



HAL
open science

Conduite alimentaire de la jument en lactation au pâturage : influence sur l'ingestion, la couverture des besoins et l'état parasitaire

Claire Collas

► **To cite this version:**

Claire Collas. Conduite alimentaire de la jument en lactation au pâturage : influence sur l'ingestion, la couverture des besoins et l'état parasitaire. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2014. Français. NNT : 2014CLF22514 . tel-01226843

HAL Id: tel-01226843

<https://theses.hal.science/tel-01226843>

Submitted on 10 Nov 2015

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.

**ECOLE DOCTORALE
SCIENCES DE LA VIE, SANTE, AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT**

N° d'ordre : 650

THESE
pour obtenir le grade de
Docteur d'Université
Spécialité : Nutrition animale

Présentée et soutenue publiquement par

Claire COLLAS

le 27 novembre 2014

**CONDUITE ALIMENTAIRE DE LA JUMENT EN LACTATION AU
PATURAGE : INFLUENCE SUR L'INGESTION, LA COUVERTURE DES
BESOINS ET L'ETAT PARASITAIRE**

Thèse dirigée par Bertrand DUMONT et Géraldine FLEURANCE

Rapporteurs : Iain J. GORDON, Pr, The James Hutton Institute
Jean-Louis PEYRAUD, DR, INRA

Examineurs : Jacques GUILLOT, Pr, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort
Philippe MICHAUD, Pr, POLYTECH, Président du Jury
Sophie DANVY, ID, IFCE, Membre invité
Géraldine FLEURANCE, IR, IFCE-INRA
Bertrand DUMONT, DR, INRA

Laboratoire d'accueil :

Equipe Relations Animal-Plantes et Aliments, UMR1213 Herbivores
INRA Centre de Clermont-Ferrand/Theix, 63122 Saint-Genès-Champanelle

« Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir mais de le rendre possible »
Antoine de Saint-Exupéry

« Il vaut mieux suivre le bon chemin en boitant que le mauvais d'un pas ferme »
Saint Augustin

Remerciements

Mes premières pensées sont pour Géraldine Fleurance et Bertrand Dumont qui m'ont encadrée et accompagnée tout au long de ces trois années de thèse. Je vous remercie sincèrement pour votre disponibilité et votre soutien. Vous m'avez fait confiance en m'offrant l'opportunité de réaliser ce doctorat sur la conduite alimentaire de la jument au pâturage et j'espère avoir été à la hauteur.

J'ai eu la chance de pouvoir réunir chaque année un super comité de thèse composé de Rémy Delagarde, Jacques Cabaret, Guillaume Sallé, Patrick Duncan, Etienne Doligez, Françoise Clément, Sophie Danvy, Laurence Wimel, William Martin-Rosset, Michel Doreau, Jacques Agabriel, Bertrand Dumont et Géraldine Fleurance. Vos propositions constructives ont été essentielles pour l'avancement de la thèse. Par nos échanges vous avez su me guider et me rassurer, je vous en remercie.

Je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de s'investir dans l'évaluation de ce travail de thèse : Iain J. Gordon et Jean-Louis Peyraud en tant que rapporteurs, ainsi que Jacques Guillot, Philippe Michaud, Sophie Danvy, Géraldine Fleurance et Bertrand Dumont en tant qu'examineurs. C'est qu'il y en a des pages à lire !

Cette thèse a été réalisée grâce au soutien financier de l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE) et du département Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage (PHASE) de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Les expérimentations ont été financées par l'IFCE, l'Institut Carnot en Santé Animale (ICSA) et le métaprogramme Gestion Intégrée de la Santé des Animaux (GISA).

Je remercie Jean-Marc Lobaccaro, directeur de l'École Doctorale Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, de m'avoir acceptée au sein de cette école doctorale.

Je remercie Isabelle Veissier de m'avoir accueillie au sein de l'Unité Mixte de Recherches sur les Herbivores (UMR1213) de l'INRA de Clermont-Ferrand/Theix, ainsi que Maryse Tesseydre, Annie Royet, Pascale Francisco et Nicolas Barrière pour leur accueil et leur disponibilité lors des nombreuses questions administratives.

Plus particulièrement, cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe Relations Animal-Plantes et Aliments (RAPA), dirigée par Bertrand Dumont. J'ai été parfaitement intégrée à l'équipe et j'ai pu bénéficier de l'appui des chercheurs, ingénieurs et techniciens pour avancer au cours de ces trois années. Je remercie en particulier Aline Le Morvan, Jocelyne Aufrère, Angélique Quereuil, Frédéric Anglard, Nicolas Rossignol, Laurent Lanore, Jean-Marie Ballet et Cécile Ginane pour leur investissement scientifique et technique au cours de la thèse. Merci également à Francis Decuq (équipe Pôle Informatique).

Mon intégration dans cette unité m'a permis de rencontrer des personnes des différentes équipes avec qui j'ai pu échanger sur le plan scientifique ou personnel, ou encore partager les petits moments du quotidien qui font qu'on se sent bien. Je pense en particulier à Julie, Peppe, Marjorie, Bérengère, Raphaëlle, Alexandra et Alexandra, Inès, Véro, Sophie, Cécile, Jean-Baptiste, Jessie, Lahlou, Bertrand, Hervé, Marie, Lia, ... Merci à tous pour votre soutien, vos encouragements et tous les bons moments qu'on a partagés. Plus que de simples collègues cette thèse m'a permis de rencontrer des personnes géniales grâce à qui ces trois ans sont passés très vite, tout simplement merci !

Je remercie Laurence Wimel de m'avoir accueillie au sein de la Station Expérimentale de l'IFCE à Chamberet et qui s'est fortement investie aux côtés de Patrice Dupuy et Cédric Dubois pour assurer le bon déroulement des expérimentations. Rien n'aurait été possible sans le soutien technique de Joseph Bellonie, Jean-Louis Larry, Claude Larry, Patrick Paucard, Jacques Boulanger, Ludivine Collon et Anthony. Merci énormément à vous pour avoir fait que tout se passe bien sans compter les nombreuses heures supplémentaires le soir ou le week-end. Enfin je n'oublie pas Marie-Jo Provost, de bonne humeur en toute situation, et qui a toujours été présente pour discuter pendant les bons et les mauvais moments et me rassurer.

Merci beaucoup à Guillaume Sallé, Jacques Cortet et Jacques Cabaret de l'INRA de Nouzilly pour la réalisation des analyses parasitologiques et leur investissement tout au long de ces trois ans.

Ma thèse m'a donné l'occasion de co-encadrer plusieurs étudiantes : Charlotte Ceglowski, Marina Duclouet, Nissirlany Cardoso Leal et Hélène Macé. Par votre investissement, votre motivation et votre bonne humeur ce fût un plaisir de travailler avec vous. Ce ne fut pas facile tous les jours et vous avez largement contribué à la réalisation des expérimentations, merci.

Bien sûr je n'oublie pas tous les stagiaires de la station, les team crotte 2012 et 2013, qui nous ont apporté une aide précieuse et indispensable au quotidien ou lors des périodes très chargées. Je vous en ai demandé beaucoup mais vous avez toujours répondu présentes, encore une fois merci. Bien plus que des journées de travail nous avons partagé notre quotidien et ce fût un plaisir de vivre ces moments de collectivité avec vous : Charlotte Ceglowski, Marina Duclouet, Nissirlany Cardoso Leal, Hélène Macé, Adeline Billamboz, Pauline Serre, Julie Knoetzer, Julie Joly, Typhaine Dies-Lardanchet, Marine Pellier, Mélissande Dalous, Chloé Hamelin, France d'Harcourt, Chloé Sorgues, Léa Tanalahy, Aurore Thévenon, Florence Viard, Oriane Abdous, Céline, ...

Cette thèse n'est pas seulement le résultat de ces trois dernières années mais l'aboutissement de huit années d'étude au cours desquelles j'ai rencontré des personnes qui m'ont soutenue et aidée à évoluer. Je pense à Irène Till-Bottraud, grâce à qui j'ai repris confiance en moi lors de mon année de master 1 et qui m'a soutenue lors de mes recherches de master 2. Je pense également à Sabrina Gaba, François Bretagnolle, Vincent Bretagnolle et Thibaut Powolny qui m'ont permis de réaliser mon stage de master 2 dans les meilleures

conditions et de m'initier à la rédaction scientifique, et m'ont soutenue lors de ma recherche de thèse.

A tous mes amis que j'ai rencontré au collège, au lycée ou sur un banc de fac que ce soit à Besançon, Grenoble ou Dijon, merci d'avoir été là pour rendre les études plus faciles. Je pense en particulier aux 2F2C : Fanny, ma binôme de TP pendant 6 ans, merci d'avoir caché la tête du poisson, Cécile, ma binôme d'écovolontariat tortues-phoques et Fanny, toujours de bonne humeur et pas stressée ; mais aussi à toute la team L3BE avec qui j'ai partagé de super moments, comme un certain stage de biologie marine ou un barbecue à la Bouloie ; à Marie, ma binôme trèfle ; et à Lucile, Etienne et Benjamin, loin des yeux près du cœur !

Je n'oublie pas mon modèle biologique, les juments et les poulains, que je remercie vivement pour leur participation aux expérimentations et leur patience lors des mesures. Si vous me pardonnez les prélèvements rectaux, j'oublierai les clôtures cassées.

Je remercie mes parents qui m'ont soutenu dans mes choix et m'ont permis de partir réaliser mes études là où je le souhaitais. A ma sœur Louise et à mes parents, merci énormément à vous de vous être occupés de Flambeur quand il n'allait pas bien et que j'étais loin. Je sais que c'était contraignant. Vous m'avez soulagé d'un grand stress et m'avez permis de m'investir dans ma thèse en culpabilisant moins de ne pas être là.

Enfin je remercie mon grand pour son soutien, sa patience et tout ce qu'il m'apporte. Merci d'avoir passé des nuits avec moi à observer les juments, d'avoir rentré des données de temps de pâturage quand mes yeux disaient « stop trop de cellules tue la cellule », ou encore d'avoir été le premier spectateur et critique de mes présentations orales. Ne t'inquiète pas un jour on sera grand, et quand on sera grand ça sera bien.



Quand on a un grand poney gourmand qui arrive à grossir dans n'importe quelles conditions on en arrive à se demander comment il fonctionne.

Spéciale dédicace à mon petit Flambeur qui contribue depuis 15 ans à ma passion et qui je l'espère m'a pardonné mes infidélités lors de mes séjours corréziens.



Sommaire

| | |
|---|----|
| Liste des abréviations | 13 |
| Liste des tableaux | 17 |
| Liste des figures..... | 19 |
| | |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 23 |
| Contexte | 25 |
| <i>Le pâturage : un atout pour la durabilité des systèmes d'élevage d'herbivores</i> | 25 |
| <i>Systèmes d'élevages équinés : une nécessaire rationalisation de l'utilisation des intrants</i> | 26 |
| <i>Problématique de la thèse</i> | 29 |
| Etude bibliographique | 31 |
| Nutrition et santé des équins au pâturage : étude des effets des caractéristiques de la ressource sur l'ingestion et l'état parasitaire | 31 |
| I. Ingestion de fourrages : influence des caractéristiques de la ressource et conséquences d'un apport de concentré | 31 |
| 1. Des connaissances principalement acquises pour des chevaux alimentés à l'auge..... | 31 |
| 1.1. Facteurs de variation de l'ingestibilité des fourrages chez le cheval..... | 31 |
| 1.1.1. Composition chimique et valeur nutritive | 32 |
| 1.1.1.1. Teneur en eau | 35 |
| 1.1.1.2. Digestibilité | 35 |
| 1.1.1.3. Valeur azotée du régime..... | 36 |
| 1.1.1.4. Valeur énergétique du régime..... | 37 |
| 1.1.2. Conditions de récolte et de conservation..... | 37 |
| 1.1.3. Mode de distribution..... | 38 |
| 1.1.4. Qualités organoleptiques | 39 |
| 1.2. Apport de concentré chez le cheval : cas des régimes mixtes | 39 |
| 2. Des données limitées chez le cheval au pâturage | 43 |
| 2.1. Effet de la hauteur et de la biomasse végétale sur l'ingestion journalière..... | 46 |
| 2.2. Effet d'une variation simultanée en hauteur et qualité | 46 |
| 2.3. Effet de la disponibilité en herbe..... | 47 |
| 2.3.1. La réponse fonctionnelle chez le cheval..... | 47 |
| 2.3.2. Effet de la disponibilité en herbe sur l'ingestion journalière..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 2.4. Effet de la disponibilité en herbe et de la complémentation énergétique : loi générale chez la vache laitière..... | 48 |
| <i>Pour résumer</i> | 49 |
| II. Interactions nutrition-parasitisme..... | 50 |
| 1. Les nématodes gastro-intestinaux des équidés..... | 50 |
| 1.1. Cycle des parasites..... | 50 |
| 1.2. Les principaux nématodes..... | 51 |
| 1.2.1. Les ascaris..... | 51 |
| 1.2.2. Les oxyures..... | 51 |
| 1.2.3. Les strongles..... | 51 |
| 1.2.3.1. Les grands strongles..... | 52 |
| 1.2.3.2. Les petits strongles..... | 52 |
| 2. Conséquences de l'infestation parasitaire pour l'hôte..... | 54 |
| 2.1. Conséquences métaboliques de l'infestation par les nématodes GI et impacts sur l'utilisation de l'alimentation par l'hôte..... | 54 |
| 2.1.1. Réduction de l'ingestion volontaire et perte de productivité..... | 54 |
| 2.1.2. Perte et détournement des protéines endogènes..... | 55 |
| 2.1.3. Facteurs influençant les conséquences métaboliques du parasitisme..... | 56 |
| 2.2. Priorités d'allocation des ressources..... | 56 |
| 3. Effet de la nutrition chez un animal infesté..... | 58 |
| 3.1. Effet de la nutrition sur la résilience de l'hôte..... | 58 |
| 3.2. Effet de la nutrition sur la résistance de l'hôte..... | 59 |
| 3.2.1. Alimentation riche en protéines..... | 60 |
| 3.2.2. Alimentation riche en énergie..... | 61 |
| 3.2.3. Intérêt des minéraux et des éléments traces..... | 62 |
| 3.2.4. Alimentation avec des plantes bioactives : cas des plantes contenant des tanins condensés..... | 62 |
| 3.2.4.1. Généralités sur les tanins..... | 62 |
| 3.2.4.2. Action anthelminthique directe des tanins condensés..... | 66 |
| 3.2.4.3. Action anthelminthique indirecte des tanins condensés..... | 69 |
| 3.2.4.4. Sainfoin..... | 69 |
| 3.3. Effet de la nutrition et de la conduite du pâturage sur l'infestation de l'hôte..... | 71 |
| <i>Pour résumer</i> | 72 |
| Déroulement de la thèse..... | 73 |
| <i>Présentation des trois expérimentations</i> | 73 |
| <i>Lieux des expérimentations</i> | 75 |

CHAPITRE 1

La complémentation énergétique au pâturage est-elle indispensable pour assurer la couverture des besoins de juments de selle en lactation ? 77

CHAPITRE 2

En dessous de quel niveau de disponibilité en herbe, une complémentation énergétique des juments de selle en lactation devient-elle nécessaire ? 89

CHAPITRE 3

Vers des solutions alternatives aux traitements chimiques pour la gestion du parasitisme équin : effet d'un apport de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d'un excès d'azote de court-terme 103

DISCUSSION GENERALE 131

I. Rappel de l'objectif et du déroulé de la thèse..... 133

II. Conduite du pâturage et couverture des besoins nutritionnels de la jument en lactation 135

1. Méthodologie : estimation de la digestibilité de l'herbe et calcul de l'ingestion 135

2. Influence de la complémentation énergétique et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion et la couverture des besoins nutritionnels de la jument 136

2.1. Estimation des quantités d'herbe offertes au ras du sol..... 136

2.2. Adaptation du comportement d'ingestion des juments complémentées et non complémentées face aux variations de disponibilité de la ressource..... 137

2.2.1. Ingestion journalière 137

2.2.2. Vitesse d'ingestion et temps de pâturage 140

2.3. Implications pour la conduite alimentaire de la jument à l'herbe 143

2.3.1. Détermination du seuil de quantité d'herbe offerte en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire..... 143

2.3.2. Vers des indicateurs simples pour la conduite du pâturage 144

2.3.2.1. La hauteur d'herbe après pâturage..... 144

2.3.2.2. La hauteur d'herbe disparue 146

2.3.3. Conditions d'application du seuil de quantité d'herbe offerte..... 147

2.3.4. Cas d'un pâturage hétérogène ou de couverts de faible qualité..... 148

3. Compromis entre performances animales individuelles et efficacité d'utilisation du couvert 149

III. Nutrition et parasitisme 151

1. Un apport énergétique au pâturage ne semble pas renforcer la résistance des juments vis-à-vis des nématodes gastro-intestinaux 151

2. Une alimentation enrichie en protéines semble inefficace à court-terme vis-à-vis de la résistance des chevaux au parasitisme..... 152

| | |
|--|-----|
| 3. Les métabolites secondaires du sainfoin, une piste à développer pour réduire les traitements anthelminthiques | 154 |
| 3.1. Des résultats originaux | 154 |
| 3.2. Un effet uniquement direct ? | 155 |
| 3.3. Quelles conditions pratiques d'utilisation ? | 157 |
| IV. Conclusion générale | 159 |
| Références | 163 |
| Valorisation de la thèse | 199 |
| Annexes | 203 |
| Liste des Annexes | 205 |
| Annexe 1 | 207 |
| Annexe 2 | 209 |
| Annexe 3 | 211 |
| Annexe 4 | 221 |
| Annexe 5 | 225 |
| Annexe 6 | 229 |
| Résumé / Abstract | 233 |

Liste des abréviations

Français

| | |
|------|--|
| AH | anthelminthique |
| ATP | adénosine triphosphate |
| C | complémenté |
| DMSO | diméthylsulfoxyde |
| E | élevé |
| F | faible |
| GI | gastro-intestinal |
| I | intermédiaire |
| IFCE | Institut Français du Cheval et de l'Équitation |
| INRA | Institut National de la Recherche Agronomique |
| L3 | larve de nématode de stade 3 (stade infestant) |
| MAD | matières azotées digestibles |
| MAT | matières azotées totales |
| MO | matière organique |
| MS | matière sèche |
| MSD | matière sèche digestible |
| MSP | métabolites secondaires des plantes |
| NC | non-complémenté |
| NDF | neutral detergent fiber |
| NOF | nombre d'œufs excrétés par gramme de fèces |
| P | protéines |
| PFh | production fécale (attribuable à l'herbe) |
| PV | poids vif |
| QI | quantité ingérée |

| | |
|-----|--------------------------|
| QO | quantité d'herbe offerte |
| S | sainfoin |
| SAU | surface agricole utile |
| T | témoin |
| TC | tanin condensé |
| TS | taux de substitution |
| UFC | unité fourragère cheval |
| UGB | unité gros bétail |
| VI | vitesse d'ingestion |

Anglais

| | |
|------|---------------------------------|
| BDMI | barley dry matter intake |
| BDMD | barley dry matter digestibility |
| BSC | body condition score |
| BW | bodyweight |
| CD | control diet |
| CF | crude fiber |
| CP | crude protein |
| DCP | digestible crude protein |
| DCPI | digestible crude protein intake |
| DDM | digestible dry matter |
| DHA | daily herbage allowance |
| DM | dry matter |
| DMI | dry matter intake |
| DMSO | dimethyl sulfoxide |
| ES | energy supplementation |
| FEC | faecal egg count |

| | |
|------------|--|
| FO | faecal output (attributable to herbage intake) |
| GDMI | grass dry matter intake |
| GDMD | grass dry matter digestibility |
| GLM | generalized linear model |
| GLMM | generalized linear mixed model |
| HDMI | herbage dry matter intake |
| HDMD | herbage dry matter digestibility |
| HFU | Horse Feed Unit |
| IFCE | French Horse and Riding Institute |
| INRA | National Institute of Agronomic Research |
| IR | intake rate |
| L3 | third-stage nematode larvae (infective stage) |
| LU | livestock unit |
| LW | live weight |
| LWG | live weight gain |
| MED | medium |
| NDF | neutral detergent fiber |
| NE | net energy |
| NEI | net energy intake |
| NS or NSUP | nonsupplemented |
| PD | protein diet |
| S or SUP | supplemented |
| SD | sainfoin diet |
| SSH | sward surface height |
| TDDMI | total digestible dry matter intake |
| TDMI | total dry matter intake |

Liste des tableaux

Introduction générale

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Ingestibilité des principaux fourrages chez le cheval (d'après une synthèse de INRA 2012)..... | 32 |
| Tableau 2. Taux de substitution d'un fourrage par du concentré chez le cheval..... | 42 |
| Tableau 3. Ingestions journalières réalisées par des chevaux au pâturage (adapté de Edouard et <i>al.</i> , 2009b)..... | 45 |
| Tableau 4. Une possible hiérarchisation des priorités réalisées par un animal en croissance ou reproducteur pour l'allocation de ses ressources limitantes envers ses différentes fonctions métaboliques (d'après Coop et Kyriazakis, 1999)..... | 57 |

Chapitre 1

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Vegetation characteristics according to cycle: sward height, sward availability in the 1 st paddock and CP and NDF content..... | 83 |
| Tableau 2. Grass dry matter intake, total dry matter intake, total digestible dry matter intake, net energy intake and daily grazing time for supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares along the grazing season..... | 86 |

Chapitre 2

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Chemical composition and nutritive value of the supplement (barley)..... | 95 |
| Tableau 2. Daily offered area and characteristics of herbage on offer for grazing according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])..... | 96 |
| Tableau 3. Mares' daily intake according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])..... | 98 |
| Tableau 4. Grazing time and herbage intake rate according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily | |

| | |
|--|-----|
| herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])..... | 100 |
|--|-----|

