADF14, ADF22 et ADF26 au cours des trois périodes de mesure

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : Écart-type résiduel.

: Analyse de variance sur les données des quatre régimes au cours de la période 57-62j, suivie d'une comparaison 2 à 2 à l'aide du test de Tukey

x: différent de ADF14 période 57-62j

y : différent de ADF22 période 57-62j

z : différent de ADF26 période 57-62j

1.3.1.2. Effet de l'âge

La digestibilité de tous les constituants alimentaires étudiés a varié de façon hautement significative en fonction de l'âge ($P < 0,001$). De façon générale, la digestibilité des constituants a été plus importante quand les animaux étaient plus jeunes (57-62 jours d'âge). Puis, elle a baissé au cours de la deuxième période (82-87 jours d'âge). La digestibilité de la MO a ainsi baissé de 9 points de la 1^{ère} à la 2^{ème} période quand celle des PB baissait de 11 points. Entre ces deux périodes toujours, la digestibilité du NDF a baissé de 15 points quant celle de l'ADF chutait de 13 points. Toutefois, la digestibilité de tous les constituants est restée stable de la 2^{ème} à la 3^{ème} période (107-112 jours d'âge).

De même, chez le lapin en croissance, Gidenne et Perez (1993) ont observé sur trois périodes, (28 à 33 jours, 49 à 54 jours et 70 à 75 jours d'âge) une diminution de la digestibilité des nutriments avec l'augmentation d'âge des animaux, sauf pour l'amidon. La diminution de la digestibilité des nutriments était plus marquée de la 1^{ère} à la 2^{ème} période avec une baisse de 9 points pour la digestibilité de la MO. Dans notre expérimentation, la digestibilité des fibres a été plus élevée au cours de la 1^{ère} période. Lebas (1973) a observé des résultats similaires, avec une baisse de la digestibilité de la MO de 5 points entre la 6^{ème} et la 9^{ème} semaine, puis une stabilisation jusqu'à la 12^{ème} semaine. Il a également observé une évolution parallèle de la digestibilité des PB mais avec une baisse de 9 à 10 points. Par contre, cet auteur a observé que le lapin adulte digérait mieux la MO que les jeunes de 11 et 12 semaines d'âge. Ce dernier résultat pourrait expliquer le fait que les études réalisées chez l'aulacode adulte (plus de 120 jours d'âge) ont montré des coefficients de digestibilité relativement élevés par rapport à celle de notre présente étude. Van Zyl et al. (1999) ont par exemple observé une digestibilité de 88 % et 91 % respectivement pour la MS et les protéines brutes, avec un aliment contenant 18 % d'ADF et 14 % de PB (% de la MS). Karikari et Nyameasem (2009) qui ont travaillé avec des aulacodes adultes recevant des aliments granulés contenant 15 % d'ADF et 17 % de PB ont enregistré des valeurs de digestibilité de respectivement 76 et 93 % pour la MS et les protéines brutes, plutôt proches de celles observées dans notre étude.

1.3.1.3. Effet de l'interaction régime x période

Les résultats de l'analyse statistique présentés au tableau 15 indiquent une interaction significative entre les facteurs âge et régime seulement pour la digestibilité de la matière

organique. La figure 18 illustre comment la digestibilité de la matière organique a varié en fonction du régime âge par âge. Elle montre que la diminution de la digestibilité de la MO du régime ADF14 au régime ADF26 a été régulière au cours de la première période. Elle a diminué de 4 points du régime ADF14 au régime ADF22 puis de 5 points du régime ADF22 au régime ADF26. Par contre au cours de la deuxième et de la troisième période, la baisse de la digestibilité de la MO du régime ADF26 a été très forte par rapport à celle des deux autres régimes. Ainsi, au cours de la deuxième période, la digestibilité de la MO a diminué de 4 points du régime ADF14 au régime ADF22, puis de 15 points du régime ADF22 au régime ADF26. Au cours de la troisième période, elle a diminué de 6 points puis de 15 points respectivement. Cette forte baisse de la digestibilité du régime ADF26 au cours de ces deux dernières périodes comparée à une diminution modérée au cours de la première période explique l'interaction constatée entre les deux facteurs âge et régime.

Des tendances vers des interactions similaires ont aussi été observées sur l'ADF et son constituant majeur, la cellulose ($P = 0,087$ et $0,078$ respectivement), laissant penser que cet interaction significative pour la MO, serait liée à la composante ADF.

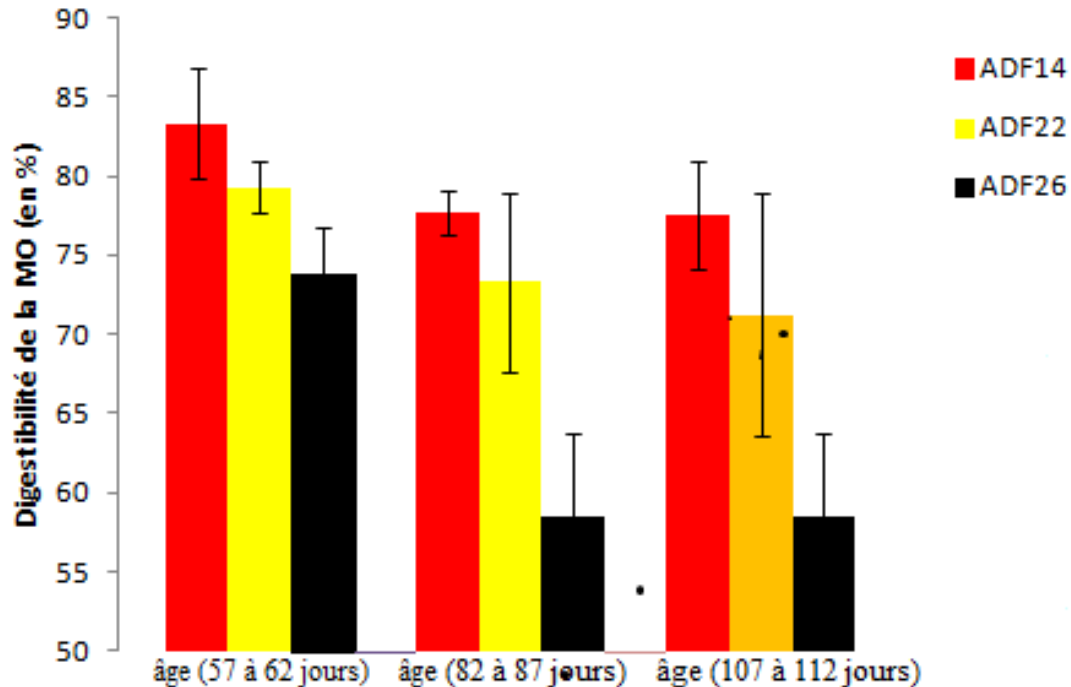


Figure 18. Variation de la digestibilité en fonction du régime âge par âge

1.3.2. Relation entre digestion de la matière organique et teneur en fibres de l'aliment

La digestibilité de la matière organique ayant diminué avec l'augmentation du niveau de fibres dans les aliments sur les trois périodes d'étude, nous avons cherché à établir une relation entre cette digestibilité et les teneurs en fibres des régimes (Figure 19). En effet, chez le lapin il a été montré que la digestibilité de la matière organique est fortement et négativement corrélée aux taux de fibres. Par exemple, la digestibilité de la matière organique était linéairement corrélée au taux d'ADF avec un coefficient de détermination r^2 égal à 0,82 (Gidenne, 1996). Dans notre étude, même si les coefficients de détermination obtenus entre la digestibilité de la matière organique et les taux de fibres ne sont pas aussi élevés que celui observé chez le lapin, deux remarques se dégagent des résultats des équations de régression de la figure 11. La première est que le résidu ADF a eu un effet dépresseur plus marqué sur la digestibilité de la matière organique que le résidu NDF. En effet, la digestibilité a diminué ($P < 0,001$) de 0,7 à 1,4 points lorsque le taux d'ADF a augmenté de 1 point dans la ration alors que cette diminution n'a été que de 0,5 à 0,9 points par point de NDF. Cet effet dépresseur plus marqué exercé par le taux d'ADF sur la digestibilité observé dans cette étude rappelle le résultat obtenu chez le lapin en croissance où la digestibilité de la matière organique a diminué de 1,35 point lorsque le taux d'ADF a augmenté de 1 point dans la ration contre seulement 0,98 point par point de NDF (Gidenne, 1996).

Par ailleurs, l'effet dépresseur des fibres sur la digestibilité semble amoindri au plus jeune âge des animaux, ce qui est conforme à l'interaction décrite au paragraphe précédent. Au cours de la première période de mesure (57 à 62 jours d'âge) par exemple, la diminution de la digestibilité de la matière organique n'a été que de 0,7 et 0,5 points par point supplémentaire d'ADF et NDF respectivement alors qu'à la troisième période de mesure (107 à 112 jours d'âge) cette diminution a atteint 1,4 et 0,9 points respectivement pour l'ADF et le NDF. Cette constatation traduit une efficacité digestive des fibres plus élevée au jeune âge de l'aulacode qu'à un âge plus avancé ainsi que cela a été constaté chez le lapin (Gidenne et Perez, 1993).

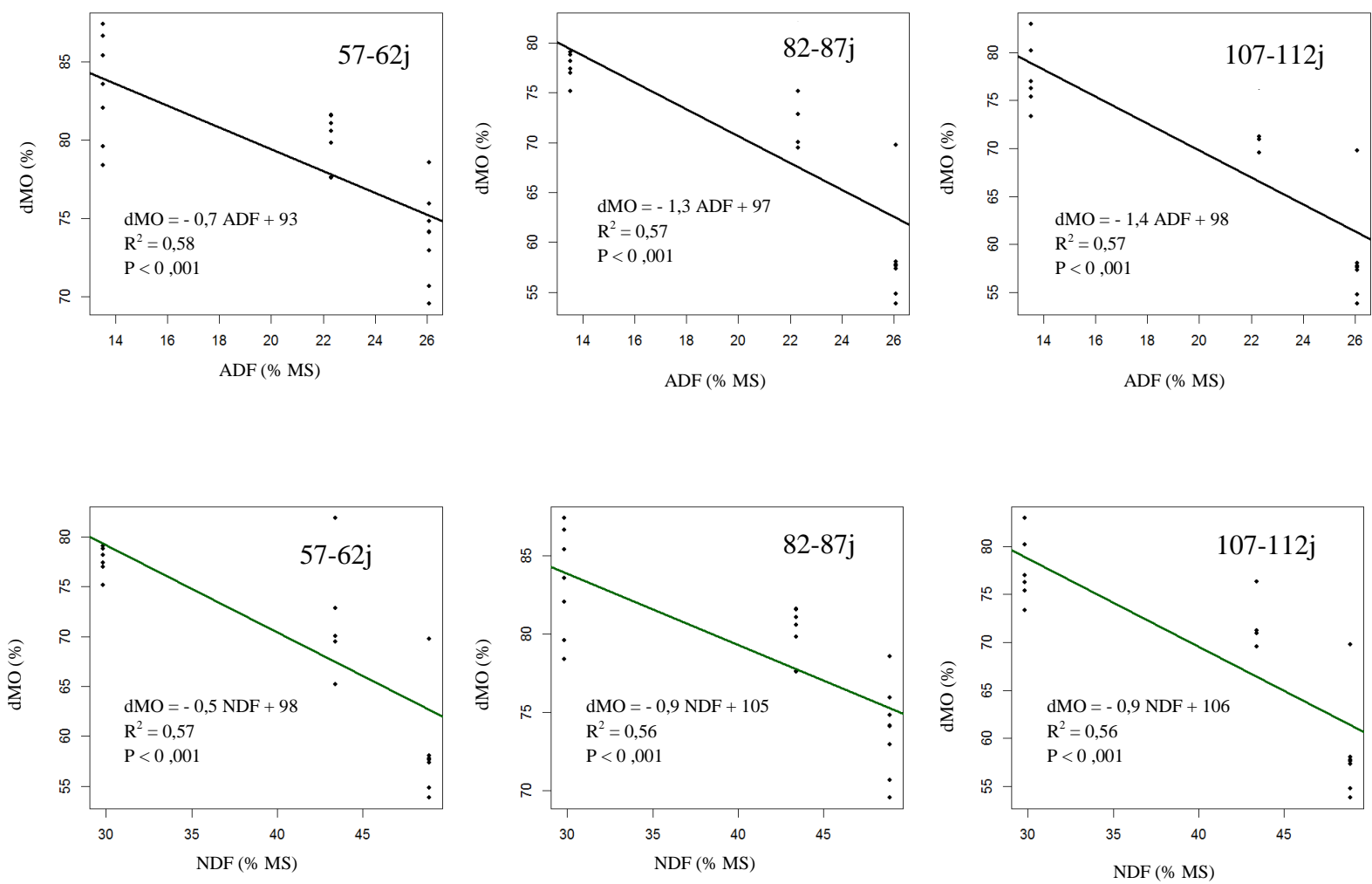


Figure 19. Relation entre la digestibilité de la matière organique (dMO) et les taux d'ADF et NDF de l'aliment, essai 1.

2. Etude des performances zootechniques et de la physiologie digestive de l'aulacode en croissance suite à une réduction simultanée des taux de fibres et de protéines brutes

Cette partie présente les résultats obtenus au cours du second protocole expérimental. Elle décrit l'anatomie digestive, les fermentations et les communautés bactériennes caecales ainsi que les résultats zootechniques et sanitaires en fonction des régimes étudiés et de l'âge des animaux.

2.1. Paramètres zootechniques et santé digestive

2.1.1. Santé des animaux en fonction des régimes

Aucune mortalité n'a été enregistrée au cours de cette expérimentation, même avec le régime le plus pauvres en fibres (8,4 % d'ADF) et en protéines. En revanche, la morbidité a eu tendance à augmenter ($P = 0,061$) avec la baisse du niveau de fibres et de protéines dans le régime (Figure 20). L'aliment NB a eu tendance à engendrer plus de cas de morbidité que les deux autres régimes, probablement à cause du taux de fibres très faible.

Quatre cas de morbidité sur les 6 observés dans le lot NB ont été constatés dès la deuxième et la troisième semaine après le début de l'expérience. Ces morbidités se sont traduites essentiellement par des pertes de poids. Nous n'avons pas observé de cas de diarrhée ni de prostration des animaux. Pour le lot NM un cas de morbidité sur les deux constaté a été observé dès la deuxième semaine après le début de l'expérimentation. Enfin, le seul cas de morbidité dans le lot NH a été observé à la sixième semaine. Ainsi, les cas de morbidité ont été observés majoritairement au plus jeune âge chez les animaux recevant les aliments pauvres en fibres et protéines ce qui peut traduire une plus grande vulnérabilité des animaux jeunes face à une déficience en fibres et protéines par rapport aux animaux plus âgés. Cette plus grande vulnérabilité des aulacodes au plus jeune âge face à un déficit en fibres alimentaires serait cohérente avec les résultats obtenus chez le lapin. En effet, il a été constaté que chez le lapin adulte, les perturbations digestives étaient rares, même dans le cas d'une déficience en fibres, contrairement à ce qui est rapporté chez des lapins au stade post-sevrage (Gidenne, 2008).

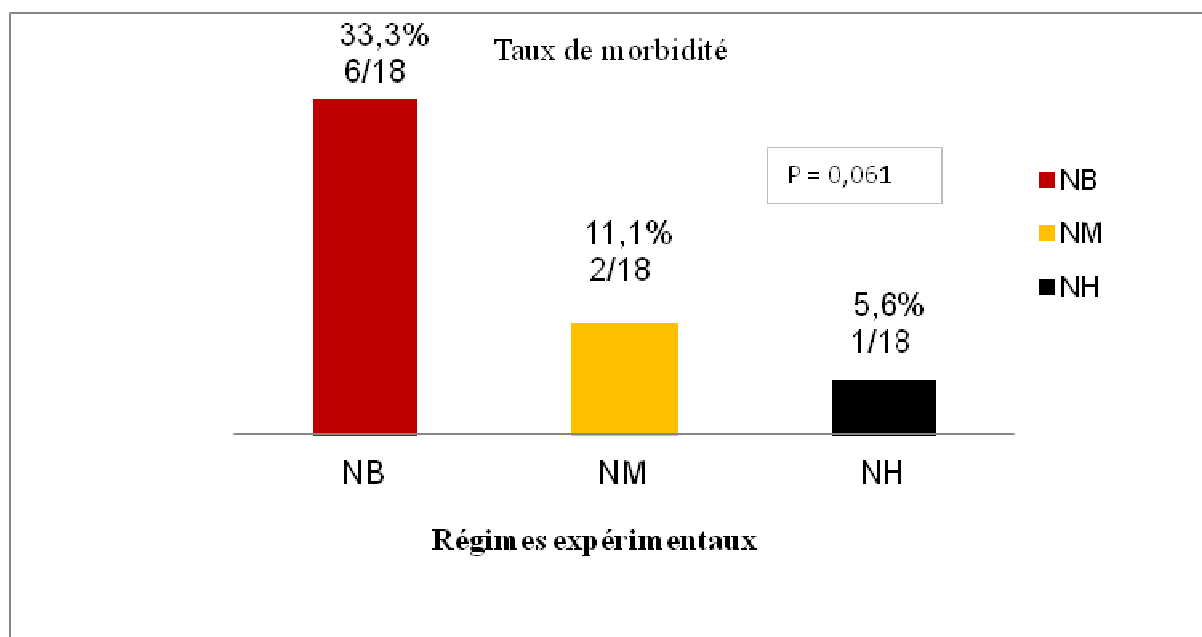


Figure 20. Taux de morbidité en fonction du régime

2.1.2. Croissance des animaux

Les poids moyens des animaux en fonction du régime au début, au milieu et en fin d'expérimentation sont présentés dans le tableau 16. La variation du GMQ en fonction du régime et de l'âge est présentée dans le tableau 17. L'allure des courbes de croissance des animaux est illustrée par la figure 21.

La vitesse de croissance des animaux soumis au régime NB a été plus faible que celle des animaux recevant les régimes NM et NH. Les GMQ étaient 6,9 et 10,9 g/j respectivement pour les lots NB et NH. Le GMQ du lot NM, qui était de 9,7 g/j, n'était pas significativement différent de celui du lot NH. Les résultats du tableau 16 révèlent que les poids vifs moyens des trois lots expérimentaux étaient identiques au début de l'expérimentation puis en milieu d'expérimentation à 68 jours d'âge. A la fin de l'expérimentation, à 96 jours d'âge, le poids vif moyen des animaux du lot NB était plus faible ($P=0,002$) tandis que les deux lots NM et NH n'étaient pas significativement différents. Les poids vifs moyens des animaux enregistrés à la fin de l'expérimentation étaient 1199 g, 1158 g et 891 g respectivement pour les lots NH, NM et NB.

La mauvaise performance de croissance des animaux du lot NB a été due certainement aux troubles digestifs occasionnés par la déficience en fibres avec ce régime. Mais, le faible niveau de protéines brutes dans ce lot peut également être en cause. En revanche, le régime

NM qui était plutôt pauvre en protéines brutes, mais relativement riche en fibres a conduit à une vitesse de croissance similaire à celle du lot soumis au régime NH.

Les courbes de la figure 21 montrent que les animaux ont eu globalement une croissance linéaire ($P < 0,001$; $R^2 = 0,95$ pour les lots NM et NH et $R^2 = 97$ pour le lot NB) sur la période d'étude.

Tableau 16. Poids vif des animaux en fonction du régime (en g)

	Régimes expérimentaux			ETR	Valeur de P
	NB	NM	NH		
Début d'expérimentation	443	445	440	148	0,99
68 jours d'âge	623	689	733	166	0,149
96 jours d'âge	891 ^a	1158 ^b	1199 ^b	168	0,002

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b} : Pour la même ligne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

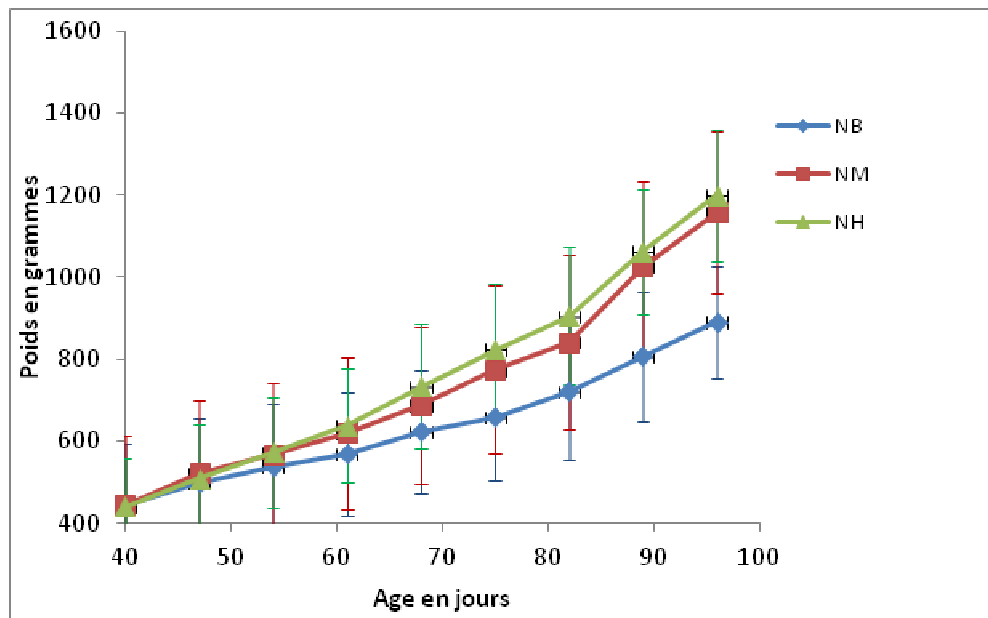


Figure 21. Courbes d'évolution du poids des animaux

Tableau 17. Ingestion, gain moyen quotidien et indice de consommation en fonction du régime et de l'âge, expérimentation 2.

	Régime*			Age		Valeur de P			
	NB	NM	NH	55-69j	79-93j	ETR	Régime	Age	Régime x Age
Gain moyen quotidien (g/j)	6,8 ^b	9,7 ^a	10,9 ^a	7,9	10,5	2,55	< 0,001	< 0,001	0,43
Ingestion (g d'aliment brut/j)	33,4 ^b	35,6 ^b	43,2 ^a	33,8	41,3	9,39	0,004	0,002	0,55
Ingestion (g MS/kg PV/j)	44,7 ^b	43,3 ^b	51,5 ^a	47,9	45,2	8,47	0,007	0,25	0,97
Indice de consommation (g d'aliment / g de croît	5,21 ^a	4 ^b	4,02 ^b	4,71	4,12	1,54	0,026	0,132	0,2

ETR : Écart-type résiduel.

* : valeurs moyennes en fonction du régime mesurées entre 55 à 93 jours d'âge

^{A,b,c} : Pour la même ligne et le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.1.3. Ingestion et indice de consommation

L'ingestion d'aliment par animal et par jour a augmenté de 29 % du régime NB à NH ($P = 0,003$). Cependant il n'y a pas eu de différence significative entre l'ingestion par les animaux recevant le régime NB et ceux recevant le régime NM. L'ingestion d'aliment par jour a aussi varié entre les deux périodes de mesure. Elle a augmenté de 22 % de la première période (55-69 jours d'âge) à la deuxième période (79-93 jours d'âge). Lorsque l'ingestion de MS a été exprimée par kg de poids vif, l'effet fibres a toujours été observé contrairement à l'effet période qui n'a plus été constaté. Globalement, le niveau d'ingestion a varié entre 33,4 g et 43,2 g d'aliment par animal et par jour.

L'IC a été meilleur pour les animaux des lots NM et NH (4 et 4,02) que pour celui du lot NB (5,21). L'IC n'a pas varié de façon significative entre les deux périodes.

L'augmentation de l'ingestion d'aliment avec la hausse du niveau de fibres dans les rations observée pour les trois régimes étudiés est cohérente avec les résultats obtenus chez le cobaye (Sakaguchi, 1997) et le lapin (Gidenne, 1996). Les niveaux d'ingestion observés dans notre étude sont proches de ceux enregistrés par Karikari et Nyameasem (2009) chez des aulacodes un peu plus âgés. Ils ont enregistré des niveaux d'ingestion de l'ordre de 53 à 66 g de MS d'aliment par animal par jour. Les valeurs d'IC observées dans notre étude sont également cohérentes, quoique légèrement inférieures, avec les valeurs d'IC obtenues par Karikari et Nyameasem (2009).

2.1.4. Ingestion de constituants alimentaires

L'ingestion moyenne de constituants alimentaires par animal et par jour a été étudiée en fonction du régime et de l'âge (Tableau 18). L'ingestion de matière organique a augmenté de 12 % de l'aliment NB à l'aliment NH ($P = 0,009$) de l'aliment NB à l'aliment NH.

L'ingestion de protéines brutes n'a pas varié de façon significative entre les deux régimes pauvres en PB (NB et NM), qui contenaient 10 et 11 % de protéines brutes, respectivement. Elle a été plus élevée ($P < 0,001$) avec le régime NH qui était également le plus riche en protéines brutes (13 %). Les quantités de PB ingérées par animal et par jour ont varié de 3,3 à 5,4 g du régime NB au régime NH ce qui correspond à une hausse d'ingestion de protéines

brutes de 60 %. Entre le régime NM et le régime NH, la différence d'ingestion de PB a été de 38 %.

La quantité d'énergie brute ingérée a été plus élevée ($P = 0,005$) avec le lot soumis au régime NH avec 1700 kcal d'énergie ingérée par animal par jour. Elle n'a pas différé de manière significative entre les animaux recevant les régimes NB et NM.

Les quantités de fibres alimentaires ingérées ont logiquement baissé ($P < 0,001$) de façon régulière avec la réduction du niveau de fibres dans les régimes. Ainsi, la quantité de NDF ingérée par animal et par jour a baissé de 50 % du régime NH au régime NM puis, de 45 % du régime NM au régime NB. De la même manière, la quantité d'ADF ingérée par animal et par jour a connu une réduction de 60 % du régime NH au régime NM puis, de 60 % du régime NM au régime NB. En ce qui concerne l'amidon, les quantités ingérées n'ont pas varié avec le régime.

Entre les deux lots d'animaux soumis aux régimes NB et NM, seules les quantités de fibres ingérées étaient significativement différentes. Les quantités ingérées de protéines brutes, d'énergie brute et d'amidon n'étaient pas statistiquement différentes. Cette observation laisse penser que les différences entre ces deux lots provenaient pour l'essentiel de la variation de la quantité de fibres entre les deux régimes. Ce résultat est similaire à ce qui a été observé chez le lapin (Gidenne, 1996). Par exemple, lors d'une baisse de la teneur en NDF de 39 à 22 %, l'ingestion de fibres a baissé de 18 g/j (soit - 58 %) sous l'effet conjugué de la réduction de la teneur en fibres et de la baisse du niveau d'ingestion d'aliment, tandis que la quantité d'amidon ingérée n'augmentait que de 6 g/j. Cet auteur a ainsi conclu que les différences entre régimes provenaient bien pour l'essentiel de variations de la quantité de fibres ingérée, et non de celle d'amidon.

Tableau 18. Ingestion de constituants alimentaires en fonction du régime et de l'âge, expérimentation 2 (en g/j sauf énergie en kcal/j).

	Régime*			Age		ETR	Valeur de P		
	NB	NM	NH	55-69j	79-93j		Régime	Age	Régime x Age
Matière organique	28,7 ^b	30,2 ^{ab}	32,2 ^a	28,6	30,5	8,07	0,009	0,002	0,58
Protéines brutes	3,3 ^b	3,9 ^b	5,4 ^a	3,8	4,6	0,99	< 0,001	0,002	0,68
Energie	1319 ^b	1417 ^b	1700 ^a	1342	1627	374	0,005	0,003	0,61
Neutral detergent fibre (NDF)	6,6 ^c	9,6 ^b	14,4 ^a	9,3	11,4	2,34	< 0,001	0,001	0,23
Acid detergent fibre (ADF)	2,8 ^c	4,5 ^b	7,2 ^a	4,4	5,4	1,06	< 0,001	< 0,001	0,082
Hemicelluloses (NDF-ADF)	3,9 ^c	5,1 ^b	7,2 ^a	4,9	6,0	1,26	< 0,001	< 0,001	0,41
Cellulose (ADF-ADL)	2,4 ^c	3,8 ^b	6,0 ^a	3,7	4,6	0,91	< 0,001	< 0,001	0,105
Amidon	13,6	12,5	11,2	11,3	13,6	3,52	0,101	0,015	0,83

* : valeurs moyennes en fonction du régime mesurées entre 55 à 93 jours d'âge

ETR : Écart-type résiduel.

^{abc} : Pour la même ligne, et le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.1.5. Digestibilité des rations

Les coefficients de digestibilité des constituants alimentaires ont été étudiés en fonction du régime et de l'âge (Tableau 19). De façon générale, les coefficients de digestibilité ont baissé avec la hausse du niveau de fibres dans le régime. Le passage de l'aliment NB à l'aliment NH correspondait à un doublement du niveau de fibres. Cette augmentation du niveau de fibres dans l'aliment a entraîné une baisse de 21 % des digestibilités de la matière organique et de l'énergie brute. La digestibilité du NDF a baissé de 31 % tandis que celle de l'ADF a chuté de 35 %. La digestibilité des protéines brutes a baissé de 9 % quand celle de l'amidon diminuait seulement de 3 %. Dans l'ensemble, les digestibilités des PB et des fibres ont été identiques pour les régimes NM et NH malgré des taux de fibres et de protéines brutes différents dans deux régimes.

En fonction de la période, les coefficients de digestibilité des constituants alimentaires n'ont pas varié de façon significative excepté les hémicelluloses pour lesquelles ils ont baissé ($P = 0,047$) et l'amidon pour lequel ils ont eu tendance à diminuer ($P = 0,097$) entre la 1^{ère} et la 2^{ème} période.

Les valeurs de digestibilité enregistrées dans cette expérimentation sont proches de celles observées chez le lapin en croissance. Gidenne et al. (2004) ont signalé pour le lapin en croissance une digestibilité de la MO de l'ordre de 83,5 % pour un aliment à 9,2 % d'ADF et 16,5 % de protéines brutes, et une digestibilité de la MO de 77,4 % pour un aliment à 17 % d'ADF et 16,2 % de protéines brutes. Cependant, la digestibilité de la MO enregistrée dans cette expérimentation est faible par rapport à celle obtenue par Karikari et Nyameasem (2009) chez l'aulacode en croissance. Ces derniers ont signalé une digestibilité de la MO très élevée (95 à 84 %) avec des aliments contenant 15 à 23 % d'ADF et 17 % de protéines brutes.

Les valeurs de digestibilité enregistrées pour l'amidon chez l'aulacode ont été particulièrement élevées comme cela a été déjà observé pour le lapin chez qui la digestibilité de l'amidon est quasi-totale, variant de 95 à 100 % (Gidenne, 1996). De plus, la digestibilité de l'amidon s'accroît avec la concentration alimentaire, ainsi que cela a été observé chez le lapin (Blas et Gidenne, 2010).

Tableau 19. Coefficients de digestibilité des constituants alimentaires en fonction du régime et de la période, expérimentation 2 (%).

	Régime*			Age		Valeur de P			
	NB	NM	NH	55-69j	79-93j	ETR	Régime	Période	Régime x Période
Matière organique	84,4 ^a	74,4 ^b	66,4 ^c	75,1	74,6	3,30	< 0,001	0,60	0,36
Energie brute	83,0 ^a	73,6 ^b	65,3 ^c	74,1	73,3	3,43	< 0,001	0,39	0,36
Protéines brutes	77,4 ^a	71,5 ^b	69,9 ^b	73,5	72,1	4,78	< 0,001	0,24	0,51
Neutral detergent fibre (NDF)	53,5 ^a	41,1 ^b	36,6 ^b	44,4	42,4	8,15	< 0,001	0,35	0,26
Acid detergent fibre (ADF)	46,4 ^a	32,9 ^b	30,1 ^b	36,0	36,3	9,23	< 0,001	0,94	0,42
Hemicelluloses (NDF-ADF)	58,5 ^a	48,1 ^b	43,1 ^b	51,7	47,7	7,48	< 0,001	0,047	0,126
Cellulose (ADF-ADL)	51,0 ^a	37,0 ^b	34,9 ^b	40,1	41,2	9,40	< 0,001	0,72	0,42
Amidon	97,9 ^a	96,8 ^a	95,1 ^b	97,0	96,1	1,85	< 0,001	0,097	0,89

* : valeurs moyennes en fonction du régime mesurées entre 55 à 93 jours d'âge

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.1.6. Teneurs en constituants digestibles des régimes expérimentaux

Les teneurs en constituants digestibles des trois régimes en fonction des deux périodes de mesure de digestibilité sont présentées dans le tableau 20.

Les teneurs en énergie digestible des trois régimes étaient comprises entre 2500 et 3300 kcal/kg d'aliment brut, soit entre 10,7 et 13,8 MJ/kg d'aliment brut. Quant aux protéines digestibles, elles ont varié entre 76 et 90 g/kg d'aliment brut. Ainsi, le rapport protéines digestibles/énergie digestible a varié de 5,6 g PD/MJ pour le régime NB à 8,3 g PD/MJ pour le régime NH.

Nous avons comparé ces valeurs aux recommandations nutritionnelles chez le lapin en croissance. Selon Lebas (2004), pour optimiser la croissance, il est recommandé une concentration d'ED de 2400 kcal/kg d'aliment, pour le lapin au stade péri-sevrage (18-42 jours d'âge) et 2600 kcal d'ED/kg d'aliment pour le lapin en finition (42 -75 jours d'âge). La teneur en énergie digestible de l'aliment NH est correcte par rapport à ces recommandations. Cependant les deux aliments NM et NB apparaissent trop riches en énergie par rapport à ces normes. Par ailleurs, les faibles niveaux d'azote digestibles de nos rations ont conduit à un ratio protéines digestibles / énergie digestible faible par rapport aux valeurs recommandées chez le lapin qui se situent à 11 g PD/MJ pour le stade péri-sevrage et 11,5 g PD/MJ pour la finition.