Chapitre 3

| | |
|--|-----|
| Tableau 1. Chemical composition and nutritive value of foodstuffs..... | 129 |
|--|-----|

Liste des figures

Introduction générale

| | |
|--|----|
| Figure 1. Schéma des constituants de la matière organique des aliments et de leur fractionnement par la méthode d'analyse classique (d'après INRA, 2012)..... | 33 |
| Figure 2. Variation avec l'âge de la composition morphologique et de la valeur nutritive d'un fourrage vert (exemple : ray-grass d'Italie) (d'après INRA, 2012)..... | 34 |
| Figure 3. Schéma de l'appareil digestif des équidés..... | 34 |
| Figure 4. Schéma général du cycle parasitaire des vers intestinaux du cheval (d'après Barrier et Laugier, 2011)..... | 50 |
| Figure 5. Principaux nématodes gastro-intestinaux des équidés..... | 53 |
| Figure 6. Structure de l'acide gallique et d'un tannin gallique, le 1,2,3,4,6-penta-O-galloyl-beta-D-glucopyranose..... | 63 |
| Figure 7. Structure de la catéchine et de l'épicatéchine..... | 64 |
| Figure 8. Sainfoin (<i>Onobrychis viciifolia</i>)..... | 71 |

Chapitre 1

| | |
|---|----|
| Figure 0. Juments et poulains au pâturage, et jument au box pendant la complémentation..... | 80 |
| Figure 1. Liveweight time course of supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares... | 85 |
| Figure 2. Body condition score time course of supplemented (S) and nonsupplemented (NS) mares..... | 85 |
| Figure 3. Influence of mare supplementation on foal growth (S, supplemented mares; NS, non-supplemented mares)..... | 85 |
| Figure 4. Changes in the faecal nematode egg excretion (FEC) of supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares throughout the experiment..... | 85 |

Chapitre 2

| | |
|---|----|
| Figure 0. Trois juments suitées recevant une quantité d'herbe élevée (au premier plan) et trois juments suitées recevant une quantité d'herbe intermédiaire (au second plan)..... | 92 |
|---|----|

Figure 1. (A) Net energy intake according to energy supplementation (ES) and daily herbage allowance (DHA). (B) Horse digestible CP intake according to ES and DHA.....99

Figure 2. (A) Consumption of energy in relation to requirements according to energy supplementation (ES) and daily herbage allowance (DHA) using INRA recommendations. (B) Consumption of protein in relation to requirements according to ES and DHA using INRA recommendations.....99

Figure 3. Daily pattern of grazing activity of mares during the 2 d of grazing in a strip according to daily herbage allowance. (A) Mean of the first 24 h in a strip and (B) mean of the last 24 h in a strip.....101

Chapitre 3

Figure 1. Results of faecal egg counts (FEC).....126

Figure 2. Results of the larval development assay.....127

Figure 3. Results of the egg hatch assay.....128

Discussion générale

Figure 1. Variations de l'ingestion journalière d'herbe selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 et 2013.....138

Figure 2. Variations de la vitesse d'ingestion d'herbe selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 et 2013.....141

Figure 3. Variations du temps de pâturage selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 et 2013.....142

Figure 4. Effet linéaire de la quantité d'herbe offerte sur la couverture des besoins liée à l'ingestion d'herbe chez les juments non complémentées (expérimentation 2013).....143

Figure 5. Quantité d'énergie (UFC) à apporter par le complément pour couvrir 100% des besoins énergétiques des juments selon la quantité d'herbe offerte (expérimentation 2013).144

Figure 6. Photos d'un herbomètre stick et d'un herbomètre plateau.....145

Figure 7. Relation entre la hauteur d'herbe mesurée à l'herbomètre plateau (cm) et la hauteur d'herbe mesurée à l'herbomètre stick (cm) établie en 2013.....146

| | |
|---|-----|
| Figure 8. Variations de l'ingestion journalière d'herbe par les juments en lactation selon la hauteur d'herbe après pâturage (cm) ou la hauteur d'herbe disparue (% de la hauteur avant pâturage) en 2013..... | 147 |
| Figure 9. Variations de l'ingestion d'herbe et du taux d'utilisation du couvert (% de la quantité d'herbe offerte) selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol avec les données mesurées pour les juments non-complémentées en 2012 et 2013..... | 150 |
| Figure 10. Schéma récapitulatif de l'ingestion et du comportement alimentaires des juments en lactation complémentées en orge ou non dans différentes situations de quantités d'herbe offertes..... | 161 |
| Figure 11. Seuil de quantité d'herbe offerte en-dessous duquel une complémentation énergétique des juments en lactation est nécessaire, et conditions de validité de ce seuil. Ce schéma est un « zoom » sur la réponse des juments non-complémentées présentée sur la figure 10..... | 162 |

Introduction générale

Contexte

Le pâturage : un atout pour la durabilité des systèmes d'élevage d'herbivores

Aujourd'hui l'élevage européen toutes espèces d'herbivores confondues compte près de 78 millions d'unités gros bétail (UGB), productrices de lait ou de viande, dont l'alimentation est basée sur l'utilisation des prairies permanentes ou des prairies temporaires, qui représentent respectivement plus de 57 millions d'hectares et 10 millions d'hectares de la surface agricole de l'Union Européenne-27 (Pflimlin, 2012 ; Huyghe *et al.*, 2014). Les prairies permanentes représentent ainsi 85% des 39% de la surface agricole de l'Union Européenne-27 couverte par les prairies. A l'échelle de la France, les prairies permanentes mobilisent 33% de la surface agricole utile (SAU) dont 15% sont représentés par les landes et les parcours des zones méditerranéennes et montagneuses. L'utilisation des prairies par le pâturage permet de maîtriser les coûts de production en réduisant le recours aux aliments concentrés et aux fourrages conservés, l'herbe pâturée étant l'aliment le moins coûteux si elle est bien gérée (Peyraud et Delaby, 2001 ; Delaby *et al.*, 2003). La conduite au pâturage des herbivores domestiques contribue également au bien-être des animaux, à la qualité et à l'image des produits, à l'entretien des prairies qui fournissent des services écosystémiques à la société (séquestration du carbone, régulation des cycles des nutriments, etc.) et à la préservation de leur biodiversité (Gibon, 2005 ; Isselstein *et al.*, 2007 ; Bernués *et al.*, 2011 ; Bedoin et Kristensen, 2013).

Cependant, gérer la conduite des herbivores au pâturage est plus délicat que les alimenter à l'auge à base de fourrages conservés. Il s'agit d'une gestion dynamique et réactive où l'éleveur doit fréquemment prendre des décisions, liées à la date de mise à l'herbe, au temps de présence des animaux sur les parcelles ou encore à la durée des cycles de rotation, pour atteindre et maintenir un équilibre entre le flux de croissance de l'herbe et le flux d'ingestion des animaux (Scott *et al.*, 2013). Les conditions climatiques incertaines (température, précipitations) à court-terme ainsi que leurs conséquences sur la croissance et la valeur nutritive de l'herbe complexifient une estimation difficile des apports nutritifs reçus lors du pâturage. Cette gestion délicate peut constituer un frein à la valorisation optimale de la

ressource pâturée et conduire l'éleveur à apporter des aliments concentrés au pâturage ou à privilégier une alimentation à l'auge avec des fourrages conservés afin d'assurer la couverture des besoins des animaux au détriment de la performance économique de l'exploitation (Ferris, 2007 ; Finneran *et al.*, 2011). Néanmoins, il existe en milieux tempérés des systèmes de production performants au plan zootechnique et économique reposant sur une valorisation maximale du pâturage dans l'alimentation des troupeaux. En particulier, les élevages de bovins allaitants peuvent maintenir les performances des animaux, y compris des vaches en lactation dont les besoins sont élevés, en basant leur alimentation sur le pâturage sans avoir recours à une complémentation (Drennan et Mc Gee, 2008 ; Bedoin et Kristensen, 2013). Dans ces systèmes, le vêlage a généralement lieu au printemps pour faire coïncider la période où l'abondance et la qualité de l'herbe sont maximales avec la période où les besoins nutritionnels des vaches en lactation sont les plus élevés (May *et al.*, 1999 ; Drennan et Mc Gee, 2008 ; Fraser *et al.*, 2009). La gestion sur le plan économique de l'alimentation des vaches allaitantes peut impliquer une mobilisation des réserves corporelles des vaches durant la période hivernale et une reprise d'état pendant la saison de pâturage, plus ou moins importante selon la valeur nutritive de l'herbe (Petit *et al.*, 1995). Un compromis doit être trouvé entre une quantité d'herbe offerte suffisante pour maximiser l'ingestion d'herbe mais pas trop excessive pour éviter le gaspillage et une repousse de moins bonne qualité.

Systemes d'élevages équins : une nécessaire rationalisation de l'utilisation des intrants

L'important développement de l'équitation de loisir a conduit ces 30-40 dernières années à un accroissement du nombre d'équins en Europe. D'après les estimations, on compterait 6 millions d'équins (Liljenstolpe, 2009) utilisant approximativement 3,5 millions d'hectares pour le pâturage et la fourniture d'aliments, ce qui représente environ 3% des terres arables de l'Union Européenne-15 (SLU, 2001). En France, les effectifs sont estimés à 1 million, soit environ 4% des herbivores domestiques, avec une hausse de 25 000 équins par an depuis 2008 (REFErences, 2012). Un demi million d'hectares seraient utilisés pour alimenter les chevaux, ce qui représente 0.1% du territoire métropolitain et 5% des prairies permanentes (REFErences, 2009).

En dépit d'une demande croissante de chevaux de selle, des enquêtes réalisées dans 250 exploitations professionnelles en France (Morhain, 2011) rapportent de faibles revenus pour les élevages équinés (inférieurs à 15 000 € d'excédent brut d'exploitation par unité de main d'œuvre). Les principales raisons sont un manque d'adéquation entre l'offre (principalement orientée vers le sport de haut niveau) et la demande (loisir) conduisant à un accroissement du nombre de chevaux importés et à une mauvaise maîtrise des coûts de production, en particulier d'alimentation. Ainsi, les charges liées à l'alimentation représentent 20 à 50% des charges opérationnelles selon les systèmes (REFErences, 2010 ; Morhain, 2011) et seulement 30% des élevages sont autonomes sur le plan alimentaire (principalement ceux ayant une autre production agricole). Ces charges d'alimentation pourraient être réduites par une meilleure valorisation de l'herbe pâturée. On estime que l'herbe représente une part de l'alimentation annuelle de l'ordre de 30% pour les chevaux à forte valeur commerciale (races de course ou de sport de haut niveau) chez lesquels la couverture permanente des besoins est assurée par une forte complémentation des animaux en concentrés toute l'année (Moulin, 1995). L'utilisation de l'herbe est supérieure dans les systèmes élevant des chevaux pour le sport amateur et le loisir (50-60% de l'alimentation annuelle ; Moulin, 1995) mais elle reste limitée par le manque de confiance des éleveurs vis-à-vis d'une ressource qui varie en disponibilité et en qualité au cours de la saison, et qui subit d'importantes fluctuations inter-annuelles selon les conditions climatiques. De plus, les références de conduite alimentaire des chevaux à l'herbe restent peu nombreuses malgré des travaux récents sur l'animal en croissance (Mésochina *et al.*, 2000 ; Grace *et al.*, 2002a ; Edouard *et al.*, 2009a, 2010). Les mêmes conclusions relatives à la sous-utilisation de l'herbe dans les élevages équinés de course et de sport et loisir sont rapportées dans d'autres pays, par exemple au Royaume-Uni (Mullen *et al.*, 1979), aux Etats-Unis (Glade, 1983) ou encore au Brésil (Oliveira *et al.*, 2010). Ainsi, la complémentation avec des concentrés des animaux à forts besoins, juments poulinières et poulains, est une pratique courante pour garantir la couverture de leurs besoins lorsqu'ils sont conduits au pâturage, même dans de bonnes conditions herbagères (Miraglia *et al.*, 2006 ; Hoffman *et al.*, 2009). La nécessité d'une complémentation systématique interroge pourtant lorsque l'on sait que des vaches allaitantes peuvent être nourries exclusivement à l'herbe (Drennan et Mc Gee, 2008 ; Bedoin et Kristensen, 2013) et que les chevaux se caractérisent par des niveaux d'ingestion de fourrages supérieurs à ceux des bovins de même format lorsqu'ils sont nourris *ad libitum* (Duncan *et al.*, 1990, Ménard *et al.*, 2002). Dans l'étude de Thériez *et al.* (1994), des juments nourries à l'auge avec différents types de fourrages ont

ainsi couvert leurs besoins énergétiques quel que soit leur état physiologique et la qualité du fourrage tandis que des vaches allaitantes ne couvraient plus leurs besoins de gestation et de lactation sur les fourrages au stade floraison.

Parallèlement au développement des connaissances sur l'alimentation des chevaux à l'herbe pour couvrir leurs besoins nutritionnels, les recherches sur la conduite au pâturage doivent également s'intéresser aux moyens de gérer durablement le parasitisme gastro-intestinal qui constitue une menace pour la santé et les performances des animaux (Collobert-Laugier *et al.*, 2002a ; Murphy et Love, 1997 ; Love *et al.*, 1999). Actuellement, la gestion du parasitisme repose presque exclusivement sur l'utilisation massive et répétée de traitements par des molécules anthelminthiques (AH) de synthèse (Nielsen *et al.*, 2006). Le contrôle des nématodes gastro-intestinaux (GI) avec les AH seuls devient difficile car les phénomènes de résistances de certains parasites à certaines molécules anthelminthiques se répandent dans de nombreux pays et engendrent une perte d'efficacité des traitements (Coles *et al.*, 2006 ; von Samson-Himmelstjerna, 2012). Ainsi, une résistance aux benzimidazoles des cyathostomes ou petits strongles, les parasites équins les plus communs, est avérée et répandue partout dans le monde (Ramisz et Betlejewska, 1993 ; Kaplan, 2002 ; Witzendorff *et al.*, 2003 ; Meier et Hertzberg, 2005 ; Lind *et al.*, 2007 ; Kuzmina et Kharchenko, 2008). Dans une moindre mesure des résistances au pyrantel ont été rapportées en Amérique du Nord (Woods *et al.*, 1998 ; Lyons *et al.*, 2011) et en Europe du Nord (Ihler, 1995 ; Craven *et al.*, 1998 ; Lind *et al.*, 2007). Alors que les avermectines (notamment ivermectine et moxidectine) semblaient être épargnées par ces phénomènes (Kaplan *et al.*, 2004 ; Nielsen, 2010), des études récentes rapportent des résistances à l'ivermectine des cyathostomes en Europe (Traversa *et al.*, 2009) et des *Parascaris* aux Etats-Unis (Craig *et al.*, 2007). D'autre part, les résidus de molécules AH rejetés dans l'environnement via les fèces ont de lourdes conséquences sur la pédofaune et impactent les relations trophiques (Donald, 1994 ; McKellar, 1997). Une gestion durable des nématodes GI réside dans une approche intégrée combinant plusieurs stratégies telles qu'une utilisation raisonnée des traitements AH, une gestion du pâturage permettant de limiter le contact entre l'hôte et les larves infestantes, une manipulation de la nutrition pour réduire l'infestation et renforcer l'immunité de l'hôte ou encore la sélection d'animaux génétiquement résistants (Barger, 1999 ; Hoste *et al.*, 2005b ; Athanasiadou *et al.*, 2008 ; Hoste et Torres-Acosta, 2011). L'objectif n'est plus d'éliminer 100% des vers sur une courte durée, ce qui n'est pas réalisable avec des traitements AH en raison du développement de résistances, mais

de suffisamment contrôler l'état parasitaire des herbivores sur le long terme pour que leur santé et leur niveau de production ne soient pas affectés en ayant recours à des méthodes moins efficaces mais plus durables (Waller, 2006 ; Hoste et Torres-Acosta, 2011).

Problématique de la thèse

A l'heure où le rôle des systèmes herbagers pour l'élevage des herbivores domestiques prend de plus en plus d'ampleur en raison de leurs avantages sur les plans économique, zootechnique et environnemental, il paraît indispensable d'améliorer les connaissances sur l'ingestion des chevaux au pâturage. Quelques travaux ont permis de préciser les lois de réponse de l'ingestion et des choix alimentaires face à des variations de structure (hauteur, biomasse) et/ou de qualité du couvert chez le cheval en croissance ou à l'entretien, mais l'intérêt d'une complémentation des chevaux à forts besoins selon les conditions de pâturage n'a jusqu'à présent jamais été étudié. Le manque de références techniques sur la valorisation de l'herbe par les chevaux est le facteur limitant d'une conduite alimentaire performante sur les plans économique et zootechnique et se traduit par une évidente sous-utilisation des ressources herbagères dans l'alimentation des chevaux. Cette thèse s'intéressera en particulier à la jument de selle en lactation, dont la complémentation au pâturage est une pratique courante pour assurer la couverture de ses besoins élevés. Il apparaît nécessaire d'alimenter les juments au minimum au niveau de leurs besoins énergétiques puisqu'une balance énergétique négative pourrait se traduire par une diminution de la production d'énergie par le lait, donc une pénalité pour la croissance du poulain, ou par une mobilisation des réserves corporelles de la jument (Doreau *et al.*, 1988). Ainsi, l'objectif global de la thèse est de préciser l'impact de variations dans la conduite alimentaire de la jument de selle en lactation au pâturage, en particulier les effets d'une complémentation et de la quantité d'herbe offerte, sur son niveau d'ingestion, la couverture de ses besoins et son état parasitaire, dans une perspective d'optimisation de l'utilisation des intrants visant à améliorer les performances des élevages équin. En particulier, il s'agit d'une part d'améliorer les connaissances sur la régulation de l'ingestion au pâturage de la jument en lactation et de préciser les conditions de pâturage nécessitant la mise en place d'une complémentation ; d'autre part de préciser comment la manipulation de la nutrition du cheval peut influencer la régulation du parasitisme gastro-intestinal.

Etude bibliographique

Nutrition et santé des équins au pâturage : étude des effets des caractéristiques de la ressource sur l'ingestion et l'état parasitaire

I. Ingestion de fourrages : influence des caractéristiques de la ressource et conséquences d'un apport de concentré

1. Des connaissances principalement acquises pour des chevaux alimentés à l'auge

1.1. Facteurs de variation de l'ingestibilité des fourrages chez le cheval

Les fourrages sont des aliments grossiers qui comprennent les fourrages verts (herbe) consommés au pâturage, et les fourrages conservés (foins, ensilages, pailles) consommés à l'auge. Ce sont les aliments dont l'ingestibilité (quantité de matière sèche d'un aliment qu'un animal peut consommer spontanément quand il est distribué à volonté comme seul aliment) est la plus variable avec des valeurs mesurées entre 9 et 26 g MS.kg PV⁻¹ chez des équidés adultes domestiques à l'entretien (INRA, 2012 ; Tableau 1). Ainsi, on reporte une ingestibilité comprise entre 18 et 21 g MS.kg PV⁻¹ pour des fourrages verts de prairie naturelle. Les foins de prairie naturelle, de graminées ou de légumineuses présentent des valeurs similaires à celles des fourrages verts entre 17 et 23 g MS.kg PV⁻¹. Les ensilages d'herbe pré-fanés de prairie naturelle sont moins bien consommés que les foins ou les fourrages verts (12 à 18 g MS.kg PV⁻¹), alors que les ensilages enrubannés le sont mieux (22 à 26 g MS.kg PV⁻¹). Les ensilages de maïs (9 à 20 g MS.kg PV⁻¹) et les pailles (12 à 15 g MS.kg PV⁻¹) ont la plus faible ingestibilité. L'ingestibilité varie en sens inverse de la teneur en parois lignifiées du

fouillage et pour les fourrages grossiers de l'effet d'encombrement qu'il exerce dans le gros intestin. D'autres facteurs tels que la famille botanique ou les conditions de récolte et de conservation sont à l'origine de variations dans l'appétibilité et la composition chimique (valeur nutritive, teneur en matière sèche, etc.) des fourrages qui déterminent leur ingestibilité. Ils sont discutés dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 1. Ingestibilité des principaux fourrages chez le cheval (d'après une synthèse de INRA, 2012).

| Aliments | Quantités ingérées^{1,2}, g MS par kg poids vif |
|--|--|
| Fourrages verts de prairie naturelle | 18-21 |
| Foins de prairie naturelle ou de graminées | 17-21 |
| Foins de légumineuses | 21-23 |
| Pailles | 12 -15 |
| Ensilage de maïs bien conservé | |
| à 25% de MS | 9-12 |
| à 30% de MS | 12-20 |
| Ensilages d'herbe pré-fané bien conservé (prairie naturelle) | |
| à 25% de MS | 12-15 |
| à 35% de MS | 15-18 |
| Ensilage enrubanné (prairie naturelle, graminée) | |
| à 45% de MS | 22-24 |
| à 60% de MS | 24-26 |

MS : matière sèche

¹quantité maximale de fourrage ingérée par l'animal lorsque l'aliment est distribué à volonté

²les fourchettes représentent la variation entre animaux

1.1.1. Composition chimique et valeur nutritive

La valeur alimentaire d'un aliment résulte de sa valeur nutritive (teneur en énergie, acides aminés, minéraux et oligoéléments) et de son ingestibilité, les deux étant sous l'influence de sa composition chimique.

Les fourrages sont constitués de l'appareil aérien des plantes fourragères qui comprend les feuilles (légumineuses et diverses) ou limbes foliaires (graminées), les tiges (et les gaines dans le cas des graminées), les fleurs (légumineuses et diverses), les épis et les graines (graminées).

Les parois des cellules végétales représentent 30 à 60% de la teneur en matière sèche (MS) des fourrages (jusqu'à 80% dans le cas des pailles) et sont essentiellement constituées de glucides partiellement indigestibles (cellulose et hémicellulose) et de lignine totalement

indigestible (Figure 1). On parle également de cellulose brute pour désigner la fraction fibreuse des fourrages puisqu'elle est majoritairement constituée de cellulose (70-80%), avec une proportion moindre d'hémicellulose (5-10%), de lignine (5-10%) et de matières azotées (1-3%). La cellulose brute représente entre 40 et 65% des parois végétales (soit 10 à 50% de la MO). Les tiges sont plus riches en parois que les feuilles et la teneur en parois s'accroît avec l'âge de la plante qui entraîne une augmentation de la proportion de tissus de soutien et de conduction à parois épaisses et lignifiées, et une réduction de la proportion de tissus à parois minces (Figure 2). Le vieillissement de la plante s'accompagne également d'une diminution de sa teneur en eau (de 85 à 75% environ) et de sa valeur nutritive.

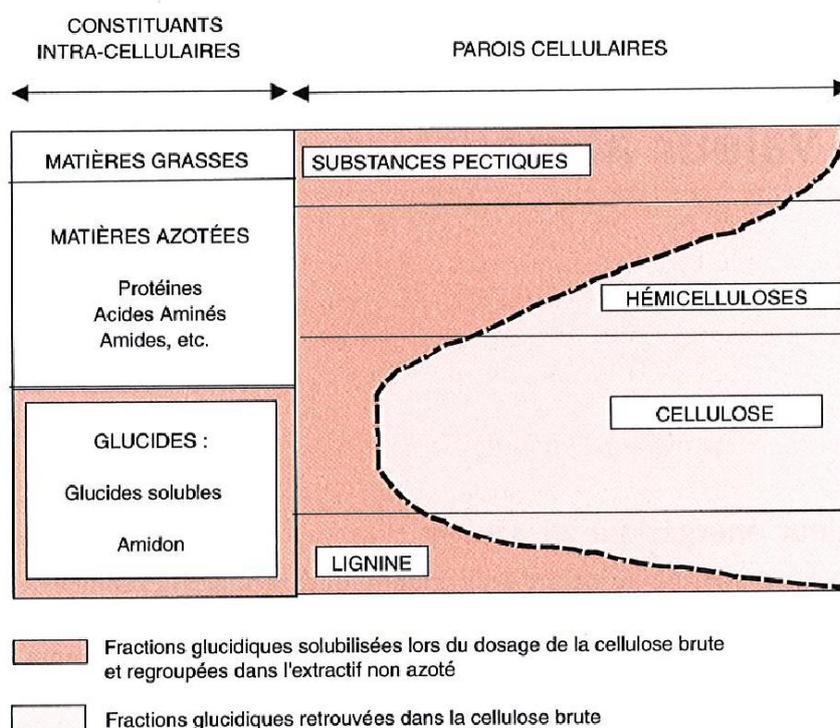


Figure 1. Schéma des constituants de la matière organique des aliments et de leur fractionnement par la méthode d'analyse classique (d'après INRA, 2012).

Les cellules végétales comprennent également des composés non pariétaux très digestibles qui sont pour partie des glucides cytoplasmiques (glucides solubles et amidon), et pour partie des matières azotées (5 à 60%) regroupant des protéines et des constituants azotés non protéiques (Figure 1). Les constituants cytoplasmiques, dont les constituants azotés, sont principalement digérés par voie enzymatique dans l'intestin grêle ; alors que les constituants pariétaux, et environ 30% de l'azote digestible de la ration, sont principalement digérés par

voie microbienne dans le gros intestin, principalement le caecum (Wolter, 1984 ; INRA, 2012). Le cheval est un herbivore monogastrique dont le transit est rapide dans l'estomac, de capacité réduite (15 à 18 L), mais dure environ 24 h dans le gros intestin qui est très développé (180 à 220 L) (Wolter, 1984 ; Figure 3). Les fourrages longs séjournent en moyenne 36 h dans le tube digestif.

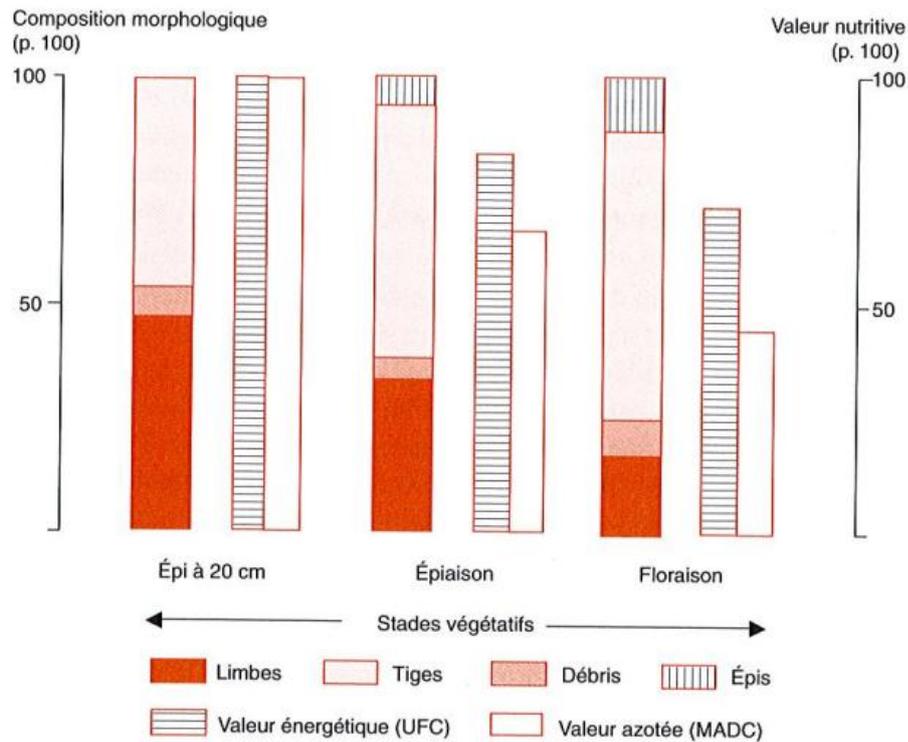


Figure 2. Variation avec l'âge de la composition morphologique et de la valeur nutritive d'un fourrage vert (exemple : ray-grass d'Italie) (d'après INRA, 2012).

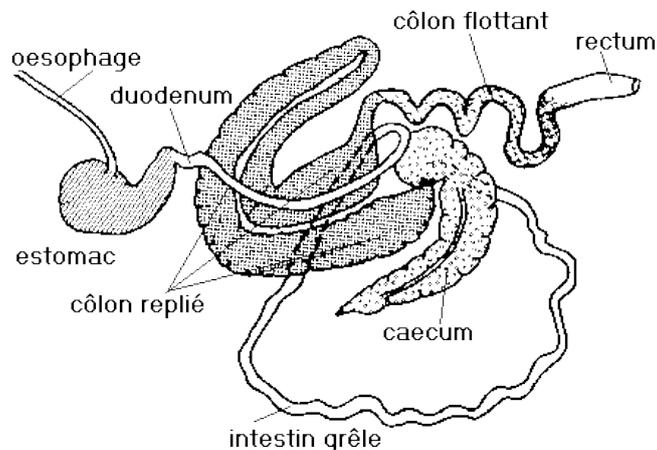


Figure 3. Schéma de l'appareil digestif des équidés (<http://www.1cheval.com>)

1.1.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle très important dans l'ingestibilité des fourrages et peut varier de 15 à 85% entre un foin récolté en juin-juillet et une herbe de printemps (INRA, 2012). Les fourrages verts ont une teneur en eau supérieure à 70%. Au pâturage, Mésochina (2000) a mesuré des variations interannuelles d'ingestion de matière organique par les chevaux en croissance de l'ordre de 60%. Les niveaux d'ingestion étaient plus élevés l'année où la teneur en matière sèche de l'herbe était élevée ce qui a conduit l'auteur à formuler l'hypothèse qu'une forte teneur en eau de la végétation pourrait limiter son ingestion par une augmentation du volume digestif. Les ensilages ont une teneur en eau comprise entre 40 et 70% du poids frais. Leur ingestibilité s'accroît avec la teneur en matière sèche (INRA, 2012). Par exemple, Agabriel et al. (1982) ont mesuré une augmentation de l'ingestibilité de l'ensilage de maïs de 60% lorsque sa teneur en matière sèche passait de 20 à 45%. A notre connaissance, il n'y a pas d'effets mesurés de la teneur en eau des fourrages déshydratés (elle varie entre 8 et 16% pour les foins et les pailles) sur leur ingestibilité.

1.1.1.2. Digestibilité

La digestibilité d'un aliment est fonction de la digestibilité de chacun de ses constituants et se calcule à partir du rapport entre la quantité d'un aliment qui est ingérée et celle qui est digérée : $\text{digestibilité} = (\text{ingéré} - \text{excrété}) / \text{ingéré}$. Il s'agit d'une digestibilité apparente puisque de la matière organique (MO) d'origine endogène (enzymes et mucus sécrétés par l'épithélium intestinal) ou d'origine microbienne (matières azotées) apparaît dans le tube digestif et se rajoute à la fraction réellement digestible de l'aliment.

Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que la digestibilité de la MS chez le cheval diminue avec la qualité du fourrage (notamment lorsque sa fibrosité augmente), mais que les effets de la digestibilité ou de la teneur en fibres des fourrages sur leur ingestibilité sont limités, contrairement à ce qu'on observe chez les ruminants (Janis, 1976 ; Chenost et Martin-Rosset, 1985 ; Cymbaluk, 1990 ; Dulphy *et al.*, 1997b ; Edouard *et al.*, 2008). Cette différence entre les équidés et les ruminants est liée à l'absence d'orifice réticulo-omasal dans le tractus digestif du cheval, alors que chez les ruminants celui-ci limite le passage des particules de fourrages dans la suite de l'appareil digestif (Wolter, 1984 ; Dulphy *et al.*, 1997a). Ainsi chez le cheval il faut un écart de qualité très important, comme entre de la luzerne et de la paille,

pour obtenir des écarts significatifs d'ingestion selon la qualité des fourrages (Vernet *et al.*, 1995 ; Dulphy *et al.*, 1997a).

Dans une synthèse récente, Edouard *et al.*, (2008) ont mis en évidence que la variabilité inter-individuelle pouvait cependant moduler l'effet de la qualité du fourrage sur son ingestibilité. Lorsque les données sont analysées au niveau d'un groupe de chevaux (donc lorsqu'on ne prend pas en compte la variabilité inter-individuelle), l'augmentation de la teneur en fibres ne diminue que légèrement l'ingestion des fourrages et celle-ci n'est également que peu influencée par la teneur en MAT et la digestibilité de la MS (Edouard *et al.*, 2008). L'ingestibilité d'un fourrage ne peut alors pas être prédite à partir de sa composition chimique. En revanche, pour chaque individu, on peut mettre en évidence des relations entre la valeur nutritive des fourrages et leur ingestibilité. Une majorité de chevaux augmentent leur ingestion pour compenser la plus faible valeur nutritive des fourrages, alors que quelques autres réduisent celle-ci sans conséquences sur la couverture de leurs besoins (Edouard *et al.*, 2008). De par leur forte capacité d'ingestion et leur tolérance à la fibrosité du fourrage, les chevaux sont capables de consommer de plus grandes quantités de fourrages grossiers que des bovins de même format. Ils peuvent ainsi réaliser des niveaux d'ingestion de MO digestible plus élevés que les ruminants alors qu'ils digèrent moins bien la MS et les fibres (Cymbaluk, 1990 ; Duncan *et al.*, 1990 ; Dulphy *et al.*, 1995 ; Ménard *et al.*, 2002 ; Edouard *et al.*, 2008). En accord avec la faible influence moyenne de la teneur en fibres des fourrages sur leur ingestibilité, le stade de maturité et le cycle de récolte des fourrages verts ou des foin ne font pas varier leur ingestibilité (INRA, 2012), et ceci alors que le stade de maturité d'un fourrage est le principal déterminant de sa digestibilité.

1.1.1.3. Valeur azotée du régime

Les fourrages conservés ont une teneur en matières azotées qui varie entre 0 et 170 g MADC.kg MS⁻¹. Martin-Rosset et Doreau (1984) et Dulphy *et al.* (1997b) ont rapporté que l'ingestion volontaire des chevaux était indépendante de la teneur en matières azotées totales (MAT) du régime mais dans ces essais les écarts de MAT entre fourrages étaient limités. En fait c'est en dessous d'une teneur en MAT de 80 g.kg MS⁻¹ que l'ingestion journalière des chevaux semble chuter (Dulphy *et al.*, 1997b). Ainsi, lorsqu'on écarte la gamme de qualité des fourrages, il devient possible de mettre en évidence une relation positive entre le niveau d'ingestion volontaire d'un régime et sa teneur en MAT (Johnson *et al.*, 1982 ; Chenost *et*

Martin-Rosset, 1985 ; Dulphy *et al.*, 1997a). Ainsi l'ingestibilité d'un régime augmente en moyenne de 44% lorsque sa teneur en MAT passe de 4 à 24%.

Les différences d'ingestibilité rapportées entre les fourrages de familles botaniques différentes pourraient être pour partie reliées à leur valeur azotée (Edouard *et al.*, 2008). Comparativement aux graminées, les légumineuses possèdent une cellulose moins digestible mais aussi une plus faible teneur en parois indigestibles et une plus forte disponibilité de leurs matières protéiques (Wolter, 1984). Cette meilleure valeur nutritive explique que l'ingestibilité des légumineuses soit supérieure d'environ 10 à 20% (avec des valeurs extrêmes à +30%) à celle des graminées (Crozier *et al.*, 1997 ; LaCasha *et al.*, 1999 ; Rodiek et Jones, 2012). Les relations entre valeur azotée du régime et ingestibilité peuvent aussi être analysées en intra-spécifique (ou intra-famille botanique). Par exemple, une réduction de la teneur en MAT de 50% réduit l'ingestibilité de la luzerne de plus de 60%. La faible teneur en azote de certains fourrages, qu'ils soient fortement digestibles tels que l'ensilage de maïs ou peu digestibles tels que la paille, peut expliquer leur faible ingestibilité. Il a d'ailleurs été montré qu'une complémentation azotée améliorerait de 11 à 23% l'ingestibilité de régimes à base de paille (Wolter *et al.*, 1982).

1.1.1.4. Valeur énergétique du régime

La valeur énergétique des fourrages conservés varie entre 0,3 et 0,8 unités fourragères cheval (UFC). L'ingestibilité des aliments semble positivement corrélée avec leur teneur en énergie brute ; l'ingestibilité augmentant en moyenne de 12% avec une augmentation de la teneur en énergie brute des aliments de 3 à 4,5 Mcal.kg MS⁻¹ (Boulot, 1987). En revanche, aucune relation entre l'ingestibilité d'un régime et sa valeur énergétique exprimée en énergie digestible n'a jusqu'ici pu être mise en évidence (Mésochina, 2000). Les pertes énergétiques dans les fèces qui entrent en compte pour le passage de l'énergie brute à l'énergie digestible pourraient expliquer cette absence de relation.

1.1.2. Conditions de récolte et de conservation

Les méthodes de récolte et de conservation des fourrages sont à l'origine de pertes de sucres et de matières azotées du contenu cellulaire par rapport à la plante sur pied et modifient ainsi la valeur alimentaire du fourrage. Les pertes à la récolte sont dues aux processus

respiratoires qui se poursuivent après la fauche. Dans le cas des ensilages, des pertes supplémentaires sont dues aux fermentations anaérobies. Par ailleurs on rapporte des pertes mécaniques lors de la fauche, ou par lessivage lors du séchage ou de la conservation. Des traitements peuvent cependant être appliqués aux fourrages pour permettre une meilleure conservation (fanage et ensilage des fourrages verts) ou faciliter leur stockage et leur distribution. Ainsi, le hachage ou le broyage des fourrages réduit la taille des particules alimentaires et améliore l'ingestibilité des fourrages de 13 à 24% grâce à une diminution de 20 à 40% du temps de séjour des aliments dans le tube digestif. Il peut ainsi y avoir des différences d'ingestibilité entre des fourrages récoltés au même stade mais conservés selon différentes méthodes (fanage, ensilage, enrubannage), et ceci d'autant plus que le cheval semble très sensible à la qualité de conservation des aliments et à leur teneur en matière sèche (Agabriel *et al.*, 1982 ; INRA, 2012). Le traitement d'un fourrage par la soude ou l'ammoniaque modifie également la structure des parois végétales et accroît ainsi sa digestibilité et sa valeur alimentaire (Wolter *et al.*, 1982 ; INRA, 2012). En revanche, le traitement d'un foin grossier ou d'une paille n'a que peu affecté son ingestibilité par des chevaux en croissance ou des poneys (Wolter *et al.*, 1982 ; Lawrence *et al.*, 1987).

1.1.3. Mode de distribution

La fréquence de distribution des repas et les quantités distribuées par repas peuvent faire varier les niveaux d'ingestion. L'augmentation du nombre de distributions quotidiennes semble accroître les niveaux d'ingestion de poneys lorsque ceux-ci reçoivent des aliments peu ingestibles à l'auge (Austbo, 1986). Les chevaux reçoivent généralement leur ration en deux ou trois repas distribués à heures fixes avec quatre à six heures d'intervalle entre chaque repas. Il est conseillé d'augmenter la fréquence de distribution (au moins trois repas par jour) lorsque les quantités journalières sont élevées et/ou lorsque le régime est riche en glucides fermentescibles, et ceci afin de ne pas saturer les capacités digestives des chevaux. Fractionner la ration journalière en six repas semble favoriser le maintien de l'homéostasie et une meilleure utilisation métabolique des nutriments (Youket *et al.*, 1985).

1.1.4. Qualités organoleptiques

Lorsqu'il est placé en situation de choix, le cheval manifeste un comportement sélectif de tri envers certains aliments qui pourrait entraîner des écarts d'ingestibilité (Boulot, 1987). Les différences d'ingestibilité entre les fourrages frais et les foin, entre les foin et les pailles, ou entre légumineuses et graminées, peuvent en partie s'expliquer par les préférences alimentaires des chevaux (Edouard *et al.*, 2008). Les qualités organoleptiques des fourrages jouent un rôle majeur : ainsi la préférence des chevaux pour les saveurs sucrées permet d'améliorer l'ingestibilité d'un aliment par incorporation de saccharose ou de mélasse (notamment pour les céréales). Il est également possible que la perception tactile au niveau buccal participe au déterminisme de l'ingestibilité d'un aliment. L'odorat est également un sens bien développé et un aliment de forte odeur peut voir sa consommation réduite. Ainsi les chevaux rejettent généralement les plantes toxiques alors qu'ils consomment préférentiellement les aliments auxquels ils sont habitués.

1.2. Apport de concentré chez le cheval : cas des régimes mixtes

La distribution de fourrages peut être complétée par celle d'un aliment concentré, très ingestible et rapidement métabolisable, qui permet un apport supplémentaire de nutriments pour assurer la couverture des besoins et éventuellement équilibrer les apports nutritionnels des animaux (INRA, 2012). La complémentation peut être faite à partir d'aliments riches en amidon tels que les graines de céréales (orge, avoine, maïs, etc.), d'aliments riches en glucides solubles (racines, tubercules) et leurs sous-produits (mélasse, etc.), ou encore d'aliments riches en matières azotées tels que des graines oléagineuses ou protéagineuses (soja, féverole, etc.) et leurs sous-produits (farine, tourteaux, etc.). L'ingestibilité d'un aliment varie selon la nature et la quantité des autres constituants du régime. L'apport de concentré peut ainsi modifier l'ingestibilité du fourrage par un processus de substitution.

Le taux de substitution (TS) permet de caractériser l'amplitude de la substitution d'un aliment A (ici le fourrage) par un aliment B (ici le concentré). Il se définit comme la quantité de matière sèche de fourrage ingérée en moins (en kg) par kg de matière sèche de concentré ingéré. Si la réduction de l'ingestion de fourrage est moins importante que l'augmentation de

l'ingestion de concentré, alors le taux de substitution est compris entre 0 et 1 et l'ingestion totale est augmentée. Dans le cas d'un concentré énergétique la prise calorique et le gain de poids vif sont alors accrus (Agabriel *et al.*, 1982 ; Martin-Rosset et Doreau, 1984). Un taux de substitution de 0 correspond à une additivité totale de l'ingestion de fourrage et de concentré, alors qu'un taux de substitution de 1 correspond à une substitution totale puisque la quantité de fourrage substituée est égale à la quantité de concentré ingérée ; dans ce cas l'ingestion totale n'est pas modifiée. Le TS est supérieur à 1 lorsque la quantité de fourrage substituée est supérieure à la quantité de concentré apportée ; l'ingestion totale est alors réduite. Enfin, le TS est négatif lorsque l'ingestion de fourrages s'accroît avec l'apport de concentré ; l'ingestion totale est alors augmentée. L'INRA (2012) rapporte une gamme de taux de substitution variant entre 0,3 et 2,4 chez le cheval, mais plusieurs auteurs ont également calculé des valeurs négatives avec un complément azoté (Jordan, 1979 ; Wolter *et al.*, 1982). La variabilité des taux de substitution est difficile à expliquer mais il semble que le taux de substitution soit influencé par les caractéristiques du fourrage (qualité, quantité), la nature et la dose de concentré et les caractéristiques de l'animal qui déterminent ses besoins nutritionnels et sa capacité d'ingestion (stade physiologique, race, etc.).