Tableau 20. Teneurs moyennes en nutriments digestibles des régimes expérimentaux

Constituants alimentaires	Régimes		
	NB	NM	NH
Première période			
Protéines digestibles (g/kg brut)	76,3	79,7	90,0
Energie digestible (kcal/kg brut)	3307	2978	2584
Energie digestible (MJ/kg brut)	13,8	12,5	10,8
PD/ED (g PD/1000 kcal)	23,1	26,8	34,8
PD/ED (g PD/MJ)	5,5	6,4	8,3
NDF digestible (g/kg brut)	104	122	121
ADF digestible (g/kg brut)	38	44	46
Hémicelluloses digestibles (g/kg brut)	65	78	74
Cellulose digestible (g/kg brut)	35	41	45
Amidon digestible (g/kg brut)	402	352	246
Deuxième période			
Protéines digestibles (g/kg brut)	76,3	76,2	85,4
Energie digestible (kcal/kg brut)	3265	2875	2567
Energie digestible (MJ/kg brut)	13,6	12,0	10,7
PD/ED (g PD/1000 kcal)	23,4	26,5	33,3
PD/ED (g PD/MJ)	5,6	6,3	8,0
NDF digestible (g/kg brut)	108	101	123
ADF digestible (g/kg brut)	39	40	54
Hémicelluloses digestibles (g/kg brut)	70	61	69
Cellulose digestible (g/kg brut)	38	38	52
Amidon digestible (g/kg brut)	398	330	247

Quantités de nutriments digestibles ingérés

Les quantités de nutriments digestibles ingérées par animal et par jour, en fonction du régime et de la période, sont présentées au tableau 21. La quantité de matière organique digestible ingérée n'a pas varié de façon significative avec le régime ($P = 0,18$). Les quantités moyennes de MO digestibles ingérées par animal étaient comprises entre 21,9 et 25,8 g/j. De même, la quantité d'énergie digestible ingérée n'a pas varié de façon significative en fonction du régime ($P = 0,26$). Les quantités moyennes d'énergie digestible ingérées par animal ont varié entre 1014 et 1169 kcal/j.

La quantité de protéines digestibles ingérée était plus élevée avec le régime NH qu'avec les deux autres régimes ($P < 0,001$). Elle était de 3,8 g avec le régime NH contre 2,7 g avec les régimes NB et NM.

Concernant les fibres, la quantité journalière de NDF digestible ingérée par animal par jour était plus élevée avec le régime NH (+1,5 g, $P < 0,001$). Elle a ainsi varié de 3,8 g pour les régimes NB et NM à 5,3 g pour le régime NH. Pour l'ADF, les quantités digestibles ingérées ont varié de 1,4 g/j pour les régimes NB et NM, à 2,3 g/j ce qui correspond à une hausse de 64 %. Quant à l'amidon, les quantités digestibles ingérées ont diminué ($P = 0,011$) de 14,3 g/j à 10,8 g/j du régime NB au régime NH. En ce qui concerne la quantité d'amidon digestible ingérée encore, la différence observée entre les régimes NB et NM n'était pas statistiquement significative. Par ailleurs, les quantités de constituants digestibles ingérées ont augmenté de la 1^{ère} à la 2^{ème} période excepté les hémicelluloses.

En résumé, aucun constituant alimentaire ne différait entre les lots NB et NM par sa quantité digestible ingérée, y compris les fibres alimentaires. Cette observation laisse penser que les différences observées entre les lots NB et NM n'étaient pas dues à la quantité de fibres digérée (puisque elle était similaire dans ces deux lots) mais plutôt dû à la quantité de fibres ingérée. Le rôle physique de régulation du transit digestif par les fibres est probablement impliqué pour les cas de morbidité observés dans les lots NB et NH. En effet comme cela a été montré chez le lapin, il y a une régulation du transit digestif en fonction de l'ingestion de fibres et l'effet majeur des fibres porte surtout sur le transit caecal (Gidenne 1996).

Tableau 21. Quantités de constituants alimentaires digestibles ingérées en fonction du régime et de la période (en g/j sauf énergie en kcal/j)

	Régime			Age		Valeur de P			
	NB	NM	NH	55-69j	79-93j	ETR	Régime	Période	Régime x Période
Matière organique	25,8	21,9	24,3	21,6	26,2	6,12	0,173	0,009	0,583
Protéines	2,7 ^b	2,7 ^b	3,8 ^a	2,8	3,4	0,75	< 0,001	0,018	0,570
Energie	1169	1014	1121	999	1195	284	0,26	0,016	0,605
Neutral detergent fibre (NDF)	3,8 ^b	3,8 ^b	5,3 ^a	3,9	4,7	1,2	< 0,001	0,036	0,136
Acid detergent fibre (ADF)	1,4 ^b	1,4 ^b	2,3 ^a	1,5	1,8	0,52	< 0,001	0,016	0,071
Hemicelluloses (NDF-ADF)	2,4 ^b	2,4 ^b	3,1 ^a	2,5	2,8	0,70	0,003	0,131	0,288
Cellulose (ADF-ADL)	1,3 ^b	1,4 ^b	2,1 ^a	1,4	1,8	0,49	< 0,001	0,002	0,046
Amidon	14,3 ^a	11,8 ^{ab}	10,8 ^b	14,8	18,2	4,42	0,011	0,009	0,667

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b,c} : Pour la même ligne les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.2. Anatomie descriptive des compartiments digestifs

La photo 17 présente une vue d'ensemble du tube digestif de l'aulacode en croissance et les images de la photo 18 représentent les compartiments digestifs au sevrage (40 jours d'âge), à 82 jours et 103 jours d'âge.

L'estomac de l'aulacode est uniloculaire avec deux parties : la partie la plus volumineuse correspond au fundus et la moins volumineuse, rattachée à l'intestin grêle, correspond à l'antrum. L'intestin grêle représente la partie la plus longue du tube digestif avec 119 ± 15 cm (longueur \pm écart-type) contre 85 ± 12 cm pour le côlon total, tous âges confondus ($P < 0,001$, test de Student). Le caecum comprend trois parties : une large base, un corps avec des haustrations et un apex. L'apex qui est l'extrémité libre, est dépourvu d'appendice vermiforme ce qui constitue une différence anatomique majeure par rapport au caecum du lapin. Le caecum présente également deux bandes musculaires du côté ventral sur toute sa longueur. La réduction du diamètre de la base marque le début du côlon qui se divise en deux parties : le côlon proximal et le côlon distal. Le côlon distal se différencie du côlon proximal par la présence de matières fécales dures qui forment des bosselures.

2.3. Paramètres physico-chimique du tube digestif

Les paramètres physico-chimiques du tube digestif des sevrans sont comparés aux animaux plus âgés dans le tableau 22. Les effets de l'âge et du régime sont présentés dans les tableaux 23, 24 et 25 pour les animaux euthanasiés à 82 et 103 jours. En l'absence de données dans la littérature relatives aux mensurations viscérales de l'aulacode jeune, nous avons comparé nos données avec celles de l'aulacode adulte mais aussi avec celles du lapin.



Photo 17. Vue d'ensemble du tube digestif de l'aulacode en croissance.



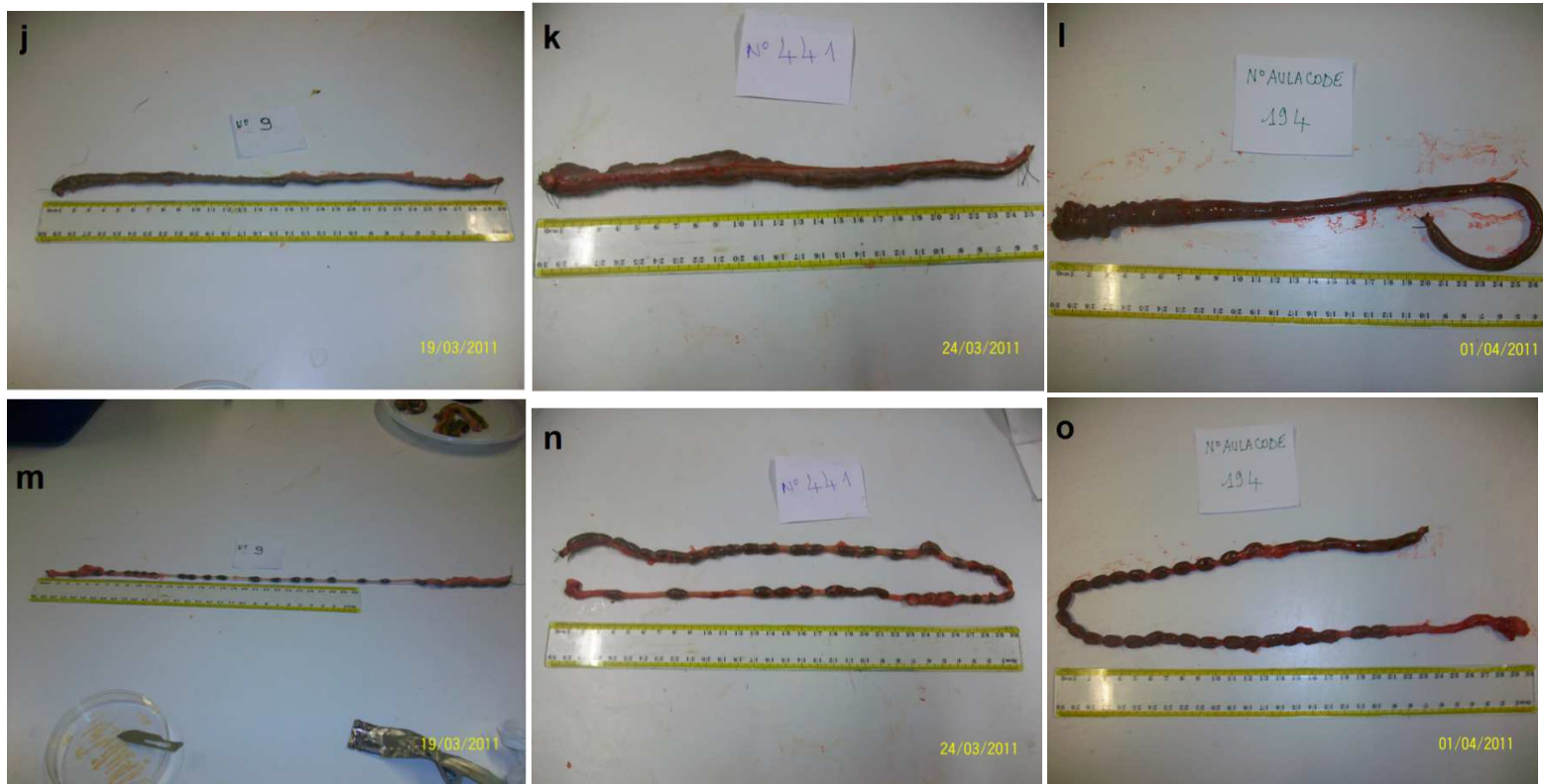


Photo 18. Développement des compartiments digestifs de l'aulacode suivant l'âge: **a,b,c** estomac (40 , 82, 103 jours d'âge) ; **d,e,f** caecum (40 , 82, 103 jours d'âge) ; **g,h,i** intestin grêle (40 , 82, 103 jours d'âge) ; **j,k,l** côlon proximal (40 , 82, 103 jours d'âge) ; **m,n,o** côlon distal (40 , 82, 103 jours d'âge)

2.3.1. Comparaison des paramètres physico-chimiques du tube digestif entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours

Dans la mesure où les sevrans ne recevaient pas d'aliment expérimental avant euthanasie mais étaient nourris de fourrage et de maïs grain avec leur mère, il n'est pas possible de préciser si d'éventuelles différences entre eux et les animaux de 82 et 103 jours étaient dues à la différence d'âge et statut physiologique ou à la différence entre le régime avant et après sevrage.

Le poids du contenu de tous les compartiments digestifs ainsi que leurs poids vides ont augmenté après sevrage. Lorsque les poids vides des segments digestifs ont été exprimés en % du poids vif, les proportions n'ont pas varié après sevrage, sauf pour le côlon proximal et l'estomac qui ont enregistré chacun une baisse de 25 % de leurs proportions respectives.

Le poids du contenu de l'estomac exprimé en % du poids du contenu digestif total a diminué de moitié après sevrage ($P = 0,011$), passant de 33 à 17 %. La proportion élevée du poids du contenu stomacal par rapport au contenu digestif total au sevrage laisse penser que l'estomac joue probablement un rôle plus important dans la digestion à cet âge qu'après sevrage. La proportion du contenu du côlon proximal en % de la masse digestive totale a eu tendance à augmenter après sevrage ($P = 0,085$). Pour les autres compartiments, la proportion de leur contenu par rapport au contenu digestif total n'a pas varié de façon significative après sevrage. La proportion du poids du contenu caecal par rapport au poids du contenu digestif total a été relativement élevée dès le sevrage. Elle a représenté près de 40 % du contenu digestif total au stade sevrans contre 44 % ensuite, ce qui suggère que le caecum joue un rôle clé dans la digestion chez l'aulacode depuis le stade sevrage.

Les pH des contenus des différents segments digestifs n'ont pas varié de façon significative après sevrage sauf au niveau du côlon proximal où le pH du contenu a baissé légèrement passant de 6,6 à 6,4 du stade sevrans aux animaux de 82 et 103 jours.

Chez le lapin en croissance, il a été observé une augmentation du poids du contenu des différents segments digestifs ainsi que l'augmentation de leur poids vide avec l'augmentation d'âge de 5 à 11 semaines (Lebas et Laplace 1972 ; Lebas et al., 1982) comme c'est le cas dans notre présente étude. Cette augmentation du poids des tissus des compartiments digestifs et de

leurs contenus avec l'âge traduit à l'évidence un développement des organes digestifs pour des animaux qui n'avaient pas encore atteint l'âge adulte.

2.3.2. Effets du régime et de l'âge sur les animaux de 82 et 103 jours

2.3.2.1. Poids du tube digestif

Le poids du tube digestif plein a augmenté ($P < 0,001$) de 118 à 174 g du régime le moins fibreux (NB) au plus fibreux (NH), ce qui représente une hausse de poids de 47 %. Il a augmenté de 45 % avec l'âge ($P < 0,001$), passant de 123 à 180 g de 82 à 103 jours d'âge. Lorsque le poids du tube digestif plein est exprimé en % du poids vif de l'animal, l'effet fibre a été une tendance ($P = 0,06$) mais l'effet âge n'a plus été observé. Le poids du tube digestif a représenté de 15,5 à 18 % du poids vif des animaux.

Le poids du contenu digestif a augmenté de 50 % du régime NB au régime NH ($P < 0,001$) et de 30 % de 82 à 103 jours d'âge ($P < 0,001$). Lorsque le poids du contenu digestif a été exprimé en % du poids vif, cette proportion a augmenté avec la hausse du niveau de fibres dans l'aliment ($P = 0,015$) et diminué avec l'augmentation en âge des animaux ($P < 0,002$). Le poids du contenu a représenté entre 10,4 et 12,5 % du poids vif des animaux.

A titre comparatif, le poids du tube digestif plein de l'aulacode adulte exprimé en % du poids vif de l'animal est de 10 % (Van Zyl et al., 2005). Chez le lapin, les études de Lebas et al. (1982) ont montré que le poids du tube digestif plein et celui de son contenu exprimés en % du poids vif de l'animal diminuent avec l'âge. Le poids du tube digestif plein du lapin a diminué en moyenne de 21 à 16 % du poids vif de l'animal et celui du contenu digestif de 11,3 à 8,5 % du poids vif, de 56 à 77 jours d'âge. Cependant, ces proportions n'ont pas varié de façon significative lorsque le taux de cellulose brute a augmenté de 11 à 25 % (par rapport au produit brut) dans l'aliment.

Tableau 22. Comparaison des paramètres physico-chimiques du tube digestif entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours

	Sevrans	Animaux de 82 et 103 jours	Test de Student	
			<i>t</i>	<i>P</i>
Estomac				
pH antrum	2,05	1,98	-0,02	0,98
pH fundus	2,22	2,20	-0,23	0,82
Contenu (g)	17,1	24,3	2,31	0,025
Contenu (% du contenu du TD)	32,9	16,8	-2,66	0,011
Poids vide (g)	3,5	5,6	3,25	0,002
Poids vide (% du poids vif)	0,8	0,6	-3,12	0,003
MS (%)	nd	23,3	-	-
Intestin grêle				
pH	6,88	6,60	-1,35	0,18
Contenu (g)	8,0	18,1	3,45	0,001
Contenu (% du contenu du TD)	16,8	18,4	0,68	0,50
Poids vide (g)	10,1	19,3	4,36	< 0,001
Poids vide (% du poids vif)	2,4	2,2	-0,78	0,438
MS (%)	17,0	20,0	1,08	0,286
Caecum				
pH	6,08	6,14	0,72	0,473
Contenu (g)	20,1	43,7	4,44	< 0,001
Contenu (% du contenu du TD)	39,3	43,8	1,29	0,204
Poids vide (g)	4,8	9,2	2,97	0,005
Poids vide (% du poids vif)	1,1	1,0	-0,85	0,399
MS (%)	19,0	21,0	0,62	0,537
Côlon proximal				
pH	6,63	6,37	-2,24	0,031
Contenu (g)	4,5	11,4	2,30	0,026
Contenu (% du contenu du TD)	8,5	13,1	1,77	0,085
Poids vide (g)	5,1	8,0	2,33	0,025
Poids vide (% du poids vif)	1,2	0,9	-2,77	0,008
MS (%)	nd	22,7		
Côlon distal				
Contenu (g)	2,0	5,6	2,73	0,009
Contenu (% du contenu du TD)	5,5	5,7	0,19	0,849
Poids vide (g)	2,9	4,9	2,72	0,009
Poids vide (% du poids vif)	0,7	0,6	-1,47	0,148

TD : tube digestif, MS : matière sèche, nd : non déterminé

t : écart entre sevrans et animaux de 3 mois

2.3.2.2.Poids des compartiments digestifs

Le poids de l'estomac plein a représenté 19 à 23 % du poids du tube digestif plein. Cette proportion n'a pas varié de façon significative avec le régime et l'âge. Son contenu a augmenté de 34 % du régime NB au régime NH ($P = 0,027$). Exprimé en % du contenu du tube digestif, le poids du contenu de l'estomac a représenté entre 23 à 27 % du poids du contenu digestif total mais cette proportion n'a pas varié de façon significative avec l'âge et le régime.

Le poids de l'intestin grêle plein a représenté entre 23 et 27 % du poids du tube digestif. Cette proportion a diminué ($P = 0,015$) de 12 % du régime NB au régime NH. Il n'y a pas eu d'effet significatif de l'âge sur cette variable. Le poids du contenu intestinal a augmenté avec la hausse du niveau de fibres dans les régimes ($P < 0,001$), mais lorsqu'il a été exprimé en % du poids du contenu digestif, l'effet régime n'a plus été observé. Par ailleurs, l'analyse du contenu de l'intestin grêle a révélé une interaction entre le régime et l'âge. Cette interaction s'explique par le fait qu'à 82 jours d'âge, le contenu de cet organe était similaire pour les trois régimes. Il était de 12,5, 12,5 et 15,9 g respectivement pour les régimes NB, NM et NH. Mais à 103 jours d'âge, le contenu de l'intestin grêle avait pratiquement doublé pour les régimes NM et NH alors qu'il n'a augmenté que de 20 % pour le régime NB. Les contenus étaient alors de 15,6, 25,7 et 25,9 g respectivement avec les régimes NB, NM et NH.

Concernant le caecum, le poids de l'organe plein exprimé en % de le poids du tube digestif plein n'a pas varié avec le régime ni avec l'âge. Cependant, le régime a eu pour effet d'augmenter ($P = 0,006$) son contenu de 37 % du régime NB au régime NH. Son contenu a également augmenté de 34 % entre 82 à 103 jours d'âge ($P < 0,001$). Mais, lorsque le poids du contenu a été exprimé en % de le poids du contenu digestif total, aucun effet régime et âge n'a été observé. Le poids du contenu du caecum a représenté entre 42 et 46 % du poids du contenu digestif total.

Quant au côlon proximal, le poids de son contenu a augmenté ($P = 0,002$) de 60 %, de l'aliment NB à l'aliment NH. Même lorsque ce poids a été exprimé en % du poids du contenu digestif total, l'effet régime a été toujours observé ($P = 0,012$). Le poids du contenu du côlon proximal a représenté entre 8,6 et 14,3 % du poids du contenu digestif total. Enfin, le poids du contenu du côlon distal a représenté entre 5,5 et 6 % du poids du contenu digestif total. Cette proportion n'a pas varié avec le régime ni avec l'âge.

Chez le lapin en croissance, Lebas et al. (1982) n'a pas observé d'effet significatif du régime sur le contenu des compartiments digestifs lorsqu'ils ont étudié différents niveaux de fibres dans l'aliment (11 à 25 % de cellulose brute) à l'exception du contenu caecal qui a augmenté de 19 % avec la hausse du niveau de fibres. Mais l'effet régime observé dans notre étude sur les masses des compartiments digestifs et leurs contenus ne peut pas être attribué de façon exclusive à l'effet des fibres puisque nos rations pauvres en fibres étaient également pauvres en protéines brutes. De plus les teneurs en fibres étaient plus faibles dans nos régimes expérimentaux que dans ceux utilisés par Lebas et al. (1982).

Les données enregistrées sur les compartiments digestifs et leurs contenus ont révélé que le poids du contenu caecal de l'aulacode représentait en moyenne plus de 40 % du poids du contenu digestif total, ce qui rappelle des résultats similaires chez le lapin et le cobaye. En effet, chez le lapin il a été montré que le poids du contenu caecal s'accroît linéairement de 2 à 5 semaines d'âge pour devenir le plus important compartiment digestif vers 5-6 semaines d'âge avec 40 % du poids du contenu digestif total (Gidenne et al., 2008). Chez le cobaye il a été signalé que le poids du contenu caecal représente en moyenne 65 % du poids du contenu digestif total (O'Malley, 2005). Vu le rôle important joué par le caecum dans la digestion chez le lapin et le cobaye, l'on peut s'attendre à ce que le caecum joue un rôle également important dans la digestion chez l'aulacode.

Le passage de l'aliment NB à NH correspondait à un doublement du taux d'ADF. Cette hausse a occasionné une augmentation de la proportion du poids du contenu du côlon proximal par rapport au poids du contenu digestif total de 66 % tandis que les proportions des contenus des autres sections du tube digestif n'ont pas varié de façon significative. Ce résultat peut signifier une plus forte sollicitation du côlon proximal lors d'une hausse du niveau de fibres dans la ration alimentaire. Il a été en effet démontré chez le cobaye (Sperber et al., 1983 ; Sakaguchi, 2003) et le lapin (Björnhag (1972) le rôle très particulier joué par le côlon proximal en complément de celui du caecum dans la digestion des fibres alimentaires.

2.3.2.3. Poids vides des compartiments digestifs

Les poids vides des compartiments digestifs ont augmenté avec l'augmentation du niveau de fibres dans l'aliment à l'exception du poids de l'intestin grêle qui n'a pas varié de façon significative. Ainsi, du régime NB au régime NH, le poids vide de l'estomac a augmenté de

4,9 à 6,8 g et celui du caecum de 7,6 à 11,1 g. Les poids vides du côlon proximal et du côlon distal ont augmenté respectivement de 6,3 à 9,1 g et 4,5 à 5,9 g. Les poids vides de tous ces compartiments digestifs ont également augmenté de 82 jours à 103 jours d'âge. Par contre, lorsque ces poids étaient exprimés en % du poids vif de l'animal, les effets régime et âge n'étaient plus observés sauf pour l'estomac où les deux effets étaient conservés et le côlon distal pour lequel seul l'effet âge était conservé. Les travaux de Lebas et al. (1982) n'ont pas permis d'observer chez le lapin un effet de la teneur en fibres du régime sur les poids des tissus des segments digestifs, contrairement à notre étude, peut-être parce que dans l'étude de Lebas et al. (1982), seul le niveau de fibres a varié entre les régimes expérimentaux.

Toutefois, les résultats de notre étude ont montré que le caecum, qui renferme par ailleurs la plus grande part (40 %) du contenu digestif, possède un poids vide relativement faible par rapport à celui de l'intestin grêle. Le faible poids du caecum vide pourrait s'expliquer par le fait que sa sous muqueuse est très fine comparée à celle de l'intestin grêle. Les travaux de Van Zyl et al. (2005) ont montré en effet que le corps du caecum possède une sous muqueuse avec une épaisseur inférieure à 20µm alors que le jéjunum, la partie la plus longue de l'intestin grêle, a une sous muqueuse d'épaisseur voisine de 60µm.

2.3.2.4. Teneur en matière sèche du contenu des compartiments digestifs

Pour le même compartiment digestif, le taux de MS du contenu n'a pas varié de façon significative avec le régime et l'âge. Le taux de MS du contenu stomacal est en moyenne de 23%, et celui de l'intestin grêle est situé entre 18 et 21 %. Le contenu caecal présente un taux de MS entre 19 et 23 %, contre 21 à 27 % pour le côlon proximal. Le côlon distal, qui contient les crottes dures, a eu un taux de MS relativement élevé, compris entre 30 et 44 %.

A titre de comparaison, chez l'aulacode adulte, Van Zyl et Delpont (2010) ont observé des taux de MS variant de 15 à 25 % pour l'estomac, 10 à 17 % pour l'intestin grêle, 15 à 30 % pour le caecum, 15 à 18 % pour le côlon proximal et 22 à 37 % pour le côlon distal avec un régime à base de fourrages complétement avec un aliment granulé de lapin. Chez le lapin, le taux de MS est de 16 à 21 % dans l'estomac, 7 % dans l'intestin grêle, 20 à 24 % dans le caecum, 20 à 25 % dans le côlon proximal et 20 à 40 % dans le côlon distal (Lebas et al, 1996). Le taux de MS du contenu de l'intestin grêle obtenu dans le cadre de notre étude reste néanmoins élevé par rapport à la valeur observée chez le lapin

2.3.2.5. pH du contenu des compartiments digestifs

Le pH du contenu stomacal, très bas, n'a pas varié de façon significative avec le régime et l'âge. Ainsi, le pH dans le fundus a été compris entre 1,9 à 2,1 et celui de l'antrum entre 2,1 à 2,4, mais il n'y pas de différence significative ($P = 0,17$) entre ces 2 sites. Le pH du contenu de l'intestin grêle a été légèrement acide. Il a eu tendance à varier avec le régime ($P = 0,09$) allant de 6,5 à 6,8 de NB à NH. L'âge n'a eu aucun effet sur le pH du contenu de l'intestin grêle. Le pH du contenu caecal a été légèrement acide. Il n'a pas varié avec le régime mais, il a augmenté légèrement avec l'âge ($P = 0,009$) passant de 5,9 à 6,1 de 82 à 103 jours d'âge. Quant au côlon proximal, le pH de son contenu a baissé ($P = 0,013$) du régime NB au régime NH, passant de 6,5 à 6,2. L'âge n'a pas eu d'effet sur le pH de ce contenu.

Le pH du contenu stomacal était très acide par rapport aux contenus des autres segments du tube digestif comme précédemment observé par Van Zyl et *al.* (2005) chez l'aulacode adulte. L'acidité élevée dans cette portion du tube digestif devrait naturellement empêcher les fermentations microbiennes, ce qui suggère que la digestion dans l'estomac est essentiellement assurée par les enzymes sécrétées par les glandes gastriques telles que la pepsine comme observé chez le cobaye et le lapin (Yu et al., 2000). L'acidité du digesta de l'estomac est ensuite neutralisée au niveau du duodénum avant le transit dans l'intestin grêle. La neutralisation de l'acidité du chyme stomacal est assurée par les sécrétions alcalines des glandes de Brunner situées dans la sous-muqueuse du duodénum de l'aulacode (Van Zyl et al., 2005), comme observé chez d'autres herbivores monogastriques (Carleton et Leach 1950). En conséquence, le pH de l'intestin grêle était proche de la neutralité, ce qui est favorable à la fois à l'activité des enzymes et à d'éventuelles fermentations microbiennes. Dans cette étude, le caecum qui représente la majeure partie (40 %) du contenu digestif total a présenté une valeur de pH de 5,9 à 6,1, compatible avec les fermentations microbiennes. Ceci suggère donc que le caecum est le principal site d'activité microbienne de l'aulacode, comme observé chez d'autres herbivores monogastriques, tels que le cobaye (Sakaguchi et al., 1985) ou le lapin (Gidenne, 1986).

Tableau 23. Poids des compartiments digestifs et de leurs contenus en fonction de l'âge et du régime.

	Régime			Age (j)		ETR	Régime	Valeur de P	
	NB	NM	NH	82	103			Age	Régime x Age
Poids du tube digestif (TD)									
Poids plein (g)	118,1 ^b	162,4 ^a	174,0 ^a	123,3	179,8	28,6	< 0,001	< 0,001	0,135
Poids plein (% du PV)	15,5	17,4	18,0	18,0	16,7	3,15	0,06	0,225	0,266
Contenu (g)	79,6 ^c	97,9 ^b	121,2 ^a	85,4	113,8	18,35	< 0,001	< 0,001	0,941
Contenu (% PV)	10,4 ^b	11,4 ^{ab}	11,6 ^a	12,5	10,5	1,71	0,015	0,002	0,466
Estomac									
Poids plein (% du poids du TD)	22,7	18,7	19,6	21,4	19,7	5,73	0,241	0,395	0,398
Contenu (g)	21,1 ^b	23,4 ^{ab}	28,4 ^a	21,5	27,1	6,37	0,027	0,014	0,696
Contenu (% du contenu du TD)	26,9	24,5	22,6	25,3	24,6	6,63	0,424	0,757	0,846
Intestin grêle									
Poids plein (% du poids du TD)	26,6 ^a	24,1 ^{ab}	23,2 ^b	24,2	24,9	2,68	0,015	0,345	0,048
Contenu (g)	14,0 ^b	19,1 ^a	20,9 ^a	13,7	22,8	4,25	< 0,001	< 0,001	0,024
Contenu (% du contenu du TD)	18,7	19,5	17,0	16,2	20,8	4,18	0,322	0,002	0,022
Caecum									
Poids plein (% du poids du TD)	37,8	37,9	35,7	35,9	38,3	6,84	0,692	0,292	0,440
Contenu (g)	36,8 ^b	43,7 ^{ab}	50,7 ^a	37,6	50,7	9,85	0,006	< 0,001	0,529
Contenu (% du contenu du TD)	45,8	43,6	42,1	44,0	43,7	7,8	0,514	0,894	0,471
Côlon proximal									
Poids plein (% du poids du TD)	10,4 ^b	12,6 ^{ab}	13,6 ^a	11,5	13,0	3,03	0,046	0,210	0,883
Contenu (g)	6,2 ^b	12,7 ^a	14,8 ^a	8,0	15,0	5,56	0,002	< 0,001	0,529
Contenu (% du contenu du TD)	8,6 ^b	16,4 ^a	14,3 ^a	10,8	15,2	5,15	0,012	0,07	0,532
Côlon distal									
Poids plein (% du poids du TD)	6,8	6,9	7,2	7,4	6,5	2,27	0,906	0,254	0,271
Contenu (g)	3,9	6,2	6,4	4,9	6,3	3,06	0,132	0,208	0,924
Contenu (% du contenu du TD)	5,5	6,0	5,5	5,2	6,3	1,80	0,815	0,123	0,252

ETR : Écart-type résiduel ; PV : poids vif, TD : tube digestif

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

Tableau 24. Poids vides des compartiments digestifs en fonction de l'âge et du régime.

	Régime			Age (j)		Valeur de P			
	NB	NM	NH	82	103	ETR	Régime	Age	Régime x Age
Estomac									
Poids vide (g)	4,9 ^b	5,0 ^b	6,8 ^a	4,7	6,5	0,86	< 0,001	< 0,001	0,428
Poids vide (% du PV)	0,6 ^b	0,6 ^b	0,7 ^a	0,7	0,6	0,09	0,041	0,011	0,941
Intestin grêle									
Poids vide (g)	17,9	19,8	20,0	15,9	22,8	3,70	0,333	< 0,001	0,683
Poids vide (% du PV)	2,4	2,3	2,0	2,3	2,1	0,35	0,089	0,121	0,818
Caecum									
Poids vide (g)	7,6 ^b	8,9 ^{ab}	11,1 ^a	6,8	11,6	2,37	0,004	< 0,001	0,096
Poids vide (% du PV)	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	0,27	0,475	0,580	0,394
Côlon proximal									
Poids vide (g)	6,3 ^b	8,4 ^{ab}	9,1 ^a	6,5	9,6	2,27	0,016	< 0,001	0,171
Poids vide (% du PV)	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,22	0,472	0,531	0,327
Côlon distal									
Poids vide (g)	4,5 ^b	4,3 ^b	5,9 ^a	4,3	5,6	1,43	0,021	0,008	0,264
Poids vide (% du PV)	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,13	0,154	0,042	0,046

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

Tableau 25. Taux de MS et pH du contenu des compartiments digestifs, en fonction du régime ou de l'âge.

	Régime			Age (j)		Valeur de P			
	NB	NM	NH	82	103	ETR	Régime	Age	Régime x Age
Estomac									
Taux de MS (%)	23,7	23,0	23,0	23,3	23,3	0,03	0,842	0,895	0,469
pH fundus	1,9	1,9	2,1	1,9	2,1	0,62	0,591	0,403	0,356
pH antrum	2,1	2,0	2,3	2,1	2,4	0,72	0,230	0,252	0,755
Intestin grêle									
Taux de MS (%)	20,2	18,2	20,6	20,4	18,9	0,05	0,503	0,360	0,977
pH	6,5	6,5	6,8	6,6	6,6	0,43	0,093	0,858	0,898
Caecum									
Taux de MS (%)	23,2	18,7	21,4	22,3	19,7	0,09	0,527	0,454	0,240
pH	6,1	6,0	6,0	5,9	6,1	0,24	0,559	0,009	0,198
Côlon proximal									
Taux de MS (%)	26,6	21,0	21,6	23,8	21,7	0,06	0,191	0,407	0,344
pH	6,5 ^a	6,4 ^{ab}	6,2 ^b	6,3	6,4	0,23	0,013	0,136	0,405
Côlon distal									
Taux de MS (%)	43,8	29,7	36,3	41,1	33,7	0,10	0,232	0,142	0,773

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.4. Etude de l'activité fermentaire du caecum

Les paramètres fermentaires du contenu caecal ont été comparés entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours (Tableau 26). Ces mêmes paramètres ont été analysés en fonction du régime et de l'âge (Tableau 27).

2.4.1. Comparaison du profil fermentaire entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours

La concentration en $\text{NH}_3\text{-N}$ n'a pas varié de façon significative après sevrage. Quant à la concentration en AGV totaux, elle a baissé de 22 % après sevrage ($P < 0,001$). La différence observée entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours pour la concentration en AGV totaux ne peut pas être attribuée de façon exclusive à l'effet de l'âge, ces deux catégories d'animaux n'ayant pas eu la même alimentation. Chez le lapin, les concentrations en AGV totaux connaissent, en général, une augmentation du sevrage (30 à 70 mmol/L) à 10 semaines d'âge (80 à 130 mmol/L) (Bellier et al., 1995 ; Piattoni et al., 1996 ; Bennegadi et al., 2004). Toutefois, la variation de la concentration en AGV en fonction de l'âge peut dépendre de certains facteurs comme les modalités de conduite alimentaire, en particulier du niveau d'ingestion d'aliments solides avant sevrage, qui lui-même peut dépendre de l'âge au sevrage. Xiccato et al. (2001) ont par exemple montré qu'un sevrage précoce à 21 jours d'âge stimulait l'ingestion d'aliment solide et donc stimulait les fermentations caecales par rapport à un sevrage à 25 ou 28 jours d'âge. Ainsi, à 32 jours d'âge, les animaux sevrés à 21 jours présentaient une concentration en AGV plus élevée que ceux sevrés à 25 ou 28 jours d'âge.

Les proportions d'acides acétique et butyrique ont augmenté de 4 et 3% respectivement après le sevrage alors que l'acide propionique a connu au contraire une baisse de 8 %. Le ratio propionate / butyrate a connu une baisse (de moitié) après sevrage en raison des effets combinés de la baisse de la concentration en acide propionique et de l'augmentation de celle de l'acide butyrique. Les sens de variation des proportions des AGV caeaux observés entre sevrans et animaux de 82 ou 103 jours chez l'aulacode sont conformes avec ce qui est observé chez le lapin. Ainsi, Piattoni et al. (1996) ont observé chez le lapin une baisse de 50 % de la proportion d'acide propionique entre le sevrage et 56 jours d'âge alors que la proportion d'acide butyrique doublait entre ces deux périodes. Tout comme dans notre étude, cet auteur n'a pas observé de variation de la concentration d'ammoniac entre ces deux périodes.

Tableau 26. Comparaison des paramètres fermentaires entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours

Paramètres fermentaires	Sevrans	Animaux de 82 et 103 jours	Test de Student	
			<i>t</i>	<i>p</i>
NH ₃ -N (mmol/l)	13,7	11,0	-1,37	0,176
AGV totaux (mmol/l)	123,1	95,1	-4,12	< 0,001
Acide acétique (%)	71,5	75,5	2,09	0,043
Acide propionique (%)	23,5	15,5	-6,59	< 0,001
Acide butyrique (%)	4,0	7,3	1,79	0,081
Ratio propionate/butyrate	6,0	2,6	-3,82	< 0,001

2.4.2. Etude de la variation du profil fermentaire en fonction du régime et de l'âge sur les animaux de 82 et 103 jours

La concentration en AGV totaux a diminué de 13 % ($P = 0,003$) entre 82 et 103 jours d'âge (103 à 89 mmol/l), et coïncide avec l'augmentation du pH caecal observé entre 82 et 103 jours d'âge (Tableau 27). Le régime n'a pas eu d'effet significatif sur ces concentrations en AGV totaux.

L'acide acétique a représenté entre 73 et 78 % des AGV totaux. Cette proportion a augmenté de 74 à 77 % des AGV totaux du régime NB à NH. Par contre, l'âge n'a pas eu d'effet significatif sur la proportion de l'acide acétique. L'analyse statistique a révélé une interaction significative entre les facteurs régime et âge pour la proportion d'acide acétique. Cette interaction est liée au fait que les valeurs les plus basses étaient observées avec le régime NB à 82 jours mais avec le régime NM à 103 jours (Figure 22).

L'acide propionique a représenté entre 15 et 16 % des AGV totaux. Sa proportion n'a pas varié avec l'âge ni avec le régime. Quant à l'acide butyrique, sa proportion a baissé avec l'augmentation du niveau de fibres dans le régime ($P = 0,013$), passant de 8,6 à 5,2 % des AGV totaux. Sa proportion n'a pas varié entre 82 et 103 jours d'âge.

Par ailleurs, le ratio acide propionique / acide butyrique a augmenté avec la hausse du niveau de fibres dans le régime ($P = 0,034$). Il a par contre eu tendance à diminuer entre 82 et 103 jours ($P = 0,065$). Ce ratio a varié entre 2,1 et 3,5 en fonction du régime et entre 2,2 et 3,1 selon l'âge.

Les concentrations en AGV totaux observées dans cette étude chez l'aulacode en croissance (en moyenne 85 $\mu\text{moles/g}$ matière fraîche caecale) ont été approximativement le double de celles enregistrées chez le cobaye adulte. Yu et *al.* (2000) ont en effet observé une concentration en AGV totaux de 41 mmoles/kg de matière fraîche caecale chez le cobaye adulte. Mais, elles sont du même ordre que celles obtenues chez le lapin en croissance (Combes et al., 2011).

Comme les concentrations moyennes en AGV caecaux chez l'aulacode sont aussi élevées que chez le lapin et plus élevées que chez le cobaye, on peut penser que les AGV pourraient contribuer à la couverture d'une grande part des besoins en énergie de cet animal, comme c'est le cas chez le lapin et le cobaye. Par exemple, il a été montré que les AGV pouvaient couvrir entre 30 à 50 % des besoins énergétiques d'entretien des lapins adultes (Parker, 1976 ; Marty et Vernay, 1984 ; Gidenne, 1994).

Dans notre étude, la concentration en AGV totaux n'a pas varié de façon significative en fonction du régime. En revanche, la proportion de l'acide acétique a augmenté (de 4 %) et celle de l'acide butyrique a diminué (de 3 %) avec la hausse du ratio PD/ED dans l'aliment. Ce résultat est cohérent avec les observations faites chez le lapin. En effet, il a été montré chez le lapin que l'intensité des fermentations caecales n'était pas limitée par la teneur en fibres, mais dépendait d'avantage de leur nature. En revanche, la baisse de la teneur en fibres du régime agirait plus clairement sur l'orientation des fermentations, avec pour effet majeur d'élever la proportion molaire de butyrate (Gidenne, 1996).

Le profil des AGV caecaux observé chez l'aulacode dans cette étude (plus de 70 % pour l'acétate, autour de 15 % pour le propionate et un peu plus de 5 % pour le butyrate), avec un ratio acide propionique / acide butyrique supérieur à 1 est proche de celui signalé chez le cobaye (Henning et Hird 1970). Chez le lapin ce ratio propionate / butyrate est clairement inférieur à 1 après le sevrage et chez l'adulte (Hoover et Heitman, 1972 ; Gidenne, 1986). Cette caractéristique rapproche donc davantage la physiologie digestive de l'aulacode de celle du cobaye que de celle du lapin.

La concentration en NH₃-N a eu tendance à augmenter ($P = 0,072$) du régime NB au régime NH, probablement en raison de la hausse du niveau de protéines digestibles simultanément avec le niveau de fibres. Elle a par contre baissé de 32 % de 82 jours à 103 jours d'âge, passant de 13,1 à 8,9 mmol/l ($P < 0,001$). Ces concentrations en NH₃-N observées chez l'aulacode sont proches de celles enregistrées par Combes et al. (2011) pour le lapin en croissance (18 à 14 mmol/l).

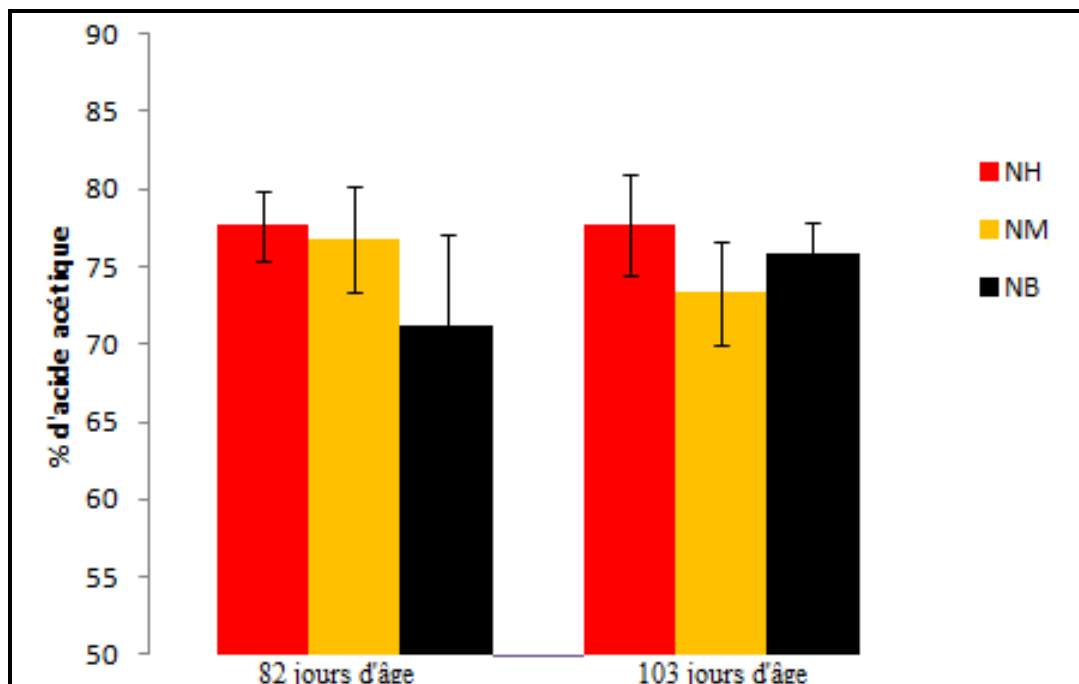


Figure 22. Proportion d'acide acétique en fonction du régime et de l'âge, dans le caecum de l'aulacode.

Tableau 27. Profil fermentaire en fonction de l'âge et du régime

	Régime			Age (j)		ETR	Valeur de P		
	NB	NM	NH	82	103		Régime	Age	Régime x Age
NH3-N (mmol/l)	9,9	10,2	12,9	13,1	8,9	3,44	0,072	< 0,001	0,195
AGV totaux (mmol/l)	92,4	94,7	98,5	102,5	88,5	15,86	0,523	0,003	0,731
Acide acétique (%)	73,8 ^b	75,1 ^{ab}	77,6 ^a	75,5	75,6	3,46	0,034	0,848	0,031
Acide propionique (%)	15,7	15,3	15,5	16,1	14,9	2,40	0,947	0,141	0,366
Acide butyrique (%)	8,6 ^a	7,9 ^{ab}	5,2 ^b	6,5	7,9	2,76	0,013	0,200	0,107
Ratio C ₃ / C ₄	2,1 ^a	2,3 ^a	3,5 ^b	3,1	2,2	1,31	0,034	0,065	0,708

ETR : Écart-type résiduel.

^{a,b,c} : Pour la même ligne et pour le même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

2.5. Caractérisation du microbiote caecal

2.5.1. Description générale des résultats de l'analyse des communautés bactériennes caecales

Quarante échantillons du contenu caecal issus de 7 groupes d'animaux ont été analysés dans cette étude. Les numéros attribués aux échantillons ainsi que l'âge et le régime correspondants sont indiqués dans le tableau 28. Pour les sevrans, 2 échantillons ont été éliminés de l'analyse en raison de taux de matière sèche de contenu caecal anormalement bas.

Tableau 28. Liste des échantillons analysés pour la caractérisation du microbiote caecal

Groupes	Age (en jours)	Régimes alimentaires	Nombre d'échantillons
1	40	Fourrage vert + maïs grain	4
2	82	NB	6
3	82	NM	6
4	82	NH	6
5	103	NB	6
6	103	NM	6
7	103	NH	6

Le séquençage des 40 échantillons a permis d'obtenir 575521 séquences brutes au total. Après "nettoyage" bioinformatique il a permis d'obtenir en moyenne 12218 ± 7758 séquences par échantillon, soit entre 2759 et 28823 séquences par échantillon. Les séquences supprimées au cours de l'étape de nettoyage des séquences brutes ont représenté 12% du nombre total de séquences.

L'affiliation taxonomique a permis d'identifier 407 taxons dans les 40 échantillons analysés. Au total, 13 phyla, 27 classes, 67 ordres, 147 familles et 362 genres ont été identifiés. Le nombre de séquences non assignées à un phylum a représenté près de 4% des séquences

totales contre respectivement 3 ; 4 et 14% pour les niveaux classe, ordre et famille. Les genres identifiés ont représenté 60% des séquences totales.

L'abondance relative des échantillons au niveau phylum a été visualisée à l'aide d'une figure de type "heatmap" (Figure 23), en utilisant le package gplots du logiciel R ([http:// www.R-project.org](http://www.R-project.org)). Cette méthode a permis de regrouper les 40 échantillons en trois grands groupes: un premier groupe de 8 échantillons caractérisés par une très grande richesse en Firmicutes, un second groupe de 15 échantillons qui se distinguent par une grande richesse en Bacteroidetes et une richesse moyenne en Firmicutes ; et enfin un troisième groupe de 17 échantillons caractérisés par une grande richesse en Firmicutes et une richesse moyenne en Bacteroidetes.

Seuls les échantillons provenant des sevrans (Tableau 28) ont été dans un seul groupe (le second). Les autres échantillons ont été répartis dans les trois groupes. Pour la suite, nous avons donc choisi de comparer, dans une première approche, l'abondance relative des communautés bactériennes caecales entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours considérés ensemble puis, dans une seconde approche, nous avons comparé plus précisément les animaux de 82 et 103 jours entre eux en fonction du régime et de l'âge.

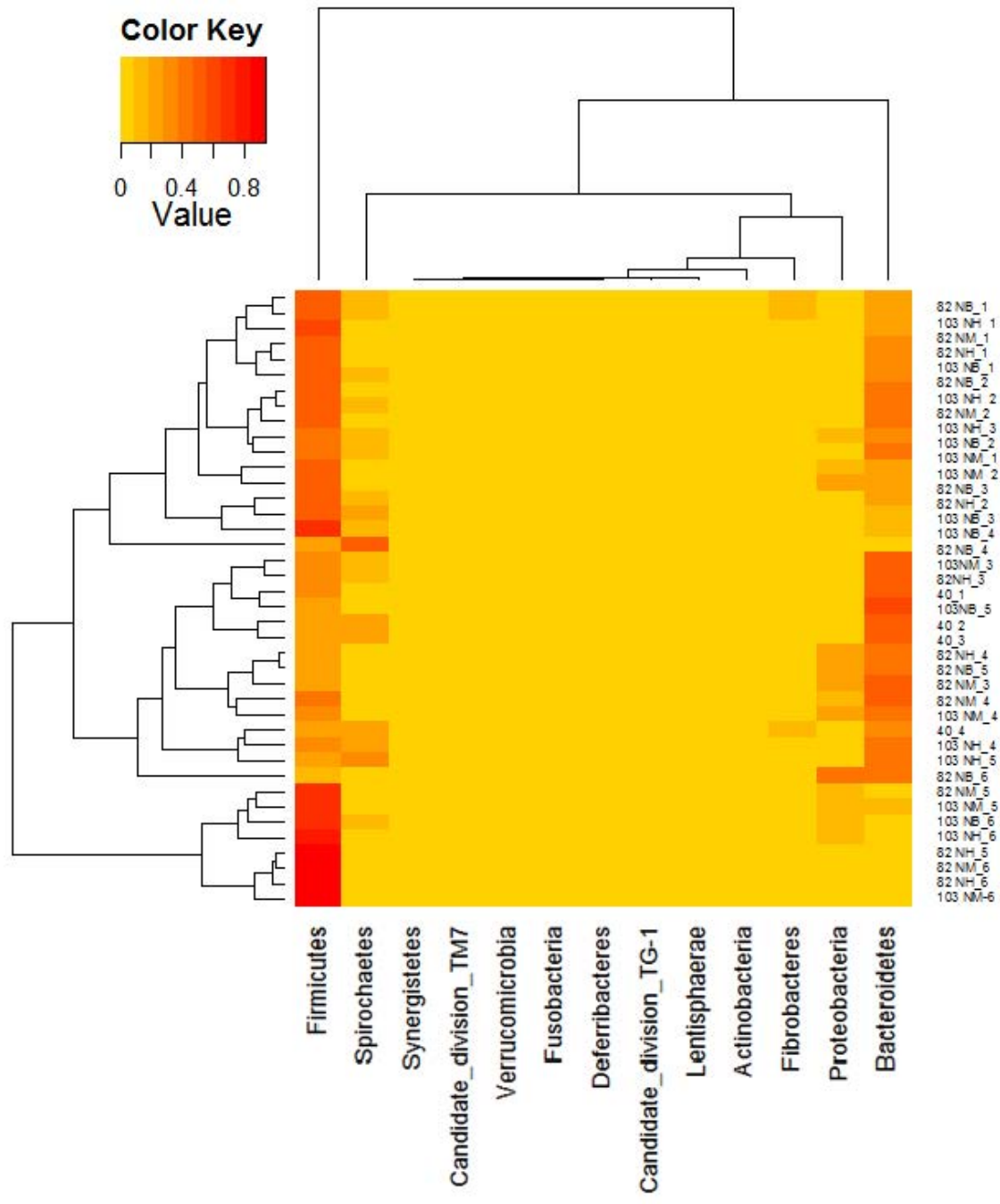


Figure 23. Heatmap et dendrogrammes avec regroupement bidirectionnel montrant l'abondance relative de tous les phyla détectés et les similarités entre les échantillons analysés. Le code de couleur rouge / jaune indique respectivement une haute / basse abondance relative de chaque phylum représenté ici en colonnes.

2.5.2. Comparaison de l'abondance relative des communautés bactériennes entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours

Nous présenterons en détail les résultats relatifs aux niveaux phylum, famille et genres. Les résultats relatifs aux classes et ordres sont présentés dans les annexes 3 à 6.

2.5.2.1. Abondance des phyla bactériens dans le microbiote caecal

Au total, 13 phyla ont été identifiés dans le caecum de l'aulacode (Figure 23). Parmi ces 13 phyla, 6 étaient majoritaires (plus de 1 % d'abondance relative) : Bacteroidetes, Firmicutes, Spirochaetes, Proteobacteria, Fibrobacteres et Actinobacteria. Les phyla majoritaires chez les sevrans et les animaux de 82 et 103 jours sont représentés sur les figures 24 et 25 respectivement et le tableau 29 montre les phyla dont l'abondance relative a différencié entre les deux âges. Les Bacteroidetes et Firmicutes ont représenté plus de 75% des séquences et leurs proportions ont varié avec l'âge.

Les Bacteroidetes étaient deux fois plus abondants chez les sevrans (51%) que chez les animaux de 82 et 103 jours (28%) ($P = 0,042$). A l'inverse, les Firmicutes étaient deux fois plus abondants chez les animaux de 82 et 103 jours (50%) que chez les sevrans (25%). L'abondance relative des quatre autres phyla majoritaires représentés par Spirochaetes, Proteobacteria, Fibrobacteres et Actinobacteria n'a pas varié de façon significative entre les deux stades considérés.

L'analyse phylogénétique des séquences de l'ADNr 16S du microbiote caecal de l'aulacode a ainsi révélé deux informations principales au niveau phylum. La première est que la communauté bactérienne du caecum était majoritairement représentée par les phyla des Bacteroidetes et Firmicutes. La prédominance de ces deux phyla a été également observée chez le lapin à 63 jours d'âge (Massip et al., 2012), avec plus de 90% des séquences appartenant aux phyla des Firmicutes et Bacteroidetes. Monteils et al. (2008) avaient auparavant observé chez le lapin adulte (7 mois d'âge) que plus de 95% des séquences appartenaient à ces deux phyla. Chez le cobaye, Hildebrand et al. (2012) a observé que 43% des séquences appartenaient aux phyla des Firmicutes et Bacteroidetes après séquençage de tous les génomes microbiens.

La deuxième information est que le phylum des Bacteroidetes était plus représenté au sevrage que le phylum des Firmicutes et que la hiérarchie s'est inversée ensuite au stade post-sevrage. La proportion de Bacteroidetes a ainsi baissé avec l'âge. Ce résultat est cohérent avec les observations de Bennegadi et al. (2003) chez le lapin en croissance. Cet auteur a observé que les Bacteroidetes représentaient 42% des séquences totales chez le lapin au sevrage (28 jours d'âge) et que cette proportion diminuait avec l'âge pour atteindre 18% à 42 jours d'âge.

Par ailleurs, le microbiote caecal de l'aulacode semble présenter plus de diversité au niveau des phyla que celui du lapin. En effet, alors que les Bactéroïdètes et Firmicutes constituent plus de 90% des séquences bactériennes chez le lapin (Monteils et al., 2008 ; Massip et al., 2012), ces deux phyla ont représenté moins de 80% des séquences de l'aulacode dans notre étude. En plus de ces deux phyla dominants, le microbiote de l'aulacode a présenté d'autres phyla majoritaires avec des proportions relativement élevées : Spirochaetes (9,5 à 16,9%), Proteobacteria (4,3 à 8,7%), Fibrobacteres (1,6 à 2,2%) et Actinobacteria (0,9 à 1,2%). Chez le lapin à 63 jours d'âge, les Actinobacteria et Proteobacteria ont été détectés à moins de 1% d'abondance relative (Massip et al., 2012). Chez le cobaye les abondances relatives des Proteobacteria, et d'Actinobacteria (exprimée en % des séquences microbiennes) sont proches de celles observées chez l'aulacode dans notre étude, mais l'abondance relative des Spirochaetes chez l'aulacode a été plus élevée que chez le cobaye. En effet, les Proteobacteria, Spirochaetes et Actinobacteria ont été retrouvés chez le cobaye avec des abondances relatives respectives de 9 ; 1,2 et 1% (Hildebrand et al., 2012). Ainsi, une particularité du microbiote caecal de l'aulacode par rapport à ceux du lapin et du cobaye réside dans sa plus grande richesse en Spirochaetes.

Tableau 29. Abondances relatives (%) des phyla ayant varié entre les stades sevrage et post-sevrage

	Sevrans	Animaux de 82 et 103 jours	Test de Student	
			<i>t</i>	<i>P</i>
Bacteroidetes	50,9	27,8	2,10	0,042
Firmicutes	25,3	50,4	2,53	0,015

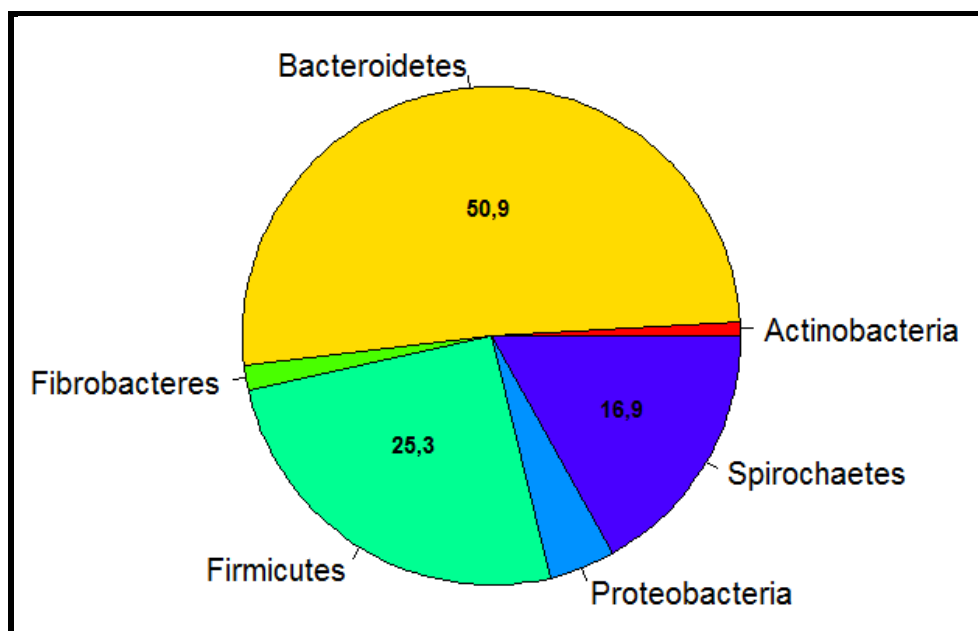


Figure 24. Phyla majoritaires chez l'aulacode au sevrage (sevrons) (% d'abondance relative)

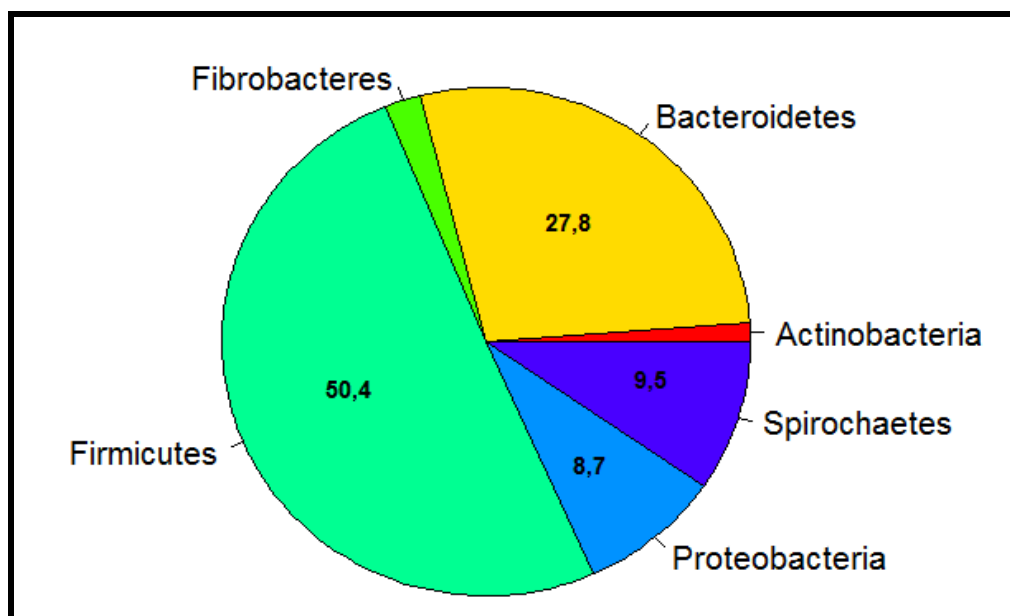


Figure 25. Phyla majoritaires chez l'aulacode de 3 mois (82 et 103 jours, en % d'abondance relative)

2.5.2.2. Abondance des familles bactériennes du microbiote caecal

Les familles majoritaires, ayant une abondance relative supérieure à 1 % sont présentées sur les figures 26 et 27. Elles appartenaient à l'ordre des Bacteroidales avec les *Prevotellaceae* (11,5 à 12,3%), *Rikenellaceae* (3,1 à 9,5%), *Porphyromonadaceae* (9,9 à 2,2% d'abondance relative), à l'ordre des Clostridiales avec les *Lachnospiraceae* (9,7 à 22%), *Ruminococcaceae* (8,2 à 13,7%), *Clostridiaceae* (1,5 à 2,2% d'abondance relative). D'autres familles appartenaient aux ordres des Aeromonadales, Erysipelotrichales, Fibrobacterales et Spirochaetales. Il s'agissait respectivement des *Succinivibrionaceae* (0,9 à 4,1%), *Erysipelotrichaceae* (0,4 à 7,7%), *Fibrobacteraceae* (1,6 à 2,2%) et *Spirochaetaceae* (9,5 à 16,8% d'abondance relative).

Le tableau 30 présente les familles qui ont varié de façon significative entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours. Les *Bacteroidaceae*, *Porphyromonadaceae* et *Rikenellaceae* ainsi qu'une famille non classifiée de l'ordre des Bacteroidales étaient 2 à 4 fois plus représentées chez les sevrans que chez les animaux plus âgés. Parmi les familles mieux représentées chez les sevrans, on compte également *Planococcaceae* de l'ordre des Bacillales, *Mycoplasmataceae* de l'ordre des Mycoplasmatales et une famille non classifiée de l'ordre des Rickettsiales. Les familles *Erysipelotrichaceae*, *Lachnospiraceae* ainsi qu'une famille non identifiée du phylum des Firmicutes étaient respectivement 16, 2 et 3 fois plus abondantes chez les animaux de 82 et 103 jours d'âge que chez les sevrans. Ainsi, les familles plus abondantes chez les sevrans que chez les animaux plus âgés appartenaient au phylum des Bacteroidetes alors que les familles plus abondantes chez les animaux plus âgés appartenaient au phylum des Firmicutes.

Parmi les familles majoritaires présentes au sein de la communauté bactérienne caecale de l'aulacode, deux sont fortement représentées chez le lapin. Il s'agit des familles des *Ruminococcaceae* et *Lachnospiraceae* qui ont été retrouvées dans le caecum du lapin avec des abondances relatives respectives de 45 et 35% (Massip et al., 2012). Ces deux familles sont connues pour leurs espèces fibrolytiques. La famille des *Ruminococcaceae* est connue pour deux de ses espèces, *Ruminococcus albus* et *Ruminococcus flavefaciens*, chez le lapin (Bennegadi et al., 2003). Ces espèces cellulolytiques sont aussi connues pour être particulièrement actives dans le rumen. *Ruminococcus flavefaciens* peut par exemple dégrader des celluloses très cristallines, telles que celles constituant les fibres de coton (Fonty et

Chaucheyras-Durand, 2007). Certaines espèces de la famille des *Lachnospiraceae* (*Butyrivibrio fibrisolvens*, *Butyrivibrio crossotus*) sont connues pour dégrader les fibres telles que les xylanes. Une autre espèce de cette famille (*Lachnospira multipara*) a été décrite comme l'espèce pectinolytique la plus active du rumen (Fonty et Chaucheyras-Durand, 2007). Toutefois, contrairement au lapin chez qui les familles des *Ruminococcaceae* et *Lachnospiraceae* représentent 80% de la communauté bactérienne (Massip et al., 2012), chez l'aulacode, ces deux familles ont été moins représentées (moins de 40% de la communauté bactérienne). Ainsi comme les deux principales familles comprenant des espèces fibrolytiques connues chez le lapin sont moins abondantes chez l'aulacode, on peut penser que d'autres familles majoritaires présentes au sein du microbiote caecal de l'aulacode pourraient probablement intervenir dans la dégradation des fibres. On pourrait penser à la famille des *Spirochaetaceae* ou encore aux *Prevotellaceae*. Ces deux familles étaient relativement abondantes dans le microbiote caecal de l'aulacode. Elles ont représenté plus de 30% des séquences chez les animaux de 82 et 103 jours d'âge.

Concernant la famille des *Spirochaetaceae* il a été montré qu'en dehors des propriétés fixatrices d'azote reconnues à certaines espèces identifiées majoritairement chez les termites (Lilburn et al., 2001), d'autres espèces de cette famille décrites chez les ruminants possédaient des propriétés pectinolytiques et pouvaient fermenter un large panel d'oses (Fonty et Chaucheyras-Durand, 2007). Pour la famille des *Prevotellaceae*, il a été montré qu'elle comprend des espèces avec des propriétés allant de la dégradation des xylanes et des pectines à la fermentation de plusieurs oses dans le rumen (Fonty et Chaucheyras-Durand, 2007).

Par ailleurs, les abondances relatives de ces deux familles (*Spirochaetaceae* et *Prevotellaceae*) n'ont pas changé en fonction de l'âge. Ce résultat pourrait signifier que ces deux familles ont eu une grande importance au sein de l'écosystème digestif de l'aulacode sur toute la période étudiée.