Pour les fourrages ayant une ingestibilité élevée (par exemple un foin de graminée ou de luzerne), un apport de concentré (ou un accroissement de la quantité de concentré distribuée) entraîne le plus souvent une diminution de l'ingestion volontaire de fourrage mais dans une proportion moins importante que la quantité de concentré consommée. Le taux de substitution est alors compris entre 0 et 1 (Sasimowski *et al.*, 1979 ; Martin-Rosset et Doreau, 1984 ; Martin-Rosset *et al.*, 1986 ; Martin-Rosset et Dulphy, 1987 ; Vermorel *et al.*, 1997 ; Peiretti *et al.*, 2006 ; Winsco *et al.*, 2013 ; Tableau 2). Dans quelques cas, l'ingestion de fourrage diminue plus fortement que l'apport de concentré, ce qui conduit à une diminution de l'ingestion totale (et donc à un $TS > 1$) (Martin-Rosset et Doreau, 1984 ; Trillaud-Geyl *et al.*, 1986 ; Martin-Rosset et Dulphy, 1987 ; Peiretti *et al.*, 2006 ; Lavin *et al.*, 2013 ; Tableau 2).

Pour les fourrages de plus faible ingestibilité (ensilage de maïs, paille), les taux de substitution sont systématiquement compris entre 0 et 1 (Agabriel *et al.*, 1982 ; Martin-Rosset et Doreau, 1984 ; Trillaud-Geyl *et al.*, 1986 ; Martin-Rosset et Dulphy, 1987 ; Tableau 2). Dans le cas d'une distribution simultanée de foin (à forte ingestibilité) et de paille (à faible ingestibilité), l'apport de concentré entraîne uniquement une substitution de la paille (avec un TS compris entre 0 et 1) alors que l'ingestion volontaire de foin reste inchangée (Martin-Rosset et Doreau, 1984). Avec un concentré azoté, Wolter *et al.* (1982) rapportent un taux de

substitution proche de 0 lorsque de la paille est distribuée en quantité restreinte. Pour des fourrages distribués *ad libitum*, le taux de substitution peut même devenir négatif, ce qui traduit une augmentation de l'ingestion volontaire de fourrage en réponse à l'apport de concentré (Jordan, 1979 ; Wolter *et al.*, 1982 ; Tableau 2).

En résumé, le taux de substitution entre fourrages et concentrés est généralement compris entre 0 et 1 sans effet net de la valeur nutritive du fourrage. Ainsi, pour des fourrages d'ingestibilité élevée, les taux de substitution rapportés dans la littérature s'étendent dans une gamme allant de 0,2 à 1,6, alors que la gamme de variation s'étend de 0,2 à 1 pour les fourrages moins facilement ingérés. Ces variations restent difficiles à expliquer. La proportion de concentré dans le régime, qui change dans les différentes études répertoriées, pourrait être un facteur déterminant tout comme la nature du concentré puisque les rares valeurs négatives ont toujours été obtenues avec des concentrés azotés. Les effets de la teneur en matière sèche du fourrage ont été analysés mais là non plus aucune tendance générale ne se dégage entre les expérimentations. Ainsi, lorsque la teneur en MS de l'ensilage de maïs augmente, le taux de substitution augmente également (Agabriel *et al.*, 1982). Dans le même temps, des taux de substitution relativement faibles entre 0,2 et 0,3 sont pourtant calculés avec des chevaux consommant un foin dont la teneur en MS était élevée (environ 85% ; Sasimowski *et al.*, 1979 ; Martin-Rosset et Doreau, 1984 ; Vermorel *et al.*, 1997), et un taux de substitution de 0,14 est calculé pour des poneys consommant des granulés de paille dont la teneur en MS était voisine de 90% (Wolter *et al.*, 1982). Les différences de quantité et de nature de concentré offerte, de teneur en matière sèche des fourrages et de type d'animal (format, stade physiologique, etc.) entre expérimentations n'ont jusqu'ici pas permis de conduire une analyse quantitative globale. Les rares données existantes ne permettent pas à ce jour de tirer de règles générales, y compris lorsqu'une gamme de niveaux ou de natures de concentrés étaient testés dans un même essai (Martin-Rosset et Dulphy, 1987 ; Vermorel *et al.*, 1997).

Tableau 2. Taux de substitution d'un fourrage par du concentré chez le cheval.

| Animaux | Etat physiologique | Régime | Classe TS | TS | Référence |
|--|--------------------|--|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Pur-sang (n=1) Jument de selle (n=1) Jument de trait (n=1) | Entretien | Foin de graminées <i>ad lib</i> + avoine <i>ad lib</i> | 0 à 1 | 0,27 | Sasimowski <i>et al.</i> , 1979 |
| 0,46 | | | | | |
| 0,72 | | | | | |
| Jument de trait (n=6) | Entretien | Foin de prairie <i>ad lib</i> + 2 ou 4 kg de concentré | | 0,73 | Martin-Rosset <i>et al.</i> , 1986 |
| Selle (n=4) | Entretien | Foin dont 25% concentré dont 50% concentré | | 0,32 0,66 | Peiretti <i>et al.</i> , 2006 |
| Hongre de selle (n=26) | Entretien | Foin de graminées dont 40% d'orge dont 30% de maïs dont 40% de pulpe de betterave | | 0,75 0,71 0,21 | Vermorel <i>et al.</i> , 1997 |
| | | Foin de luzerne <i>ad lib</i> dont 30% de maïs | | 0,66 | |
| Trait | 6-12 mois | Foin et paille <i>ad lib</i> + concentré | | 0,61 | Martin-Rosset et Doreau, 1984 |
| | 18-24 mois | | | 0,67 | |
| | 18-24 mois | Foin <i>ad lib</i> + concentré | | 0,29 | |
| Trait (n=9) | 10 mois | Foin de prairie <i>ad lib</i> + 30% de concentré | | 0,99 | Martin-Rosset et Dulphy, 1987 |
| Jument de selle (n=30) | Fin de gestation | Foin de graminées <i>ad lib</i> + concentré (0,75% PV soit 4-5 kg) | | 0,65 | Winsco <i>et al.</i> , 2013 |
| Selle (n=12) | 6-12 mois | Ensilage de maïs + 1 à 3 kg de concentré | | 0,25 | Trillaud-Geyl <i>et al.</i> , 1986 |
| | 18-24 mois | | | 0,93 | |
| | 30-36 mois | | | 0,62 | |
| Trait (n=289) | 6-12 mois | Ensilage de maïs (%MS<30) <i>ad lib</i> + concentré | 0,61 | Agabriel <i>et al.</i> , 1982 | |
| | | Ensilage de maïs (%MS>30) <i>ad lib</i> + concentré | 0,81 | | |
| Trait (n=12) | 10 mois | Ensilage de maïs <i>ad lib</i> + 30% de concentré + 60% de concentré + 90% de concentré | 0,34 0,28 0,49 | Martin-Rosset et Dulphy, 1987 | |

| | | | | | |
|------------------------|-----------|---|-----|-------|------------------------------------|
| Poney (n=4) | Entretien | Granulés de paille sodée en quantité restreinte + 14% de tourteau de soja | | 0,14 | Wolter <i>et al.</i> , 1982 |
| Hongres de selle (n=6) | Entretien | Foin de luzerne + concentré | > 1 | 1,10 | Lavin <i>et al.</i> , 2013 |
| Selle (n=5) | Entretien | Foin dont 50% concentré | | 1,06 | Peiretti <i>et al.</i> , 2006 |
| Selle (n=12) | 6-12 mois | Foin <i>ad lib</i> + 1 ou 2 kg de concentré | | 1,55 | Trillaud-Geyl <i>et al.</i> , 1986 |
| Trait | 6-12 mois | Foin <i>ad lib</i> + concentré | | 1,10 | Martin-Rosset et Doreau, 1984 |
| Trait (n=9) | 10 mois | Foin de prairie <i>ad lib</i> + 60% de concentré | | 1,12 | Martin-Rosset et Dulphy, 1987 |
| Ponette (n=18) | Gestation | Ensilage de maïs <i>ad lib</i> + granulés de litière | < 0 | -2,21 | Jordan, 1979 |
| Poney (n=4) | Entretien | Granulés de paille sodée <i>ad lib</i> + 14% de tourteau de soja | | -1,15 | Wolter <i>et al.</i> , 1982 |

TS : taux de substitution

2. Des données limitées chez le cheval au pâturage

Au pâturage, les chevaux doivent ajuster leur comportement alimentaire pour faire face aux contraintes spécifiques liées au couvert végétal (Edouard *et al.*, 2009b). La disponibilité et la valeur nutritive des ressources pâturées varient dans le temps et l'espace. Ainsi, les chevaux doivent réaliser un compromis entre le temps et l'énergie consacrés aux déplacements pour échantillonner le couvert et sélectionner leur régime, et ceux consacrés à la prise alimentaire. La biomasse végétale, répartie verticalement, engendre des contraintes de préhension pour l'animal (en particulier les couverts ras et peu denses) et l'herbe sur pied impose une résistance à l'arrachement plus ou moins grande en fonction de la proportion des tiges et des gaines dans le couvert. L'ensemble de ces contraintes de recherche et de préhension affectent le budget temps de l'animal et les choix réalisés comme cela est bien documenté chez les ruminants (Thornley *et al.*, 1994 ; Dumont et Parsons, 2003). Pour tous les herbivores, il est possible de décomposer les quantités ingérées journalières au pâturage comme le produit du temps de pâturage journalier par la vitesse d'ingestion (VI). La vitesse

d'ingestion est elle-même égale au produit de la masse des bouchées par la fréquence des bouchées. L'animal peut s'adapter aux contraintes imposées par le couvert végétal en modulant certaines de ces composantes. La capacité d'adapter le temps de pâturage est relativement limitée chez le cheval qui pâture en moyenne 15 h par jour (entre 12 et 19 h) contre seulement 8 h pour les ruminants. Les principaux repas sont celui du matin qui débute autour du lever du jour et celui du soir avant à la tombée de la nuit (Martin-Rosset *et al.*, 1978 ; Duncan *et al.*, 1990). L'activité de pâturage se poursuit cependant en période nocturne. Le pâturage nocturne représente entre 23 à plus de 50% du temps de pâturage total et augmente linéairement avec celui-ci.

Comparativement aux ruminants, peu de références sont disponibles sur les niveaux d'ingestion du cheval au pâturage (Edouard *et al.*, 2009b ; Tableau 3). Pour des juments de selle en lactation en pâturage continu, les niveaux d'ingestion réalisés sont supérieurs sur des prairies naturelles (38 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; Duncan, 1992) par rapport à des prairies temporaires (24 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; Grace *et al.* 2002b). Ces différences pourraient être liées à des écarts de qualité d'herbe puisque dans le second exemple les juments en lactation ont largement couvert leurs besoins énergétiques et azotés malgré les plus faibles niveaux d'ingestion. Les hauts niveaux d'ingestion rapportés par Duncan (1992) ont depuis été confirmés sur des prairies naturelles pâturées en continu par des chevaux de trait (Fleurance *et al.*, 2001) ou de race Prezwalski (Kuntz *et al.*, 2006) à l'entretien. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les niveaux d'ingestion réalisés à l'auge par des chevaux à forts besoins (32 à 40 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ pour des juments en lactation ou des poulains ; Duncan, 1992), mais très supérieures aux valeurs rapportées pour les chevaux à l'entretien (17 à 20 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; Duncan, 1992). Pour les chevaux en croissance, les niveaux d'ingestion au pâturage sont supérieurs pour les races de trait par rapport aux races de selle et ceci quel que soit le mode de gestion du pâturage. Les quelques références sur les niveaux d'ingestion journalière de différents types de chevaux au pâturage sont rapportés dans le tableau ci-dessous. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons décrire et discuter comment les facteurs de variation liés au couvert pâturé modulent les quantités d'herbe ingérées au pâturage.

Tableau 3. Ingestions journalières réalisées par des chevaux au pâturage (adapté de Edouard *et al.*, 2009b).

| Animaux | Poids vif, kg | Ingestion, gMS.kgPV ⁻¹ .j ⁻¹ | Pâturage | Prairies | Mesures | Références |
|---------------------------------|---------------------------|--|----------|--|--|-------------------------------------|
| Adultes à l'entretien | | | | | | |
| Juments de trait | 674 | 34 | Continu | Prairies naturelles humides <i>Marais Poitevin</i> | Collecte fèces et azote fécal | Fleurance <i>et al.</i> , 2001 |
| Mâles et femelles de Prezwalski | 279 | 35 | Continu | Prairies naturelles et roselières <i>Autriche</i> | Alcanes | Kuntz <i>et al.</i> , 2006 |
| Juments en lactation | | | | | | |
| Pur-sang | 560 | 24 | Continu | Prairie de raygrass et trèfle blanc <i>Nouvelle-Zélande</i> | Collecte fèces et digestibilité à l'auge | Grace <i>et al.</i> , 2002b |
| Selle-Français et Anglo-arabe | 591 | 26 | Fil | Prairie permanente <i>Corrèze</i> | Collecte fèces et azote fécal | Fleurance <i>et al.</i> , 2012 |
| Camargue | 372 | 38 | Continu | Prairies naturelles humides <i>Camargue</i> | Collecte fèces et azote fécal | Duncan, 1992 |
| Chevaux en croissance | | | | | | |
| Selle (1 an) | 350 | 20 | Tournant | Prairie de raygrass et trèfle blanc <i>Nouvelle-Zélande</i> | Collecte fèces et digestibilité à l'auge | Grace <i>et al.</i> , 2002a |
| Selle (1 an) | 311 | 14 | Continu | Prairies naturelles ± fertilisées <i>Australie</i> | Alcanes | Friend <i>et al.</i> , 2004 |
| Selle (1-2 ans) | 340 (1 an) 480 (2 ans) | 19-23 | Tournant | Prairies temporaires <i>Corrèze et Normandie</i> | Collecte fèces et azote fécal | Mésochina <i>et al.</i> , 2000 |
| Selle (2 ans) | 496 | 23 | Tournant | Prairies temporaires <i>Corrèze</i> | Collecte fèces et azote fécal | Edouard <i>et al.</i> , 2009a, 2010 |
| Trait (2-3 ans) | 731 | 26 | Tournant | Prairies hétérogènes humides <i>Marais Poitevin</i> | Collecte fèces et azote fécal | Fleurance <i>et al.</i> , 2010 |
| Trait (2-7 ans) | 410-850 | 26-32 | Continu | Prairies naturelles humides <i>Marais Poitevin</i> | Collecte fèces et azote fécal | Ménard <i>et al.</i> , 2002 |

MS : matière sèche ; PV : poids vif

2.1. Effet de la hauteur et de la biomasse végétale sur l'ingestion journalière

Certains travaux, conduits chez le cheval en croissance, se sont intéressés à l'influence de la hauteur du couvert sur l'ingestion journalière des chevaux. En conditions de disponibilité en herbe non limitantes (supérieure à 130 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, i.e. supérieure à 54 kg MS.animal⁻¹.j⁻¹), Mésochina et al. (2000) ont montré que les quantités de MS ingérées par les poulains restaient stables (en moyenne 20 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, i.e. 8,6 kg MS.animal⁻¹.j⁻¹) pour des biomasses offertes entre 230 et 350 g MS.m⁻² (soit des hauteurs d'herbe entre 6,6 et 9,4 cm). Dans cette expérience la teneur en matières azotées totales (MAT) variait entre 15 et 20% de la teneur en MS du couvert, mais sa teneur en fibre restait constante (NDF : 57% MS). Dans ces conditions, le temps de pâturage (15 h.j⁻¹) et la vitesse d'ingestion (9.8 g MS.min⁻¹) n'ont également pas varié avec les hauteurs d'herbe. Sur une plus large gamme de hauteurs d'herbe végétative (6,1 à 17,7 cm), offerte à disponibilité et qualité constantes et non limitantes (62 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, i.e. 32 kg MS.animal⁻¹.j⁻¹ ; MAT : 18% MS, NDF : 49% MS, digestibilité de l'herbe ingérée : 61% MS), les niveaux d'ingestion volontaire de chevaux en croissance sont également restés stables autour de 21 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (Edouard *et al.*, 2009a). Le temps de pâturage journalier était d'en moyenne 14 h indépendamment de la hauteur du couvert. Cette stabilité des niveaux d'ingestion et des temps de pâturage indique que les chevaux ont modulé leur mode de prélèvement (fréquence de préhension et masse des bouchées) de manière à maintenir constante leur vitesse d'ingestion. Ces études mettent en évidence la capacité des chevaux de pâturer des couverts courts en adaptant leur comportement d'ingestion. Comparativement aux ruminants, les chevaux sont plus aptes à exploiter la végétation de faible hauteur grâce à leur double rangée d'incisives (Ménard *et al.*, 2002 ; Edouard *et al.*, 2009a).

2.2. Effet d'une variation simultanée en hauteur et qualité

Edouard *et al.* (2010) ont par la suite mesuré des niveaux d'ingestion d'herbe similaires (24 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, soit 13 g MS digestible.kg PV⁻¹.j⁻¹) pour des poulains de selle dans une plus large gamme de hauteur (7 à 80 cm) et de biomasse (61 à 741 g MS.m⁻²), associée à des différences de qualité (MAT : 13 à 7% MS, NDF : 56 à 62% MS) du couvert pâturé. Les poulains ont une nouvelle fois adapté leur comportement d'ingestion à la structure

et à la qualité du couvert pour maintenir leur niveau d'ingestion. Fleurance et al. (2010) ont également proposé des situations contrastées de hauteur et de qualité de couvert à des poulains de traits. Les animaux ont réalisé une ingestion de matière organique (MO) digestible 35% plus élevée sur un couvert hétérogène où les animaux pouvaient choisir entre des zones d'herbe rases et des zones d'herbe haute que sur un couvert court homogène et de bonne qualité (1 à 8 cm, MAT : 12% MS, NDF : 51% MS). Les niveaux d'ingestion enregistrés sur le couvert hétérogène étaient 55% plus élevée que sur un couvert homogène haut mais de moindre qualité (9 à 40 cm, MAT : 7% MS, NDF : 65% MS). La modulation du comportement d'ingestion était alors effective puisque la fréquence des bouchées était trois fois plus élevée sur les placettes d'herbe rase que sur l'herbe haute. Utiliser l'herbe haute semble plus coûteux en énergie puisque les poulains ont plus eu à mastiquer par gramme de MO ingérée ; c'est probablement le mécanisme principal qui limite l'ingestion d'herbe épiée puisque, comme nous l'avons déjà discuté, les chevaux sont globalement tolérants à la fibrosité du couvert. Dans une parcelle hétérogène, les chevaux pourraient partager leur temps de pâturage entre des zones hautes, qui permettent un flux d'ingestion rapide, et des placettes d'herbe rase où ils consomment une herbe de meilleure valeur nutritive. Les travaux sur les préférences alimentaires des chevaux concordent pour indiquer que les chevaux sélectionnent fortement ces placettes d'herbe rase (Ödberg et Francis-Smith, 1976 ; Menard *et al.*, 2002 ; Edouard *et al.*, 2010 ; Dumont *et al.*, 2012).

2.3. Effet de la disponibilité en herbe

2.3.1. La réponse fonctionnelle chez le cheval

Le concept de réponse fonctionnelle décrit par Holling (1959) est la relation entre la vitesse d'ingestion (quantité de ressources consommée par un animal par unité de temps = masse des bouchées x fréquence de préhension) et la quantité de ressource disponible, ici la biomasse herbacée. Fleurance *et al.* (2009) ont décrit la réponse fonctionnelle de chevaux à l'entretien de trois formats (poneys, chevaux de selle et chevaux de trait) en mesurant leur vitesse d'ingestion sur des couverts de prairie temporaire offrant une large gamme de quantités offertes (20,4 à 127,8 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ pour les poneys ; 10,9 à 68,2 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ pour les chevaux de selle ; 9,7 à 60,8 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ pour les chevaux de trait). Dans cette gamme de disponibilité en herbe, les hauteurs variaient entre 3 et 63 cm, et la teneur en NDF

entre 68% de la MS pour les couverts ras et 53% MS pour les couverts hauts. Comme chez la majorité des espèces d'herbivores, la vitesse d'ingestion a augmenté avec la quantité de ressources disponibles jusqu'à atteindre un seuil ; on observe une relation asymptotique dite réponse fonctionnelle de type II. La prévision du temps de manipulation de la bouchée n'a pas été améliorée lorsque la teneur en fibres du couvert était considérée dans le modèle, ce qui indique que les chevaux n'ont pas été impactés par la fibrosité de l'herbe dans la gamme testée (NDF : 53 à 68% MS ; Fleurance *et al.*, 2009). Ces résultats corroborent ceux de Gross *et al.* (1993) pour des chevaux de selle pâturant des couverts de luzerne. Lorsque la biomasse du couvert augmente, la masse des bouchées augmente également mais la fréquence de prélèvement diminue car l'animal passe plus de temps à manipuler (prélever et mastiquer) les bouchées. Lorsque la biomasse du couvert diminue, la masse des bouchées diminue également mais la fréquence de prélèvement augmente ; l'animal parvient ainsi dans certaines limites à contrer les effets de la diminution de la masse des bouchées sur les couverts ras ou peu denses (Naujeck et Hill, 2003 ; Fleurance *et al.*, 2009).