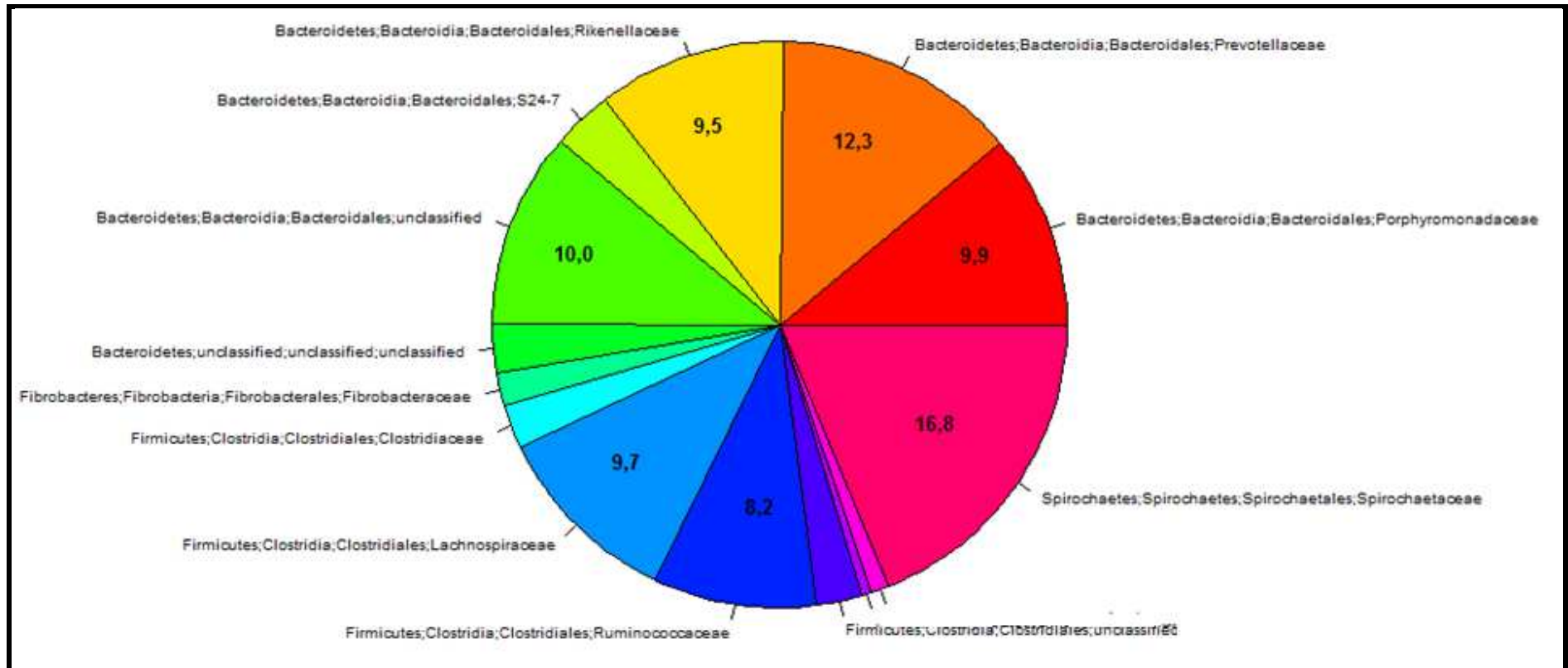


Figure 26. Familles majoritaires chez les sevrans (% d'abondance relative)

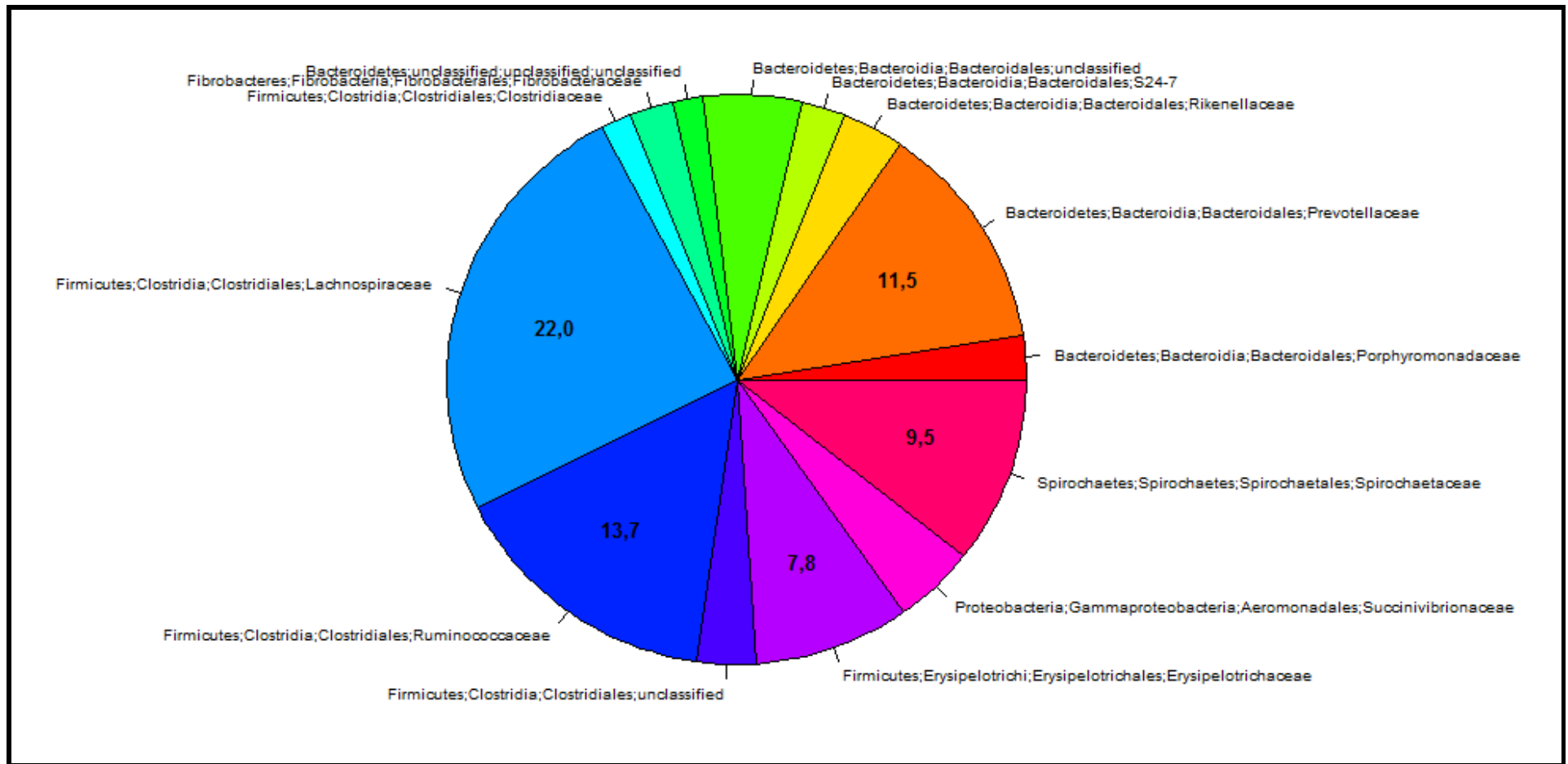


Figure 27. Familles bactériennes majoritaires chez les aulacodes de 3 mois (82 et 103 jours, en% d'abondance relative)

Tableau 30. Abondances relatives (%) des familles bactériennes ayant varié entre les sevrans et les aulacodes de 3 mois (82 et 103 jours).

	Sevrans 40 jours	Animaux de 82 et 103 jours	Test de Student	
			t	P
Phylum des Actinobacteria				
<i>Actinobacteria Actinomycetales Corynebacteriaceae</i>	0,00	0,03	3,02	0,004
Phylum des Bacteroidetes				
<i>Bacteroidia Bacteroidales Bacteroidaceae</i>	2,33	0,77	2,58	0,013
<i>Bacteroidia Bacteroidales Porphyromonadaceae</i>	9,93	2,24	2,79	0,008
<i>Bacteroidia Bacteroidales Rikenellaceae</i>	9,51	3,10	2,77	0,008
<i>Bacteroidia Bacteroidales unclassified</i>	10,00	4,89	2,27	0,028
Phylum des Firmicutes				
<i>Bacilli Bacillales Planococcaceae</i>	0,45	0,00	3,48	0,001
<i>Bacilli Bacillales Staphylococcaceae</i>	0,03	0,06	3,01	0,004
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae</i>	9,68	22,00	2,45	0,019
<i>Erysipelotrichi Erysipelotrichales</i>				
<i>Erysipelotrichaceae</i>	0,47	7,78	2,61	0,012
<i>Mollicutes Mycoplasmatales Mycoplasmataceae</i>	0,03	0,00	2,41	0,021
<i>Unclassified unclassified unclassified</i>	0,42	1,22	2,05	0,046
Phylum des Proteobacteria				
<i>Alphaproteobacteria Rickettsiales unclassified</i>	0,03	0,02	2,11	0,041

2.5.2.3. Abondance des genres bactériens majoritaires dans le microbiote caecal de l'aulacode

Les genres bactériens majoritaires (soit avec une abondance relative supérieure à 0,1%) sont représentés dans le tableau 31 pour les sevrans et le tableau 32 pour les animaux de 82 et 103

jours. Les genres dont l'abondance relative a varié de façon significative entre ces deux stades ont été présentés dans le tableau 33.

Parmi les genres majoritaires identifiés, *RC9* (2,52 à 8,1%), *Parabacteroides* (0,76 à 8,08%), *Prevotella* (2,99 à 6,34%) et *Xylanibacter* (0,13 à 1,21%) ont été retrouvés parmi les Bacteroidetes. Chez les Firmicutes, les genres identifiés étaient *Erysipelotrichaceae Turicibacter* (6,75 à 0,39%), *Lachnospiraceae Incertae_Sedis* (3,79 à 5,36%), *Ruminococcaceae Incertae_Sedis* (1,28 à 2,03%) et *Ruminococcus* (1,04 à 2,53%). En dehors des phyla des Bacteroidetes et Firmicutes, d'autres genres majoritaires identifiés appartenait aux phyla des Proteobacteria et Spirochaetes. Pour le phylum des Proteobacteria, il s'agissait de *Succinivibrio* (0,9 à 4,05%). Pour les Spirochaetes, deux genres majoritaires ont été identifiés. Il s'agit de *Termite_Treponema_cluster* (1,69 à 2,23 %) et *Treponema* (7,08 à 12,62%).

Parmi les genres majoritaires non identifiés, nous avons retrouvé *Bacteroidales unclassified* (4,89 à 10%), *Bacteroidales Prevotellaceae unclassified* (3,19 à 7,67%), *Bacteroidales S24-7 unclassified* (2,24 à 3,04%) du phylum des Bacteroidetes mais aussi, *Clostridiales Lachnospiraceae unclassified* (3,63 à 10,83%), *Clostridiales Ruminococcaceae unclassified* (2,89 à 4,44%), *Clostridiales Ruminococcaceae uncultured* (1,77 à 3,08%), *Clostridiales unclassified* (2,3 à 2,88) et *Clostridiales Lachnospiraceae uncultured* (1,3 à 2,93%) chez les Firmicutes.

Parmi les genres qui étaient plus représentés chez les sevrans que chez les animaux plus âgés, nous avons retrouvé *Bacteroides*, *Parabacteroides*, *Prevotellaceae unclassified*, *Rikenellaceae RC9*, *Rikenellaceae unclassified*, *Bacteroidales unclassified*. Ces genres qui appartiennent au phylum des Bacteroidetes étaient plus abondants chez les sevrans (1 à 10%) que chez les animaux plus âgés (0 à 4,89%). En revanche, les genres qui étaient plus abondants chez les animaux de 82 et 103 jours d'âges que chez les sevrans appartenait en général au phylum des Firmicutes. Il s'agissait de *Lachnospiraceae unclassified*, *Lachnospiraceae Blautia*, *Lachnospiraceae Robinsoniella*, *Erysipelotrichaceae Turicibacter*. Par exemple, *Lachnospiraceae unclassified* et *Erysipelotrichaceae Turicibacter* avaient respectivement 10,83 et 6,74% d'abondance relative chez les animaux plus âgés alors qu'ils n'avaient que 3,63 et 0,38 % d'abondance relative chez les sevrans, respectivement.

Ruminococcus a été identifié dans le microbiote caecal de l'aulacode au cours de cette étude. Ce genre a été déjà identifié chez le lapin avec deux espèces : *R. flavefaciens* et *R. albus*.

Selon Bennegadi et al. (2003), l'espèce *R. flavefaciens* est l'espèce cellulolytique dominante de l'écosystème caecal du lapin. Par ailleurs, notre étude a permis d'identifier *Prevotella* dans le caecum de l'aulacode, contrairement à ce qui a été obtenu chez le lapin. En effet, les études de Bennegadi et al. (2003) et de Abecia et al. (2005) n'ont pas permis de détecter *Prevotella* dans le caecum du lapin. Ces auteurs pensent que soit ce groupe est absent chez le lapin soit il est présent en proportion si faible qu'il a été impossible de le détecter. Quatre espèces de *Prevotella* identifiées dans le rumen sont connues pour la dégradation des xylanes et des pectines (Fonty et Chaucheyras-Durand, 2007).

Parmi les genres majoritaires identifiés dans le contenu caecal de l'aulacode au cours de cette étude, les genres *Treponema* et *Termite_Treponema_cluster* du phylum des Spirochaetes constituent une spécificité. Leurs proportions élevées expliquent l'abondance relative élevée du phylum des Spirochaetes auquel ils appartiennent. Concernant le genre *Treponema*, des espèces présentes dans le rumen ont la capacité de dégrader une gamme variée de substrats dont les pectines. Quant au genre *Termite_Treponema_cluster*, très spécifique aux termites (Lilburn et al. 1999), il contiendrait des espèces ayant plusieurs propriétés de dégradation de nombreux substrats (pectines, amidon soluble, cellobiose, dextrines, maltose,...) comme la plupart des tréponèmes connus (Miller et al., 1992), et de plus elles sont capables de fixer de l'azote atmosphérique. Breznak, (2002) a aussi décrit comment certaines souches appartenant à ce genre, avaient des propriétés acétogènes (production d'acide acétique à partir de dioxyde de carbone et de dihydrogène selon la réaction : $4 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$). Les genres *Treponema* et *Termite_Treponema_cluster* n'ont pas varié de façon significative entre les sevrans et animaux plus âgés. On peut donc supposer que ces espèces ont joué un rôle important sur toute la période de l'étude (40 à 103 jours d'âge) au sein de l'écosystème caecal de l'aulacode.

Tableau 31. Abondance relative (%) des genres bactériens majoritaires du microbiote caecal chez les sevrans

	Abondance relative
Phylum des Bacteroidetes	
<i>Bacteroidia Bacteroidales unclassified unclassified</i>	10,0
<i>Bacteroidia Bacteroidales Rikenellaceae RC9</i>	8,10
<i>Bacteroidia Bacteroidales Porphyromonadaceae Parabacteroides</i>	8,08
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae unclassified</i>	7,67
<i>Bacteroidia Bacteroidales S24-7 unclassified</i>	3,03
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae Prevotella</i>	2,99
<i>unclassified unclassified unclassified unclassified</i>	2,52
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae Xylanibacter</i>	1,21
Phylum des Fibrobacteres	
<i>Fibrobacteria Fibrobacterales Fibrobacteraceae uncultured</i>	1,64
Phylum des Firmicutes	
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae Incertae_Sedis</i>	3,79
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae unclassified</i>	3,63
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae unclassified</i>	2,89
<i>Clostridia Clostridiales unclassified unclassified</i>	2,30
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae uncultured</i>	1,77
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae uncultured</i>	1,30
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae Incertae_Sedis</i>	1,28
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae Ruminococcus</i>	1,04
<i>Erysipelotrichi Erysipelotrichales Erysipelotrichaceae Turicibacter</i>	0,39
Phylum des Proteobacteria	
<i>Gammaproteobacteria Aeromonadales Succinivibrionaceae Succinivibrio</i>	0,90
Phylum des Spirochaetes	
<i>Spirochaetes Spirochaetales Spirochaetaceae Treponema</i>	12,62
<i>Spirochaetes Spirochaetales Spirochaetaceae Termite_Treponema_cluster</i>	2,23

Tableau 32. Abondance relative (%) des genres majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours

	Abondance relative
Phylum des Bacteroidetes	
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae Prevotella</i>	6,34
<i>Bacteroidia Bacteroidales unclassified unclassified</i>	4,89
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae unclassified</i>	3,19
<i>Bacteroidia Bacteroidales Rikenellaceae RC9</i>	2,52
<i>Bacteroidia Bacteroidales S24-7 unclassified</i>	2,24
<i>unclassified unclassified unclassified unclassified</i>	1,47
<i>Bacteroidia Bacteroidales Porphyromonadaceae Parabacteroides</i>	0,76
<i>Bacteroidia Bacteroidales Prevotellaceae Xylanibacter</i>	0,13
Phylum des Fibrobacteres	
<i>Fibrobacteria Fibrobacterales Fibrobacteraceae uncultured</i>	2,19
Phylum des Firmicutes	
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae unclassified</i>	10,83
<i>Erysipelotrichi Erysipelotrichales Erysipelotrichaceae Turicibacter</i>	6,75
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae Incertae_Sedis</i>	5,36
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae unclassified</i>	4,44
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae uncultured</i>	3,08
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae uncultured</i>	2,93
<i>Clostridia Clostridiales unclassified unclassified</i>	2,88
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae Ruminococcus</i>	2,53
<i>Clostridia Clostridiales Ruminococcaceae Incertae_Sedis</i>	2,03
Phylum des Proteobacteria	
<i>Gammaproteobacteria Aeromonadales Succinivibrionaceae Succinivibrio</i>	4,05
Phylum des Spirochaetes	
<i>Spirochaetes Spirochaetales Spirochaetaceae</i>	1,69
<i>Termite_Treponema_cluster</i>	
<i>Spirochaetes Spirochaetales Spirochaetaceae Treponema</i>	7,08

Tableau 33. Abondance relative (%) des genres bactériens ayant varié entre les stades sevrage et post-sevrage

	Sevrans 40 jours	Animaux de 82 et 103 jours	Student t.test	
			t	P
Classe des Actinobacteria				
<i>Actinomycetales Corynebacteriaceae Corynebacterium</i>	0	0,04	3,02	0,004
<i>Bifidobacteriales Bifidobacteriaceae Bifidobacterium</i>	0,03	0,01	2,25	0,03
Classe des Bacteroidia				
<i>Bacteroidales Bacteroidaceae Bacteroides</i>	2,33	0,77	2,58	0,013
<i>Bacteroidales Porphyromonadaceae Parabacteroides</i>	8,09	0,76	3,44	0,001
<i>Bacteroidales Prevotellaceae unclassified</i>	7,67	3,19	2,22	0,032
<i>Bacteroidales Rikenellaceae RC9</i>	8,1	2,52	2,20	0,034
<i>Bacteroidales Rikenellaceae unclassified</i>	1,03	0,2	2,69	0,01
<i>Bacteroidales unclassified unclassified</i>	10	4,89	2,27	0,028
Classe des Bacilli				
<i>Bacillales Bacillaceae Bacillus</i>	0	0,05	3,02	0,004
<i>Bacillales Planococcaceae Incertae_Sedis</i>	0,06	0	3,38	< 0,001
<i>Bacillales Planococcaceae Lysinibacillus</i>	0,3	0	3,37	0,002
<i>Bacillales Planococcaceae unclassified</i>	0,07	0	4,66	< 0,001
<i>Bacillales Staphylococcaceae Staphylococcus</i>	0	0,05	2,58	0,014
Classe des Clostridia				
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Blautia</i>	0,08	0,54	2,76	0,002
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Epulopiscium</i>	0,03	0	3,38	0,002
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Robinsoniella</i>	0,11	0,41	3,81	< 0,001
<i>Clostridiales Lachnospiraceae unclassified</i>	3,63	10,83	2,63	0,012
<i>Clostridiales Peptostreptococcaceae Incertae_Sedis</i>	0,22	0	2,26	0,029
Classe des Erysipelotrichi				
<i>Erysipelotrichales Erysipelotrichaceae Turicibacter</i>	0,38	6,74	2,37	0,023
Classe des Alphaproteobacteria				
<i>Rickettsiales unclassified unclassified</i>	0,03	0,02	2,11	0,042
Classe des Gammaproteobacteria				
<i>Pseudomonadales Pseudomonadaceae Azomonas</i>	0,05	0,09	2,26	0,029

2.5.3. Abondance relative des communautés bactériennes du caecum de l'aulacode en fonction du régime et de l'âge.

Le tableau 34 présente les familles bactériennes dont l'abondance relative a varié en fonction du régime ou entre 82 et 103 jours, ou pour lesquelles il y a eu une interaction entre le régime et l'âge. Très peu de familles ont varié avec le régime. Au sein du phylum des Bacteroidetes, la famille *RF16* était plus abondante avec le régime NM alors qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les régimes NB et NH pour l'abondance de cette famille. Au sein du phylum des Firmicutes, il n'y a pas eu de différence significative entre les régimes pour l'abondance des familles sauf la famille *Family_XIII_Incertae_Sedis* qui a eu tendance à être plus abondante avec le régime NH ($P = 0,065$). Concernant le phylum des Proteobacteria, la famille des *Oxalobacteraceae* a été plus abondante avec le régime NH et moins abondante avec le régime HB, le régime NM conduisant à une abondance intermédiaire ($P = 0,016$). Toujours dans le phylum des Proteobacteria, l'abondance relative de la famille des *Enterobacteriaceae* a eu tendance à augmenter avec la baisse du niveau de fibres et protéines dans les régimes ($P = 0,07$). Son abondance relative a été multipliée par 6 du régime NH au régime NB.

En considérant le facteur âge, nos résultats ont montré que l'abondance relative de certaines familles a baissé avec l'avancée en âge des animaux tandis que d'autres familles ont vu leur abondance relative augmenter avec l'avancée en âge des animaux. Ainsi, les familles des *Marinilabiaceae* et *Family_XIII_Incertae_Sedis*, ont vu leurs abondances relatives baisser avec l'augmentation en âge quand celle de la famille des *Lachnospiraceae* augmentait de 17,4 à 26,6% entre 82 et 103 jours d'âge.

Par ailleurs, pour certaines familles, les abondances relatives ont subi une interaction des deux facteurs régime et âge. C'est le cas des familles des *Marinilabiaceae*, *Clostridiaceae*, *Family_XIII_Incertae_Sedis*, *Erysipelotrichaceae*, *Mycoplasmataceae* et *Moraxellaceae*. Ces interactions s'expliquent soit par le fait que pour une bactérie donnée, son abondance relative peut à 82 jours d'âge augmenter avec l'augmentation du niveau de fibres et protéines dans le régime puis, à 103 jours d'âge, baisser avec l'augmentation du niveau de fibres et protéines dans le régime, soit par le scénario inverse. On pourrait citer par exemple le cas de la famille des *Clostridiaceae* dont l'abondance relative a augmenté de 0,45 à 4,75% avec la hausse du niveau de fibres et protéines à 82 jours d'âge alors qu'à 103 jours d'âge, la même hausse du niveau de fibres et protéines a abaissé son abondance relative de 2,4 à 0,2%.

En descendant au niveau genre, l'abondance relative des communautés bactériennes a très peu varié en fonction du régime (Tableau 35). Au sein du phylum des Bacteroidetes le genre *RF16 unclassified* était plus abondant avec le régime NM (1,99% d'abondance) qu'avec les deux autres régimes qui n'ont pas présenté de différence significative entre eux (0,14 et 0,15% d'abondance relative, respectivement avec MH et NB).

Parmi les Proteobacteria, le genre *Desulfovibrionaceae Bilophila* était plus abondant avec le régime NH (0,87%) qu'avec le régime NM (0,14%), le régime NB ayant conduit à une abondance intermédiaire (0,27%).

Toujours parmi les Proteobacteria, l'abondance relative de *Enterobacteriaceae Enteric_Bacteria_cluster* a eu tendance à augmenter avec la baisse du niveau de fibres et protéines dans le régime ($P = 0,096$). Son abondance relative a été multipliée par 5 du régime NH à NB. Enfin, parmi les Spirochaetes, le genre *Termite_Treponema_cluster* était plus abondant avec le régime NH (2,48%) qu'avec le régime NM (0,79%), le régime NB conduisant à une abondance intermédiaire (1,8%) ne différant ni du régime NM, ni du régime NH.

L'abondance relative de certains genres n'a pas subi un effet individuel du régime ou de l'âge mais a subi un effet de l'interaction de ces deux facteurs. Ces interactions ont révélé que l'abondance relative de chacune de ces communautés bactériennes n'a pas évolué dans le même sens avec le même régime aux deux âges considérés. Ce résultat témoigne de la complexité de l'étude des communautés bactériennes des écosystèmes digestifs.

Cette étude a révélé que la baisse du ratio PD/ED de NH à NB a eu tendance à augmenter l'abondance relative du genre *Enteric_Bacteria_cluster*. Même s'il n'a pas été possible d'aller jusqu'à l'identification des espèces dans cette étude, on peut noter que certaines espèces du groupe *Enteric_Bacteria_cluster* telles que *Escherichia coli* et *Yersinia enterocolitica* sont connues pour être impliquées dans les entéropathies du lapin (Nicodemus et al., 2004).

Le régime NH semble favoriser l'abondance du genre *Termite_Treponema_cluster*, sachant que l'écart observé avec le régime NB n'était pas significatif. Une étude plus complète avec l'identification des espèces en présence ainsi que leurs propriétés devrait permettre de mieux comprendre l'impact des constituants alimentaires sur ce groupe de bactéries.

Dans cette étude, le niveau de fibres et de protéines n'a pas eu d'effet sur l'abondance relative des genres connus pour leurs espèces fibrolytiques tels que *Ruminococcus* ou encore

Prevotella. Chez le lapin, Bennegadi et al. (2003) avaient observé qu'une déficience en fibres entraînait une hausse de l'abondance relative des bactéries cellulolytiques *Ruminococcus albus* et *Fibrobacter intestinalis*, contrairement à Boulharouf et al. (1991) qui avaient observé qu'une hausse du niveau de fibres augmentait l'abondance relative des bactéries cellulolytiques.

Tableau 34. Abondances relatives (%) des familles ayant varié en fonction du régime ou de l'âge

	Régime			Age (j)		ETR	Valeur de P		
	NB	NM	NH	82	103		Régime	Age	Régime x Age
	Phylum des Bacteroidetes								
<i>Bacteroidia Bacteroidales Marinilabiaceae</i>	0,01	0,1	0,02	0,02	0	0,18	0,355	0,04	0,047
<i>Bacteroidia Bacteroidales RF16</i>	0,16 ^b	1,99 ^a	0,14 ^b	0,43	1,1	0,36	0,011	0,609	0,24
Phylum des Firmicutes									
<i>Clostridia Clostridiales Clostridiaceae</i>	1,43	0,82	2,46	1,9	1,24	0,39	0,926	0,879	0,003
<i>Clostridia Clostridiales Family_XIII_Incertae_Sedis</i>	0,41	0,35	0,80	0,69	0,34	0,14	0,065	0,01	0,057
<i>Clostridia Clostridiales Lachnospiraceae</i>	23,81	22,53	19,67	17,36	26,64	0,31	0,801	0,03	0,59
<i>Erysipelotrichi Erysipelotrichales Erysipelotrichaceae</i>	6,59	10,47	6,27	9,15	6,41	0,47	0,651	0,899	0,013
<i>Mollicutes Mycoplasmatales Mycoplasmataceae</i>	0	0	0,1	0,1	0	0,15	0,280	0,114	0,009
<i>Mollicutes Unclassified unclassified</i>	0	0,07	0,05	0	0,08	0,25	0,129	0,03	0,63
Phylum des Proteobacteria									
<i>Gammaproteobacteria Enterobacteriales</i>									
<i>Enterobacteriaceae</i>	0,06	0,02	0,01	0,05	0,02	0,22	0,07	0,243	0,81
<i>Betaproteobacteria Burkholderiales Oxalobacteraceae</i>	0,01 ^b	0,03 ^{ab}	0,04 ^a	0,02	0,04	0,17	0,016	0,11	0,28
<i>Gammaproteobacteria Pseudomonadales Moraxellaceae</i>	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17	0,887	0,937	0,046
<i>Gammaproteobacteria unclassified unclassified</i>	0,84	0,45	0,12	0,82	0,13	0,32	0,649	0,034	0,36

Tableau 35. Abondances relatives (%) des genres ayant varié en fonction du régime ou de l'âge

	Régime			Age (j)		ETR	Valeur de P		
	NB	NM	NH	82	103		Régime	Age	Régime x Age
Classe des Bacteroidia									
<i>Bacteroidales RF16 unclassified</i>	0,15 ^b	1,99 ^a	0,14 ^b	0,43	1,1	0,36	0,011	0,609	0,24
<i>Bacteroidales Rikenellaceae vadinBC27</i>	0,03	0,02	0,04	0,01	0,05	0,24	0,394	0,033	0,61
Classe des Clostridia									
<i>Clostridiales Clostridiaceae Anaerobacter</i>	0,13	0,07	0,17	0,15	0,1	0,27	0,420	0,983	0,032
<i>Clostridiales Clostridiaceae Clostridium</i>	0,95	0,58	1,87	1,41	0,86	0,38	0,859	0,852	0,002
<i>Clostridiales Clostridiaceae unclassified</i>	0,3	0,16	0,34	0,28	0,25	0,25	0,418	0,773	< 0,001
<i>Clostridiales Family_XIII_Incertae_Sedis uncultured</i>	0,18	0,17	0,49	0,4	0,17	0,18	0,355	0,021	0,015
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Butyrivibrio</i>	0,01	0,02	0,01	0	0,02	0,20	0,938	0,049	0,88
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Catonella</i>	0	0,02	0,05	0	0,05	0,18	0,193	0,023	0,19
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Incertae_Sedis</i>	6,23	5,81	4,03	3,41	7,31	0,28	0,541	0,003	0,50
<i>Clostridiales Lachnospiraceae Parasporobacterium-Sporobacterium</i>	0,34	0,3	0,22	0,12	0,45	0,21	0,828	0,009	0,19
<i>Clostridiales Lachnospiraceae unclassified</i>	11,51	11,47	9,51	8,14	13,5	0,29	0,863	0,028	0,84
<i>Clostridiales Ruminococcaceae Oscillospira</i>	0,09	0,19	0,15	0,1	0,19	0,21	0,658	0,285	0,022

Classe des Erysipelotrichi									
<i>Erysipelotrichales Erysipelotrichaceae Turicibacter</i>	6,02	8,14	6,07	8,81	4,68	0,50	0,992	0,716	0,009
Classe des des Mollicutes									
<i>Unclassified unclassified unclassified</i>	0	0,08	0,06	0	0,09	0,25	0,129	0,035	0,63
Classe des Alphaproteobacteria									
<i>Rhodospirillales Rhodospirillaceae unclassified</i>	0,04	0,13	0,06	0,03	0,13	0,27	0,203	0,016	0,39
Classe des Deltaproteobacteria									
<i>Desulfovibrionales Desulfovibrionaceae Bilophila</i>	0,21 ^{ab}	0,14 ^b	0,87 ^a	0,62	0,19	0,24	0,043	0,115	0,24
<i>Desulfovibrionales Desulfovibrionaceae unclassified</i>	0,18	0,14	0,79	0,60	0,14	0,26	0,582	0,031	0,022
Classe des Gammaproteobacteria									
<i>Enterobacteriales Enterobacteriaceae</i>									
<i>Enteric_Bacteria_cluster</i>	0,05	0,03	0,01	0,30	0,22	0,22	0,096	0,277	0,87
<i>Unclassified unclassified unclassified</i>	0,84	0,45	0,12	0,82	0,13	0,32	0,648	0,034	0,36
Classe des Spirochaetes									
<i>Spirochaetales Spirochaetaceae</i>	1,80 ^{ab}	0,79 ^b	2,48 ^a	1,54	1,84	0,34	0,038	0,804	0,92
<i>Termite_Treponema_cluster</i>									

DISCUSSION GENERALE

La synthèse bibliographique présentée au début de ce travail montre que plusieurs études ont été réalisées sur l'aulacode, ce rongeur sauvage monogastrique herbivore. Ces études visaient à approfondir les connaissances sur la biologie et notamment l'alimentation dans le but d'améliorer la productivité de l'élevage de cet animal déjà élevé dans plusieurs pays d'Afrique de l'ouest et centrale. Néanmoins, il existe encore peu de données zootechniques et nos connaissances sur sa physiologie digestive restent trop parcellaires pour proposer des recommandations alimentaires pour l'aulacode en croissance. Ainsi, concernant l'alimentation, plusieurs préoccupations demeurent. D'une part, des études antérieures ont signalé l'importance des fibres dans la ration de cet animal herbivore pour sécuriser sa santé digestive, mais les seuils minimum et maximum d'apport n'ont pas encore été étudiés chez l'animal au stade post-sevrage. D'autre part, les ratios entre apport énergétique et protéiques n'ont pas non plus été étudiés. Enfin, sur un plan plus pratique, l'aliment distribué aux animaux dans les élevages est constitué pour l'essentiel de fourrage complété dans le meilleur des cas avec une céréale, les tourteaux étant écartés des rations alimentaires en raison de leurs coûts élevés.

Rappelons que notre étude avait trois principaux objectifs. Le premier objectif visait à mieux comprendre le fonctionnement digestif de cet animal à travers l'étude comparée de son anatomie et de sa physiologie digestive avec celles d'autres monogastriques herbivores tel que le lapin ou le cobaye. Le deuxième objectif était de savoir quel était l'impact réel des fibres sur la santé et les performances zootechniques de l'aulacode en croissance. Il s'agissait de déterminer les limites de teneurs en fibres compatibles avec la santé et une efficacité digestive optimale. Enfin un troisième objectif visait à estimer le rôle du ratio protéines digestibles/énergie digestible pour optimiser la croissance, et également réduire le coût d'un aliment concentré en utilisant de la céréale, moins onéreuse que les tourteaux. Il s'agissait aussi de mesurer quel serait le niveau maximum d'incorporation de céréales, sans compromettre dangereusement les performances des animaux en raison de l'abaissement de la teneur de la ration en protéines brutes, et sans compromettre la santé en raison de l'abaissement du taux de fibres.

Nous avons travaillé avec des aulacodes jeunes, à partir du sevrage, parce que c'est la période où ces animaux sont les plus vulnérables et où les taux de mortalité sont les plus élevés (Jori et Chardonnet, 2001), comme c'est aussi le cas chez le lapin (Gidenne et al., 2008).

Après avoir présenté les limites de cette étude, liées pour l'essentiel aux difficultés rencontrées dans l'exécution des protocoles expérimentaux, nous présenterons l'anatomie et la

physiologie digestives de l'aulacode en croissance avant de présenter l'impact des régimes alimentaires étudiés sur la santé et les performances zootechniques.

1. Méthodologie expérimentale et limites de notre étude

Les expérimentations sur les animaux ont été réalisées en Côte-d'Ivoire dans la ferme expérimentale d'une Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA/INP-HB Yamoussoukro). La première grande difficulté était la fiabilité de l'approvisionnement en matières premières locales et l'impossibilité de faire contrôler rapidement au plan analytique les aliments achetés à cause de l'éloignement du laboratoire de l'UMR TANDEM (INRA-ENVT-ENSAT Toulouse, France) où s'est effectué l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et microbiologiques au cours de cette étude. Cette difficulté explique le fait que les teneurs en ADF des quatre régimes expérimentaux de l'essai 1 n'étaient pas strictement équidistantes. Par ailleurs des difficultés pour constituer et conserver des prélèvements de contenu digestif ont empêché de mesurer les paramètres microbiologiques et fermentaires dans l'expérimentation 1.

Une autre difficulté rencontrée dans notre étude émane du comportement alimentaire particulier de l'aulacode. Cet animal prend l'aliment avec ses membres antérieurs, puis le porte à sa bouche, en s'éloignant de la mangeoire. De ce fait, il peut gaspiller près de la moitié de l'aliment granulé distribué, ce qui a rendu difficile la détermination précise de la quantité d'aliment réellement consommée d'autant plus que l'aliment gaspillé était parfois mouillé par l'eau de boisson. Le gaspillage a probablement été sous-estimé au cours de l'expérimentation 1, d'où une surestimation de la quantité ingérée et de la digestibilité des constituants alimentaires. Des dispositions particulières prises au cours de la deuxième expérimentation ont permis d'aplanir ces difficultés et d'obtenir des coefficients de digestibilité plus corrects. Enfin, vu l'impossibilité de maîtriser l'alimentation avant sevrage, les différences observées entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours dans l'expérimentation 2 pouvaient être dues aussi bien au changement de régime au sevrage qu'à l'âge des animaux.

2. Anatomie et physiologie digestives comparées

2.1. Anatomie digestive

Notre étude a révélé que, du sevrage jusqu'à 103 jours d'âge, le caecum de l'aulacode contenait une grande part du contenu digestif, avec 40% du poids du contenu digestif total.

Cette proportion n'a pas varié avec l'âge. Ce résultat pourrait signifier que le caecum a joué un rôle aussi important chez les sevrans que chez les animaux plus âgés dans la digestion. Il est également probable que les sevrans (31 à 45 jours d'âge) ont déjà bien débuté leur ingestion d'aliment solide (fourrages) avec leur mère, d'où le développement important du gros intestin (caecum et côlon) dès un mois d'âge. Contrairement au contenu caecal, le contenu de l'estomac a diminué avec l'âge. Il est passé de 33% à 17% du contenu digestif total entre sevrans et animaux de 82 et 103 jours d'âge. Cette diminution de la proportion du contenu stomacal avec l'âge pourrait signifier que l'estomac joue un rôle dans la digestion plus important chez les sevrans que chez les animaux plus âgés. L'avancée en âge des animaux a eu également pour effet d'augmenter la proportion du contenu du côlon proximal tandis que celle de l'intestin grêle n'a pas varié.

Concernant le facteur régime, la hausse du ratio PD/ED a eu pour effet d'augmenter la proportion du contenu du côlon proximal. Les proportions des contenus des autres compartiments digestifs n'ont pas varié avec le régime.

Dans des études antérieures, Alogninouwa et al. (1996) avaient fait remarquer que le caecum de l'aulacode occupait 60% du volume de la cavité abdominale. Ce développement important du caecum chez l'aulacode rappelle celui de deux autres monogastriques herbivores, le cheval et le lapin, chez qui cet organe joue un rôle clé dans la digestion. Mais, en dehors des travaux de Van Zyl et al. (2005) chez l'aulacode adulte, qui avaient révélé que le caecum était le compartiment digestif le plus volumineux avec 29% du poids du tube digestif plein, aucune étude n'avait été faite, en particulier chez l'aulacode en croissance. La proportion du contenu digestif caecal de l'aulacode obtenue dans cette étude est similaire à ce qui est observé chez le lapin (Gidenne et al., 2007). Le caecum jouerait donc un rôle aussi important dans la digestion chez l'aulacode que chez le lapin.

Par ailleurs, au niveau gastrique, nous n'avons pas observé de différence significative entre le pH de l'antrum et celui du fundus. Chez le lapin, le pH gastrique varie au cours de la journée, surtout dans la zone fundique, et il est plus élevé dans le fundus en présence de caecotrophes. L'absence de différence significative entre le pH de l'antrum et celui du fundus chez l'aulacode peut signifier soit que l'aulacode ne pratique pas la caecotrophie, ce qui est cohérent avec le fait que nous n'ayons jamais observé de caecotrophes dans l'estomac, soit que l'horaire de nos abattages ne permettait pas d'observer de caecotrophes dans l'estomac. En effet, selon Holzer et al. (1986) l'ingestion circadienne des crottes chez l'aulacode a lieu

généralement entre 0 h et 6 h du matin or nos animaux ont été euthanasiés entre 9 h et 12 h. En outre, pour Holzer et al. (1986), les crottes ingérées sont similaires aux crottes émises. Lors de nos autopsies et peut-être encore en raison de l'horaire, nous n'avons pas non plus observé de crottes normales dans l'estomac. Nous n'avons pas non plus observé la formation de crotte "molles" de type caecotrophes dans le côlon distal, mais avons seulement observé les crottes "classiquement" excrétées. Van Zyl et Delpont (2010) n'ont pas non plus observé de crottes dans l'estomac d'aulacodes adultes euthanasiés entre 8 h et 9 h du matin. L'ensemble de ces résultats suggère que l'aulacode ne produit qu'un seul type de crottes, qu'il ne pratique pas la caecotrophie, mais qu'il peut occasionnellement pratiquer la coprophagie.

2.2. Profil fermentaire du contenu caecal

Dans le but de comparer la physiologie digestive de l'aulacode avec celles d'autres herbivores, nous avons précisé les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques du contenu caecal de l'aulacode, du lapin, du cobaye et de la souris dans le tableau 36.

Tableau 36. Paramètres physico-chimiques moyens du contenu caecal de l'aulacode, du lapin, du cobaye et de la souris.

Paramètres fermentaires	Aulacode (notre étude)	Cobaye (Patten et al., 2004 ; Yu et al., 2000)	Lapin (Gidenne et al., 2004 ; Combes et al., 2011)	Souris (Pan et al. 2009)
Poids du contenu caecal (% contenu digestif total)	40 %	65 %	40 %	35 – 40%
pH	5,9 - 6	6,7 – 6,9	5,8 – 6,2	6,2 - 7
NH ₃ -N (mmol/l)	10	20	15	10 - 15
AGV totaux (mmol/l)	100	50	100	50
Acide acétique (%)	75	60	80	73
Acide propionique (%)	15	20	5	20
Acide butyrique (%)	5	15	10	5
Ratio propionate/butyrate	> 1	> 1	< 1	> 1

Le poids du contenu du caecum et son pH chez l'aulacode ont été similaires aux valeurs déjà publiées chez le lapin et la souris, mais plus faibles que chez le cobaye, qui a aussi une concentration du caecum en ammoniac plus élevée que l'aulacode et le lapin.

La concentration caecale en AGV totaux a été élevée, de l'ordre de 100 mM comme dans le rumen des ruminants ou le caecum du lapin (Combes et al., 2011) ; elle a été double de celle observée chez le cobaye (Yu et al., 2000). Le profil fermentaire observé chez l'aulacode indique une majorité d'acétate (>70%), suivi du propionate (15%) et du butyrate (5%). Ainsi, le ratio propionate / butyrate est supérieur à 1, comme chez le cobaye (Henning et Hird, 1970) ou de nombreux herbivores (ruminants, porc, etc.). En revanche, chez le lapin, ce ratio propionate / butyrate est inférieur à 1 dès 5 semaines d'âge (Hoover et Heitman, 1972 ; Gidenne, 1986). Cette caractéristique rapproche donc davantage la physiologie digestive de l'aulacode de celle du cobaye que de celle du lapin. Ce résultat est concordant avec le fait que l'aulacode et le cobaye appartiennent à un même sous-groupe taxonomique, les Hystricomorphes (Wood, 1955).

Vu les concentrations élevées en AGV caecaux chez l'aulacode, on peut penser que les AGV contribuent également à la couverture d'une grande part des besoins en énergie de l'aulacode, comme c'est le cas chez le lapin et le cobaye (Tableau 36 ; Marty et Vernay, 1984 ; Gidenne, 1994).

D'autre part, la concentration en AGV totaux était significativement plus élevée chez les sevrans que chez les animaux de 82 et 103 jours d'âge. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le régime alimentaire avant sevrage était très riche en fibres (fourrage vert), dont la digestion est *a priori* très limitée avant le gros intestin, d'où une arrivée de substrat plus importante chez les sevrans que chez les animaux plus âgés, expliquant une plus forte concentration en AGV. Au contraire, chez le lapin nourri avec un aliment granulé sans fourrage associé et sans changement d'aliment au sevrage, la concentration caecale en AGV augmente du sevrage à 70 jours d'âge (Bellier et al., 1995 ; Piattoni et al., 1996 ; Bennegadi et al., 2004). D'autre part, la digestion de l'amidon dans l'intestin grêle étant limitée chez le jeune, le maïs grain disponible avant sevrage aurait pu conduire à une arrivée importante de substrat fermentescible dans le caecum des sevrans. Cependant, des différences de concentrations en AGV ne peuvent être interprétées de façon univoque comme des différences de production, puisque la concentration est la résultante d'une production, d'une absorption et d'une quantité totale de contenu. Rapporté au poids des animaux, le poids du

contenu caecal ne différait pas entre sevrans et animaux plus âgés ; par contre, une plus forte concentration en AGV chez les sevrans pourrait avoir été liée à une moindre absorption par la muqueuse.

2.3.Caractérisation du microbiote caecal

Notre étude a permis d'apporter des résultats, à notre connaissance complètement originaux sur le microbiote caecal de l'aulacode. Nous pouvons ainsi comparer ce dernier à celui d'autres herbivores, tels que le lapin, le cobaye, la souris ou la vache (tableau 37). Le microbiote caecal de l'aulacode est dominé par deux phyla majoritaires, les Bacteroidetes et les Firmicutes, comme chez les autres herbivores. Cependant, les données concernant le cobaye sont limitées à l'étude de Hildebrand et al. (2012), qui avaient pu assigner à un phylum seulement de 63% des séquences (après séquençage de tous les génomes microbiens), ce qui limite les possibilités de comparaison avec nos résultats. Comparé au lapin, les phyla majoritaires ont été plus diversifiés chez l'aulacode. Alors que ces deux phyla représentent plus de 90% des séquences chez le lapin, ils en ont représenté moins de 80% chez l'aulacode. Cette diversité des phyla majoritaires au sein du microbiote caecal de l'aulacode a permis de retrouver non seulement des familles comprenant des espèces fibrolytiques présentes chez le lapin comme les *Ruminococcae* et les *Lachnospiraceae*, mais aussi d'autres familles moins représentées chez le lapin comme les *Prevotellaceae* et les *Spirochaetaceae*.

Tableau 37. Comparaison de l'abondance relative (%) des phyla bactériens majoritaires, dans le caecum de l'aulacode, du lapin, du cobaye, de la souris et du rumen de la vache, déterminés par séquençage de l'ADN 16S (sauf cobaye, séquençage de tous les génomes microbiens)

Genres bactériens	Aulacode (notre étude)	Cobaye (Hildebrand et al., 2012)	Lapin (Massip et al., 2012)	Souris (Campbell et al. 2012)	Vache (Zened et al.,2012)
Bacteroidetes	25	15	4 à 5	30	40
Firmicutes	50	29	90	53-89	50
Proteobacteria	8,7	9,4	< 1	< 2	4,3
Spirochaetes	9,5	1,2	-	+	+
Actinobacteria	1,2	1,3	<1	+	5,5
Fibrobacteres	2,2	-	-	+	+

Le profil fermentaire caecal particulier du lapin avec un ratio propionate / butyrate inférieur à 1 est dû à la particularité de sa communauté microbienne caecale et non au substrat (Adjiri et al., 1992) sachant que chez le lapin l'écosystème caecal ne contient ni champignons ni protozoaires (Bennegadi et al., 2003). Les bactéries productrices de butyrate connues dans le rumen, du genre *Butyrivibrio*, sont présentes dans le caecum du lapin. Leur présence pourrait expliquer le faible ratio propionate/butyrate chez le lapin. Quoique l'abondance relative du genre *Butyrivibrio* ne soit pas connue chez le lapin, la famille des *Lachnospiraceae* à laquelle ce genre bactérien appartient est majoritaire et représente 35% des séquences (Massip et al., 2012) contre 22 pour l'aulacode dans notre étude.

La présence du phylum des Spirochaetes avec une abondance relativement élevée au sein du microbiote caecal de l'aulacode constitue une originalité très intéressante en ce sens que les espèces de ce phylum sont connues pour plusieurs propriétés bénéfiques pour leurs hôtes comme cela a été décrit chez les termites (Lilburn et al., 2001 ; Breznak, 2002) . En effet, le phylum des Spirochaetes représente 50% des procaryotes présents dans le tube digestif des termites (Paster et al., 1996). Certaines espèces de ce phylum possèdent des propriétés d'acétogénèse, apportant donc de l'énergie à l'hôte (Breznak, 2002). D'autres souches participeraient au recyclage de l'azote contenu dans l'acide urique. En outre, il a été démontré

in vitro que des souches avaient des propriétés de fixation d'azote (Lilburn et al., 2001). Selon cet auteur, les Spirochaetes joueraient un rôle essentiel dans la nutrition azotée chez les termites ce qui permettrait à ces animaux de couvrir leurs besoins en azote même à partir d'un aliment assez pauvre comme le bois (environ 0,05% d'azote). Malgré la proportion élevée de Spirochaetes au sein de l'écosystème digestif de l'aulacode et la présence du genre *Termite_Treponema_cluster*, l'extrapolation entre termite et aulacode est très hasardeuse. En effet, la présence d'azote atmosphérique dans le caecum est hautement improbable. De plus, il y a peu de chance qu'il y ait de l'acide urique dans le caecum de l'aulacode. Donc le rôle des Spirochaetes dans la nutrition azotée de l'aulacode est sans doute mineur, mais cela nécessiterait des recherches plus spécifiques.

Dans cette étude la baisse du niveau de fibres a eu tendance à augmenter l'abondance relative du genre *Enteric_Bacteria_cluster*. Certaines espèces de ce genre sont couramment impliquées dans les troubles digestifs chez le lapin (Nicodemus et al., 2004). Cet auteur avait par exemple observé une baisse de l'abondance de *Campylobacter* lors d'une hausse du taux de fibres. Une augmentation du niveau de fibres dans les rations favoriserait le développement d'une flore commensale (Boulahrouf et al., 1991) dans le tube digestif, et renforce l'effet "barrière" exercé par le microbiote face à des bactéries pathogènes (Nicodemus et al., 2004). Lors de notre première expérimentation, chez les animaux morts d'une déficience en fibres, des analyses bactériologiques avaient permis d'isoler *E. coli* au niveau du tube digestif. On pourrait faire l'hypothèse que les troubles sanitaires observés chez les animaux soumis aux régimes pauvres en fibres ont été causés par des bactéries pathogènes du genre *Enteric_Bacteria_cluster*. Néanmoins, les symptômes observés concernaient principalement les segments antérieurs du tube digestif (estomac et intestin grêle), alors que chez le lapin, ce sont surtout les segments postérieurs qui sont atteints lors de troubles digestifs post-sevrage. L'aulacode ne présenterait donc pas une physiopathologie digestive identique à celle du jeune lapin. Des études plus poussées sur la physiopathologie du jeune aulacode en relation avec son alimentation sont donc indispensables.

3. Régime alimentaire et santé de l'aulacode en croissance

La comparaison des paramètres sanitaires des animaux au cours des deux essais est illustrée par la figure 28.

Dans notre étude, une faible concentration en fibres alimentaires (7 % d'ADF) a provoqué des entérites hémorragiques mortelles chez l'aulacode en croissance tandis qu'une concentration de 12 % d'ADF n'a pas occasionné des morts mais des animaux malades (expérimentation 1). La mortalité est survenue au cours de la 4^{ème} semaine d'alimentation avec le régime ADF8 ce qui suggère qu'au cours des trois premières semaines les animaux ont résisté au faible niveau de fibres. Par ailleurs, au cours de notre deuxième expérimentation, pour des niveaux de fibres similaires à ceux de la première expérimentation, il n'y a pas eu de mortalité, mais le taux de morbidité a eu tendance à augmenter avec la baisse du niveau de fibres. Nos travaux ont ainsi permis de montrer que la santé digestive de l'aulacode en croissance est bien principalement sous la dépendance du niveau de fibres dans la ration comme observé chez le lapin. Il convient cependant de signaler que la physiopathologie digestive de l'aulacode est différente de celle du lapin en ce sens que dans le cas de l'aulacode, une déficience en fibres provoque une inflammation de la partie antérieure du tube digestif (estomac et intestin grêle) sans apparition de diarrhée tandis que chez le lapin, un déficit en fibres se traduit par un contenu du caecum et du colon liquide, avec apparition de diarrhée.

La moindre incidence de troubles sanitaires dans la deuxième expérimentation que dans la première, pour des teneurs en fibres voisines, pourrait être due à un moindre niveau de protéines brutes dans l'aliment (figure 28). Les régimes pauvres en fibres de l'expérimentation 2 (NB et NM) étaient en effet nettement plus pauvres en protéines (10 et 11 %) que le régime ADF8 (15 %) de l'expérimentation 1. Il a été observé, chez le lapin, qu'une élévation du taux de protéines brutes de l'aliment de 13 à 16% conduisait à une hausse de la concentration caecale en ammoniac (Gidenne et al., 2007), et qu'un excès de protéines brutes pourrait favoriser la prolifération de certains pathogènes tels que *E. coli* ou *Clostridium*, qui ont un besoin plus élevé en acides aminés comme substrat de croissance que les bactéries non pathogènes (Catala et Bonnafous, 1979 ; Haffar et al., 1988 ; Cortez et al., 1992). On peut supposer que, dans le cas de nos rations pauvres en fibres dans l'expérimentation 1, le faible niveau de fibres couplé à un niveau élevé en protéines brutes a entraîné un excès d'azote dans le caecum qui aurait favorisé le développement d'agents pathogènes, surtout avec le régime le

plus pauvre en fibres. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour tester de manière indépendante l'effet du taux de fibres et celui du taux de protéines.

L'autopsie des animaux morts issus du lot recevant le régime ADF8 avait révélé la présence massive d'*E. coli*. au niveau du contenu de l'estomac et de l'intestin grêle ainsi qu'au niveau du foie, des poumons et de la rate. Dans l'expérimentation 2, la forte réduction du niveau de fibres parallèlement à celle du niveau protéique a seulement eu tendance à augmenter la morbidité (arrêts ou baisse d'ingestion, arrêts de croissance), mais, il n'y a pas eu de morts comme dans l'expérimentation 1. Ainsi, le faible niveau de protéines brutes dans la ration réduirait la sensibilité aux troubles digestifs après le sevrage, empêchant ainsi des cas de mortalité.

Pour comparaison, chez le lapin au stade post-sevrage, il est recommandé un minimum de 19% d'ADF dans l'aliment, pour réduire les risques de troubles digestifs (Gidenne et al., 2008). Nos expérimentations conduisent à recommander pour l'aulacode une teneur en ADF des aliments d'au moins 17%. Des études supplémentaires, sur de plus grand effectifs d'animaux, et avec des régimes dont le taux de fibre varierait entre 14 et 21% d'ADF permettraient de préciser notre première approche de recommandation.

Par ailleurs, nous ne pouvons cependant pas écarter un rôle possible de l'amidon dans la genèse de ces troubles digestifs chez l'aulacode en croissance, sachant que dans notre seconde expérimentation, la teneur en amidon était très élevée pour les régimes NB et NM (respectivement 40 et 35%). Des recherches spécifiques sur le rôle de l'amidon sur la physiopathologie de l'aulacode en croissance seraient nécessaires. Par exemple, il serait judicieux, en perspectives, d'analyser la concentration iléale en amidon chez l'aulacode pour estimer son efficacité de digestion de l'amidon, y compris pour de fortes ingestions d'amidon. En première approche, il semble néanmoins préférable de ne pas dépasser 26% d'amidon dans la ration de l'aulacode. En comparaison, chez le lapin sevré, un apport élevé d'amidon n'entraîne pas d'accroissement de la fréquence des troubles digestifs (Gidenne *et al.* 2005). C'est pourquoi chez le lapin au stade post-sevrage il n'est pas préconisé de recommandations en amidon en vue de réduire les troubles digestifs.

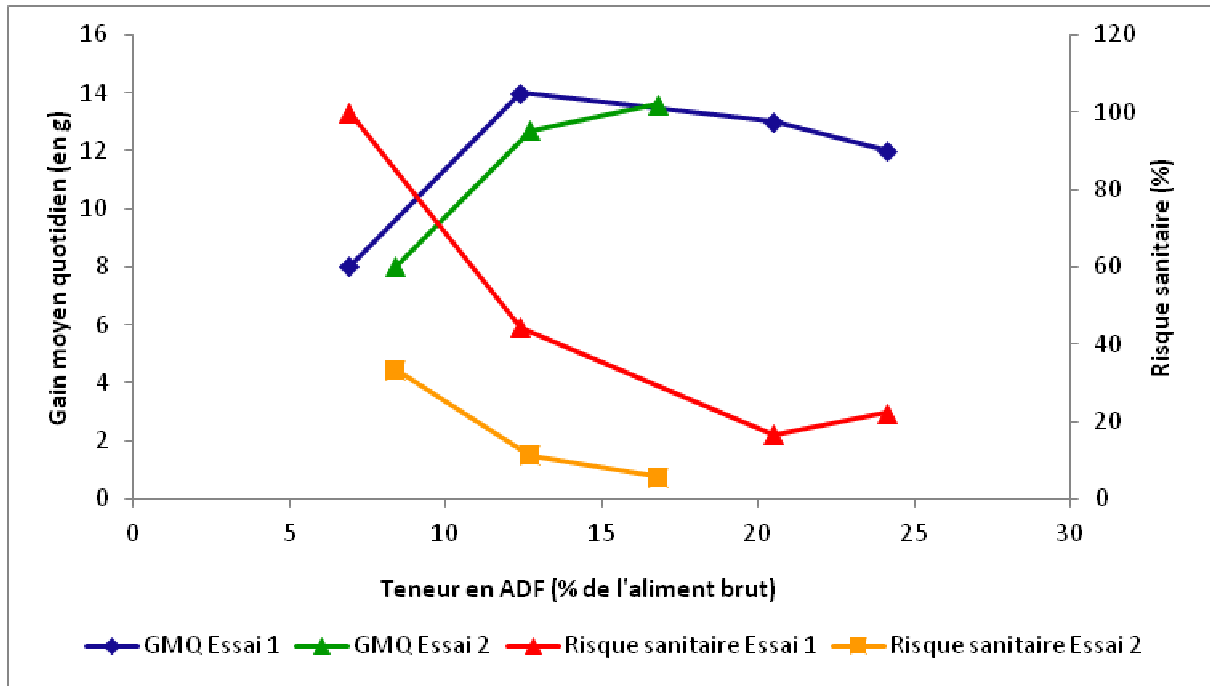


Figure 28. Comparaison des paramètres de croissance et de santé de l’aulacode au cours des deux expérimentations (Risque sanitaire = mortalité + morbidité).

4. Régime alimentaire et croissance de l’aulacode

Une trop forte diminution du niveau de fibres alimentaires a réduit les performances de croissance de l’aulacode (Figure 28), en association avec la détérioration du statut sanitaire. Ainsi, une réduction de la vitesse de croissance a été observée au cours des deux essais d’alimentation avec les régimes contenant 7 et 8 % d’ADF (essais 1 et 2 respectivement). Dans l’expérimentation 1, cette réduction de la vitesse de croissance était associée à l’altération de l’état sanitaire des animaux suite à la consommation de l’aliment le plus déficient en ADF. Dans l’expérimentation 2, la plus faible croissance avec le régime NB était probablement liée à la trop faible teneur en protéines de l’aliment (également pauvre en fibres mais très riche en amidon), ce qui sera discuté plus loin.

À l’opposé, une légère réduction de la vitesse de croissance a été également observée avec l’aliment à 24 % d’ADF au cours de l’expérimentation 1. Il a été montré chez le lapin que lorsque le taux de fibres est situé entre 10 et 25% d’ADF, le niveau d’ingestion est mieux corrélé avec la concentration en fibres de l’aliment qu’avec la concentration en ED (Gidenne et Lebas, 2005). Ainsi dans cette gamme de concentration, le lapin en croissance augmente son niveau d’ingestion lors de la hausse du niveau de fibres dans l’aliment pour compenser la baisse de concentration en énergie digestible de la ration. Durant notre étude, l’aulacode a

augmenté son niveau d'ingestion avec la hausse du taux de fibres dans les aliments, sauf entre les aliments ADF22 et ADF26 pour lesquels il n'y a pas eu de différence significative de niveaux d'ingestion. Ce résultat suggère que les animaux avaient atteint leur niveau d'ingestion maximal. La réduction de la vitesse de croissance observée avec le régime ADF26 s'explique aussi par l'effet dépresseur des fibres sur la digestibilité des constituants alimentaires de sorte que les besoins nutritionnels des animaux n'ont probablement pas pu être couverts par les quantités d'aliment ingérées. L'ensemble de ces résultats rappelle les contraintes à respecter en matière de fibres lors de formulation d'aliments pour les monogastriques herbivores : prise en compte d'un seuil d'apport minimal en raison de leurs rôles positifs sur la santé digestive, et excès à éviter en raison de leurs effets dépresseurs sur la digestibilité des nutriments. Ainsi, comme résumé par la figure 28, un maximum de fibres d'environ 21 % d'ADF semble adéquat pour ne pas trop pénaliser les performances de croissance de l'aulacode. Le taux de fibres optimisant la croissance se situe probablement entre 12 et 21 % d'ADF. Rappelons toutefois (voir paragraphe précédent) que l'optimisation sanitaire nécessite une teneur d'au moins 17% d'ADF.

Les moindres vitesses de croissance observées au cours de l'expérimentation 2 pour les lots d'animaux soumis aux régimes NB et NM que pour le lot NH pourraient également être liées aux faibles niveaux de protéines dans ces aliments. Un trop faible ratio PD/ED (< 6 g/MJ, dû à un faible apport protéique combiné avec un faible apport de fibres et correspondant à une teneur en protéines inférieure à 11% dans nos expérimentations) a pénalisé la croissance.

Dans ces régimes, les teneurs en lysine et acides aminés sulfurés (estimation basée sur les valeurs des matières premières dans les tables, Sauvante et al., 2002) dans ces aliments étaient de 4,4 et 4,6 g/kg d'aliment pour le régime NB, 4,9 et 4,9 g/kg d'aliment pour le régime NM, et 5,0 et 4,8 g/kg d'aliment pour le régime NH, respectivement. A titre de comparaison, les teneurs en lysine et acides aminés sulfurés recommandées dans la ration du lapin en croissance se situent respectivement à 7,5 et 5,5 g/kg d'aliment. Le niveau de lysine dans nos aliments semble relativement faible par rapport aux recommandations faites pour le lapin, mais le potentiel de croissance de l'aulacode est également beaucoup plus faible que celui du lapin et la lysine ne semble pas avoir été un facteur limitant de la croissance avec le régime NH. Ceci peut être étayé par le fait que dans nos trois régimes, les teneurs en lysine digestible et acides aminés sulfurés digestibles, calculées en utilisant la digestibilité des protéines brutes, étaient similaires, de respectivement de 3,4 et 3,6 g/kg pour le régime NB, 3,5 et 3,5 g/kg pour le régime NM, 3,5 et 3,4 g/kg pour le régime NH. Ceci montre donc que les différences de

performances de croissance entre lots n'étaient pas dues aux apports d'acides aminés essentiels, mais plutôt aux différences d'apport total de protéines brutes ou de ratio PD/ED.

La synthèse de ces relations entre composition des aliments d'une part et santé et croissance d'autre part, nous permet d'estimer quelques intervalles de recommandations nutritionnelles pour les apports en protéines brutes, fibres et amidon pour l'aulacode en croissance (tableau 38).

Tableau 38. Recommandations de teneurs en protéines, fibres et amidon en vue d'une prévention des risques sanitaires et d'une bonne croissance de l'aulacode au stade post-sevrage (par rapport à l'aliment brut).

	Minimum	Maximum
Protéines brutes (%)	11	à déterminer
Protéines digestibles (%)	8	à déterminer
Protéines digestibles / Energie digestible (g/MJ)	6	à déterminer
Lignocellulose (ADF, %)	17	21
Amidon (%)	à déterminer	26 (à confirmer)

CONCLUSIONS
ET
PERSPECTIVES

Ce travail avait pour objectifs i) d'approfondir les connaissances sur l'anatomie et la physiologie digestive de l'aulacode, ii) de connaître l'impact des fibres alimentaires et du ratio PD/ED sur la santé et la croissance de l'aulacode, iii) de tenter de remplacer des sources protéiques par des céréales, sources d'amidon, en vue de baisser le coût de l'alimentation. L'originalité de notre travail repose d'abord sur l'animal étudié. Il s'agit d'un animal sauvage dont la viande est très prisée en Afrique subsaharienne, sur lequel plusieurs travaux sont menés dans le but de réussir sa domestication et réduire la pression de la chasse sur l'espèce sauvage. L'originalité de notre étude repose aussi sur l'âge des animaux choisis : le stade post-sevrage. La plupart des travaux réalisés sur l'aulacode ont été effectués sur des animaux adultes alors que les problèmes de mortalité dans les élevages concernent surtout les animaux jeunes. Enfin, aucune étude n'avait encore été réalisée sur les paramètres fermentaires et le microbiote caecal de l'aulacode, or ces connaissances sont nécessaires pour mieux appréhender le fonctionnement digestif de ce monogastrique herbivore. Nous avons en particulier apporté des connaissances originales en caractérisant la communauté bactérienne de l'écosystème caecal de l'aulacode à l'aide de méthodes modernes de microbiologie moléculaire.

Nos travaux ont montré que, lors d'utilisation d'un aliment complet granulé, il est nécessaire d'apporter des fibres, avec une teneur comprise entre 17 et 21 % d'ADF pour à la fois éviter des troubles digestifs graves tels que les entérites hémorragiques et garantir une bonne vitesse de croissance des animaux. Le taux de protéines brutes doit être supérieur à 11 % de l'aliment pour ne pas pénaliser les performances de croissance.

Nos travaux ont également révélé que le caecum de l'aulacode est volumineux et renferme plus de 40% du contenu digestif. Ce résultat suggère que cet organe joue un rôle très important dans la digestion chez l'aulacode, comme en témoigne la concentration caecale élevée en AGV. Notre étude a en outre montré que la composition du microbiote caecal de l'aulacode est différente de celle de monogastriques connus tels que le lapin ou le cobaye. Elle se caractérise par une grande diversité des genres bactériens majoritaires et surtout par l'abondance d'espèces du phylum des Spirochaetes, pourtant peu représenté chez le lapin et le cobaye.

L'ensemble des connaissances issues de ce travail ouvrent vers plusieurs perspectives de recherche. Il serait intéressant de poursuivre ce travail par la recherche de la composition optimale des aliments, en resserrant les fourchettes de teneurs en ADF et protéines issues de ce notre travail, sur des effectifs plus importants d'animaux, et avec des aliments plus variés. Une étude plus approfondie du microbiote avec mesure des densités bactériennes par qPCR en

plus des abondances relatives et une étude des archées et des protozoaires permettraient une analyse plus globale et plus complète des communautés microbiennes du caecum de l'aulacode.

Par ailleurs, dans l'objectif de formuler un aliment moins cher pour l'élevage de l'aulacode, il sera nécessaire de rechercher d'autres matières premières locales disponibles, peu coûteuses, en alternative au maïs, trop pauvre en protéines. Peut-être faudrait-il se placer dans un contexte d'élevages plus traditionnels et ne pas seulement porter la réflexion sur un aliment complet granulé pour des élevages hors sol. La réflexion pourrait ainsi porter sur la fourniture d'un aliment granulé, concentré complémentaire d'un fourrage distribué à volonté.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Abecia L., Fondevila M., Balcells J., Edwards J.E., Newbold C.J. et McEwan N.R. 2005. Molecular profiling of bacterial species in the rabbit caecum. *FEMS Microbiology Letters*, 244: 111-115.

Adjahoutonon K.Y.K.B., Mensah G.A. et Akakpo A.J. 2007. Evaluation des performances de production des élevages d'aulacodes installés dans le sud-est du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*. N°56, pp. 36-45.

Adjanooun E. 1988. Contribution au développement de l'élevage de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*, TEMMINCK, 1827) et à l'étude de sa reproduction, Thèse de Doctorat d'Etat ENV d'Alfort. 198 p.

Adjanooun E. 1992. Le cycle sexuel et la reproduction de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* Temminck, 1827). *Mammalia*, 56: 109-119.

Adoumbene J. 1991. L'appareil reproducteur male de l'aulacode. (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1821). Etude anatomo-histologique. Thèse Médecine vétérinaire. Université cheikh Anta-Diop – Dakar. Ecole inter-états des sciences et médecines vétérinaires (E. J. S. M. V.)

Adoun C. 1992. Aperçu sur la biologie de l'aulacode. In : 1^{ère} Conférence Internationale, l'aulacodiculture : acquis et perspectives. Cotonou : Bénin, p 49-72.

Adu E.K., Aning K.G., Wallace P.A. et Ocloo T.O. 2000. Reproduction and mortality in a colony of captive greater cane rats, *Thryonomys swinderianus*, Temminck. *Tropical Animal Health and Production*, 32: 11-17.

Agossou E. 1991. Etude anatomique et histologique de la portion tubulaire de l'appareil digestif de l'aulacode *Thryonomys swinderianus*, TEMMINCK, 1827). Thèse de médecine vétérinaire. Dakar, Sénégal, 62 p.

Ajahi, S.S et Tewe O.O. 1980. Food preferences and carcass composition of the grasscutter (*Thryonomys swinderianus*) in captivity. *African Journal of Ecology*, 18: 133-140.

Akomehi T. C. 1988. Aperçu sur la pathologie de l'aulacode. *Nature et faune* 4: 29-37.

Alogninouwa T. 1994. Contribution à l'étude anatomique et histologique de l'appareil digestif de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827). Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. Spécialité Biologie animale. 131 p.

Alogninouwa T., Agba K.C., Agossou E et Kpodekon M. 1996. Anatomical, histological and functional specificities of the digestive tract in the male grasscutter (*Thryonomys swinderianus*, Temminck 1827). *Anatomia Histologia Embryologia*, 25: 15-21.

Alogninouwa T., Koboret Y., Kpodekon M., Agossou E. et Fall E. H. M. 1992. Le tube digestif de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827) : relations morphologie, structure et pathologie ; In : 1^{ère} Conférence Internationale sur l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin, p 73-78.

Amany K.A. 1973. Etude d'une population d'aulacodes dans les savanes de Lamto, DEA d'écologie tropicale, FAST, Université d'Abidjan, Côte-d'Ivoire, 1973.

Amany K.A. 1978. Données écologiques et biologiques sur l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* T.) dans les savanes de Lamto. Thèse de doctorat Université Nationale de Côte-d'Ivoire, n°40, p 4-72.

Andersson A.F., Lindberg M., Jakobsson H., Bäckhed F., Nyrén P., Engstrand L. 2008. Comparative analysis of human gut microbiota by barcoded pyrosequencing. *PloS One*, 3: e2836.

Asibey E.O.A. 1974a. The grass-cutter (*Thryonomys swinderianus*, TEMMINCK, 1827) in Ghana. In : Biology of Hystricomorph rodents: *Symposia of the Zoological Society of London*, p 171-181.

Asibey E.O.A. 1974b. Reproduction in the grasscutter (*Thryonomys swinderianus* Temminck), in Ghana. *Symposia of the Zoological Society of London*, 34: 251-263.

AVMA. 2007. American Veterinary Medical Association guidelines on euthanasia. <https://www.avma.org/KB/Policies/Documents/euthanasia.pdf>

Baptist R. et Mensah G. A. 1986. The cane rat: farm animal of the future? *World animal review*, 60: 2-6.

Barboza P. S et Hume I. D. 2006. Physiology of intermittent feeding: integrating responses of vertebrates to nutritional deficit and excess. *Physiological and Biochemical Zoology*, 79: 250–264.

Bellier R. et Gidenne T. 1996. Consequences of reduced fibre intake on digestion, rate of passage and caecal microbial activity in the young rabbit. *British Journal of Nutrition*, 75: 353-363.

Bellier R., Gidenne, T., Vernay, M. et Colin, M. 1995. In vivo study of circadian variations of the cecal fermentation pattern in postweaned and adult rabbits. *Journal of Animal Science*, 73: 128-135.