2.3.2. Effet de la disponibilité en herbe sur l'ingestion journalière

Des chevaux en croissance ont également réalisé des niveaux d'ingestion d'herbe similaires autour de $20,2 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ dans une gamme de disponibilité en herbe offerte allant de 129 à 201 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (Mésochina *et al.*, 2000). Ainsi les niveaux d'ingestion ne varient pas lorsque la quantité d'herbe offerte reste élevée ce qui présage de l'existence d'une relation curvilinéaire entre l'ingestion et la quantité de ressource disponible. En revanche, des poulains placés dans des conditions de pâturage limitantes (en moyenne 21 kg MS par animal) ont augmenté de près de 10% leur temps de pâturage journalier, soit jusqu'à 17 h par jour en moyenne, pour compenser la faible quantité d'herbe disponible (Mésochina, 2000). Ils ont ainsi fortement défolié le couvert (jusqu'à 85%) en pâturant jusqu'à moins de 1 cm ce qui a également entraîné des variations de la qualité de l'herbe. Les niveaux d'ingestion sont restés stables (en moyenne 11,2 kg MO par animal) mais dans des conditions aussi extrêmes la croissance des poulains a été pénalisée.

2.4. Effet de la disponibilité en herbe et de la complémentation énergétique : loi générale chez la vache laitière

Les conséquences sur l'ingestion de variations des quantités d'herbe et/ou de concentré offertes n'ont encore jamais été décrites chez le cheval alors que la complémentation au pâturage des chevaux à forts besoins est une pratique courante. En revanche, il existe une littérature abondante sur l'effet de la disponibilité en herbe sur les niveaux d'ingestion réalisés par des vaches laitières complémentées ou non. Les lois générales établies pour les vaches laitières permettent de poser des hypothèses à vérifier chez le cheval et peuvent offrir une base de comparaison même si nous sommes conscients qu'elles ne sont pas directement transposables aux équins. Nous les résumons donc très brièvement ici. Chez la vache laitière, les quantités journalières d'herbe ingérées augmentent rapidement avec les quantités d'herbe offertes puis se stabilisent en suivant une relation curvilinéaire (Dalley *et al.*, 1999 ; Pérez-Prieto et Delagarde, 2013). Lorsque la disponibilité de l'herbe n'est pas limitante, l'ingestion volontaire des ruminants est principalement régulée par des contraintes physiques liées à la digestibilité du couvert. Chez les ruminants un apport de concentré au pâturage entraîne le plus souvent une diminution des quantités d'herbe ingérées et une augmentation de l'ingestion totale, soit des taux de substitution compris entre 0 et 1 (Delagarde *et al.*, 2001). Il est rapporté que la substitution herbe/concentré est d'autant plus importante que la quantité d'herbe offerte est élevée (Grainger et Mathews, 1989 ; Stockdale, 2000 ; McEvoy *et al.*, 2008). Par conséquent, la complémentation des vaches laitières permettrait d'améliorer leur ingestion d'éléments nutritifs et de maintenir leurs performances productives lorsque la disponibilité de l'herbe est faible ou lorsqu'elle présente des carences nutritionnelles (Delaby *et al.*, 2001 ; Delagarde *et al.*, 2001).

Pour résumer

La plupart des travaux sur l'ingestion du cheval ont été réalisés à l'auge avec des fourrages conservées ; les niveaux d'ingestion mesurés restent assez stables sauf lorsque la valeur nutritive de l'offert est faible. Dans le cas d'un régime associant fourrages et concentrés, il est majoritairement observé une substitution partielle du fourrage par le concentré ; cependant les niveaux d'ingestion de fourrage et d'ingestion totale peuvent évoluer différemment et les facteurs de variation du taux de substitution restent à préciser. L'ingestion au pâturage a fait l'objet de quelques travaux récents chez le cheval en croissance ou à l'entretien pour étudier l'effet de la structure du couvert et de la qualité de l'herbe. La réponse de chevaux à forts besoins, comme la jument en lactation, face à des variations des quantités d'herbe offertes et/ou de complémentation n'ont jusqu'ici pas été décrites.

II. Interactions nutrition-parasitisme

1. Les nématodes gastro-intestinaux des équidés

1.1. Cycle des parasites

Le cycle de développement des nématodes gastro-intestinaux se compose d'une phase libre et d'une phase parasitaire (Figure 4). La phase libre, ou exogène, débute lorsque les œufs, pondus par les vers adultes dans l'intestin grêle ou le gros intestin du cheval, sont expulsés dans le milieu extérieur via les fèces et contaminent les pâturages. Les œufs éclosent et passent par plusieurs stades larvaires (L1 et L2 se nourrissant de bactéries) avant d'atteindre le stade de larves infestantes L3. La phase parasitaire, ou endogène, débute lorsque ces larves sont ingérées par le cheval lorsqu'il pâture. Les larves peuvent migrer dans diverses régions de l'organisme, en causant de graves lésions au niveau des organes concernés, puis rejoignent l'intestin où elles évoluent en vers adultes matures qui pourront se reproduire et pondre des œufs à leur tour. La durée des différents stades ou encore les lieux de migration dans l'organisme sont variables selon l'espèce de parasites considérée.

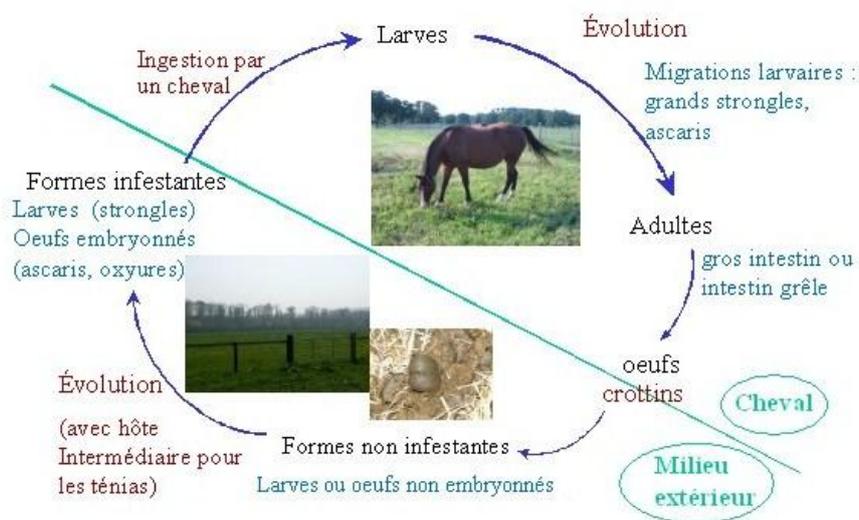


Figure 4. Schéma général du cycle parasitaire des vers intestinaux du cheval (d'après Barrier et Laugier, 2011).

1.2. Les principaux nématodes

Les vers, ou helminthes, sont les principaux parasites internes des équidés. Ils peuvent être ronds ou plats et sont respectivement appelés les nématodes et les cestodes. Il peut s'agir également de larves d'insectes qui se développent dans l'estomac du cheval. Cette étude bibliographique s'intéressera uniquement aux nématodes gastro-intestinaux (GI).

1.2.1. Les ascaris

Ce sont de gros vers blancs (15-50 cm x 6-8 mm) de l'espèce *Parascaris equorum* infestant particulièrement les jeunes chevaux de la naissance à 2 ans (Figure 5). Les poulains s'infestent par coprophagie en consommant les fèces des adultes, eux-mêmes contaminés au pâturage, voire par le lait maternel. Les œufs (90-100 µm de diamètre) sont ingérés sous forme d'embryons puis éclosent dans l'intestin grêle (Owen et Slocombe, 1985). Les larves traversent alors la paroi de l'intestin et migrent dans plusieurs zones de l'organisme (foie, cœur, poumons) avant de revenir au niveau de l'intestin grêle où elles se transforment en adultes.

1.2.2. Les oxyures

Les oxyures sont des nématodes de l'espèce *Oxyuris equi* de faible pouvoir pathogène. Les adultes (4 à 15 cm de long pour les femelles, 1 cm pour les mâles) (Figure 5) sont localisés dans le gros intestin (colon et rectum) mais la ponte des œufs se fait au niveau de l'anus (Owen et Slocombe, 1985). Les œufs se transforment en larves infestantes en 5 à 7 jours qui tombent au sol et infestent le cheval qui les absorbe.

1.2.3. Les strongles

En Europe, 73% des chevaux de tout âge sont infestés par des strongles (Kornás *et al.*, 2010). Cette catégorie regroupe une cinquantaine d'espèces parmi lesquelles on distingue les grands strongles et les petits strongles. Les larves sont hématophages et les adultes provoquent des inflammations des muqueuses. Ces parasites peuvent être responsables de

coliques ou d'autres troubles tels que des anémies, des œdèmes ou des ulcères. L'infestation se fait par l'ingestion de larves infestantes L3 au pâturage. Les œufs (60-80 x 40-50 µm pour les grands strongles, et 80-110 x 40-45 µm pour les petits strongles) sont pondus dans le gros intestin et sont ensuite excrétés via les fèces avec un pic d'excrétion en période estivale. La durée moyenne d'évolution des œufs en L3 est d'une semaine pour les grands strongles et de 3-4 jours pour les petits strongles avec des variations liées aux facteurs climatiques (chaleur, humidité, etc.).

1.2.3.1. Les grands strongles

Il s'agit de vers rouges-bruns mesurant 2 à 5 cm dont les principales espèces sont *Strongylus vulgaris* (la plus commune) (Figure 5), *Strongylus edentatus* et *Strongylus equinus* (Owen et Slocombe, 1985 ; Cabaret, 2011). Les larves infestantes de *S. vulgaris* arrivent dans le caecum et le colon, muent puis migrent dans les artères mésentériques et évoluent en pré-adultes avant de rejoindre le gros intestin où les pré-adultes vont former des nodules dans la muqueuse digestive. La période prépatente, entre l'ingestion d'une larve infestante et l'émission des premiers œufs, est de 6 mois. Les larves de *S. edentatus* migrent au foie par la veine porte avant de rejoindre le caecum. Pour ce strongle hépatopéritonéal la période prépatente dure de 9 à 10 mois. Les larves de *S. equinus* migrent vers le foie et le pancréas par voie péritonéale puis atteignent le gros intestin. La période prépatente de ce parasite est d'environ 8 mois.

1.2.3.2. Les petits strongles

Les petits strongles, également appelés trichonèmes ou cyathostomes, sont les parasites internes les plus fréquents chez les chevaux (Love *et al.*, 1999 ; Collobert-Laugier *et al.*, 2002b ; Wood *et al.*, 2013). Ils regroupent plusieurs espèces au sein des genres *Cyathostomum* (*C. catinatum*, *C. coronatum*), *Cylicostephanus* (*C. longibursatus*, *C. minutus*), *Cylicocyclus* (*C. nassatus*, *C. insigne*), *Cylicodontophorus*, *Poteriostomum* et *Gyalocephalus*. L'augmentation de la prévalence des cyathostomes coïncide avec la forte régression des grands strongles due à l'utilisation répandue des traitements anthelminthiques (AH) alors que les cyathostomes ont développé des résistances à ces molécules (Klei et Chapman, 1999 ; Love *et al.*, 1999 ; Collobert-Laugier *et al.*, 2002a ; von Samson-

Himmelstjerna, 2012). Les chevaux sont généralement infestés simultanément par plus de cinq espèces de cyathostomes (Love *et al.*, 1999). Ce sont de petits nématodes fins blanchâtres, bruns ou rouges et mesurant de 0.5 à 2.5 cm (Figure 5), dont les adultes sont situés dans le gros intestin. Après l'infestation, la période prépatente dure environ 2 mois. Les larves se développent sous la muqueuse intestinale et peuvent s'y enkyster pour poursuivre leur développement en provoquant de graves lésions de la paroi abdominale. Les larves peuvent également entrer en hypobiose (= arrêt de leur évolution) dans la muqueuse pendant plusieurs mois (jusqu'à 36 mois). Généralement elles entrent en hypobiose en fin d'automne et reprennent leur activité au printemps suivant. Lorsque les larves sont enkystées ou en hypobiose elles ne peuvent pas être atteintes par les molécules des traitements anthelminthiques ; les traitements ne sont efficaces que lorsque les larves rejoignent la paroi intestinale (Love *et al.*, 1999).



Figure 5. Principaux nématodes gastro-intestinaux des équidés (de haut en bas, de gauche à droite : ascaris : *Parascaris equorum*, oxyure : *Oxyuris equi*, grands strongles : *Strongylus vulgaris*, petits strongles, œuf de petit strongle) (<http://www.nhm.ac.uk>, <http://www.vetbook.org>, Laboratoire Merial, <http://www.vetnext.com>, C. Collas).

2. Conséquences de l'infestation parasitaire pour l'hôte

2.1. Conséquences métaboliques de l'infestation par les nématodes GI et impacts sur l'utilisation de l'alimentation par l'hôte

La plupart des études conduites sur les interactions nutrition-parasitisme des herbivores domestiques concernent les petits ruminants, ovins et caprins.

2.1.1. Réduction de l'ingestion volontaire et perte de productivité

Il est bien établi dans la littérature qu'une infestation par des nématodes GI entraîne chez l'hôte une réduction de la disponibilité des nutriments à travers une perte d'appétit se traduisant par une diminution de l'ingestion volontaire de 15 à plus de 50% (ruminants : Coop et Kyriazakis, 1999 ; ovins : Sykes et Greer, 2003), et une réduction de l'efficacité des nutriments absorbés (maldigestion, malabsorption) (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; Hoste et Torres-Acosta, 2011). La plus faible efficacité de l'utilisation de l'énergie et des protéines est liée à une réduction de la digestibilité du régime, une augmentation des dépenses énergétiques pour l'entretien et une altération de l'efficacité de l'utilisation des produits finaux de la digestion (ovins : Sykes et Coop, 1976, 1977). Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer les mécanismes responsables de la diminution de l'ingestion telles que des douleurs abdominales et une inflammation de l'intestin, un changement dans la vitesse de flux ou dans le pH du digesta, une altération de la disponibilité en acides aminés et une modification du ratio protéines/énergie des nutriments absorbés, ou encore une altération des peptides ou hormones de l'intestin ou des neuropeptides hypothalamiques puisque le système nerveux central est supposé jouer un rôle important dans le contrôle de l'appétit (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996). Il a été montré chez les ruminants que les performances zootechniques étaient fortement affectées (réduction du dépôt des tissus mous, du gain de poids vif, de la production de lait, des performances de reproduction, ...) (Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996 ; Athanasiadou *et al.*, 2008) et certains auteurs ont estimé qu'entre 40 et 90% de la perte de production pouvaient

être attribués à la réduction de l'ingestion volontaire des animaux (Dargie, 1980 ; Sykes, 1987).

Chez le cheval, en dépit du fait que plus de la moitié des animaux expulsent des œufs de cyathostomes sans symptôme clinique particulier (Fritzen *et al.*, 2010 ; Traversa *et al.*, 2010), des conséquences physiopathologiques importantes ont été rapportées (Love *et al.*, 1999) : inflammation du tractus GI, diarrhées, coliques, hypoalbuminémie, œdèmes sous-cutané, perte de poids, ralentissement de la croissance osseuse voire mort de l'animal dans les cas les plus sévères (Ogbourne, 1978 ; Murphy et Love, 1997 ; Love *et al.*, 1999).

2.1.2. Perte et détournement des protéines endogènes

Les changements nutritionnels majeurs engendrés par une infestation parasitaire concernent le métabolisme des protéines. Ainsi, les infestations des chevaux par les nématodes GI, notamment les cyathostomes, induisent une perte de protéines (Love *et al.*, 1999) principalement due à l'augmentation de la perméabilité de l'intestin (Love *et al.*, 1991). En particulier, l'infestation entraîne une diminution de la concentration sanguine en fructosamine et en albumine et une altération de la composition en globuline (Murphy et Love, 1997).

Chez les ruminants, les pertes de protéines endogènes à travers le tractus GI sont particulièrement importantes lors d'une infestation parasitaire et résultent en partie de la fuite des protéines plasmatiques, et en partie de l'augmentation de l'exfoliation des cellules épithéliales de l'intestin et de la sécrétion de mucoprotéines (Coop et Holmes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999). Ces pertes peuvent réduire de 30% la disponibilité des acides aminés pour le métabolisme des tissus périphériques et il est observé que les carcasses des animaux parasités contiennent généralement moins de protéines que celles des animaux contrôles. Il a été montré chez les ruminants parasités que les nutriments ainsi que les protéines synthétisées étaient détournés des processus de production (dépôt des tissus musculaires, croissance osseuse, production de lait, ...) vers les réponses essentielles au maintien de l'homéostasie et affectées par l'infestation (synthèse de protéines plasmatiques et sanguines, sécrétion de mucus, réparation de l'intégrité du tractus GI, ...) (Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999 ; Knox *et al.*, 2006 ; Hoste et Torres-Acosta, 2011).

2.1.3. Facteurs influençant les conséquences métaboliques du parasitisme

Le degré de diminution de l'ingestion volontaire ainsi que l'étendue des troubles métaboliques induits par une infestation par des nématodes gastro-intestinaux dépendent de facteurs liés aux parasites et de facteurs liés à l'hôte (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999 ; Knox *et al.*, 2006). Les facteurs liés aux parasites concernent l'espèce et son site d'infestation dans le tractus GI, le nombre de larves infestantes, ou encore la vitesse d'infestation par les larves. Chez les ovins par exemple, il est observé que les espèces de nématodes localisées dans l'intestin (par exemple *T. colubriformis*) occasionnent des troubles physiopathologiques plus sévères que les espèces localisées dans l'abomasum (par exemple *O. circumcincta*). Par ailleurs, les effets pathogènes des parasites sont d'autant plus importants que le nombre de vers infestant l'animal est élevé (brebis : Kahn *et al.*, 2003), ce nombre étant lui-même corrélé positivement à la vitesse d'infestation par les larves.

Les facteurs liés à l'hôte concernent l'âge, les effets négatifs du parasitisme étant plus marqués chez les jeunes chevaux que chez les adultes (Klei et Chapman, 1999) ou encore les statuts nutritionnel (cf. Parties 3.1. et 3.2.) et immunitaire, puisque l'impact du parasitisme semble plus important pendant la phase d'acquisition de l'immunité. Les différences entre races semblent être liées à des différences de besoins nutritionnels selon le potentiel de production de l'animal (Coop et Kyriazakis, 1999). Il existe également une résistance génétique au parasitisme.

2.2. Priorités d'allocation des ressources

Un animal parasité se trouve en situation de ressources limitantes (cf. Partie 2.1) et doit réaliser des compromis dans leur allocation entre les fonctions d'entretien, de croissance et de reproduction, et les fonctions immunitaires (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999 ; Athanasiadou *et al.*, 2008). Coop et Kyriazakis (1999) ont proposé une hiérarchisation de la répartition des ressources chez un animal infesté en production, en supposant que l'hôte contrôle l'allocation de ses ressources limitantes (i.e. l'hôte n'est pas manipulé par les parasites) (Tableau 4).

Tableau 4. Une possible hiérarchisation des priorités réalisées par un animal en croissance ou reproducteur pour l'allocation de ses ressources limitantes envers ses différentes fonctions métaboliques (d'après Coop et Kyriazakis, 1999).

| Animal en croissance | | Animal reproducteur |
|--|--|--|
| Phase d'acquisition de l'immunité | Phase d'expression de l'immunité | |
| 1.Maintien de l'homéostasie | 1.Maintien de l'homéostasie | 1.Maintien de l'homéostasie |
| 2.Acquisition de l'immunité | 2.Gain protéique | 2.Effort reproducteur (gestation/lactation) |
| 3.Gain protéique | 3.Expression de l'immunité | 3.Expression de l'immunité |
| 4.Maintien de l'état corporel et engraissement | 4.Maintien de l'état corporel et engraissement | 4.Recouvrement de l'état corporel et engraissement |

Quels que soient le stade physiologique de l'animal et son expérience vis-à-vis des parasites, un hôte infesté alloue en priorité ses ressources au maintien de l'homéostasie afin de permettre sa survie à court-terme (Coop et Kyriazakis, 1999). Cette fonction d'entretien inclue la réparation ou le remplacement des tissus endommagés par les parasites.

Il est supposé que les jeunes animaux en croissance qui sont exposés pour la première fois à un challenge parasitaire allouent ensuite leurs ressources limitantes pour l'acquisition de l'immunité avant la croissance car les conséquences pathophysiologiques de l'infestation pourraient menacer sa survie et l'empêcher d'atteindre la maturité (Coop et Kyriazakis, 1999). L'acquisition de l'immunité consiste en la reconnaissance par le système immunitaire de l'hôte des antigènes des parasites comme des protéines du « non-soi » lors d'un premier contact avec des nématodes. Une réponse immunologique innée se met ainsi en place et consiste notamment en la différenciation, maturation et prolifération des lymphocytes. La phase d'acquisition de l'immunité est relativement longue et se termine lorsque tous les mécanismes impliqués fonctionnent, bien qu'il soit considéré que l'acquisition et l'expression de l'immunité soient majoritairement un processus continu (ruminants : Coop et Kyriazakis, 1999 ; Athanasiadou *et al.*, 2008). Chez le cheval, la réponse immunitaire spécifique contre les cyathostomes est lente à acquérir et nécessite une exposition prolongée aux parasites pour se développer complètement et réduire le nombre de larves L3 enkystées, les expulser de la muqueuse intestinale et rejeter les vers adultes (Klei et Chapman, 1999). Cette réponse fait intervenir des cellules spécialisées, les lymphocytes B, responsables de la production des anticorps spécifiques, et les lymphocytes T.

Dans le cas des animaux reproducteurs ou des animaux en croissance non naïfs (déjà exposés aux parasites), l'allocation des ressources pour l'expression de l'immunité intervient après l'allocation des ressources pour les fonctions de reproduction ou de croissance qui permettent la préservation du matériel génétique (ruminants : Coop et Kyriazakis, 1999).

Chez le cheval comme chez le ruminant, lorsque l'immunité est déjà acquise, la réponse immunitaire peut s'exprimer plus rapidement contre l'établissement, le développement, la fécondité des parasites que lorsque l'immunité n'est pas encore acquise (chevaux : Love et Duncan, 1992 ; ovins : Athanasiadou *et al.*, 2008). La capacité des hôtes infestés à maintenir leurs fonctions de croissance et de reproduction et leur capacité à réguler les populations de parasites sont très fortement affectées par la nutrition des hôtes. Il est fréquemment observé une relaxation de l'expression des réponses immunitaires chez les femelles en période *peripartum* (fin gestation, début lactation) (brebis : Houdijk *et al.*, 2003). Ainsi, les périodes où les besoins nutritionnels sont élevés sont les périodes où une complémentation pourrait être particulièrement intéressante vis-à-vis de la lutte contre le parasitisme. La réponse immune peut être plus complètement satisfaite lorsque les besoins de croissance ou de reproduction diminuent (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999). Ainsi, en enlevant un agneau à des brebis en lactation, Houdijk *et al.*, (2006) ont montré qu'une diminution des besoins nutritionnels pour la production de lait permettait aux brebis en lactation d'allouer plus de ressources à la fonction immunitaire afin de réduire leur charge parasitaire.

3. Effet de la nutrition chez un animal infesté

3.1. Effet de la nutrition sur la résilience de l'hôte

La nutrition de l'hôte influence les perturbations métaboliques et pathophysiologiques induites par le parasitisme (Coop et Holmes, 1996 : Coop et Kyriazakis, 1999). Ainsi, la capacité de l'hôte à maintenir son niveau de production lorsqu'il est confronté à un challenge parasitaire (= résilience, Riffkin et Dobson, 1979 ; Albers *et al.*, 1987 ; van Houtert et Sykes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999), peut être améliorée par une alimentation couvrant les besoins supplémentaires associés à la présence des nématodes. De manière générale, il a été montré que le métabolisme protéique était plus affecté par le parasitisme GI que le

métabolisme énergétique puisque les infections par les nématodes GI induisent une déficience en protéines plutôt qu'une déficience en énergie (cf. Partie 2.1.). Plusieurs travaux ont mis en évidence l'intérêt d'une alimentation riche en protéines métabolisables pour aider l'hôte à surmonter les conséquences négatives du parasitisme par une augmentation de l'ingestion ou du gain de poids vif (ovins : Datta *et al.*, 1998 ; Bricarello *et al.*, 2005; Louvandini *et al.*, 2006). Par contre, une alimentation riche en énergie métabolisable semble peu influencer la capacité de résilience de l'hôte (ruminants : van Houtert *et al.*, 1995 ; van Houtert et Sykes, 1996).

3.2. Effet de la nutrition sur la résistance de l'hôte

La résistance au parasitisme est la capacité de l'hôte à exprimer une réponse immune efficace contre l'établissement, le développement ou la persistance d'une population de parasites au sein de l'organisme (Riffkin et Dobson, 1979 ; Albers *et al.*, 1987 ; Coop et Kyriazakis, 1999). Pour s'exprimer, une réponse immunitaire nécessite d'avoir été précédemment acquise lors d'une première exposition aux parasites. La réponse immunitaire agit sur plusieurs phases du développement des parasites au sein de l'hôte : elle prévient l'établissement des larves infestantes ou limite leur développement en adultes, elle réduit la fécondité des vers femelles, et elle induit l'expulsion d'une partie des vers établis (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996). En dehors du dosage des cellules connues pour jouer un rôle dans la régulation de la réponse immunitaire et des processus inflammatoires (notamment les lymphocytes T qui sécrètent des cytokinines régulant la production d'anticorps), il existe peu d'indicateurs du niveau d'infestation parasitaire d'un hôte. Le meilleur indicateur est la charge parasitaire qui ne peut être déterminée que lorsque l'animal est abattu. L'estimation du nombre d'œufs excrétés par gramme de fèces (NOF), obtenu par coproscopie, permet de détecter des changements dans le niveau d'infestation parasitaire de l'hôte sans avoir recours à l'abattage (Gordon, 1980 ; Cringoli *et al.*, 2004). Chez le cheval, la technique de McMaster est la plus communément employée pour réaliser les coproscopies (Kornaš *et al.*, 2010 ; Carstensen *et al.*, 2013 ; Wood, 2013). La méthode de coproscopie, très utilisée, présente cependant certaines limites puisque des changements dans la quantité ou la qualité de la nourriture ingérée, ou encore des changements dans le métabolisme de l'hôte, peuvent conduire à des variations dans la production fécale (quantité, teneur en eau) conduisant à des variations dans l'estimation du NOF non liées à des variations

de charge parasitaire (ruminants : van Houtert et Sykes, 1996). D'autres indicateurs ont été testés, comme le dosage de la concentration sanguine en pepsinogène ou en gastrine, mais n'ont pas été retenus comme des indicateurs fiables.

Comme pour toute fonction métabolique, des protéines, de l'énergie, des minéraux, des éléments traces et des vitamines sont nécessaires au fonctionnement du système immunitaire. Ainsi, le statut nutritionnel d'un hôte influence l'expression de son immunité contre les parasites, et une complémentation en nutriments, en particulier ceux qui sont limitants, peut améliorer les capacités de résistance des animaux face à un challenge parasitaire. Cet effet positif de la nutrition est d'autant plus marqué sur les génotypes les plus sensibles au parasitisme (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; Athanasiadou *et al.*, 2008 ; Hoste et Torres-Acosta, 2011 ; Houdijk, 2012).

3.2.1. Alimentation riche en protéines

Les résultats de plusieurs études convergent vers l'idée que le statut nutritionnel de l'hôte, notamment une alimentation riche en protéines, influencerait peu la vitesse d'acquisition de l'immunité lors de l'établissement initial des parasites chez des animaux naïfs (hormis s'ils sont sévèrement sous-nourris), mais qu'elle serait déterminante pour l'expression de l'immunité (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; van Houtert et Sykes, 1996 ; Coop et Kyriazakis, 1999). En particulier, une complémentation protéique peut améliorer le degré et la vitesse d'expression de l'immunité ce qui se traduit par une action antiparasitaire plus rapide (ruminants : van Houtert et Sykes, 1996 ; Min et Hart, 2003 ; Athanasiadou *et al.*, 2008). Une complémentation protéique résulte généralement en une augmentation de la concentration en cellules circulatoires et inflammatoires locales (anticorps, ...) (ovins : Athanasiadou *et al.*, 2008). La résistance est d'autant plus améliorée par une complémentation protéique (soja, farine de poisson, graines de coton, urée) que les protéines métabolisables sont limitantes en l'absence de complémentation (ovins : Houdijk et Athanasiadou, 2003 ; Kahn *et al.*, 2003 ; Houdijk, 2012). Ainsi, distribuer un complément protéique aux femelles en période *peripartum* s'avère une stratégie efficace pour réduire le déclin de l'expression de l'immunité fréquemment observé et diminuer leur NOF et leur charge parasitaire (brebis : Donaldson *et al.*, 1998, 2001 ; Coop et Kyriazakis, 1999 ; Houdijk *et al.*, 2005, 2009 ; Athanasiadou *et al.*, 2008 ; Kidane *et al.*, 2009). De nombreuses études chez les ovins ont mis en évidence que des hôtes infestés recevant un régime riche en protéines présentaient des

conséquences pathophysiologiques moins sévères, une meilleure résistance lors d'une réinfestation, une augmentation de la production d'anticorps et une réduction de leur NOF et de leur charge parasitaire (Coop et Holmes, 1996 ; Datta *et al.*, 1998 ; Coop et Kyriazakis, 1999 ; Knox et Steel, 1999 ; Bricarello *et al.*, 2005 ; Louvandini *et al.*, 2006).

3.2.2. Alimentation riche en énergie

Le métabolisme des protéines étant plus affecté par une infestation parasitaire que la balance énergétique, une alimentation riche en protéines semble généralement plus bénéfique pour améliorer la résistance aux parasites qu'une alimentation riche en énergie (ruminants : Hoste et Torres-Acosta, 2011). Certaines études conduites sur les petits ruminants rapportent néanmoins un effet bénéfique d'une alimentation riche en énergie sur la capacité de résistance des animaux. Ainsi, des travaux sur les brebis en lactation (Ferre *et al.*, 1995) et les agneaux (Prache, 1988 ; Prache *et al.*, 1992) témoignent d'un intérêt d'une complémentation énergétique sur la réduction du NOF et de la charge parasitaire. Par ailleurs, la résistance aux parasites est meilleure pour des chèvres en période *peripartum* alimentées au-dessus de leurs besoins énergétiques que pour celles alimentées en dessous (Etter *et al.*, 1999). L'augmentation des apports énergétiques pourrait cependant être confondue avec les apports en protéines métabolisables car l'énergie permet d'augmenter la synthèse de protéines microbiennes (caprins : Hoste *et al.*, 2005b ; ruminants : Houdijk, 2012). Dans l'étude de Valderrábano *et al.* (2002), le NOF ou la charge parasitaire d'agneaux en croissance n'ont pas été réduits par une augmentation des apports en énergie métabolisable alors qu'ils recevaient déjà une alimentation riche en protéines. Les auteurs ont néanmoins observé une plus petite taille des vers femelles excrétés par les agneaux recevant un apport supplémentaire d'énergie métabolisable. L'hôte pourrait ainsi essayer de contrôler la taille des vers et en tirer bénéfice puisqu'il est reporté que les vers de taille et de masse importantes peuvent causer plus de dégâts pour son organisme (ovins : Stear *et al.*, 1999). Par conséquent il semblerait qu'en plus des apports protéiques, la balance énergie/protéines soit également à considérer (caprins : Hoste *et al.*, 2005b).

3.2.3. Intérêt des minéraux et des éléments traces

Les macro-minéraux et les éléments traces font partie des nutriments qui permettent le bon fonctionnement du système immunitaire et qui pourraient influencer la relation hôte-parasite (ruminants : Coop et Holmes, 1996 ; Koski et Scott, 2003 ; Sykes et Kyriazakis, 2007). Ainsi, le molybdène peut avoir un effet direct sur le métabolisme des nématodes en réduisant leur croissance et leur viabilité (van Houtert et Sykes, 1996). Une déficience en cobalt peut induire des niveaux de NOF plus élevés (Coop et Holmes, 1996). Coop et Field (1983) rapportent qu'une alimentation riche en phosphore permettrait de réduire le NOF et le nombre de vers comptabilisés à l'autopsie chez des agneaux.

3.2.4. Alimentation avec des plantes bioactives : cas des plantes contenant des tanins condensés

Les plantes bioactives contiennent des métabolites secondaires qui ne sont pas impliqués dans les principales fonctions des plantes, telles que la croissance, la reproduction ou la photosynthèse, mais qui sont associés à des mécanismes de défense contre la prédation par les herbivores ou contre des pathogènes fongiques. Plusieurs travaux révèlent que les métabolites secondaires des plantes (MSP, composés azotés comme les alcaloïdes, terpènes comme les saponines et phénols comme les tanins) peuvent affecter certains traits de vie des nématodes gastro-intestinaux des herbivores (Hoste *et al.*, 2006). Cette étude bibliographique s'intéressera particulièrement aux tanins.

3.2.4.1. Généralités sur les tanins

Les tanins sont des composés phénoliques comprenant une structure cyclique (noyau aromatique) avec une ou plusieurs fonctions hydroxyle (-OH). On distingue les tanins hydrolysables et les tanins condensés (Min *et al.* 2003). Tous les organes des plantes peuvent contenir des tanins (racines, rhizomes, écorce, bois, feuilles, tiges, fleurs, fruits, graines). Ils sont majoritairement localisés dans les tissus épidermiques et subépidermiques et dans une moindre mesure dans le péricarpe des fruits et des racines (Brunet, 2008). Des facteurs intrinsèques, tels que l'espèce (Foo *et al.*, 1996, 1997), la variété (Hedqvist *et al.*, 2000), la partie végétale ou le stade végétal, et extrinsèques, tels que les conditions climatiques et

pédologiques ou le stress de prédation, influencent la teneur en tanins des plantes (Brunet, 2008). En particulier, il est généralement observé une dilution des tanins avec le développement des plantes (Jean-Blain, 1998). Un stress environnemental, tel qu'un déficit hydrique ou encore une attaque par un prédateur, peut stimuler la synthèse de tanins (Feucht *et al.*, 1997 ; Bennick, 2002).

Les tannins hydrolysables contiennent un carbohydrate (généralement D-glucose) comme élément central. Les groupements hydroxyles de ces carbohydrates sont estérifiés avec des groupes phénoliques comme l'acide gallique (Figure 6) ou l'acide ellagique. Les tannins hydrolysables sont principalement présents au niveau des parois cellulaires et des espaces intracellulaires. Leurs produits de dégradation (par exemple le pyrogallol) sont absorbés dans l'intestin grêle et peuvent être toxiques pour les ruminants (Min *et al.*, 2003).

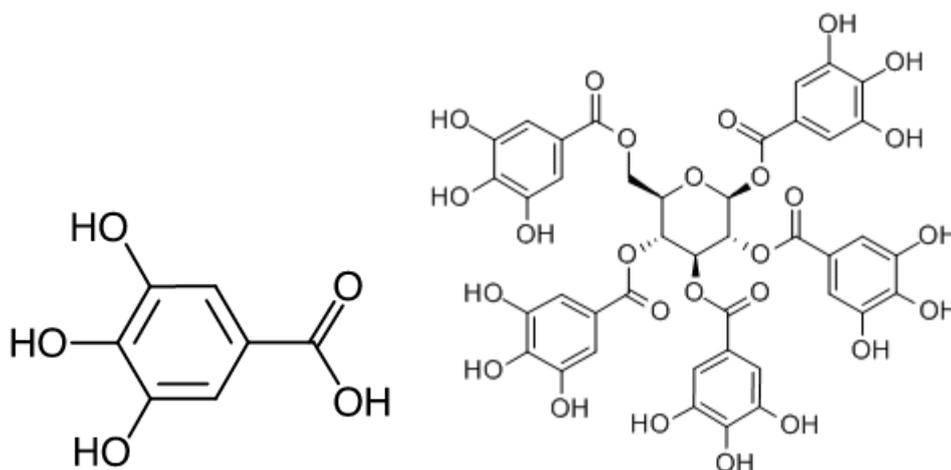


Figure 6. Structure de l'acide gallique (à gauche) et d'un tannin gallique, le 1,2,3,4,6-penta-O-galloyl-beta-D-glucopyranose (à droite) (<http://commons.wikimedia.org>, <http://www.chemicalbook.com>).

Les tanins condensés (TC), ou proanthocyanidines, sont des polyphénols de la famille des flavonoïdes. Ce sont des complexes d'oligomères (2 à 10 monomères) et de polymères (plus de 10 monomères) de flavan-3-ol (catéchine) ou de flavan-3,4-diol (épicatéchine) liés par des liaisons de type carbone-carbone (Mueller-Harvey et Mc Allan, 1992 ; Schofield *et al.*, 2001 ; Min *et al.*, 2003 ; Figure 7). Le degré de polymérisation (nombre d'unités monomériques) des tanins condensés est très variable selon la plante et leur poids moléculaire peut varier de 500 à 20000 daltons selon l'espèce de plante, les tissus concernés ou la saison (Brunet, 2008 ; Theodoridou, 2010). Ces différences peuvent produire une infinie diversité de

structures chimiques qui affectent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des tanins condensés (Min et Hart, 2003).

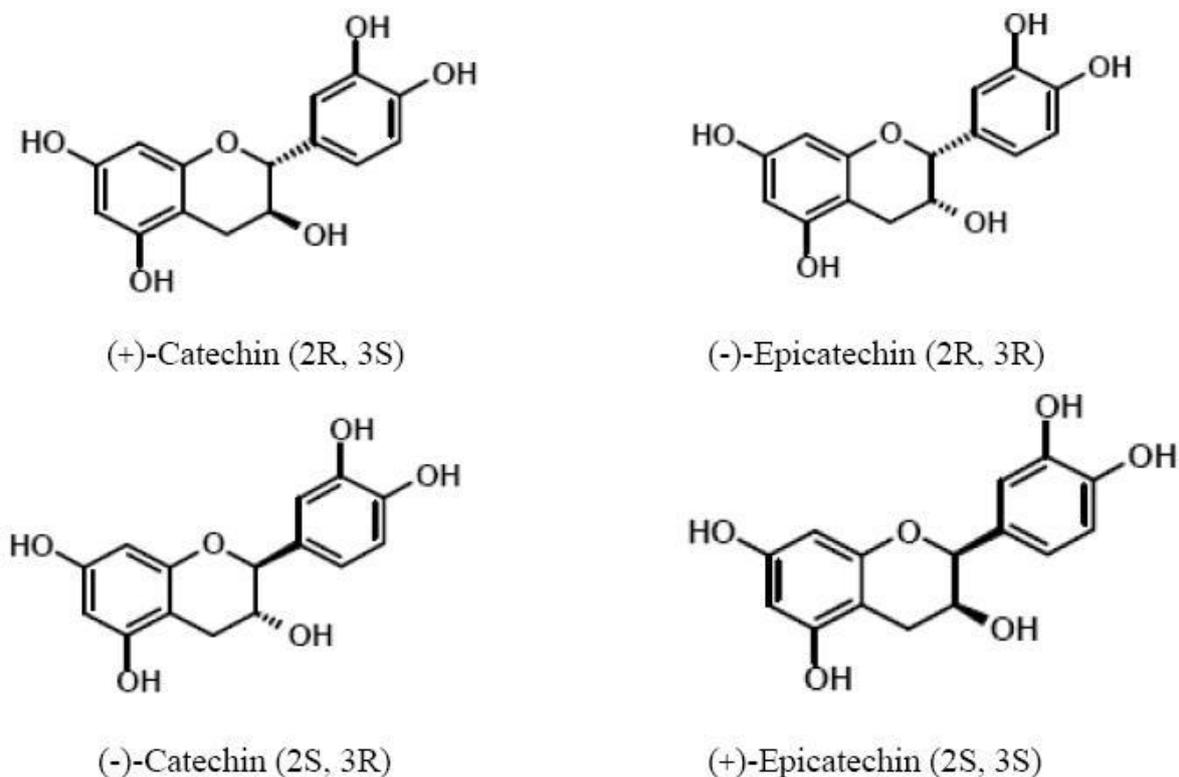


Figure 7. Structure de la catéchine (à gauche) et de l'épicatechine (à droite) (<http://lem.ch.unito.it>).

Les tanins condensés ont la propriété de former des complexes avec différents types de molécules, incluant des protéines, des carbohydrates, des polysaccharides, des acides nucléiques, des enzymes, des bactéries et des minéraux (Min et Hart, 2003 ; Theodoridou, 2010). La formation de complexes entre les TC et les protéines est dépendante du pH. Un pH proche de la neutralité (3,5 à 7,5) permet leur formation alors qu'un pH acide (inférieur à 3,5) les dissocie (Min *et al.*, 2003). La faible solubilité des TC dans l'eau, une teneur en protéines plus élevée que la teneur en TC, la présence d'ions (Ca, Mg, Na et K) ou encore un poids moléculaire élevé des TC favorisent la formation des complexes TC-protéines (Osborne et McNeill, 2004). Les propriétés biologiques des TC sont nombreuses : effets antiparasitaire et antiseptique, activité anti-oxydante, prévention des maladies cardio-vasculaires ou encore inhibition des enzymes (Brunet, 2008). Les TC sont principalement stockés dans les vacuoles intracellulaires (Brunet, 2008). Ils sont largement répandus dans différentes plantes particulièrement les arbres, les arbustes et les légumineuses, telles que le sulla (*Hedysarium*

coronarium), le lotier (*Lotus pedunculatus* et *Lotus corniculatus*) ou encore le sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) qui contient environ 20 à 50 g TC.kg MS⁻¹ (Brunet, 2008).

Les TC contenus dans les vacuoles sont libérés dans la bouche de l'animal lors de la rupture des parois cellulaires par la mastication des plantes. Si la teneur en TC est trop importante, des effets négatifs sur l'ingestion volontaire, la digestion (réduction de l'absorption d'acides aminés) et les performances zootechniques (réduction de la production de lait ou de laine, du taux de croissance) peuvent être constatés. Ainsi, l'ingestion d'une trop forte quantité de TC réduit la palatabilité des plantes par une sensation astringente (= sensation d'assèchement) dans la bouche de l'animal résultant de la complexation des TC avec les protéines salivaires ou d'une réaction directe avec les récepteurs du goût (Frutos *et al.*, 2004 ; Provenza et Roop, 2001). La digestion peut être ralentie par une diminution de la digestibilité des parois cellulaires (formation de complexes indigestibles), une diminution de l'activité microbienne, une réduction du taux d'évacuation du digesta (encombrement du rumen), ou encore une perturbation du système hormonal contrôlant la prise alimentaire (Baumont *et al.*, 2000). Certains auteurs rapportent des effets antinutritionnels pour des niveaux de TC dans le régime supérieurs à 50 g.kg MS⁻¹ (Min et Hart, 2003), d'autres à partir de 70 (Brunet, 2008) ou de 100 g.kg MS⁻¹ (Barry et McNabb, 1999). L'ingestion de quantités modérées de TC (20 à 50 g.kg MS⁻¹) peut par contre avoir des effets bénéfiques sur la nutrition (augmentation de l'absorption des acides aminés) et les performances zootechniques (augmentation du gain de poids vif des animaux en croissance, de la production de laine et de lait, de la qualité du lait, du taux d'ovulation) (Aerts *et al.*, 1999 ; Barry et McNabb, 1999 ; Brunet, 2008). L'augmentation de la fécondité peut être due à une augmentation du nombre d'ovulation ; de plus, les tanins condensés peuvent réduire la perte embryonnaire (Min *et al.*, 2001).