Bennegadi N., Fonty G., Millet L., Gidenne T. et Licois D. 2003. Effects of age and dietary fibre level on caecal microbial communities of conventional and specific pathogen-free rabbits. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 15: 23-32.

Bennegadi N., Gidenne, T. et Licois, D. 2001. Impact of fibre deficiency and sanitary status on non-specific enteropathy of the growing rabbit. *Animal Research*, 50: 401–413.

Bennegadi-Laurent N., Gidenne T. et Licois D. 2004. Nutritional and sanitary statuses alter postweaning development of caecal microbial activity in the rabbit. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Journal of Molecular and Integrative Physiology*, 139: 293-300.

Bhat, M.K. et Bhat, S. 1997. Cellulose degrading enzymes and their potential industrial application. *Biotechnology Advances*, 15: 583-620.

Björnhag G. 1972. Separation and delay of contents in the rabbit colon. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 2: 125-136.

Björnhag G. et Snipes R.L. 1999. Colonic separation mechanism in lagomorph and rodent species. *Mitteilungen aus dem Museum für Naturkunde zu Berlin, Zoologische Reihe*, 75: 275-281.

Blas E. et Gidenne T. 2010. Digestion of sugars and starch, *In: De Blas C., Wiseman J. (Eds.), Nutrition of the rabbit*, CABI, pp. 19-38.

Booth A.N., Elvehjem C.A. et Hart E.B. 1949. The importance of bulk in the nutrition of the guinea pig. *Journal of Nutrition*, 37: 263-274.

Boulahrouf A., Fonty G. et Gouet P. 1991. Establishment, counts and identification of the fibrolytic bacteria in the digestive tract of rabbit. Influence of feed cellulose content. *Current Microbiology*, 22:1-25.

Boussarie D. 2000. Le cobaye, milieu de vie et alimentation. *Le nouveau praticien vétérinaire*, 2: 65-67.

Bozinovic F. 1995. Nutritional energetics and digestive responses of an herbivorous rodent (*Octodon degus*) to different levels of dietary fibre. *Journal of Mammalogy*, 76: 627-37.

Brescia F., Chardonnet P., Garine-Wichatitsky M. et Jori F. 2002. Les élevages non-conventionnels. *In : MAE, CIRAD, GRET, CTA, 2002. Mémento de l'agronome*, support CD-ROM.

Breznak J.A. 2002. Phylogenetic Diversity and Physiology of Termite Gut Spirochetes. *Integrative and Comparative Biology*, 42: 313-318.

Buagbe, E. 1986. Substitution du son de blé au maïs comme concentré dans une ration à base de fourrage pour l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*, TEMMINCK, 1827). Mémoire d'ingénieur agronome, N°86/01PAESA, Université du Bénin, Togo.

Carleton, M.D. et Leach, E.H. 1950. Schafer's Essentials of Histology, 15th edn. Longmans, Green and Co., London.

Carré B. et Brillouet J.M. 1989. Determination of water-insoluble cell - walls in feeds: interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 72: 463-467.

Catala J. et Bonnafous R. 1979. Modifications de la microflore quantitative, de l'excrétion fécale et du transit intestinal chez le lapin, après ligature du canal pancréatique. *Annales de Zootechnie*, 28: 128.

Campbell J. H., Foster C. M., Vishnivetskaya T., Campbell A. G., Yang Z. K., Wymore A., Palumbo A. V., Chesler E. J. And Podar M., 2012. Host genetic and environmental effects on mouse intestinal microbiota. *The ISME Journal*, 1-12.

Cheeke P.R. 1987. Rabbit Feeding and Nutrition. Academic Press, Orlando, Florida, USA

Chiou P.W.S., Yu B. et Kuo C.Y. 2000. Comparison of digestive function among rabbits, guinea-pigs, rats and hamsters. I. Performance, digestibility and rate of digesta passage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 13: 1499-1507.

Combes S., Michelland R.J., Monteils V., Cauquil L., Soulie V., Tran N.U., Gidenne T. et Fortun-Lamothe, L. 2011. Postnatal development of the rabbit caecal microbiota composition and activity. *FEMS Microbiology Letters*, 77: 680-689.

Cork, S.J., Hume, I.D. et Faichney, G.J. 1999. Digestive strategies of nonruminant herbivores: The role of the hindgut. In: *Nutritional Ecology of Herbivores, Proceedings of the Vth International Symposium on the Nutrition of Herbivores*, (eds) H-J.G. Jung & G.C. Fahey, pp. 210-260. American Society of Animal Science, Savoy.

Cortez S., Brandeburger H., Greuel E. et Sundrum A. 1992. Investigations of the relationships between feed and health status on the intestinal flora of rabbits. *Tierärztliche Umschau*, 47: 544-549.

De Blas C. 1992. The roles of fibre in rabbit nutrition. *Journal of Applied Rabbit Research*, 15: 1329–1343.

De Blas C., García J. et Carabaño R. 1999. Role of fibre in rabbit diets: a review. *Annales de Zootechnie*, 48: 3–13.

Delany M.J. et Happold D.C.D. 1979. *Ecology of African Mammals*. Longman éd. London.

Ewer R.F. 1969. Form and function in the grass cutter, *Thryonomys swinderianus* Temm. (*Rodentia, Thryonomyidae*). *Ghana Journal of Science*, 9: 131–141

Fantodji A. et Mensah G.A. 2000. Rôle et impact économique de l'élevage intensif de gibier au Bénin et en Côte d'Ivoire. In: Actes Séminaire international sur l'élevage intensif de gibier à but alimentaire en Afrique. Libreville (Gabon) 23-24 mai 2000. Projet DGEG/VSF/ADIE/CARPE/ UE. p. 25-42.

Fantodji A. et Soro D. 2004. L'élevage d'aulacodes : expérience en Côte-d'Ivoire. Editions du Gret. 137 p.

Fantodji A., Traoré B. et Kouamé L.P. 2003. Influence de la drêche de brasserie et de *Leucaena leucocephala* sur la croissance de *Thryonomys swinderianus* en captivité. *Agronomie Africaine*, 15(1), p 39-50.

Foley W.J. et Cork S.J. 1992. Use of fibrous diets by small herbivores: how far can the rules be 'bent'? *Tree*, 7: 159–62.

Fonty G. et Chaucheyras-Durand F. 2007. *Les écosystèmes digestifs*. Lavoisier. Paris, 311 p.

Fortun-Lamothe L. et Boullier S. 2007. A review on the interactions between gut microflora and digestive mucosal immunity. Possible ways to improve the health of rabbits. *Livestock Production Science*, 107: 1–18.

Fraga M.J., Barreno C., Caraba.o R., Mendez, J. et De Blas J.C. 1984. Effect of amounts of fibre and protein in the diet on growth and digestive traits of rabbits. *Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Ganadera*, 21: 91- 110.

Franz R., Hummel J., Hatt J.M. et Clauss M. 2011. Intake, selection, digesta retention, digestion and gut fill of two coprophageous species, rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) and guinea pigs (*Cavia porcellus*), on a hay-only diet. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 95: 564-70.

Fuss S. 2002. Physiologie et pathologie digestive du cobaye domestique (*Cavia porcellus*). Thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire. Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. 204 p.

Ganmavo A. 1992. Elevage de l'aulacode et sa contribution au développement du monde rural, cas du sud Bénin. In : 1^{ère} Conférence Internationale sur l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin, p 27-34.

García J., Carabaño R., Pérez-Alba L. et de Blas J.C. 2000. Effect of fiber source on cecal fermentation and nitrogen recycled through cecotrophy in rabbits. *Journal of Animal Science*, 78: 638-646.

Gidenne T. 1986. Quantitative variation of bacterial fermentation products in the digestive tract of growing rabbits during the 24-h cycle. Relationships with the dietary lignin content. *Annales de Zootechnie*, 35: 121-136.

Gidenne T. 1994. Effets d'une réduction de la teneur en fibres alimentaires sur le transit digestif du lapin. Comparaison et validation de modèles d'ajustement des cinétiques d'excrétion fécale des marqueurs. *Reproduction Nutrition Development*, 34: 295-306.

Gidenne T. 1996. Conséquences digestives de l'ingestion de fibres et d'amidon chez le lapin en croissance : vers une meilleure définition des besoins. *Inra Productions Animales*, 9: 243-254.

Gidenne T. 2000. Besoin en fibres et sécurité digestive du lapin en croissance. Lauréat du prix cuninov 2000. ASFC Journée du 5 Décembre 2000 - Prix "Cuninov 2000" - Fibres et sécurité alimentaire.

Gidenne T. 2003. Fibres in rabbit feeding for digestive troubles prevention: respective role of low-digested and digestible fibre. *Livestock Production Science*, 81: 105–117.

Gidenne T. 2010. - La maîtrise sanitaire dans un élevage de lapin en 2010. Session de formation ASFC - 1er Juin 2010. <http://www.asfc-lapin.com/Docs/Activite/Sessions-Formations/2010/04-ASFC%20Juin02010-GIDENNE-nutrition&maitrise-sanitaire.pdf>.

Gidenne T. et Garcia J. 2006. Nutritional and feeding strategies improving the digestive health of the young rabbit. In: Maertens L. and Coudert P. *Recent Advances in Rabbit Sciences*. p 229-238.

Gidenne T. et Lebas F. 1987. Estimation quantitative de la caecotrophie chez le lapin en croissance : variation en fonction de l'âge. *Annales de Zootechnie*, 36: 225-336.

Gidenne T. et Lebas F. 2005. Le comportement alimentaire du lapin. 11èmes Journées de la Recherche Cunicole, 29-30 novembre 2005, Paris.

Gidenne T. et Perez J.M. 1993. Effect of dietary starch origin on digestion in the rabbit. 1. Digestibility measurements from weaning to slaughter. *Animal Feed Science and Technology*, 42:237-247.

Gidenne T. et Perez J.M. 1994. Apport de lignines et alimentation du lapin en croissance. I. Conséquence sur la digestion et le transit. *Annales de Zootechnie*, 45: 313-322.

Gidenne, T., Arveux, P. et Madec, O. 2001. The effect of the quality of dietary lignocellulose on digestion, zootechnical performance and health of the growing rabbit. *Animal Science*, 73: 97–104.

Gidenne T., Carabaño R., Badiola I., Garcia J. et Licois D. 2007. L'écosystème caecal chez le lapin domestique: Impact de la nutrition et de quelques facteurs alimentaires Conséquences

sur la santé digestive du lapereau. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, 27-28 novembre 2007, Le Mans, France.

Gidenne T., Combes S., Feugier A., Jehl N., Arveux P., Boisot P., Briens C., Corrent E., Fortune H., Montessuy S. et Verdelhan S. 2009. Feed restriction strategy in the growing rabbit. 2. Impact on digestive health, growth and carcass characteristics. *Animal*, 3: 509–515.

Gidenne T., Combes S. et Fortun-Lamothe L. 2012. Feed intake limitation strategies for the growing rabbit: effect on feeding behaviour, welfare, performance, digestive physiology and health: a review. *Animal*, 6:1407-1419.

Gidenne T., Combes S., Licois D., Carabano R., Badiola I. et Garcia J. 2008. Ecosystème caecal et nutrition du lapin : interactions avec la santé digestive. *Inra Productions Animales*, 21: 239-250.

Gidenne T., Jehl N., Lapanouse A., et Segura M. 2004. Inter-relationship of microbial activity, digestion and gut health in the rabbit: effect of substituting fibre by starch in diets having a high proportion of rapidly fermentable polysaccharides. *British Journal of Nutrition*, 92 : 95–104.

Gidenne, T., Lebas F. et Fortun-Lamothe L. 2010. Feeding behaviour of rabbits. *Nutrition of the rabbit*. C. De Blas and J. Wiseman, CABI: 233-252.

Gidenne T., Perez J.M., Lapanouse A. et Segura M. 1996. Apports de cellulose dans l'alimentation du lapin en croissance. I. Conséquences sur la digestion et le transit. *Annales de Zootechnie*, 45: 289-298.

Gidenne T., Perez J.M. et Lebas F. 1998. Besoins en constituants pariétaux du lapin de chair. B. Archambeaud ed., Fonds SYPRAM, SOFIPROTEOL publ. Paris, 2p.

Gidenne T., Pinheiro V. et Falcaõ e Cunha L. 2000. A comprehensive approach of the rabbit digestion: consequences of a reduction in dietary fibre supply. *Livestock Production Science*, 64: 225–237.

Gidenne T., Scalabrani F. et Marchais C. 1991. Adaptation digestive du lapin à la teneur en constituants pariétaux du régime. *Annales de Zootechnie*, 40: 73-84.

Gómez-Conde M.S., Garcia J., Chamorro S., Eiras P., Rebollar P.G., Perez de Rozas A., Badiola I., De Blas J.C. et Carabano R. 2007. Neutral detergent- soluble fiber improves gut barrier function in twenty-five-day-old weaned rabbits. *Journal of Animal Science*, 85: 3313-3321.

Gouet P. et Fonty G. 1973. Evolution de la microflore digestive du lapin holoxénique de la naissance au sevrage. *Annales de Biologie Animale, Biochimie, Biophysique*, 13: 733-735.

Gouet P. et Fonty G. 1979. Changes in the digestive microflora of holoxenic rabbits from birth until adulthood. *Annales de Biologie Animale, Biochimie, Biophysique*, 19: 553-566.

Haffar A., Laval A., Guillou J.P. 1988. Entérotoxémie à *Clostridium* spiroforme chez les lapins adultes. *Le Point Vétérinaire*, 20: 99-102.

Hardouin J. et Thys E. 1997. Le mini-élevage, son développement villageois et l'action de *BEDIM*. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 1: 92-99.

Henning, S.J. et Hird F.J.R. 1970. Concentrations and metabolism of short-chain fatty acids in the fermentative organs of two species of kangaroo and the guinea-pig. *British Journal of Nutrition*, 24:145-155.

Heymans J.C. 1992. Sur l'écoéthologie de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* T.) – Rongeur Thryonomyidé. In : 1^{ère} Conférence Internationale sur l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin, p 73-78.

Heymans J.C. et Codjia J.T.C. 1987. Sur l'actogramme en captivité de quatre rongeurs africains : les rats de Gambie, le rat palmiste et l'aulacode. *Cahiers d'Ethologie Appliquée*, 7: 247-262.

Heymans J.C. et Mensah G.A. 1984. Sur l'exploitation rationnelle de l'aulacode, Rongeur Thryonomyidé en R. du Bénin - données préliminaires. *Tropicultura*. 2: 56-59.

Hildebrand F., Ebersbach T., Bjørn Nielsen H. B., Li X., Sonne S. B., Bertalan M., Dimitrov P., Madsen L., Qin J., Wang J., Raes J., Kristiansen K. et Licht T.R. 2012. A comparative analysis of the intestinal metagenomes present in guinea pigs (*Cavia porcellus*) and humans (*Homo sapiens*). *BMC Genomics*, 13: 514.

Hintz, H.F. 1969. Review article: Comparison of digestion coefficients obtained with cattle, sheep, rabbits and horses. *Veterinarian*, 6: 45.

Hintz, H.F., Schryver, H.F. et Stevens, C.E. 1978. Digestion and absorption in the hindgut of nonruminant herbivores. *Journal of Animal Science*, 46: 1803–1807.

Hillyer E.V., Quesenberry K.E. 1997. Biology, husbandry and clinical techniques. In Hillyer E.V., Quesenberry K.E. Ferrets, rabbits and rodents. Clinical medicine and surgery. Edition Saunders, Philadelphia, p 243-259.

Holtenius K. et Björnhag G. 1985. The colonic separation mechanism in the guinea-pig (*Cavia porcellus*) and the chinchilla (*Chinchilla laniger*). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 82A: 537–542.

Holzer R., Mensah G.A. et Baptist R. 1986. Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*) III. Comportement de coprophagie. *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* 39: 247–252.

Hoover W.H. et Heitman R.N. 1972. Effects of dietary fiber levels on weight gain, caecal volume and volatile fatty acid production in rabbits. *Journal of Nutrition* 102: 375-380.

Hume I.D. 1989. Optimal digestive strategies in mammalian herbivores. *Physiological Zoology*, 62: 1145–1163.

Jori F. 1998. Evaluation de la diffusion de l'aulacodiculture au Gabon. Acquis, VSF report, Libreville 41 p.

Jori F. 2001. La cria de roedores tropicales (*Thryonomys swinderianus* y *Atherurus africanus*) como fuente de alimento en Gabon, Africa central. Thèse doctorale. Facultat de Veterinaria Universitat autonoma de Barcelona. 150 p.

Jori F. et Chardonnet P. 2001. Cane rat farming in Gabon. Status and perspectives. 5th International Wildlife Ranching Symposium, Pretoria, South Africa, march 2001.

Jori .F, Cooper J.E. et Casal J. 2001. Postmortem findings in captive cane rats (*Thryonomys swinderianus*) in Gabon. *Veterinary Record*, 148: 624-628.

Jori F., Mensah G.A., Adjanohoun E. 1995. Grasscutter production: an example of rational exploitation of wildlife. *Biodiversity and Conservation*, 4: 257-265.

Jung H.G. et Fahey G.C. 1983. Nutritional Implications of Phenolic Monomers and Lignin: a Review. *Journal of Animal Science*, 57: 206-219.

Kanarek R.B., Ogilby J.D., Mayer J. 1977. Effects of dietary caloric density on feeding behavior in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Physiology & Behavior*, 19: 611–618.

Karikari P.K. et Nyameasem J.K. 2009. Productive Performance and Carcass Characteristics of Captive Grasscutters (*Thryonomys swinderianus*) Fed Concentrate Diets Containing Varying Levels of Guinea Grass. *World Applied Sciences Journal*, 6: 557-563.

Kaur J., Chadha B.S., Kumar B.A., Kaur G.S. et Saini H.S. 2007. Purification and characterization of β -glucosidase from *Melanocarpus* sp. MTCC 3922. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10: 260-270.

Kennou S. et Lebas F. 1990. Résultats de croissance de lapins locaux tunisiens alimentés avec des rations contenant du fourrage vert ou ensile. *Cuni-Sciences*, 6: 31-39.

Lawani M.M. 1989. Physiologie digestive chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827) – Etudes préliminaires. Thèse de médecine vétérinaire, Dakar (Sénégal), 57 p.

Lebas F. 1973. Variations, chez le lapin, des coefficients d'utilisation digestive de la matière sèche, de la matière organique et de l'azote en fonction de l'âge, de la race et du sexe. *Annales de Biologie Animale, Biochimie, Biophysique*, 13: 767.

Lebas F. 2004. Recommandations pour la composition d'aliments destinés à des lapins en production intensive. *Cuniculture Magazine*, 31: 2.

Lebas F. 2012. Plantes tropicales utilisables comme fourrage pour les lapins. <http://www.cuniculture.info/Docs/Elevage/Figur-Tropic/chapitre3/plantes-00Composition.htm>

Lebas F., Coudert P., De Rochambeau H. et Thébault R.G. 1996. Nutrition et alimentation. *In* Le lapin : Elevage et pathologie, pp. 21-50 [FAO, editor]. Rome, Italie.

Lebas F., Gidenne T., Perez J.M. et Licois D. 1998. Nutrition and pathology. *In*: De Blas, C., Wiseman, J. (Eds.), *The Nutrition of the Rabbit*. CABI Publishing, p. 197–214.

Lebas F. et Laplace J.P. 1972. Mensuration viscérales chez le lapin. I. Croissance du foie, des reins et des divers segments intestinaux entre 3 et 11 semaines d'âge. *Annales de Zootechnie*, 21: 37-47.

Lebas F. et Laplace J.P. 1977. Growth and digestive transit in the rabbit. Variations determined by physical form, composition and crude fiber content of the feed. *Annales de Biologie Animale, Biochimie, Biophysique*, 17: 535-553.

Lebas F., Laplace J.P. et Droumenq P. 1982. Effets de la teneur en énergie de l'aliment chez le lapin. Variation en fonction de l'âge des animaux et de la séquence des régimes alimentaires. *Annales de Zootechnie*, 31: 233-256.

Lee S.C., Prosky L. et Vries J.W. 1992. Determination of total, soluble, and insoluble dietary fiber in foods enzymatic- gravimetric method, MES-TRIS buffer: collaborative study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 75: 395-416.

Lilburn T.G., T.M. Schmidt et Breznak J.A. 1999. Phylogenetic diversity of termite gut spirochaetes. *Environmental Microbiology*, 1: 331–345.

Liu Z., Lozupone C., Hamady M., Bushman F.D. et Knight R. 2007. Short pyrosequencing reads suffice for accurate microbial community analysis. *Nucleic Acids Research*, 35: e120.

Maître I., Lebas F., Arveux P., Bourdillon A., Duperray J. et Saint Cast Y. 1990. Taux de lignocellulose (ADF de Van Soest) et performances de croissance du lapin de chair. 5^e Journée Rech. Cunicole. ITAVI, Paris, vol 2, 56.1-56.11.

Marounek M. et Vovk S.J. 1995. Distribution of activity of hydrolytic enzymes in the digestive tract of rabbits. *British Journal of Nutrition*, 73: 463-469.

Martignon M.H., Combes S. et Gidenne T. 2009. Effect of the feed distribution mode in a strategy of feed restriction: effect on the feed intake pattern, growth and digestive health in the rabbit. 13^{ème} Journée es de recherches Cunicoles, Le Mans, France, pp. 39–42.

Marty J. et Vernay M. 1984. Absorption and metabolism of the short-chain fatty acids in the hindgastrointestinal tracts (GIT) of the rabbit. *British Journal of Nutrition*, 51: 265-277.

Massip K., Cauquil L., Zemb O. et Gidenne T. 2012. High throughput 16S-DNA sequencing for phylogenetic affiliation of the caecal bacterial community in the rabbit. Impact of the hygiene of housing and of the intake level. *In Proc.: Symposium on Gut Microbiology. Gut microbiota: friend or foe? Clermont-Ferrand - France 17 - 20 june.*

Mensah G.A. 1992. Rapport final des travaux de recherche sur l'alimentation chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) en captivité étroite de 1988 à 1992. *In: Manuel du programme de formation en aulacodiculture (élevage d'aulacode, Thryonomys swinderianus, Temminck, 1827).* Cotonou. Bénin. 185 p.

Mensah G.A. 1993. Futteraufnahme und verdaulichkeit beim grasnager (*Thryonomys swinderianus*). Thèse de doctorat. Institut 480, Université de Hohenheim, Allemagne. 107 p.

Mensah G.A. 1995. Consommation et digestibilité alimentaire chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*). *Tropicultura*, 13: 123-124.

Mensah G.A. 2002. La recherche en aulacodiculture : impacts sur la production et perspectives. Deuxième conférence sur la promotion de la diffusion de l'élevage d'aulacodes en Afrique au sud du Sahara des 17, 18 et 19 décembre 2002. Godomey, Bénin. 7p.

Mensah G.A. et Baptist R. 1981. Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus* TEMMINCK 1827). Mode d'accouplement et durée de gestation. *Revue de Médecine Vétérinaire*, 39: 239-242.

Mensah G.A., Blümmel M., Borowy N., Stier C. H. et Gall C.F. 1992. Consommation et digestibilité alimentaires chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*). In : 1^{ère} Conférence Internationale sur l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin, p 151-156.

Mensah G.A. et Ekué M.R.M. 2003. L'essentiel en aulacodiculture. C.B.D.D./NC-IUCN/KIT, République du Bénin/Royaume des Pays Bas, 168 p.

Menye F. et Nkolo L.M. 2009. Elevage des Aulacodes. Rapport de Formation de 12 Animateurs au Centre Pilote de Koundi. Cameroun. [www. http://data.cameroun-foret.com/system/files/07_01_182.pdf](http://data.cameroun-foret.com/system/files/07_01_182.pdf).

Meyer K., Hummel J. et Clauss, M. 2010: The relationship between forage cell wall content and voluntary food intake in mammalian herbivores. *Mammal Review*, 40: 221–245.

Miller, J.N., Smibert R.M. et Norris S.J. 1992. The genus *Treponema*. In A. Ballows, H. G. Truiper, M. Dworkin, W. Harder, and K.-H. Schleifer (eds.), *The prokaryotes*, pp. 3537–3559. Springer-Verlag, New York.

Monteils V., Cauquil L., Combes S., Godon J.J. et Gidenne T. 2008. Potential core species and satellite species in the bacterial community within the rabbit caecum. *FEMS Microbiology Letters*, 66: 620-629.

National Research Council. 1995. Nutrient requirements of laboratory animals, Fourth revised edition 1995. National Academy Press, Washington D.C., 173 p.

Nicodemus N., Perez-Alba L., Carabaño R., De Blas C., Badiola I. et Perez De Rozas A.J.G. 2004. Effect of fibre and level of ground of fibre sources on digestion and ileal and caecal characterization of microbiota of early weaned rabbits. *In: Proc. of the 8th World Rabbit Congress, C. Becerril and A. Pro (Eds.), 7- 10 september, Puebla, Mexico, Colegio de Postgraduados for WRSA publ., pp 143.* (<http://www.dcam.upv.es/8wrc/>)

Ntsame N.M. et Edderai D. 2000. Résultats zootechniques de la station d'aulacodiculture d'Owendo. Actes du séminaire international sur l'élevage intensif du gibier à but alimentaire en Afrique, Libreville, p 75-77.

O'Malley B. 2005. *Clinical Anatomy and Physiology of Exotic Species: Structure and Function of Mammals, Birds, Reptiles, and Amphibians.* London, UK: Elsevier Saunders.

Padilha M.T.S., Licois D., Gidenne T., Carré B. et Fonty G. 1995. Relationships between microflora and caecal fermentation in rabbits before and after weaning. *Reproduction Nutrition Development*, 35: 375-386.

Pan X., Chen F., Wu T., Tang H., and Zhao Z., 2009. Prebiotic oligosaccharides change the concentrations of short-chain fatty acids and the microbial population of mouse bowel. *J Zhejiang Univ Sci B.* 10(4): 258–263

Parigi Bini R. et Xiccato G. 1998. Energy metabolism and requirements. In: De Blas, C. and Wiseman, J. (ed.) *The nutrition of the rabbit.* CABI Publishing, Wallingford, UK, Chapter 7, p. 103-131.

Parker D.S. 1976. The measurement of production rates of short-chain fatty acids in the caecum of the conscious rabbit. *British Journal of Nutrition*, 36: 61-70.

Partridge G.G., Garthwaite P.H. et Findlay M. 1989. Protein and energy retention by growing rabbits offered diets with increasing proportions of fibre. *Journal of Agricultural Science*, 112: 171-178.

Patten G.S., Bird A.R., Topping D.L. et Abeywardena M.Y. 2004. Effects of convenience rice congee supplemented diets on guinea pig whole animal and gut growth, caecal digesta SCFA and in vitro ileal contractility. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 13: 92-100.

Perez J.M., Gidenne T., Bouvarel I., Arveux P., Bourdillon A., Briens C., Le Nour J., Messenger B., Mirabito L. 1996. Apport de cellulose dans l'alimentation du lapin en croissance. II. Conséquence sur les performances et la mortalité. *Annales de Zootechnie*, 45: 299-309.

Perez J.M., Gidenne T., Bouvarel I., Arveux P., Bourdillon A., Briens C., Le Naour J., Messenger B. et Mirabito L. 2000. Apports d'amidon en remplacement de fibres digestibles dans l'alimentation du lapin en croissance. 2. Conséquences sur les performances et la mortalité par diarrhée. *Annales de Zootechnie*, 49: 369-377.

Perez J.M., Lebas F., Gidenne T., Maertens L., Xiccato G., Parigi-Bini R., Dalle Zotte A., Cossu M.E., Carazzolo A., Villamide M.J., Carabaño R., Fraga M.J., Ramo M.A., Cervera C., Blas E., Fernandez J., Falcao E Cunha L. et Bengala Freire J. 1995. European reference method for *in vivo* determination of diet digestibility in rabbits. *World Rabbit Science*, 3:41-43.

Peterson A.D., Baumgardt B.R. 1971. Food and energy intake of rats fed diets varying in energy concentration and density. *Journal of Nutrition*, 101: 1057–1067.

Piattoni F., Maertens, L. et Demeyer D. 1996. In vitro study of the age-dependent caecal fermentation pattern and methanogenesis in young rabbits. *Reproduction Nutrition Development*, 36: 253-261.

Pruesse E., Quast C., Knittel K., Fuchs B.M., Ludwig W., Peplies J., Glöckner F.O. 2007. SILVA: a comprehensive online resource for quality checked and aligned ribosomal RNA sequence data compatible with ARB. *Nucleic Acids Research*, 35: 7188-7196.

Rosevear D.R. 1969. The rodents of West Africa. Trustees of the British Museum (Natural History), London.

Sakaguchi E. 2003. Digestive strategies of small hindgut fermenters. *Animal Science Journal*, 74:327–337.

Sakaguchi E., Becker G., Rechkemmer G., et Engelhardt W.V. 1985. Volume, solute concentrations and production of short-chain fatty acids in the caecum and upper colon of the guinea pig. *Z. Tierphysiol. Tierernährg. Futtermittelkde.* 54: 276-285.

Sakaguchi E., Itoh H., Kohno T., Ohshima S. et Mizutani K. 1997. Fiber digestion and weight gain in guinea pigs fed diets containing different fiber sources. *Experimental Animals*, 46: 297-302.

Sakaguchi E., Itoh H., Uchida S., et Horigome T. 1987. Comparison of fibre digestion and digesta retention time between rabbits, guinea-pigs, rats and hamsters. *British Journal of Nutrition*, 58:149-158

Sakaguchi E. et Ohmura S. 1992. Fibre digestion and digesta retention time in guinea-pigs (*Cavia porcellus*), degus (*Octodon degus*) and leaf-eared mice (*Phyllotis darwini*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 103:787–91.

Sauvant D., Perez J.M. et Tran G. 2002. Tables de composition et de la valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. INRA, Paris.

Schloss P.D., Westcott S.L., Ryabin T., Hall J.R., Hartmann M., Hollister E.B., Lesniewski R.A., Oakley B.B., Parks D.H., Robinson C.J., Sahl J.W., Stres B., Thallinger G.G., Van Horn D.J. et Weber, C.F. 2009. Introducing mothur: open-source, platformindependent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 75: 7537-7541.

Sharkey M.J. 1971. Some aspects of coprophagy in rabbits and guinea pigs fed fresh lucerne. *Mammalia*, 35: 162-167.

Skinner J.D. et Smithers R.H.N. 1990. - The mammals of the southern African subregion. Pretoria University Press, Pretoria.

Slade L.M. et Hintz H.F. 1969. Comparison of digestion in horses, ponies, rabbits and guinea pigs. *Journal of Animal Science*, 28: 842.

Soltner D. 1994. Alimentation des animaux domestiques tome 1 : les principes. Collection Science et Techniques Agricoles, Bressure, 180 p.

Sperber I., Bjornhag G. et Ridderstrile Y. 1983. Function of proximal colon in lemming and rat. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 13: 243-256.

Swart D., Siebrits F.K. et Hayes J.P. 1993. Utilization of metabolizable energy by ostrich (*Struthio camelus*) chicks at two different concentrations of dietary energy and crude fibre originating from lucerne. *South African Journal of Animal Science*, 23:136-141.

Takahashi T. et Sakaguchi E. 2006. Transport of bacteria across and along the large intestinal lumen of guinea pigs. *Journal of Comparative Physiology B*, 176: 173-178.

Tao Z.Y. et Li F.C. 2006. Effects of dietary neutral detergent fibre on production performance, nutrient utilization, caecum fermentation and fibrolytic activity in 2 to 3 month-old New Zealand rabbits. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 90: 467-473.

Thomas O. 1894. Description of a new species of reed-rat (aulacodus) from East Africa, with remarks on the milk-dentition of the genus. *Annals Magazine of Natatural History*. XIII (6): 202-204.

Tobin G. 1996. Small pets-Food types, nutrient requirements and nutritional disorders. 202 In : Kelly N., Wills J. Manual of companion animal nutrition and feeding, 4ème édition, British Small Animal Veterinary Association, 208-225.

Toleba S.S., Mensah G. A., Zougrou C.G.T., Codjo B., Kpera G.N. et Pomalegni S.C.B. 2007. Inventaire des ingrédients alimentaires simples et composés utilisés pour nourrir l'aulacode d'élevage au sud et au centre du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 57: 1-7.

Traoré B. 2010. Analyse de quelques activités enzymatiques digestives et influence d'aliments complets granulés sur des performances zootechniques de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) d'élevage. Thèse de doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte-d'Ivoire, 201 p.

Traoré B., Fantodji A. et Allou V.K. 2008. Digestibilité in vivo chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*). *Archivos de Zootecnia*, 57: 229-234.

Van der Merwe M., et Van Zyl A. 2001. Postnatal growth of the greater cane rat *Thryonomys swinderianus* (Thryonomyidae: Rodentia) in Gauteng, *South Africa. Mammalia* 65: 495-507.

Van De Velde M. 1991. L'élevage d'aulacodes au Zaïre. Publication du service agricole, N°27, Administration de la coopération au développement; Bruxelles – Belgique, 90 p.

Van Soest P.J., Robertson J.B. et Lewis B.A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74: 3583-3597.

Van Zyl A. et Delpont J.H. 2010. Digestibility of nutrients and aspects of the digestive physiology of the greater cane rat, *Thryonomys swinderianus* in two seasons. *African Zoology*, 45: 254-264.

Van Zyl A., Meyer A.J. et Van der Merwe M. 1999. The influence of fibre in the diet on growth rates and the digestibility of nutrients in the greater cane rat (*Thryonomys swinderianus*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 123: 129–135.

Van Zyl A., Rambau R.V. et Van Der Merwe, M. 2005. Aspects of the anatomy and histology of the alimentary canal of the greater cane rat, *Thryonomys swinderianus*, with reference to its feeding physiology. *African Zoology*, 40: 25–36.

Vaughan T.A. 1972. Mammalogy. W. B. Saunders Company Philadelphia ; London and Toronto.

Verdouw H., Van Echteld C.J.A. et Dekkers, E.M.J. 1977. Ammonia determination based on indophenol formation with sodium salicylate. *Water Research*, 12: 399-403.

Verne J. 1963. Précis d'histologie: la cellule, les tissus, les organes. 6^e éd. Masson et Cie, Paris, 690 p.

Villière V. 1987. Influence du taux de cellulose de la ration sur la vitesse de transit et la digestibilité chez le cobaye. Thèse Médecine Vétérinaire, Lyon N° 113.

Vispo, C. et Hume I.D. 1995. The digestive tract and digestive function in the North American porcupine and beaver. *Canadian Journal of Zoology*, 73: 967–974.

Waitkuwait E. 1985. Point sur l'élevage de l'aulacode. Compte rendu des résultats obtenus après deux ans de recherche en Côte-d'Ivoire. LACENA, Côte-d'Ivoire, 12 p.

Wilkie D.S. et Carpenter J.F. 1999. Bushmeat hunting in Congo Basin: an assessment of impacts and options for mitigation. *Biodiversity and Conservation*, 8: 927-955.

Wood A.E. 1955. A revised classification of the rodents. *Journal of Mammalogy*, 36 : 165-187.

Xiccato G., Trocino A., Sartori A. et Queaque P.I. 2001. Influence de l'âge, du sevrage précoce et de l'aliment sur le développement des organes digestifs et des fermentations caecales chez le jeune lapin. *In* : 9^{èmes} Journées de la Recherche Cunicole, 28-29 novembre, Paris, France, 1 : 199-202.

Yéwadan T.L. 1992. Alimentation des aulacodes (*Thryonomys swinderianus*) élevés en captivité étroite. *In* : 1^{ère} conférence sur l'aulacodiculture, acquis et perspectives. Cotonou, Bénin. p 143-149.

Yéwadan T. L. 1988. Sur les aspects pratiques de la conduite de l'élevage et de l'alimentation de l'aulacode en captivité. *Nature et Faune*, 4: 22-24.

Yéwadan T.L. et Schrage R. 1992. Les performances zootechniques de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) élevé en captivité étroite. *In* : 1^{ère} Conférence Internationale, l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin. p 165-173.

Yéwadan T.L. et Schrage, R. 1995. Abrégé d'élevage des aulacodes. Rossdort, verlagsgesellschaft mbH ; GTZ, 103 p.

Yu B. et Chiou W.S. 1992. Effect of dietary fiber on the VFA production and absorption in the domestic rabbit's hindgut. *Journal of the Chinese Society of Animal Science*, 21: 29-35.

Yu B., Chiou, W.S. et Kuo C.Y. 2000. Comparison of digestive function among rabbits, guinea-pigs, rats and hamsters. II. Digestive enzymes and hindgastrointestinal tracts (GIT) fermentation. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 13: 1508-1513.

Zened A., S. Combes, L. Cauquil, J. Mariette, C. Klopp, O. Bouchez, A. Troegeler-Meynadier and F. Enjalbert. 2012. Microbial ecology of the rumen evaluated by 454 GS FLX pyrosequencing is affected by starch and oil supplementation of diets. *FEMS Microbiol. Ecol.* Doi : 10.1111/1574-6941.12011.

Zougou-Tovignon G.C. 2005. Influence des parties végétatives de manioc (*Manihot esculenta*) sur les performances zootechniques des aulacodes (*Thryonomys swinderianus*, TEMMINCK, 1827) d'élevage. Mémoire de DES, Université de Liège, Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 79 p.

ANNEXES

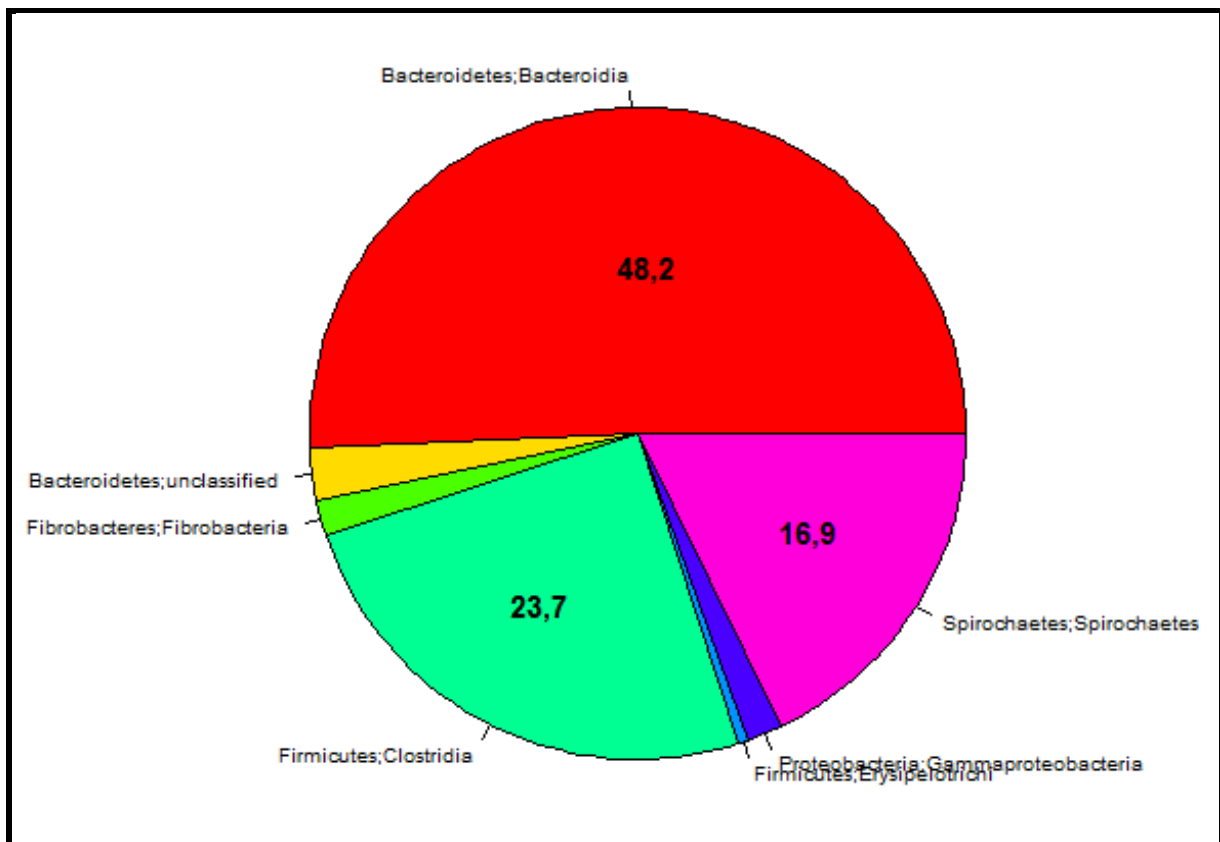
Annexe 1. Lots d'animaux, expérimentation 1

Lot 1 ADF8		Lot 2 ADF14		Lot 3 ADF22		Lot 4 ADF26	
n° aulacode	Poids	n° aulacode	Poids	n° aulacode	Poids	n° aulacode	Poids
2	348,2	6	346,8	11	344,8	8	307,2
5	356,7	20	334,4	14	333,2	10	273,6
7	332,3	44	215,8	16	360	15	386,3
14	411,8	49	338,8	18	279,9	17	313,6
21	353,6	51	151,9	28	194,7	24	315,1
25	371,3	72	424,3	42	163,8	26	278,6
34	273,9	73	346,9	45	278,2	33	317,6
46	204,2	74	271,4	55	341,8	35	207,2
48	200,8	88	327	61	384,7	36	218,1
76	350,4	91	263,8	62	352,5	41	332,5
77	361,8	94	341,3	64	372,5	50	423,4
78	353,4	95	296,4	70	351,1	56	430
79	198,8	96	355,7	81	238,8	57	413,3
86	360,4	97	296,4	83	404,8	63	323,8
93	294,8	99	426,8	108	309,8	69	355,1
98	395,4	102	298,7	110	368,6	100	380,8
101	452,4	104	415,1	113	370	109	352,1
112	394,8	117	443,2	114	462,7	8	307,2
Moyenne	334,2		327,5		328,4		331,1
±	±		±		±		±
écart- type	72,8		74,9		74,0		64,8

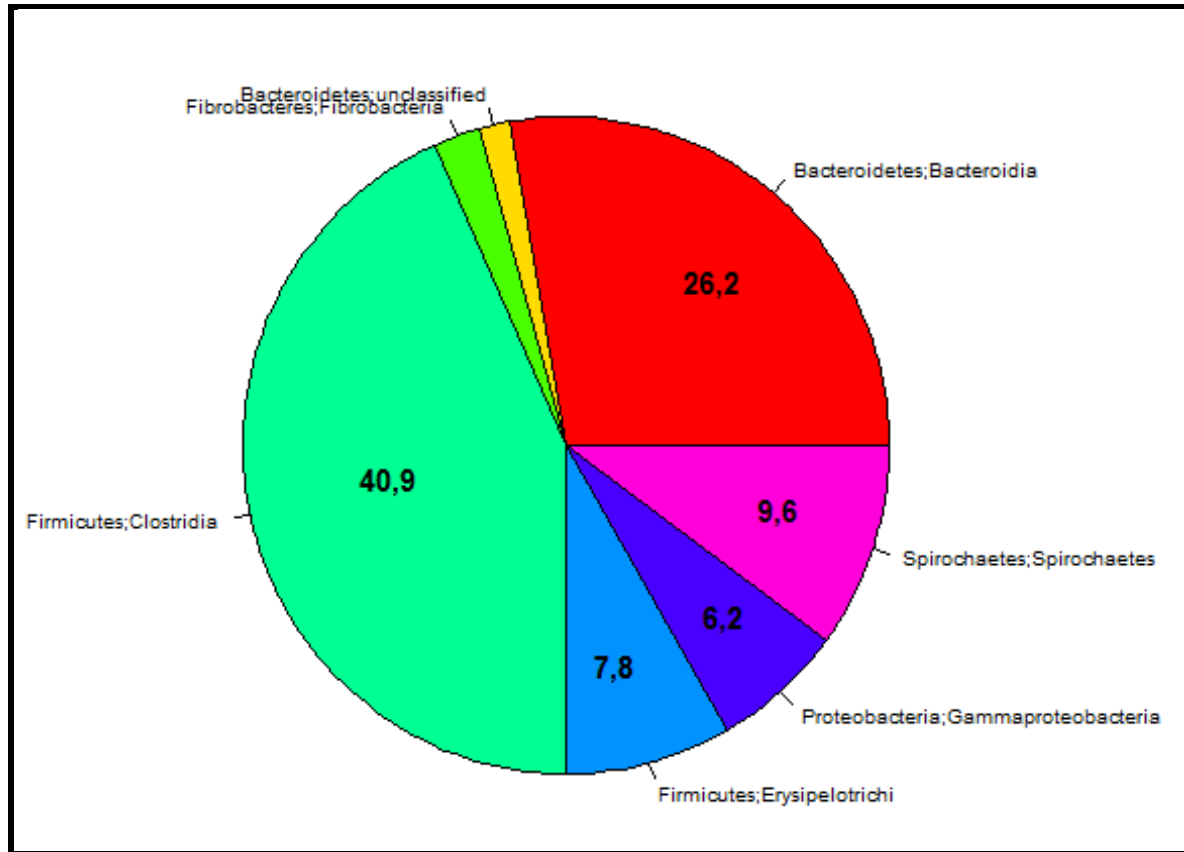
Annexe 2. Lots d'animaux, expérimentation 2.

LOT 1			Lot 2			Lot 3		
	NB			NM			NH	
N°	Poids	sexe	N°	Poids	sexe	N°	Poids	sexe
2	282,1	femelle	5	329,2	femelle	16	470,3	mâle
4	327,6	mâle	50	594,3	mâle	111	631,2	mâle
7	292,2	femelle	112	262,8	mâle	130	685,4	mâle
14	456,7	mâle	114	548,2	mâle	154	401,8	mâle
87	342,1	femelle	127	290,6	femelle	185	339,3	mâle
124	552,6	mâle	157	452,9	mâle	186	307,6	femelle
184	702,8	mâle	160	275	femelle	194	601,7	mâle
188	313,6	mâle	161	812	mâle	199	452,8	femelle
196	548,9	femelle	169	404,5	femelle	379	407,4	mâle
198	522,8	femelle	191	519,4	mâle	430	340,5	mâle
200	545,2	femelle	192	648,9	femelle	431	355,7	femelle
460	299	mâle	465	312,7	femelle	441	351,2	femelle
518	523,2	mâle	476	526,4	mâle	454	399,8	femelle
603	287,6	femelle	557	262,6	femelle	474	565,2	femelle
604	736,8	mâle	600	367,3	mâle	490	592,9	mâle
605	292,6	femelle	602	403,8	mâle	543	284,2	femelle
606	345,1	femelle	613	291,5	femelle	556	314,8	femelle
Moyenne	443,2			445,4			439,7	
±	±			±			±	
écart- type	152,1			167,6			120,3	

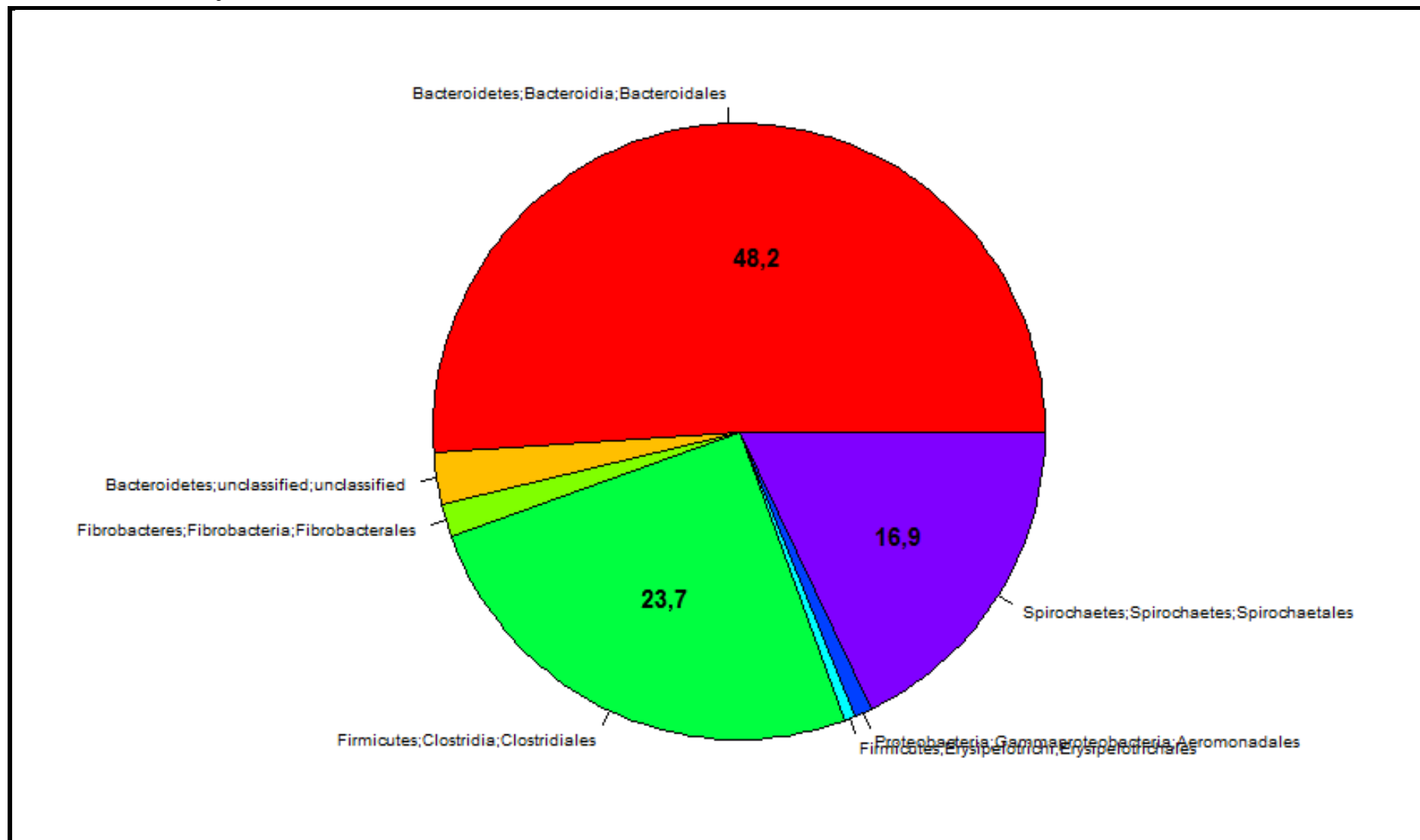
Annexe 3. Classes majoritaires chez les sevrans (%)



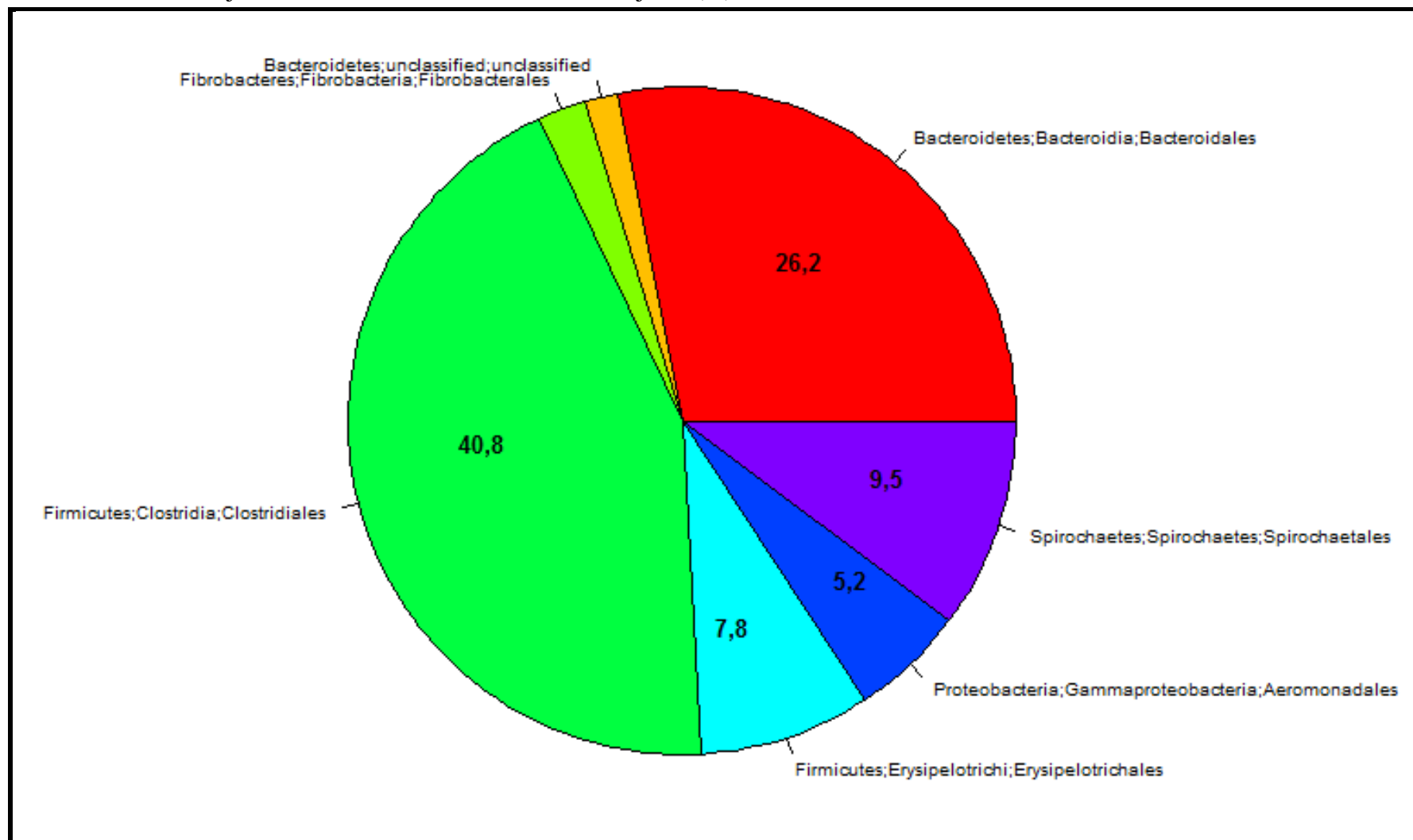
Annexe 4. Classes majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours (%)



Annexe 5. Ordres majoritaires chez les sevrans (%)



Annexe 6. Ordres majoritaires chez les animaux de 82 et 103 jours (%)



Annexe 7. Poster présenté au congrès de l'European Society of Veterinary and Comparative Nutrition, Saragosse, 2011.

Digestive anatomy and impact of dietary fibre on performances of the growing grasscutter (*Thryonomys swinderianus*)

Y.M. Yapi¹, F. Enjalbert², T. Gidenne², D. Zongo¹
¹National Polytechnic Institute Houphouët-Boigny of Yamoussoukro, Ivory Coast;
²INRA, INPT-ENSAT, ENVT, UMR 1289 Tandem, France
f.enjalbert@envt.fr

Introduction

The grasscutter is a rodent herbivore recently domesticated in several countries of sub-Saharan Africa for meat production. However, the development of this production to a rational and more productive model needs a better knowledge of the digestive physiology of this animal. This work aimed to study the digestive anatomy of the growing grasscutter and determine the impact of dietary fibre on growth rate and health.



Photo 1. Growing Grasscutter

Material and methods

In a first trial, 80 grasscutters (37 ± 5 days and 330 ± 70 g) were allocated to 4 groups of 20 animals and submitted to 4 diets containing 8, 14, 22 and 26% acid detergent fiber (ADF) on dry matter (DM) basis (ADF8, ADF14, ADF22 and ADF26). Individual weight and mortality were recorded for three months. In a second trial, 60 grasscutters (40 ± 7 days and 446 ± 152 g) were allocated to 3 groups of 20 animals, submitted to 3 diets containing 12, 17 and 22% ADF (ADF12, ADF17 and ADF22). Weight was measured for two months and pH, DM content and fresh weight of contents of digestive compartments were measured on animals slaughtered at 40, 83 and 103 days of age.

Results and Discussion

In the first trial, 33% mortality was observed in ADF8 after 7 weeks due to hemorrhagic enteritis. No mortality was observed in the other groups. Growth was most rapid with diet ADF14 followed by diet ADF22 and diet ADF26 (P < 0.05) (figure 1). In the second trial, growth was most rapid with diet ADF22 followed by diet ADF17 (Figure 2). DM content, pH and relative importance of the compartments (Table 1) did not vary with age or diet (P > 0.05).

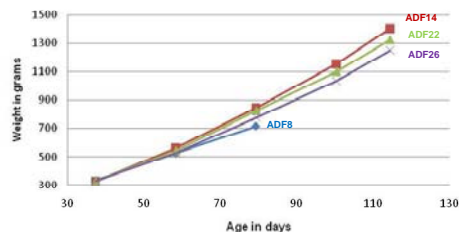


Figure 1. Evolution of animal weight in first trial

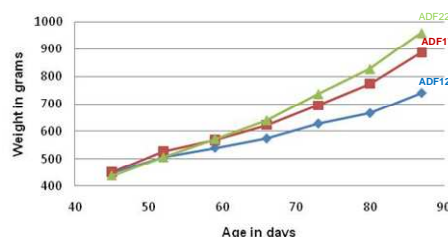


Figure 2. Evolution of animal weight in 2nd trial

Table 1. Some parameters of the digestive tract

Digestive compartments	Stomach	Small intestine	Caecum	Proximal colon	Distal colon
pH	2.1 ± 0.7	6.5 ± 0.6	6.0 ± 0.3	6.4 ± 0.3	-
DM content of digestive compartments (%)	27.8 ± 7.3	19.0 ± 5.5	20.7 ± 8.9	23.2 ± 11.8	33.1 ± 14.1
% of total fresh digestive content	23.6 ± 1.7	16.8 ± 1.3	44.0 ± 9.0	10.5 ± 0.8	5.1 ± 0.2

Conclusion

The optimum dietary level of lignocellulose for the growing grasscutter would be between 14 and 22%. The caecum appears to play an important role in the digestive function of this animal with more than 40% of total contents of the digestive tract.

Post-weaning changes in the digestive physiology and caecal fermentative activity in the greater cane rat (*Thryonomys swinderianus*). R1

Y. M. Yapi^{1,3,2,4}, T. Gidenne^{2,3,4}, Y Farizon^{3,2,4}, M. Segura^{2,3,4}, D. Zongo¹, F. Enjalbert^{3,2,4*}

¹National Polytechnic Institute Houphouët-Boigny of Yamoussoukro, Ivory Coast

²INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France

³ Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31076 Toulouse, France

⁴ Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France

The greater cane rat is a recently domesticated monogastric herbivore, and the importance of the caecum in the functioning of its digestive tract has frequently been mentioned. However, no data is available on caecal fermentative activity of this animal and research on the digestive physiology was only performed in adult animals. The present work was initiated to describe some parameters of the digestive tract anatomy and to study caecal fermentation of the growing cane rat. Thirty 40 day old weaned cane rats were used in this experiment. Six of them were immediately euthanized and twelve were housed in a collective pen for gastrointestinal tract (GIT) parameters measurements. Twelve others were kept in individual cages to record growth and food intake. Captive cane rats received a pelleted diet containing 12.5% of crude protein and 16.7% of lignocellulose. Six of the 12 collectively housed animals were euthanized on day 82 and a further 6 on day 103. The growth rate increased with age ($P < 0.01$) with a linear growth curve ($P < 0.001$) while the feed intake (g / kg body weight) did not vary ($P > 0.05$). The caecum represented the largest compartment of the digestive tract constituting more than 40% of total GIT contents. Acetate was the most abundant short chain fatty acid with more than 70% of the total, followed by propionate (less than 25%) and butyrate (around 5%). Short chain fatty acid profiles varied with age: when age increased, the acetate proportion increased ($P < 0.01$), the propionate proportion decreased ($P < 0.001$) and the butyrate proportion remained unchanged ($P > 0.05$). The propionate / butyrate ratio showed a decrease with an increase in age ($P = 0.05$). Ammonia concentrations did not vary with age ($P > 0.05$). It is concluded that the caecum is an important site of fermentation in the growing cane rat.

Keywords: cane rat, digestive physiology, caecum, fermentative activity, *Thryonomys*

*Corresponding author.

E-mail: f.enjalbert@envt.fr

INTRODUCTION

The greater cane rat (*Thryonomys swinderianus* Temminck, 1827) is a wild rodent present only in sub-Saharan Africa. As the meat of *T. swinderianus* is an important protein source in West Africa, the animal was recently domesticated in some countries for meat production. Breeding of the cane rats appears to be a good alternative to produce a source of protein and provides farmers with an additional income (Jori 2001). However, development of an efficient and economical breeding of this animal needs a better knowledge of its digestive physiology.

Research to understand the functioning of the digestive tract of this animal have been undertaken (Alogninouwa et al. 1996; Van Zyl et al. 2005 ; Van Zyl and Delpont 2010). The Cane rat is a hystricomorph monogastric herbivore similar to the guinea pig (*Cavia porcellus*) (Ewer 1969), hindgut fermenter that appears to practise caecotrophy (Holzer et al. 1986). The majority of monogastric herbivores have significant hindgut fermentation (Hintz et al. 1978), depending on microbial activity for a significant part of their energy requirement (30-40% of maintenance energy) (Engelhardt 1995). For many of these animals such as guinea pig, rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) or capybara (*Hydrochoerus hydrochaeris*) fermentation activity is particularly developed in the caecum. The caecum of the adult cane rat is the largest segment of the gastrointestinal tracts (GIT) (Van Zyl et al. 2005) as it is the case in guinea pigs (Snipes, 1997; Fuss 2002), rabbits (Snipes, 1997; Gidenne & Lebas 2006) and capybaras (Borges et al. 1996).

At this time, no data is available on caecal fermentative activity in the cane rat. Measurements of the relative proportions of the different segments of its digestive tract have been made only in adult animals (Van Zyl et al. 2005). Thus the aim of this study was to investigate the digestive anatomy of the growing cane rat and study its caecal fermentative activity from weaning (40 days old) to 103 days old.

MATERIALS & METHODS

Animals, diet and experimental design

Thirty weaned cane rats (40 day of age), born in captivity and reared at the experimental station (Graduate School of Agronomy, Yamoussoukro Ivory Coast), were used. Six animals were immediately euthanatized, one group of 12 animals was accommodated in a collective pen (100 x 50 x 40 cm), six of them being sacrificed at 82 days of age and the remaining 6 being sacrificed at 103 days of age for GIT parameters measurements and caecal sampling. Twelve animals were bred in individual cages (50 x 40 x 30 cm) to record growth and food intake. All animals had free access to water throughout the experiment, and were fed an experimental pelleted diet ad libitum, since we distributed every morning at 8:00 am, 200 grams of pellets per animal, representing more than 300% of the relative feed intake (g/day/kg of body weight) of adult cane rat reported by Van Zyl et al. (1999). The experimental diet was composed mainly of elephant grass (*Pennisetum purpureum*), cottonseed meal, corn, wheat bran and calcium carbonate (Table 1). These ingredients were mixed, crushed and pelleted (diameter = 4 mm, size=2-3 cm). The diet contained 12.5% of crude protein and 16.7% of acid detergent fiber (ADF) (Table 1).

Feed intake was measured in the twelve animals caged individually, for two periods: between weaning and 68 days and between 68 days and 96 days of age. Since the particular feeding behaviour of the greater cane rat leads to many feed losses, the determination of true intake needed special attention i.e., refusals and feed wastes were collected on a grid placed under each cage and weighed daily. The corresponding dry matter contents were also determined. Animal weights were measured once a week.

92 **Table 1.** Ingredients and chemical composition of the experimental diet.

Ingredients, g/kg		Nutrients, g/kg	
Elephant grass	265	Dry matter	915
Cottonseed meal	118	Crude protein (Nx6.25)	125
Wheat bran	207	Gross energy (kcal/kg)	3970
Corn	390	Neutral detergent fibre	334
Calcium carbonate	10	Acid detergent fibre	167
Salt	5	Acid detergent lignin	28
Vitamins and minerals mixture ^a	5	Crude ash	76

93 ^a :Vitamins: A: 2,000,000 UI/kg; D₃: 160,000 UI/kg; E: 3,000 mg/kg; B₁ 100 mg/kg; and trace-minerals: Cu²⁺:
 94 2,200 mg/kg; I: 40 mg/kg; Zn²⁺:9,600 mg/kg; Mn²⁺: 400 mg/kg; Co²⁺: 40 mg/kg; Se: 10 mg/kg; and coccidiostatic:
 95 robénidine (E 758) : 13,200 mg/kg ; (carrier: calcium carbonate)

96

97 **Slaughter and sampling procedures**

98 Animals were weighed and then slaughtered between 09:00 and 12:00 in the morning by
 99 exsanguination preceded by a blow to the head, consistent with the guidelines on euthanasia
 100 of the American Veterinary Medical Association (AVMA, 2007). Each digestive tract was
 101 removed, weighed to the nearest 0.01 g and ligated between the successive regions, i.e.,
 102 stomach, small intestine, caecum, proximal colon and distal colon. Sections were cut apart
 103 and the full fresh weight of each compartment was determined. The pH of each region was
 104 measured by inserting an electrode (pH-meter CG 805, Schott Gerate, Germany) into the
 105 digesta through a small incision. Thereafter, each region was emptied, the content was
 106 weighed and digesta samples were taken for dry matter measurement. The pH and the
 107 percentage of dry matter content of the distal colon were not determined because the content
 108 was too small. Two 1 g samples of caecum content were taken for the short-chain fatty acids
 109 (SCFA) and ammonia-nitrogen (NH₃-N) analyses. One gram of sample was diluted with 2 ml
 110 of H₂SO₄ at 2% w / v for SCFA analyse and one gram of sample was diluted with 3 ml of
 111 H₂SO₄ at 2% w / v for NH₃-N analyse. They were stored at -20°C until analysis. Finally, after
 112 being emptied, the wet mass of each empty compartment was determined. Time required for
 113 processing an individual animal ranged between 30 to 45 min after slaughter.

114

115 **Chemical analyses**

116 Dry matter (24 h at 103°C and weighed to the nearest 0.01 g) was determined on feed,
 117 refusals, wasted food and digesta. Fibrous fractions (neutral detergent fibre (NDF), ADF and
 118 acid detergent lignin (ADL) were determined on feed according to the sequential method of
 119 Van Soest *et al.* (1991) with an amyolytic pre-treatment. Nitrogen was determined according
 120 to the Dumas combustion method using a Leco auto-analyser (model FP-428, Leco
 121 Coporation, St Joseph, MI, USA) and converted to crude protein (CP = Nx6.25). Gross
 122 energy (kcal/kg of dry matter) was determined by a calorimeter (PARR 1281, Illinois, USA).

123

124 The SCFA concentrations were determined by gas chromatography (HP7890, Network
 125 GC System, USA, equipped with an auto-injector 7683B, Network GC System, US, and with
 126 a capillary column in silica, CPSil88, 100 m x 0.25 mm ID, 0.20µm film thickness,
 127 Chrompack-Varian, Netherlands). After thawing, the stored samples were centrifuged at 4000
 128 rpm at 4°C for 20 min. One mL of the supernatant was mixed with 0.2 mL of HPO₃
 129 (25%w/v). This mixture was centrifuged at 14,770 rpm at 4 ° C for 15 min, and 100 µl of the
 130 supernatant was transferred in a glass vial with 75 µl of an internal standard (4-methyl valeric
 131 acid at 2% w/v) and 900 µl of water. One µL of this mixture was injected into the gas
 132 chromatograph. The SCFA concentrations were expressed as mmol/L of the supernatant.

133 Then, they were converted into mmol/L of the liquid phase of the caecal contents, using the
134 percentage of moisture contained in the initial test sample. The SCFA profile was expressed
135 as molar percentages.

136 Ammonia concentration was measured with the procedure of Verdouw *et al.* (1977) using
137 an auto-analyser (Technicon, Domont, France). After centrifugation of the sample of caecal
138 contents, a dialysis step installed at the beginning of the analysis chain allows the separation
139 of NH₃-N. Thereafter, NH₃-N was measured in the dialysate. Ammonia concentrations were
140 transcribed into mmol/L of supernatant of the test sample. Then they were expressed into
141 mmol/L of the liquid phase of caecal contents, using the percentage of moisture contained in
142 the initial test sample.

143

144 **Statistical analysis**

145 All statistical analyses were performed using the 2.13.2 version of the R software (R
146 development Core Team 2011). Data on growth, feed intake patterns and chemical parameters
147 of the digestive tract were subjected to an analysis of variance using a one-way ANOVA
148 model with animal age or period as factor. Differences were considered significant at $P <$
149 0.05. For some parameters of the digestive tract (wet content of the proximal c \hat{c} lon, empty
150 mass of the caecum and entire full GIT mass) for which the variances were not equal, the
151 Kruskal-Wallis test was used. To describe the shape of the growth curve, live weight was
152 analysed with the repeated measures procedure, testing linear and quadratic components.