Aucune étude sur les potentiels effets anthelminthiques (AH) des TC n'a été conduite chez les équins. Cependant, la littérature sur les petits ruminants (ovins et caprins) rapporte des effets anthelminthiques des TC sur les nématodes qui peuvent être directs (effet « pharmacologique ») et/ou indirects (via l'amélioration de la nutrition protéique) (Min et Hart, 2003 ; Brunet, 2008). Plusieurs modes de distribution ont permis de mettre en évidence l'effet AH des TC : une consommation via le pâturage (Thamsborg *et al.*, 2003 ; Min *et al.*, 2004 ; Athanasiadou *et al.*, 2005 ; Tzamaloukas *et al.*, 2005), une distribution en fourrage frais (Waghorn *et al.*, 2006 ; Heckendorn *et al.*, 2007), en foin (Paolini *et al.*, 2003b ; Hoste *et al.*, 2005a ; Heckendorn *et al.*, 2006), en ensilage (Heckendorn *et al.*, 2006), sous forme de

granulés (Terrill *et al.*, 2007) ou sous forme d'extrait (Athanasidou *et al.*, 2000 ; Cenci *et al.*, 2007).

3.2.4.2. Action anthelminthique directe des tanins condensés

Les TC peuvent avoir des effets anthelminthiques directs en perturbant différentes étapes du cycle des nématodes au niveau des œufs (incubation), des larves (développement, mobilité), ou des adultes (fécondité des vers femelles, survie) (Athanasidou *et al.*, 2001 ; Min et Hart, 2003 ; Paolini *et al.*, 2005a ; Tzamaloukas *et al.*, 2005). Ces effets se traduisent par une diminution du nombre d'œufs excrétés dans les fèces et de la charge parasitaire, et par des conséquences atténuées de l'infestation parasitaire sur les performances.

Plusieurs études *in vitro* rapportent que des TC extraits de fourrages de lotier pédonculé (*L. pedunculatus*), lotier corniculé (*L. corniculatus*), sulla (*H. coronarium*), et sainfoin (*O. viciifolia*) (400 µg.mL⁻¹) réduisent l'éclosion des œufs d'environ 34%, le développement larvaire jusqu'au stade L3 de 87 à 100% et, dans une moindre mesure, la mobilité des larves de 21 à 39% (Molan *et al.*, 1999, 2000, 2002). Concernant le sainfoin, plusieurs études s'accordent sur une concentration seuil entre 300 et 600 µg.ml⁻¹ pour induire des effets sur les nématodes GI (Molan *et al.*, 2000 ; Paolini *et al.*, 2004 ; Alonso-Diaz *et al.*, 2008). Min *et al.*, (2004) rapportent une réduction de 99 à 58% de la proportion d'œufs se développant en larves L3 en analysant les fèces de chèvres ayant pâturé du sericea (*Lespedeza cuneata*), un fourrage contenant des TC.

Dans le cas des études menées *in vivo*, plusieurs résultats suggèrent des effets anthelminthiques des TC chez des petits ruminants recevant un régime contenant des niveaux modérés de TC : 30 à 40 g.kg MS⁻¹ du régime selon certains auteurs (Min et Hart, 2003 ; Hoste *et al.*, 2006), 45 à 55 g.kg MS⁻¹ selon d'autres (Paolini *et al.*, 2003a, 2003b ; Brunet, 2008). Chez les ovins et les caprins, la consommation de fourrages de légumineuses riches en TC a été associée à une réduction du niveau de NOF pouvant atteindre 50 à 70% (Min *et al.*, 2004). Cette réduction peut correspondre à une atteinte à la survie des vers et se traduit alors par une réduction de la charge parasitaire de l'hôte pouvant atteindre 30% (Athanasidou *et al.*, 2000, 2001 ; Niezen *et al.*, 2002 ; Thamsborg *et al.*, 2003 ; Tzamaloukas *et al.*, 2005 ; Heckendorn *et al.*, 2006, 2007). La réduction de NOF peut également correspondre à une diminution de la fertilité des vers femelles (caprins : Kabasa *et al.*, 2000 ; agneaux :

Heckendorn *et al.*, 2006). Niezen *et al.*, (1995, 1998) ont observé que des agneaux réalisaient une meilleure croissance et présentaient un NOF et une charge parasitaire à l'abattage considérablement réduits lorsqu'ils pâturaient du sulla, légumineuse fourragère contenant des TC, que lorsqu'ils pâturaient de la luzerne, légumineuse fourragère dépourvue de TC. Chez les cervidés, la consommation de sulla et de lotier corniculé a également été associée à une réduction de la charge parasitaire (Hoskin *et al.*, 2000).

L'installation des larves infestantes L3 chez l'hôte, étape importante du cycle des nématodes puisqu'elle permet le passage de la phase libre à la phase parasitaire, est réduite lorsque celles-ci parviennent dans un environnement riche en TC après avoir été ingérées (Hoste *et al.*, 2006 ; Brunet *et al.*, 2008). L'installation des larves L3 nécessite leur dégainement puis leur pénétration dans la muqueuse digestive de l'hôte où elles pourront poursuivre leur cycle biologique. Il a été établi que les formes engainées et dégainées des larves L3 sont toutes deux affectées par les TC avec des sites d'actions différents selon le statut larvaire (Brunet *et al.*, 2007, 2008). Des essais *in vivo* et *in vitro* de Brunet et Hoste (2006) et Brunet *et al.* (2007) ont montré que les TC du sainfoin affectaient la cinétique de dégainement des L3 et que cet effet inhibiteur était lié à la dose de TC en contact avec les larves. Les TC peuvent également perturber le développement des larves en formant des complexes avec les nutriments les rendant ainsi indisponibles pour les larves, ou alors réduire le métabolisme des parasites à travers l'inhibition de la phosphorylation oxydative (= voie métabolique utilisant l'énergie de l'oxydation des nutriments pour produire l'adénosine triphosphate, ou ATP, qui fournit l'énergie au métabolisme) causant la mort des larves.

Les tests *in vitro* permettent d'obtenir des résultats en conditions contrôlées sur l'effet anthelminthique direct des tanins condensés et de tester des concentrations représentatives de la gamme testée *in vivo*. Les tests *in vitro* permettent de tester l'effet d'une substance sur l'éclosion des œufs, le développement larvaire ou la paralysie des larves (Sandoval-Castro *et al.*, 2012). Les résultats obtenus *in vitro* peuvent différer de ceux obtenus *in vivo* car les tests *in vivo* sont soumis à la variabilité liée à l'animal (statut physiologique et immunologique). Ainsi, les effets des tanins sur les nématodes GI peuvent être plus facilement mis en évidence *in vitro* qu'*in vivo*. Les tests *in vivo* concernent soit l'estimation de nombre d'œufs excrétés par gramme de fèces (NOF) qui permet d'estimer indirectement la charge parasitaire à l'intérieur du tube digestif de l'hôte, soit la réalisation d'un bilan parasitaire en évaluant la charge parasitaire de l'hôte par autopsie (Sandoval-Castro *et al.*, 2012).

Cependant, les études réalisées avec des fourrages bioactifs ne mettent pas toujours en évidence d'effet AH direct des tanins condensés. Pour l'espèce de nématodes *H. contortus*, Paolini *et al.* (2005b) ne rapportent pas de diminution significative de la charge parasitaire de chevreaux après qu'ils aient reçu un régime avec du quebracho. En revanche, Paolini *et al.*, (2003b) ont observé une réduction de la charge parasitaire significative pour l'espèce intestinale *T. colubriformis* et proche de la significativité pour l'espèce abomasale *T. circumcincta* lorsque les larves sont soumises à des extraits de quebracho ; et Athanasiadou *et al.*, (2000) rapportent également une réduction de la charge parasitaire d'ovins infestés expérimentalement avec *T. colubriformis* suite à l'ingestion de quebracho. Paolini *et al.* (2005b) suggèrent ainsi que l'effet de TC issus de la même source sur l'établissement des larves infestantes varie selon l'espèce de nématodes. Par ailleurs, les travaux de Niezen *et al.* (1995, 1998) mettent en évidence une réduction de la charge parasitaire des ovins infestés naturellement suite à l'ingestion de sulla frais, alors que Pomroy et Adlington (2006) n'ont pas observé d'effet du sulla sur la charge parasitaire des caprins. Ces différences d'effet rapportées pour une même source de TC peuvent être dues à des différences physiologiques entre les ovins et les caprins. Enfin, d'autres travaux sur les ovins n'ont pas mis en évidence d'effet sur la charge parasitaire lorsqu'ils consommaient du sulla (Niezen *et al.*, 2002), du lotier pédonculé (Athanasiadou *et al.*, 2005) ou encore du sainfoin (Tzamaloukas *et al.*, 2005) (voir Brunet, 2008 pour une synthèse). Ainsi, hormis les facteurs liés à l'hôte, d'autres facteurs liés à l'espèce ou au stade des parasites, ou encore à la source de tanins condensés peuvent résulter en des effets différents des tanins condensés. Les différences de teneurs ou de structure (= degré de polymérisation) des TC influencent leurs propriétés biologiques et leurs effets anthelminthiques (Clausen *et al.*, 1990). Brunet et Hoste (2006) rapportent qu'en plus des oligomères (2 à 10 monomères) et des polymères (plus de 10 monomères) de flavan-3-ols, les monomères de TC pourraient également avoir des effets directs sur le développement des nématodes puisque le nombre de groupements phénoliques influence les interactions avec les protéines des larves infestantes. En étudiant l'effet des tanins condensés sur les fonctions larvaires, Brunet *et al.* (2008) suggèrent que des différences d'affinité pour la gaine des larves infestantes selon la structure des flavonoïdes pourraient expliquer la variabilité des effets.

3.2.4.3. Action anthelminthique indirecte des tanins condensés

Les TC peuvent agir indirectement contre les nématodes GI en améliorant la nutrition protéique de l'animal parasité. Dans le cas des ruminants, le pH neutre du rumen permet la complexation des TC avec les protéines des plantes ingérées et les protège de la protéolyse microbienne dans le rumen augmentant ainsi le flux d'acides aminés vers l'intestin. Le pH acide de l'abomasum (ou caillette) permet la dissociation des complexes et l'absorption des protéines dans le duodénum (= segment initial de l'intestin grêle) (Min et Hart, 2003 ; Min *et al.*, 2003 ; Athanasiadou *et al.*, 2008 ; Waghorn, 2008). L'augmentation des réserves protéiques permet à l'hôte d'allouer plus de ressources à l'expression de l'immunité (i.e. augmentation de la sécrétion d'anticorps, réduction de la charge parasitaire) lorsque celles-ci sont priorisées pour la réparation des tissus du tractus GI (agneaux : Niezen *et al.*, 2002 ; ruminants : Min *et al.*, 2003). Suite à la consommation de fourrages contenant des TC, plusieurs études rapportent par ailleurs une amélioration de la résilience chez l'hôte infesté se traduisant par une réduction des troubles digestifs tels que les épisodes de diarrhées (biches : Min *et al.*, 2005), ou par une productivité (gain de poids, production de lait ou de laine) meilleure que celle des animaux témoins (agneaux : Niezen *et al.*, 1995 ; caprins : Hoste *et al.*, 2005a). Les effets bénéfiques des TC sur la résilience pourraient être dus à l'amélioration de la nutrition protéique résultant de la complexation des TC avec les protéines alimentaires.

3.2.4.4. Sainfoin

Le sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) est une légumineuse fourragère pérenne originaire de l'est de la Méditerranée et mesurant de 40 à 100 cm de haut (Figure 8). Cette espèce est cultivée en Europe, en Asie, dans l'ouest des Etats-Unis et au Canada. Le sainfoin a été cultivé dans le sud de la France à partir du début du XVème siècle puis sa culture s'est étendue à une plus grande surface de la France et de l'Europe. Cette plante était couramment utilisée dans l'alimentation des chevaux au XIXème siècle, mais depuis le début du XXème siècle, sa culture et son utilisation ont diminué au profit de plantes plus productives. A l'échelle de la France, Prosperi *et al.*, (1994) rapporte une réduction de la surface cultivée de 97% en 46 ans. Le sainfoin apprécie les sols neutres ou alcalins (pH supérieur à 6) mais s'adapte à diverses conditions climatiques et résiste bien aux températures froides où à la

sécheresse (Meyer et Badaruddin, 2001). Il peut être cultivé seul ou en association avec des graminées, les mélanges sainfoin-graminées étant généralement plus productifs que les cultures de graminées ou de sainfoin seules (Sengul, 2003). Grâce à son association symbiotique avec les bactéries *Rhizobium*, cette légumineuse fixe l'azote atmosphérique (N_2) et l'assimile sous forme d'ammoniac (NH_3) ce qui lui confère une teneur en azote relativement élevée (environ 150 g.kg MS^{-1} selon le mode de conditionnement et le stade de maturité ; Aufrère *et al.*, 2012). En raison de sa très bonne qualité (forte teneur en protéines et en minéraux) et palatabilité, Kaldy *et al.*, (1979) suggèrent que le sainfoin pourrait représenter une alternative intéressante à d'autres cultures de légumineuses telles que la luzerne, d'autant plus que l'espèce *O. viciifolia* est peu vulnérable aux attaques par des pathogènes (insectes, etc.) contrairement à d'autres légumineuses (Morrill *et al.*, 1998). Le sainfoin est utilisé dans l'alimentation des herbivores domestiques via le pâturage ou sous forme de fourrage conservé (foin ou ensilage) (Waghorn *et al.*, 1998). Chez les ruminants il est rapporté une ingestion volontaire de sainfoin 20 à 24% plus élevée que l'ingestion de graminées et 10 à 29% plus élevée que l'ingestion d'autres espèces de légumineuses (Waghorn *et al.*, 1990). Une particularité du sainfoin est sa teneur relativement élevée en tanins condensés, notamment dans ses feuilles, de 20 à 50 g TC.kg MS^{-1} (Theodoridou, 2010) dont les effets anthelminthiques ont été démontrés chez les petits ruminants, tels qu'une réduction de la fertilité et du nombre de nématodes (caprins : Hoste *et al.*, 2005a ; Paolini *et al.*, 2005a ; ovins : Heckendorn *et al.*, 2006, 2007). Plusieurs tests *in vitro* réalisés avec des extraits de sainfoin ont également révélé leur action anthelminthique sur les larves infestantes (Brunet *et al.*, 2007, 2008). Les effets sur les différents stades parasitaires semblent à la fois directs (effets « pharmacologiques ») mais également indirects via l'amélioration de la nutrition protéique de l'hôte (Hoste et Torres-Acosta, 2011). En effet, chez les ruminants les TC peuvent former des complexes avec les protéines alimentaires ce qui permet de réduire la dégradation des protéines dans le rumen et favorise une meilleure absorption des acides aminés au niveau du duodénum (Aerts *et al.*, 1999 ; Turner et Neel, 2003). Les effets des tanins condensés du sainfoin dépendent de leur structure, ainsi que de leur teneur dans la plante. Plusieurs études rapportent une diminution de la teneur en tanins, et de leur capacité à se lier aux protéines, avec la maturation des plantes (Koupai-Abyazani *et al.*, 1993 ; Lees *et al.*, 1995).



Figure 8. Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) (<http://www.eqlife.co.uk>).

3.3. Effet de la nutrition et de la conduite du pâturage sur l'infestation de l'hôte

Un autre moyen de limiter le parasitisme gastro-intestinal des herbivores est de limiter le contact entre l'hôte et les larves infestantes au pâturage. En ce sens, la complémentation peut jouer un rôle si elle conduit à une réduction de l'ingestion d'herbe par les animaux du fait d'une substitution d'une partie de la ration d'herbe par le complément (van Houtert et Sykes, 1996). Le chargement est également un moyen de gérer le risque parasitaire puisqu'une diminution de l'intensité de pâturage réduit la consommation de larves infestantes par les herbivores (Thamsborg *et al.*, 1996 ; Etter *et al.*, 2000 ; Waller, 2006 ; Torres-Acosta et Hoste, 2008 ; Cabaret, 2011). Si les parasites présents sont sensibles aux traitements AH il est recommandé de traiter puis de déplacer les animaux dans une parcelle indemne de parasites. Au contraire, lorsqu'une résistance est installée il est nécessaire de changer les chevaux de parcelles avant de les traiter afin d'éviter que seuls les parasites résistants colonisent le pâturage (Kenyon *et al.*, 2009 ; Cabaret, 2011). Il peut être intéressant d'exploiter le cycle de développement des parasites en phase libre en mettant en place un système de pâturage en rotation avec un temps de repos entre l'utilisation de chaque parcelle puisque la durée de vie des larves infestantes sur les pâtures est limitée (Torres-Acosta et Hoste, 2008 ; Nielsen *et al.*, 2010b). Il peut également être utile d'offrir aux animaux les plus sensibles (jeunes chevaux) les prairies les moins contaminées, notamment les parcelles nouvellement semées, indemnes

de parasites car les larves infestantes sont enfouies dans le sol lors du retournement, ou les prairies de fauche (Cabaret, 2011). Les prairies fauchées pour de l'ensilage, de l'enrubannage ou du foin sont aussi pratiquement indemnes de parasites. En dehors du labourage, le hersage ou le ramassage des crottins peuvent également participer à réduire l'infestivité des pâtures (Cabaret, 2011). Enfin, le pâturage mixte ou alterné entre chevaux et ruminants doit permettre de réduire l'infestation des animaux du fait de la spécificité des nématodes (hormis *Trichostrongylus axei* présent chez les bovins et chez environ 15% des chevaux) (Eysker *et al.*, 1986 ; Nielsen *et al.*, 2010b).

Pour résumer

Les nématodes gastro-intestinaux sont les parasites internes les plus fréquents du cheval et l'infestation se fait pour la plupart par l'ingestion de larves infestantes lors du pâturage. La conduite du pâturage doit donc intégrer la gestion du parasitisme pour limiter l'infestation des chevaux et les aider à réduire leur charge parasitaire lorsqu'ils sont infestés. Jusqu'à présent, le contrôle du parasitisme s'est largement appuyé sur l'utilisation de traitements anthelminthiques chimiques dont l'efficacité est remise en cause. Une gestion intégrée du parasitisme faisant appel à plusieurs stratégies moins efficaces que les traitements chimiques mais plus durables doit se mettre en place. Dans cette thèse, nous verrons comment la manipulation de la nutrition (complémentation énergétique et protéique, utilisation d'une plante bioactive) peut améliorer la résistance du cheval vis-à-vis du parasitisme gastro-intestinal.

Déroulement de la thèse

Présentation des trois expérimentations

Le travail expérimental réalisé durant ma thèse s'est structuré autour de trois expérimentations.

La première a été conduite au cours de la saison de pâturage 2012 durant quatre mois (juin-septembre). Il s'agissait d'un suivi global destiné à quantifier l'influence d'une absence de complémentation énergétique sur l'ingestion au pâturage, les performances et l'état parasitaire de juments en lactation, et la croissance de leurs poulains. Cette étude devait apporter des références sur l'intérêt d'une complémentation énergétique au pâturage. Nous avons utilisé une complémentation à base d'orge, car celle-ci est majoritairement utilisée en élevage pour compléter les animaux à forts besoins, comme les juments allaitantes et les poulains, et ceci même lorsque les conditions de pâturage sont favorables. Deux lots de juments suitées, l'un de huit juments complémentées et l'autre de huit juments non complémentées, ont ainsi été conduits ensemble, en rotation, sur des prairies permanentes non limitantes vis-à-vis de la disponibilité en herbe. La comparaison de l'ingestion, des performances, et de l'état parasitaire des juments des deux lots a permis de caractériser leur réponse adaptative face à une absence de complémentation énergétique. Une première hypothèse est que, lorsque le pâturage n'est pas limitant, il serait possible de couvrir les besoins de juments en lactation exclusivement à l'herbe et de permettre une bonne croissance de leurs poulains. Les résultats de cette étude doivent ainsi contribuer aux recommandations alimentaires pour les équins au pâturage. Maximiser la part de l'herbe dans la ration participera à l'amélioration du bilan économique des élevages équins en réduisant les coûts d'alimentation.

Dans le cas où une complémentation énergétique s'avèrerait nécessaire, cette expérimentation visait également à déterminer les potentiels effets bénéfiques d'un apport de céréales sur la résistance des chevaux aux parasites gastro-intestinaux. On faisait l'hypothèse qu'un apport supplémentaire de nutriments permettrait d'accroître la réponse immunitaire des chevaux et ainsi de réduire l'excrétion d'oeufs de parasites dans les fèces. Si une manipulation de la nutrition s'avérait efficace pour lutter contre le parasitisme gastro-intestinal des chevaux cela

permettrait de promouvoir des alternatives aux anthelminthiques de synthèse pour réduire la charge parasitaire des chevaux. De telles alternatives présenteraient des intérêts cliniques, économiques et pour la santé publique en limitant la diffusion des résistances et des rejets toxiques pour l'environnement.

En 2013, deux expérimentations analytiques ont permis d'approfondir certains aspects soulevés par la première expérimentation et pour lesquels il n'existait pas de référence chez le cheval.

La deuxième expérimentation s'est ainsi déroulée durant six semaines en juin-juillet 2013 et visait à déterminer le seuil de disponibilité en herbe en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire pour maintenir le niveau d'ingestion des juments et couvrir leurs besoins sur un couvert de bonne qualité. Pour cela nous avons placé des juments en lactation, complémentées en orge ou non, sur des repousses avec des quantités d'herbe offerte élevée, intermédiaire ou limitante. L'objectif était de fournir de nouvelles références sur la couverture des besoins des juments en lactation au pâturage, et de tester les limites de leurs adaptations comportementales pour maintenir le niveau d'ingestion journalière.