153

154

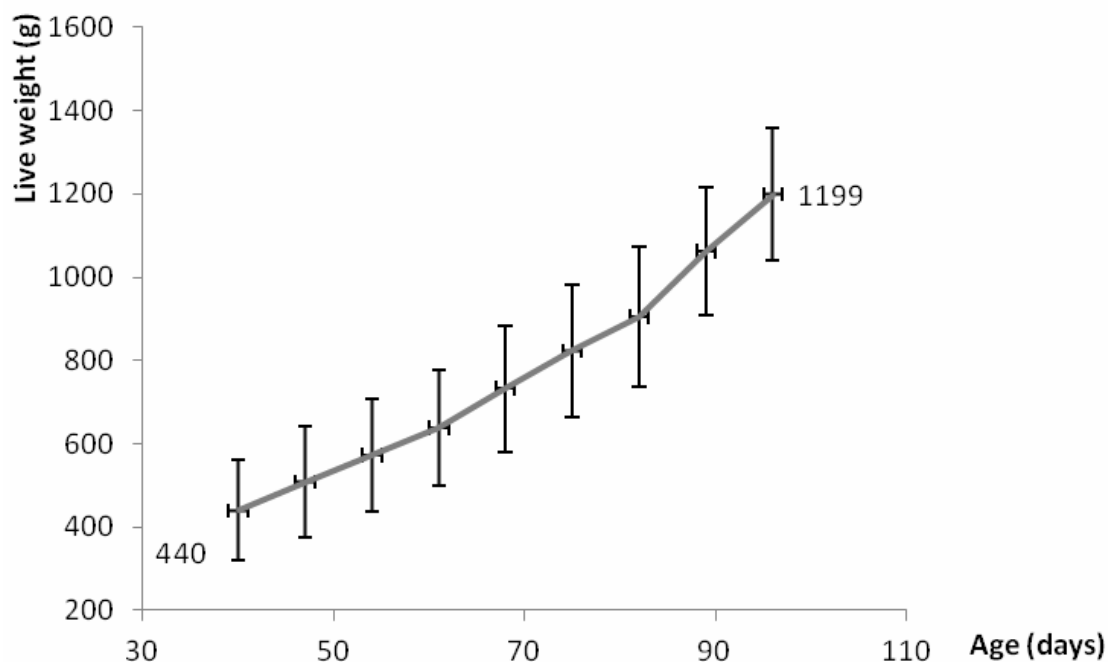
155

156 **RESULTS**

157

157 **Growth and feed intake pattern**

158 The 12 individually housed animals reached an average live weight of 1199 g at the end of
159 the experiment (Fig. 1). The growth curve obtained during the trial was linear ($P < 0.001$)
160 while the quadratic model was not significant ($P > 0.05$). The average daily gain increased
161 with age ($P < 0.01$, Table 2) and varied from 10.5 to 12.8 g/d between the two periods of the
162 experiment. The feed intake (g/day/kg of body weight) did not vary significantly during the
163 experiment ($P > 0.05$) (Table 2).



164 Fig. 1. Weight of the great cane rat*, individually caged and fed a pelleted feed.
 165 *Measured on 12 animals from weaning (40 days) to 96 days of age, mean and standard deviation.
 166

167
 168
 169 **Table 2.** Growth and feed intake of the growing cane rat*.

	Age (days)		SEM	P value
	40 to 68	68 to 96		
Average daily gain (g/day)	10.5	12.8	0.52	< 0.01
Feed intake (g/day/kg of body weight)	56.8	54.5	1.77	NS

170 *Measured on 12 animals, individually caged and fed a pelleted feed.
 171 SEM: standard error of the mean.
 172 NS: not significantly different (P> 0.05).
 173

174
 175 **Morphological description of the digestive compartments**

176 The pictures in Fig.2 represent the digestive compartments of the cane rat, according to
 177 age. The stomach was unilocular with two parts. The largest part corresponded to the fundus
 178 and the smallest corresponded to the antrum. The small intestine represented the longest part
 179 of the digestive tract (over 90 cm). The caecum was well developed and comprised three
 180 parts: a large base, a body with haustra and an apex at the free extremity. It presented two
 181 taenia (longitudinal bands of muscle) ventrally throughout its length. The reduction of the
 182 diameter of the base marked the beginning of the colon. The colon represented the longest
 183 portion of the digestive tract after the small intestine (around 40 to 60 cm). The distal colon
 184 differed from the proximal colon by the presence of hard faeces.

185
 186

187 **Physico-chemical parameters of the digestive tract in the growing cane rat.**

188 The caecum contained more than 40% of the total GIT contents (Table 3). Its contents as a
189 percentage of the total GIT contents did not vary with age ($P > 0.05$). Stomach contents were
190 next highest at all three sampling times; however, when expressed as the % of total GIT
191 contents, values decreased with age, ($P < 0.05$). The small intestine contents, with less than
192 20% of total GIT contents, did not vary with age ($P > 0.05$). Contents of the proximal colon
193 and the distal colon expressed as a percentage of the total GIT contents did not vary with age
194 and the mean values were around 10 and 5% of total digestive tract content, respectively. The
195 ratio of large intestine to small intestine contents was 31 at 103 days of age, which is the
196 value found for volume ratios in horse and guinea pig, but much lower than the 71 ratio
197 observed in rabbits (Snipes, 1997). This author also described a relationship between log
198 values of body weight and caecal volume in different mammals, with an average 0.78 slope,
199 and values over . At 103 days of age, our observed values also fitted with values reported in
200 hindgut fermenters, including rabbit and guinea pig.

201 Stomach contents were pasty, highly acidic (pH = 2.1-2.6) and had over 20% of dry
202 matter. The contents of the small intestine were relatively liquid with an almost neutral pH
203 (6.6-6.9). The caecum and proximal colon both had pasty contents with slightly acidic pH
204 (5.8-6.6). pH values were only affected by age in the caecum, where the lowest values were
205 recorded at 82 days of age, and the proximal colon.

206 The weight of empty digestive compartments expressed as a percentage of body weight of
207 the animal did not change with age ($P > 0.05$) (Table 4). The weights of empty stomach and
208 empty small intestine were over 0.6 and 1.9% of animal body weight, respectively. The
209 weight of empty caecum and empty proximal colon were around 1.1 and 1.0% of animal body
210 weight, respectively whereas the empty distal colon weight was just over 0.5%.
211

212 **Table 3.** Physico-chemical parameters of the GIT compartments contents in the growing cane
 213 rat, according to age (n=6 at each age)

Compartments	Age (days)			SEM	P value
	40	82	103		
Entire full GIT					
Mass (g)	78.2	148.4	199.7	8.86	< 0.01*
% of body mass	18.3	19.5	16.5	0.95	NS
Stomach					
% of total GIT	32.9 ^a	24.7 ^{ab}	22.2 ^b	2.36	< 0.05
Dry matter (%)	21.9	24.5	24.7	1.85	NS
pH	2.1	2.1	2.6	0.29	NS
Small intestine					
% of total GIT	15.3	14.9	19.0	1.24	0.06
Dry matter (%)	17.2	19.3	19.6	2.65	NS
pH	6.9	6.6	6.8	0.25	NS
Caecum					
% of total GIT	39.3	43.8	40.4	2.80	NS
Dry matter (%)	18.6	19.8	23.1	3.39	NS
pH	6.1 ^a	5.8 ^b	6.2 ^a	0.06	< 0.01
Proximal colon					
% of total GIT	8.5	11.0	13.4	3.40	NS*
Dry matter (%)	20.3	21.0	22.3	1.11	NS
pH	6.6 ^a	6.2 ^b	6.3 ^b	0.11	< 0.05
Distal colon					
% of total GIT	4.0	5.7	4.9	0.87	NS

214 SEM: standard error of the mean.

215 ^{a, b, c} : Mean values in the same row having a common superscript are not different.

216 * : Kruskal-Wallis test

217 NS: not significantly different ($P > 0.05$).

218

219 **Table 4.** Empty mass of the digestive compartments in the growing cane rat, according to age
 220 (n=6 at each age)

Compartments	Age (days)			SEM	P value
	40	82	103		
Stomach					
Empty mass (g)	3.5 ^c	5.6 ^b	7.9 ^a	0.41	< 0.001
% of body mass	0.8	0.7	0.6	0.05	NS
Small intestine					
Empty mass (g)	10.1 ^c	16.5 ^b	23.5 ^a	1.37	< 0.001
% of body mass	2.4	2.2	1.9	0.16	NS
Caecum					
Empty mass (g)	4.8 ^b	7.9 ^{ab}	14.2 ^a	1.02	< 0.01*
% of body mass	1.1	1.1	1.2	0.14	NS
Proximal côlon					
Empty mass (g)	5.1 ^b	7.5 ^b	10.8 ^a	0.75	< 0.001
% of body mass	1.2	1.0	0.9	0.09	NS
Distal côlon					
Empty mass (g)	2.9 ^b	5.4 ^a	6.5 ^a	0.48	< 0.001
% of body mass	0.7	0.7	0.5	0.07	NS

221 SEM: standard error of the mean.

222 ^{a, b} : Mean values in the same row having a common superscript are not different.

223 * : Kruskal-Wallis test

224 NS: not significantly different (P> 0.05).

225

226

227 **Cæcal fermentation parameters in the growing cane rat.**

228 Acetate represented the most abundant SCFA with more than 70% of total SCFA,
 229 followed by propionate, which was over 15%, and butyrate around 5%. Acetate proportion
 230 increased between 40 and 82 days of age ($P < 0.01$) while propionate proportion decreased (P
 231 < 0.001). Butyrate proportion did not change with age ($P > 0.05$). The total SCFA
 232 concentration decreased over the course of the experiment ranging from 123 to 90 mmol/L.
 233 The propionate / butyrate ratio decreased with age ($P=0.05$) from 5.7 to 2.9. Ammonia
 234 concentration did not vary with age ($P > 0.05$) and averaged 13.2 mmol/L (Table 5).

235

236

237 **Table 5.** Ammonia concentration and short-chain fatty acids concentration and molar
 238 percentages in the caecum of the cane rat, according to age* (n=6 at each age)

	Age (days)			SEM	P value
	40	82	103		
Ammonia (mmol/L)	13.7	14.2	11.7	1.27	NS
Total SCFA (mmol/L)	123.1 ^a	106.9 ^{ab}	90.1 ^b	5.73	<0.01
Acetate (%)	71.5 ^b	77.6 ^a	77.7 ^a	1.08	<0.01
Propionate (%)	23.5 ^a	16.0 ^b	15.0 ^b	1.15	<0.001
Butyrate (%)	3.5	5.0	5.9	0.76	NS
Valerate (%)	1.5	1.4	1.4	0.16	NS
Propionate / butyrate ratio	5.7	3.6	2.9	0.65	0.05

239 *Measured on 6 animals per age.

240 SEM: standard error of the mean.

241 NS: not significantly different (P> 0.05).

242

DISCUSSION

This study has allowed for the understanding of post-weaning changes in the digestive physiology and caecal fermentative activity in the cane rat, emphasizing the importance of the cecum in the digestion of this animal.

Within 8 weeks after weaning (40 days), the body weight of animals increased from 439 g to 1199 g corresponding to an average daily gain of 11.9 g/d. This was consistent with growth observed by Fantodji & Soro (2004) in the growing cane rat. Their values ranged from 7.7 to 12.5 g/d with a diet consisting only of forage or a mixed forage-concentrate feed (40 and 30 % ADF, dry matter basis), respectively. Our values are also close to the growth rates obtained by Van Der Merwe & Van Zyl (2001) in the growing cane rat. They recorded growth rates around 11.3 and 12.2 g/day for males fed high and low fibre diets (27.2 vs 17.8 % ADF) and about 8.3 and 8.4 g/day for females fed the two diets, respectively. However, during our feeding experiment, there were no difference between males and females in terms of growth presumably because the animals had not yet reached puberty at the end of the trial. Puberty is reached around 4 months of age and at the end of the trial our animals were 103 days old. Lack of difference according to sex is similar to the finding of Yewadan & Schrage (1992) and Van Der Merwe & Van Zyl (2001) who found that, between 0 and 100 days of age, the growth rates of male and female cane rats are very close. For example, Yewadan and Schrage (1992) found that from 0 to 4 months of age, the growth curve of males (n = 163) and females (n = 133) were overlaid; the difference between males and females occurred from puberty and then, sexual dimorphism increased with age of the animals

The growth performances of the cane rat are modest compared to other domestic monogastric herbivores. For instance, genetically selected lines of rabbits reach a daily gain of about 40 g/d (Gidenne *et al.* 2009) between weaning and slaughter (35-70d), while without selection the growth of the rabbit was about 10 to 20 g/d, which is similar to our observations on the greater cane rat. The mean feed intake recorded in our experiment (54.5 to 56.8 g/day/kg of body weight) was consistent with that reported by Van Zyl *et al.* (1999) (51 g/day/kg of body weight) for adults cane rat with a diet containing 17.7% of ADF. Generally, in monogastrics herbivores, feed intake shows a strong positive correlation with the concentration of ADF in the food (Gidenne & Lebas, 2006).

At weaning, the weight of the stomach contents of the great cane rats represented over 30% of total GIT contents, thereafter decreasing to less than 25%. This suggested that the stomach would have a special role in digestion in suckling animals which decreases in importance when the feeding evolved toward a forage based diet. Stomach pH was highly acidic whatever the age, as previously observed by Van Zyl *et al.* (2005) in adult animals (pH=2.19). This high acidity in this part of the digestive tract would inhibit microbial fermentations. This suggests that digestion in the stomach is essentially ensured by the enzymes secreted by the gastric glands such as pepsin (Yu *et al.* 2000). The acidity of the digesta from the stomach is then neutralized with an alkaline mucous secretions by Brunner's glands located in the submucosa of the duodenum of the cane rat (Van Zyl *et al.* 2005) as observed in other monogastric herbivores (Carleton & Leach 1950). Accordingly, the pH of the small intestine was close to neutrality, which is favourable to both activity of host enzymes and microbial fermentations.

The caecum was the largest digestive compartment as indirectly measured by the GIT contents in the growing cane rat (over 40% of total GIT contents). This result is consistent with what is observed in other monogastric herbivores. In rabbits, for example, it was observed that the caecum content increases linearly from two to five weeks of age to become the largest digestive compartment at 5-6 weeks of age with 40% of the total digestive mass (Gidenne *et al.* 2008). In Capybaras, the largest rodent monogastric herbivore (50 kg body

293 weight), caecal content represents 63% of total GIT contents (Borges *et al.* 1996) while in
294 guinea-pig caecal content can reach 65% of total GIT content (Fuss 2002). In our experiment,
295 as the caecum was the largest digestive compartment with a pH value of 5.8 to 6.2, it would
296 presumably be the main site of fermentation in the hindgut of the cane rat, as described in
297 guinea pig (Sakaguchi *et al.* 1985) and capybara (Borges *et al.* 1996).

298 Although the dry matter percentage of the distal colon content could not been determined
299 in this study, qualitative observations during slaughter revealed two distinct consistencies of
300 faecal matter. In some animals the content of the distal colon was pasty while in the majority
301 of animals it was solid. This observation suggests that the cane rat practises caecotrophy, as
302 observed in the rabbit (Bjornhag 1972; Holzer *et al.* 1986). However, this hypothesis needs to
303 be verified in further research because we have not directly studied the phenomenon in this
304 experiment.

305
306 Total SCFA concentration in the caecum decreased from 124 mmol/L at weaning to 90
307 mmol/L nine weeks later. This total SCFA concentration is in the same range than in growing
308 rabbits (Combes *et al.* 2011). However, in rabbits, the caecal SCFA concentration increases
309 from weaning (30 to 70 mmol/L) to 10 weeks of age (80 to 130 mmol/L) (Bellier *et al.* 1995;
310 Piattoni *et al.* 1996; Bennegadi *et al.* 2004). Moreover, mean SCFA concentration observed in
311 cane rat (85 μ moles/g of fresh content) is close to that obtained in guinea pigs and rats.
312 Analysis of caecal contents from adult guinea pigs showed the total SCFA levels to range
313 from 46 to 99 μ moles/g of fresh content (Hagen & Robinson 1953; Henning & Hird 1970; Yu
314 *et al.* 2000). In rats, caecal total SCFA concentration varies from 50 to 150 mmol/L (Demigne
315 *et al.* 1980; Champ *et al.* 1989; Nilsson & Nyman 2005). As mean caecal SCFA
316 concentrations are similar in these animals, it can be expected that the SCFA play an
317 important role in the supply of energy to the cane rat, as the rabbit and guinea pig. For
318 instance, the SCFA can meet between 30 and 50% of maintenance energy requirements of
319 adult rabbits (Parker 1976; Marty & Vernay 1984; Gidenne 1994).

320 Moreover, the profile of SCFA observed in the cane rat caecum (75% for acetate, 18% for
321 propionate and 5% for butyrate) with a propionate / butyrate ratio greater than one is close to
322 that of guinea pig (Henning & Hird 1970) and rat caecum (Demigne *et al.* 1980; Champ *et al.*
323 1989; Nilsson & Nyman 2005), whereas in the rabbit caecum the propionate / butyrate ratio is
324 less than one (Hoover & Heitman 1972; Gidenne 1986). Generally, the fermentation end
325 products of carbohydrate in the GIT of non-ruminant herbivores are similar to those found in
326 the rumen, and acetate is the primary SCFA while propionate is higher than butyrate (Hintz *et al.*
327 1978). The fermentative profile of the rabbit caecum is an exception, with a butyrate
328 concentration greater than propionate. According to Adjiri *et al.* (1992) this particular profile
329 originates from the composition of the rabbit caecal flora and not from the composition of the
330 fermented substrate. Caecal ammonia concentration did not depend on the age, and the mean
331 value (13.2 mmol/L) was close to those recorded by Combes *et al.* (2011) for growing rabbits
332 (18 to 14 mmol/L).

333
334 In conclusion: This study confirmed that the caecum was the largest compartment in the
335 hindgut of the growing cane rat. Based on SCFA and NH₃-N concentrations, it appears to be a
336 major site of fermentative activity. Both SCFA and NH₃-N concentrations and profiles were
337 similar to those observed in other monogastric herbivores such as the rabbit and particularly
338 close to those of other rodents (guinea pigs and rats). Further studies on fermentation in the
339 small intestine and proximal colon will provide information on whether these compartments
340 of the digestive tract of the cane rat are areas of high fermentation, as is the case in the
341 caecum

342

REFERENCES

- 343
344
345 ALOGNINOUBA, T., AGBA, K.C., AGOSSOU, E. & KPODEKON M., 1996. Anatomical,
346 histological and functional specificities of the digestive tract in the male grasscutter
347 (*Thryonomys swinderianus*, Temminck 1827). *Anatomia, Histologia, Embryologia*.
348 25: 15-21.
- 349 ADJIRI, D., BOUILLIER, O.M., LEBAS, F. & CANDAU, M. 1992. Simulation in vitro des
350 fermentations caecales du lapin en fermenteur à flux semi-continu. 1) Rôle du
351 prétraitement du substrat alimentaire. *Reproduction Nutrition Development* 32: 351-
352 360.
- 353 AVMA, 2007. American Veterinary Medical Association guidelines on euthanasia.
354 <https://www.avma.org/KB/Policies/Documents/euthanasia.pdf>
- 355 BELLIER, R., GIDENNE, T., VERNAY, M. & COLIN, M. 1995. In vivo study of circadian
356 variations of the cecal fermentation pattern in postweaned and adult rabbits. *Journal of*
357 *Animal Science* 73: 128-135.
- 358 BENNEGADI-LAURENT, N., GIDENNE, T. & LICOIS, D. 2004. Nutritional and sanitary
359 statuses alter postweaning development of caecal microbial activity in the rabbit.
360 *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative*
361 *Physiology* 139: 293-300.
- 362 BJÖRNHAG, G., 1972. Separation and delay of contents in the rabbit cœlon. *Swedish Journal*
363 *of Agricultural Research* 2:125-136.
- 364 BORGES, P.A., DOMINGUEZ-BELLO, M.G. & HERRERA, E.A. 1996. Digestive
365 physiology of wild capybara. *Journal of Comparative Physiology B* 166: 55-60.
- 366 CARLETON, M.D. & LEACH, E.H. 1950. Schafer's Essentials of Histology, 15 th edn.
367 Longmans, Green and Co., London.
- 368 CHAMP, M., BARRY, J.L., HOEBLER, C. & DELORT-LAVAL, J. 1989. Digestion and
369 fermentation pattern of various dietary fiber sources in the rat. *Animal Feed Science and*
370 *Technology* 23: 195-204.
- 371 COMBES, S., MICHELLAND, R.J., MONTEILS, V., CAUQUIL, L., SOULIE, V., TRAN,
372 N.U., GIDENNE, T. & FORTUN-LAMOTHE, L. 2011. Postnatal development of the
373 rabbit caecal microbiota composition and activity. *Fems Microbiology Ecology* 77: 680-
374 689.
- 375 DEMIGNÉ, C., RÉMÉSY, C. & RAYSSIGUIER, Y. 1980. Effect of fermentable
376 carbohydrates on short-chain fatty acids, ammonia and mineral absorption in the rat
377 caecum. *Reproduction Nutrition Development* 20: 1351-1359.
- 378 ENGELHARDT, W.V. 1995. Absorption of short-chain fatty acids from the large intestine.
379 In: Cummings, J.H., Rombeau, J.L., Sakata, T. (Eds.), *Physiological and Clinical*
380 *Aspects of Short-Chain Fatty Acids*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 149-
381 170.
- 382 EWER, R.F. 1969. Form and function in the grass cutter, *Thryonomys swinderianus* Temm.
383 (*Rodentia, Thryonomyidae*). *Ghana Journal of Science* 9: 131-141.
- 384 FANTODJI, A. & SORO, D. 2004. L'élevage d'aulacodes : expérience en Côte-d'Ivoire.
385 Editions du Gret. 137 p.
- 386 FUSS, S., 2002. Physiologie et pathologie digestive du cobaye domestique (*Cavia porcellus*).
387 Thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire. Ecole Nationale Vétérinaire de
388 Toulouse. 204 p. http://oatao.univ-toulouse.fr/980/1/debouch_980.pdf.
- 389 GIDENNE, T. 1986. Quantitative variation of bacterial fermentation products in the digestive
390 tract of growing rabbits during the 24-h cycle. Relationships with the dietary lignin
391 content. *Annales de Zootechnie* 35: 121-136.

392 GIDENNE, T. 1994. Estimation of short-chain fatty acids and of their energetic supply in the
393 rabbit caecum: effect of the dietary fibre level. In: *Proc. of the VIème Journées de la*
394 *Recherche Cunicole, 6-7 déc., Paris, INRA-ITAVI publications, vol. 2, pp. 293-299.*

395 GIDENNE, T. & LEBAS F. 2006. Feeding behaviour in Rabbits. In Bels V. (ed.), 2006.
396 Feeding in domestic vertebrates, from structure to behaviour. Cab international,
397 Wallingford UK, 179-194.

398 GIDENNE, T., COMBES, S., LICOIS, D., CARABANO, R., BADIOLA, I. & GARCIA, J.
399 2008. The caecal ecosystem and the nutrition of the rabbit: interaction with digestive
400 health. *INRA Productions Animales* 21: 239-249.

401 GIDENNE, T., COMBES, S., FEUGIER, A., JEHL, N., ARVEUX, P., BOISOT, P.,
402 BRIENS, C., CORRENT, E., FORTUNE, H., MONTESSUY, S. & VERDELHAN, S.
403 2009. Feed restriction strategy in the growing rabbit. 2. Impact on digestive health,
404 growth and carcass characteristics. *Animal* 3: 509–515.

405 HAGEN, P. & ROBINSON, K.W. 1953. Production and absorption of short-chain fatty acids
406 in the intestine of the guinea pig. *Australian Journal of Experimental Biology and*
407 *Medical Science* 31: 99-103.

408 HENNING, S.J. & HIRD F.J.R. 1970. Concentrations and metabolism of short-chain fatty
409 acids in the fermentative organs of two species of kangaroo and the guinea-pig. *British*
410 *Journal of Nutrition* 24:145-155.

411 HINTZ, H.F., SCHRYVER, H.F. & STEVENS, C.E. 1978. Digestion and Absorption in the
412 Hindgastrointestinal tracts (GIT) of Nonruminant Herbivores. *Journal of Animal*
413 *Science* 46:1803-1807.

414 HOLZER, R., MENSAH, G.A. & BAPTIST, R. 1986. Aspects pratiques en élevage
415 d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*) III. Comportement de coprophagie. *Revue*
416 *d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 39:247–252.

417 HOOVER, W.H. & HEITMAN, R.N. 1972. Effects of dietary fiber levels on weight gain,
418 caecal volume and volatile fatty acid production in rabbits. *Journal of Nutrition*
419 102 :375-380.

420 JORI, F. 2001. La cria de roedores tropicales (*Thryonomys swinderianus* y *Atherurus*
421 *africanus*) como fuente de alimento en Gabon, Africa central. Thesis doctorale. Facultat
422 de Veterinaria Universitat autonoma de Barcelona. 150 p.

423 MARTY, J. & VERNAY, M. 1984. Absorption and metabolism of the short-chain fatty acids
424 in the hindgastrointestinal tracts (GIT) of the rabbit. *British Journal of Nutrition*, 51:
425 265-277.

426 NILSSON, U. & NYMAN, M. 2005. Short-chain fatty acid formation in the
427 hindgastrointestinal tracts (GIT) of rats fed oligosaccharides varying in monomeric
428 composition, degree of polymerisation and solubility. *British Journal of Nutritio*, 94:
429 705-713.

430 PARKER, D.S. 1976. The measurement of production rates of short-chain fatty acids in the
431 caecum of the conscious rabbit. *British Journal of Nutrition* 36: 61-70.

432 PIATTONI, F., MAERTENS, L. & DEMEYER D. 1996. In vitro study of the age-dependent
433 caecal fermentation pattern and methanogenesis in young rabbits. *Reproduction*
434 *Nutrition Development* 36: 253-261.

435 R development Core Team, 2011. R: a Language and Environment for Statistical, Computing
436 Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 3-900051-07-0. [http://www.R-](http://www.R-project.org)
437 [project.org](http://www.R-project.org)

438 SAKAGUCHI, E., BECKER, G., RECHKEMMER, G. & ENGELHARDT, W.V.
439 1985. Volume, solute concentrations and production of short-chain fatty acids in the
440 caecum and upper còlon of the guinea pig. *Zeitschrift für Tierphysiologie,*
441 *Tierernährung und Futtermittelkunde* 54: 276–285.

- 442 SNIPES R.L. 1997. Intestinal absorptive surface in mammals of different sizes. *Advances in*
443 *Anatomy, embryology and Cell Biology*. 138: 1-90.
- 444 VAN DER MERWE, M. & VAN ZYL, A. 2001. Postnatal growth of the greater cane rat
445 *Thryonomys swinderianus* (Thryonomyidae: Rodentia) in Gauteng, *South Africa*.
446 *Mammalia* 65: 495-507.
- 447 VAN ZYL, A. & DELPORT, J.H. 2010. Digestibility of nutrients and aspects of the digestive
448 physiology of the greater cane rat, *Thryonomys swinderianus* in two seasons. *African Zoology*
449 45: 254-264.
- 450 VAN ZYL, A., MEYER, A.J. & VAN DER MERWE, M. 1999. The influence of fibre in the
451 diet on growth rates and the digestibility of nutrients in the greater cane rat
452 (*Thryonomys swinderianus*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*. 123:
453 129-135.
- 454 VAN ZYL, A., RAMBAU, R.V. & VAN DER MERWE, M. 2005. Aspects of the anatomy
455 and histology of the alimentary canal of the greater cane rat, *Thryonomys swinderianus*,
456 with reference to its feeding physiology. *African Zoology* 40: 25-36.
- 457 VERDOUW, H., VAN ECHELD, C.J.A., DEKKERS, E.M.J. 1977. Ammonia determinatio
458 n based on indophenol formation with sodium salicylate. *Water Research* 12:399-403.
- 459 YEWADAN, T.L. & SCHRAGE R. (1992). Les performances zootechniques de l'aulacode
460 (*Thryonomys swinderianus*) élevé en captivité étroite. In : 1^{ère} Conférence
461 Internationale, l'aulacodiculture : acquis et perspectives ; Cotonou : Bénin. p 165-173.
- 462 YU, B., CHIOU, W.S., KUO, C.Y. 2000. Comparison of digestive function among rabbits,
463 guinea-pigs, rats and hamsters. II. Digestive enzymes and hindgastrointestinal tracts
464 (GIT) fermentation. *Asian - Australasian Journal of Animal Sciences* 13: 1508-1513.
- 465

ABSTRACT

The cane rat or grasscutter (*Thryonomys swinderianus*) is a rodent herbivore recently domesticated in Africa for meat production. Some previous studies focused on the feeding of this animal, in order to improve the productivity of farms. To date, our knowledge of digestion and nutritional requirements of this animal are still very scarce. Our first objective was to improve our knowledge of digestive physiology of the young grasscutter, particularly in relation to dietary fibre supply, in order to improve the recommendations for dietary fibre content of diets to optimize growth and digestive health. Our second objective was to analyze the effects of a decreased digestible protein / digestible energy ratio, along with an increased intake of starch, on digestion and performances. The final aim was to analyze the possibilities to formulate a complete feed, cheaper for farmers and that meets the requirements of the young grasscutter. Our study found that the caecum is the most important digestive compartment of the young grasscutter between 1 and 3 months of age, with more than 40% of the total gut contents. The caecal microbial activity (100 mM of total volatile fatty acids (VFA) per gram of fresh content) is high and similar to that of ruminants or other herbivorous monogastric animals. The fermentation profile is characterized by a predominance of acetate (75% of total VFA) and a propionate / butyrate ratio greater than 1. A pyrosequencing of bacterial 16S-DNA was used to characterize the caecal microbiota. At weaning (one month), we observe a predominance of the Bacteroidetes phylum, with 51% of relative abundance, whereas the Firmicutes phylum becomes predominant (50%) at 3 months of age. Caecal microbiota is characterized by the presence of genera often identified in other digestive ecosystems of herbivores, such as: *RC9* (2-8%), *Parabacteroides* (1-8%), *Prevotella* (3.6%) and *Xylanibacter* (1%), *Erysipelotrichaceae Turicibacter* (1-7%), *Lachnospiraceae Incertae_Sedis* (4-5%), *Ruminococcaceae Incertae_Sedis* (1-2%) and *Ruminococcus* (1-3%). Other genera, absent in related species such as rabbits and guinea pigs, seemed more specific of the grasscutter, such as *Termite_Treponema_cluster* (1.7-2.2%) and *Treponema* (7-13%) of the Spirochaetes phylum. The analysis of growth performances indicated that a dietary fibre content between 17% and 21% of ADF represents a good compromise between digestive health and growth of the grasscutter after weaning. Decreasing below 6g of digestible protein / MJ of digestible energy, via a high increase in starch intake and a significant decline in crude protein content (below 11%) and fibre, is detrimental to the growth of animals.

Keywords: cane rat, *Thryonomys swinderianus*, digestive physiology, 454 pyrosequencing, bacterial communities, dietary fibre, growth, digestive health.

RESUME

L'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) est un rongeur herbivore récemment domestiqué en Afrique pour la production de viande. Quelques études antérieures ont porté sur l'alimentation de cet animal, dans le but d'améliorer la productivité des élevages. A ce jour, nos connaissances sur la digestion et les besoins nutritionnels de cet animal sont encore très parcellaires. Le premier objectif de notre étude était d'améliorer nos connaissances sur la physiologie digestive de l'aulacode en croissance, en particulier en relation avec les apports de fibres alimentaires, avec pour finalité de proposer des recommandations nutritionnelles en fibres pour optimiser la croissance et la santé digestive de cet animal. Notre second objectif était d'analyser les effets d'une diminution du ratio protéines digestibles / énergie digestible parallèlement à une hausse des apports d'amidon, sur la digestion et les performances. La finalité était d'analyser les possibilités de formuler un aliment complet moins onéreux pour les éleveurs et qui respecte les besoins de l'aulacode en croissance. Notre étude a permis de savoir que le caecum est le compartiment digestif le plus important du jeune aulacode entre 1 et 3 mois d'âge, avec plus de 40% du contenu digestif total. L'activité microbienne caecale (100 mM d'acides gras volatils totaux (AGVt) par gramme de contenu frais) est élevée, et similaire à celle des ruminants ou d'autres herbivores monogastriques. Le profil fermentaire est caractérisé par une prédominance de l'acétate (75 % des AGVt) et un ratio propionate / butyrate supérieur à 1. Le pyroséquençage 454 de l'ADN16S bactérien a permis de caractériser le microbiote caecal. Au sevrage, nous observons une prédominance du phylum des Bacteroidetes, avec 51 % d'abondance relative, alors que le phylum des Firmicutes devient majoritaire (50%) à 3 mois d'âge. Le microbiote caecal est caractérisé par la présence de genres souvent identifiés dans d'autres écosystèmes digestifs d'herbivores, tels que : *RC9* (2 à 8%), *Parabacteroides* (1 à 8%), *Prevotella* (3 à 6%) et *Xylanibacter* (1%), *Erysipelotrichaceae Turcibacter* (1 à 7%), *Lachnospiraceae Incertae_Sedis* (4 à 5%), *Ruminococcaceae Incertae_Sedis* (1 à 2%) et *Ruminococcus* (1 à 3%). D'autres genres, absents chez des espèces voisines comme le lapin et le cobaye, semblent plus spécifiques de l'aulacode, tels que *Termite_Treponema_cluster* (1.7 à 2.2%) et *Treponema* (7 à 13%), du phylum des Spirochaetes. L'analyse des performances zootechniques indique qu'un taux de fibres compris entre 17 et 21 % d'ADF représenterait un bon compromis entre santé digestive et croissance de l'aulacode après son sevrage. Descendre au dessous de 6 g de protéines digestibles par MJ d'énergie digestible, via une hausse importante des apports d'amidon et une baisse importante du taux de protéines brutes (en dessous de 11 %) et de fibres, est préjudiciable à la croissance des animaux.

Mots clés : aulacode, *Thryonomys swinderianus*, physiologie digestive, pyroséquençage 454, communautés bactériennes, fibres alimentaires, croissance, santé digestive.