Enfin, la troisième expérimentation cherchait à apprécier les éventuels effets d'autres types de complémentation sur la résistance des chevaux aux parasites gastro-intestinaux. La littérature sur les interactions nutrition-parasitisme chez les petits ruminants (ovins, caprins) contient plusieurs travaux rapportant les effets bénéfiques d'une alimentation riche en protéines ou utilisant des plantes bioactives pour diminuer la charge parasitaire des animaux. Notre étude a été réalisée en boxes individuels en Novembre-Décembre 2013 avec trois lots de chevaux en croissance infestés naturellement durant l'été. Un lot recevait un régime expérimental riche en protéines, le deuxième un régime riche en sainfoin, une légumineuse riche en métabolites secondaires dont les tanins condensés, alors que le troisième lot recevait un régime témoin isoénergétique avec les deux précédents régimes.

On faisait l'hypothèse que les animaux recevant le régime riche en protéines ou le régime riche en sainfoin pourraient exprimer une meilleure réponse immunitaire et réduiraient plus leur charge parasitaire que les animaux recevant le régime témoin. Cette expérimentation a été complétée par des tests *in vitro* pour confirmer l'effet inhibiteur des tanins condensés sur le développement des œufs de parasites en larves infestantes de stade L3. La potentielle toxicité du sainfoin, les contraintes pratiques liées au nombre d'animaux nécessaires ainsi que la

nécessité d'utiliser des animaux infestés de façon homogène n'ont pas permis de réaliser cette étude avec des juments en lactation. Nous faisons cependant l'hypothèse que l'effet du régime alimentaire sur la réponse immunitaire de l'hôte serait similaire entre des chevaux en croissance et des juments en lactation dès lors que les deux types d'animaux présentent des besoins nutritionnels importants, notamment en protéines, et qu'ils ont déjà été exposés à un challenge parasitaire.

Lieux des expérimentations

Les trois expérimentations se sont déroulées à la station expérimentale de l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE) de Chamberet, dans le département de la Corrèze (19). Cette station expérimentale est située à une altitude moyenne de 440 m (01°43'14''E – 45°35'03''N) et bénéficie d'un climat océanique tempéré. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 994 mm et l'ensoleillement annuel est en moyenne de 1937 heures. En 2012, les précipitations ont été de 341 mm au printemps et 92 mm en été, et l'ensoleillement a été de 453 heures au printemps et 751 heures en été. L'été 2013 a été plus pluvieux (292 et 187 mm de pluie au printemps et en été) et l'ensoleillement a été équivalent entre les deux années (473 et 769 heures de soleil au printemps et durant l'été 2013). Les deux expérimentations au pâturage ont utilisé les mêmes prairies permanentes semées depuis plus de 10 ans donc la productivité est d'environ 3 à 4 tonnes de matière sèche par hectare. Elles comportent environ 25 espèces de plantes par parcelle, dont les plus abondantes sont le pâturin commun (*Poa trivialis*), le ray-grass anglais (*Lolium perenne*), le dactyle aggloméré (*Dactylis glomerata*), la fétuque élevée (*Festuca arundinacea*), le trèfle blanc (*Trifolium repens*) et le pissenlit (*Taraxacum sp.*).

Les analyses parasitologiques ont été effectuées au laboratoire Infectiologie et Santé Publique situé à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Nouzilly (Indre et Loire, 37). Certaines manipulations préalables ont été effectuées à la station expérimentale de Chamberet.

Enfin, les échantillons de fèces, d'herbe et d'aliments ont été séchés et broyés à la station expérimentale de Chamberet et au centre INRA de Theix (Puy-de-Dôme, 63), les analyses de composition chimique étant réalisées par le laboratoire InVivo Labs de Saint-Nolff (Morbihan, 56).

Chapitre 1

**La complémentation énergétique au
pâturage est-elle indispensable pour assurer
la couverture des besoins de juments de
selle en lactation ?**

Effets de la suppression de la complémentation énergétique sur l'ingestion, les performances zootechniques et l'état parasitaire de la jument

Les élevages équinés sont confrontés à de lourdes charges d'alimentation et envisagent des conduites valorisant mieux l'herbe pâturée. Cette première étude cherche à déterminer s'il est possible de nourrir des juments en lactation uniquement à l'herbe sans affecter la couverture de leurs besoins et la croissance des poulains lorsque la disponibilité de l'herbe n'est pas limitante. Nous évaluons également l'intérêt d'une complémentation énergétique pour améliorer la résistance des chevaux aux parasites gastro-intestinaux.

L'expérimentation a été réalisée durant quatre mois durant la saison de pâturage 2012. Seize juments de selle suitées, infestées expérimentalement en début d'expérimentation par des larves de cyathostomes, ont été réparties en deux traitements ; huit juments étaient complémentées avec de l'orge à hauteur de 60% de leurs besoins énergétiques de lactation (C) (Figure 0) et les huit autres n'étaient pas complémentées (NC). Les 16 juments étaient conduites ensemble en pâturage tournant sur des prairies permanentes (Figure 0). Les juments et les poulains ont été pesés une fois par semaine en juin et juillet, lorsque l'allaitement était la principale source de nutrition des poulains, puis tous les 15 jours. Des mesures de conformation (hauteur au garrot) et d'ossification (largeur du canon) ont été réalisées sur les poulains à l'âge de 11 mois. Les quantités d'herbe ingérées par les juments ont été mesurées par la récolte totale des fèces et la digestibilité de l'herbe a été estimée à partir de la teneur en matières azotées totales des fèces. La charge parasitaire des juments était évaluée par des coproscopies individuelles (nombre d'œufs de ver par gramme de fèces) tous les 15 jours.

Les juments des deux lots ont couverts leurs besoins énergétiques quel que soit le cycle. Elles ont eu une évolution parallèle de leur poids et de leur note d'état corporel. Les poulains ont réalisé une croissance identique ; à 11 mois la hauteur au garrot (137 cm) et la largeur du canon (3,6 cm) des poulains étaient identiques que leurs mères aient ou non été complémentées durant la lactation. Les niveaux d'ingestion journalière des juments C sont restés stables autour de $22,6 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ tout au long de la saison de pâturage, alors que ceux des juments NC ont augmenté de $22,6$ à $28,0 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ ($P < 0,001$). En fin d'été, l'ingestion totale des juments NC tendait ainsi à dépasser celle des juments C. L'excrétion parasitaire n'a pas manifesté de différence nette entre les deux lots.

Lorsque la disponibilité de l'herbe est suffisante, l'absence de complémentation n'a pas pénalisé la croissance des poulains et le maintien des réserves corporelles des juments par rapport à une complémentation énergétique effectuée à hauteur de 60% des besoins de lactation. La forte capacité d'ingestion de fourrages verts des juments explique ce résultat. Il est en particulier suggéré que l'augmentation de l'ingestion d'herbe par les juments NC est le résultat d'une augmentation de la masse ou de la fréquence des bouchées, les temps de pâturage n'étant pas différents entre les deux lots. Notre étude confirme que le taux de substitution peut être supérieur à 1 chez le cheval contrairement à ce qui est classiquement observé chez le ruminant. Ainsi, l'ingestion du cheval pourrait être plus influencée par le métabolisme énergétique que chez le ruminant où elle dépend principalement d'une régulation physique. La complémentation énergétique n'a pas affecté la régulation de l'état parasitaire des juments. Ces différents concordent pour préconiser que la complémentation au pâturage des juments suitées ne soit pas systématique, mais plutôt raisonnée par rapport aux disponibilités en herbe.



Figure 0. Juments et poulains au pâturage (gauche) et jument au box pendant la complémentation (droite).

How does the suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism in lactating saddle mares?

C. Collas^{1,2,3†}, G. Fleurance^{1,2,3}, J. Cabaret⁴, W. Martin-Rosset^{2,3}, L. Wimmel¹, J. Cortet⁴ and B. Dumont^{2,3}

¹IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Terrefort, BP207, 49411 Saumur, France; ²INRA, UMR1213 Herbivores, Theix 63122, Saint-Genès-Champagnelle, France; ³VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP35, 89 Avenue de l'Europe, 63370 Lempdes, France; ⁴INRA and Université François Rabelais Tours, UMR 1282, Infectiologie et Santé Publique, 37380 Nouzilly, France

(Received 22 January 2014; Accepted 22 April 2014; First published online 2 June 2014)

Agroecology opens up new perspectives for the design of sustainable farming systems by using the stimulation of natural processes to reduce the inputs needed for production. In horse farming systems, the challenge is to maximize the proportion of forages in the diet, and to develop alternatives to synthetic chemical drugs for controlling gastrointestinal nematodes. Lactating saddle mares, with high nutritional requirements, are commonly supplemented with concentrates at pasture, although the influence of energy supplementation on voluntary intake, performance and immune response against parasites has not yet been quantified. In a 4-month study, 16 lactating mares experimentally infected with cyathostome larvae either received a daily supplement of barley (60% of energy requirements for lactation) or were non-supplemented. The mares were rotationally grazed on permanent pastures over three vegetation cycles. All the mares met their energy requirements and maintained their body condition score higher than 3. In both treatments, they produced foals with a satisfying growth rate (cycle 1: 1293 g/day; cycle 2: 1029 g/day; cycle 3: 559 g/day) and conformation (according to measurements of height at withers and cannon bone width at 11 months). Parasite egg excretion by mares increased in both groups during the grazing season (from 150 to 2011 epg), independently of whether they were supplemented or not. This suggests that energy supplementation did not improve mare ability to regulate parasite burden. Under unlimited herbage conditions, grass dry matter intake by supplemented mares remained stable around 22.6 g DM/kg LW per day (i.e. 13.5 kg DM/al per day), whereas non-supplemented mares increased voluntary intake from 22.6 to 28.0 g DM/kg LW per day (13.5 to 17.2 kg DM/al per day) between mid-June and the end of August. Hence total digestible dry matter intake and net energy intake did not significantly differ between supplemented and non-supplemented mares during the second and third cycles. In conclusion, supplementing lactating mares at pasture should not be systematic because their adaptive capacities enable to increase herbage intake and ensure foal growth. Further research is needed to determine the herbage allowance threshold below which supplementation is required.

Keywords: horse, grazing, inputs, gastrointestinal parasites, foal growth

Implications

Recent surveys report feeding costs representing 20% to 50% of the operational costs in horse farming systems. Lactating saddle mares with high nutritional requirements are commonly supplemented with barley at pasture. Here, we demonstrate that under unlimited herbage conditions, mares' adaptive capacities enable to meet feed requirements and to produce foals with a satisfying growth and conformation

while relying on grass only. Supplementation should thus not be systematic, which appears an efficient way to increase farmers' incomes and decrease the environmental footprint of horse farming systems by reducing the inputs required for production.

Introduction

Agroecology opens up new perspectives for the design of sustainable animal farming systems. Identifying key ecological processes to be optimized within livestock farming systems, Dumont *et al.* (2013) proposed five principles,

† E-mail: claire.collas@clermont.inra.fr

among which developing feeding systems based on natural resources to decrease the inputs needed for production, and adopting management practices aiming to improve animal health. There is indeed a need to consider reduction of all types of inputs via an alternative set of practices to intensive agriculture. This includes making the best possible use of animal adaptive capacities and of natural resources not directly utilizable by humans. Also, the use of anthelmintics needs to be minimized to limit the spread of resistance to synthetic chemical drugs, and prevent pharmaceutical residues polluting the environment (Athanasiadou *et al.*, 2008; Traversa *et al.*, 2012).

In horse farming systems, an important challenge is thus to maintain animal performances while maximizing the proportion of herbage in the diet (i.e. limiting the use of concentrate feeds). Surveys carried out in 250 professional horse farms in France report low incomes in horse breeding despite a growing demand for saddle horses (Morhain, 2011). Feeding costs represent 20% to 50% of operational costs according to the system. Grazed forages represent only 30% of the diet of athlete horses (racehorses, sport horses with high performance) and farmers rely strongly on concentrate feeds to meet horses' nutritional requirements. The use of grazed forage is higher in systems raising horses for sport and leisure; it is however still impaired by a lack of confidence in a feed resource that varies in quantity and quality according to climatic hazard, leading to high inter-annual variability in grass growth. Moreover, little is known on how to feed horses at pasture apart from some recent research on growing horses (Grace *et al.*, 2002a; Edouard *et al.*, 2009 and 2010). Animals with high nutritional requirements such as lactating mares are therefore commonly supplemented with concentrates at pasture to ensure animal performance and this even under unlimited grass growth (Miraglia *et al.*, 2006).

Systematic supplementation is indeed questionable. First, energy supplementation can cause various types of animal health issues (colic, gastric ulcer, obesity, etc.) when horses are grazed on high-quality pastures (Jansson *et al.*, 2012). In addition, horses can consume larger amount of forages than cattle (Menard *et al.*, 2002). Mares fed different types of hay indoors always met their energy requirements, whereas lactating suckler cows fed the same forages had a poorly positive or even negative energy balance when forage quality decreased (Thériez *et al.*, 1994). Since some studies in temperate areas have concluded on the possibility to feed suckler cows on grazed forages only (e.g. Drennan and Mc Gee, 2008; Bedoin and Kristensen, 2013), this opens options to suppress energy supplementation in lactating mares.

One reason why supplementation could however present an interest for grazing mares would be through its possible benefits on the expression of immunity against gastrointestinal nematodes; this represents a severe challenge to horse performance and health (Kornaš *et al.*, 2010; Scantlebury *et al.*, 2013). In ruminants, manipulation of host protein nutrition indeed helped hosts to regulate worm population, that is to decrease worm number, size and

fecundity (Coop and Holmes, 1996; Athanasiadou *et al.*, 2008). It has also been shown that supplementation with barley tended to reduce nematode egg excretion in grazing sheep (Ferre *et al.*, 1995).

The objective of this 4-month study was to test the hypothesis that, under unlimited grass growth, it is possible to feed lactating mares with grazed herbage only without affecting performance of mares and foals. We therefore compared performance and daily intake of energy-supplemented (with barley) and non-supplemented mares grazing together a permanent pasture. We also assessed whether mares of the two groups differed in their ability to decrease their parasite burden.

Material and methods

Experimental design

The experiment was conducted at the experimental farm of the French Horse and Riding Institute (IFCE) in Chamberet, France (01°43'14" E – 45°35'03" N, altitude 440 m) using 16 lactating saddle mares that were experimentally infected with cyathostome larvae at the start of measurements. Mares were either supplemented with barley (S group) or not (NS group), and rotationally grazed a fertile permanent pasture during three vegetation cycles. Mares received a mineral and vitamin supplement. The grazing period began once the 16 mares had foaled (6 June 2012) and ended when foals were on average 5-month old (2 October 2012). We compared foal growth and mares' body condition between treatments and measured voluntary intake by mares to explain observed performances. Faecal egg counts were used to estimate mare parasite burden.

Animals and pre-experimental conditions

During pregnancy, the 16 mares (Anglo-Arab and French Saddle breeds, 6 to 16 years old) were individually fed indoors with 90% of forage represented by hay (85% DM, 6.6% CP, 31.5% CF: crude fibre), haylage (69% DM, 12.2% CP, 31.3% CF) and wheat straw (88% DM, 3.5% CP, 42.0% CF), and 10% of concentrate (including 61.5% barley, 35% soya bean meal, 3.5% minerals and vitamins) according to their requirements and body condition scores (BCS) (INRA, 2012). They were managed in order to achieve BCS of around 3 at the start of the experiment, on a scale ranging from 0 (emaciated horse) to 5 (obese; Martin-Rosset *et al.*, 2008). Daily intake measurements were made in March with grass hay offered *ad libitum* for 8 days following 6 days of adaptation to estimate the intake capacity of each mare. At the end of April, mares were treated against gastrointestinal parasites using Ivermectin (Eqvalan[®], Merial, France) to ensure subsequent homogeneous infestation. After foaling, the S and NS groups of eight mares were balanced for their intake capacity, foaling date (19 April to 27 May 2012), parasitic sensitivity (estimated from faecal egg counts measured in February 2012), BCS (S: 2.8 ± 0.2; NS: 3.2 ± 0.2) and liveweight at foaling (S: 575.0 ± 20.2 kg; NS: 586.6 ± 16.1 kg).

Table 1 Vegetation characteristics according to cycle: sward height, sward availability in the 1st paddock and CP and NDF content (cycle 1: 6 June to 5 July; cycle 2: 6 July to 19 August; cycle 3: 20 August to 2 October)

| | Grazing cycle | | | RMSE | P-value |
|--|-------------------|--------------------|-------------------|------|---------|
| | Cycle 1 | Cycle 2 | Cycle 3 | | |
| Sward height (cm) | | | | | |
| Start | 52.2 ^a | 26.5 ^b | 11.9 ^c | 13.0 | *** |
| End | 13.3 ^a | 7.5 ^b | 5.3 ^c | 4.1 | *** |
| Sward availability in early cycle (kg DM/al per day) | 50.2 ^a | 77.8 ^b | 74.5 ^b | 13.5 | *** |
| Sward quality (% DM) | | | | | |
| CP | 12.5 ^a | 11.2 ^{ab} | 10.1 ^b | 0.02 | * |
| NDF | 45.3 ^a | 43.8 ^a | 47.0 ^a | 0.06 | ns |

DM = dry matter.

^{a,b}For each variable, means with different letters are significantly different at $P < 0.05$.* = $P < 0.05$; *** = $P < 0.001$.

Experimental treatments

On 1 June, all mares were experimentally infected with 5000 cyathostome larvae administered with a naso-gastric tube; this infestation should have led to a moderate level of adult worm infestation for naturally infected horses (Collobert-Laugier *et al.*, 2002). These small strongyle nematodes are the main parasites affecting horses at pasture (Love *et al.*, 1999). At high levels of infestation, horses exhibit clinical signs of anaemia, hypoalbuminaemia, partial anorexia, weight loss and diarrhoea (Kornaš *et al.*, 2010; Scantlebury *et al.*, 2013). From 6 June to 2 October, 5 mares received a daily supplement of rolled barley at pasture (88.1% DM, 11.6% CP, InVivo Labs laboratory, Vannes, France) according to their lactation stage and liveweight (on average 2.5 kg DM/day), so that it accounted for 60% of their energy requirements for lactation (INRA, 2012). NS mares received 260 g DM of rolled barley daily to get them eating 100 g of small coloured plastic balls mixed with barley in order to individualize faeces at pasture (see *voluntary intake and daily grazing time*). We assume that it is unlikely to affect the expression of immunity against cyathostomes since these 260 g represent 3% of total energy requirements only. All mares were habituated to being individually fed with barley indoors the week before the experiment.

Pasture composition and grazing management

The pasture was sown for more than 10 years and contained 25 plant species, with grass species accounting for 60% of vegetation cover. Most abundant species were rough bluegrass (*Poa trivialis*), perennial ryegrass (*Lolium perenne*), cocksfoot (*Dactylis glomerata*), tall fescue (*Festuca arundinacea*), white clover (*Trifolium repens*) and dandelion (*Taraxacum sp.*). The pasture was divided into five paddocks (1.36 to 3.37 ha); three paddocks only were used in the first rotation cycle, and the two other paddocks were added during the second and third cycles. Stocking rate was 3.1 livestock units (LU)/ha (one saddle mare and its foal = 1.2 LU; INRA, 2012) during the first cycle (from 6 June to 5 July) and 1.5 LU/ha during the second (from 6 July to 19 August) and third cycles (from 20 August to 2 October), when grass growth was much

slower. In each grazing cycle, these stocking rates ensured grazing availability to remain non-limiting (Table 1), with mares moving to a new paddock every 5 to 12 days.

Sward height, biomass and quality

Sward height was measured in each paddock before and after each grazing cycle at 100 to 150 random points per paddock (according to surface) using a graduated sward stick. For each cycle, herbage biomass was measured in the first paddock of the rotation, 2 to 3 days before intake measurements began. Sixteen 0.5 m² (10 cm × 5 m) strips were cut to 2 cm above ground level with manual lawnmowers to obtain samples accounting for variability in sward structure and composition. Samples were dried for 72 h at 60°C to estimate dry matter content. Eight sward samples per paddock and per cycle were randomly selected to be analysed for CP (Dumas method), CF (Weende method) and NDF (Goering and Van Soest, 1970). Analyses were performed by InVivo Labs laboratory (Table 1).

Pasture contamination and faecal egg excretion

Pasture contamination by parasites was assessed in each paddock at the beginning and end of the experiment, and twice per grazing cycle before the intake and grazing time measurements began. The number of infective third-stage larvae (L3) per kg of dry herbage was measured using 100 × 4 grass pinches (between thumb and forefinger, about 0.4 g of fresh grass) randomly selected in each paddock (Gruner and Sauve, 1982). No infective larvae were found in pastures during the first 2 months of the experiment. The density of larvae then increased from 400 L3 kg/DM of herbage at the end of July to 12 050 L3 kg/DM of herbage at the end of September. As the pre-patent period (time between infection and nematode egg-laying) is 2 months after infection (Cabaret, 2011), the faecal egg counts (FEC) measured in mares between June and September are the result of experimental infection on 1 June and of how it was modulated by energy supplementation.

FECs were carried out on the faeces taken from the rectum of the mares at the start of the experiment, and then every

2 weeks from July to September. The McMaster technique, modified by Raynaud (1970) (ClNa, density = 1.18 to 1.20; 360 g/L), was used with a minimal detection level of 15 eggs per gram of fresh faeces. Mares were treated against gastrointestinal parasites using Ivermectin (Eqvalan®) at the end of the experiment.

Animal performance

Foals were weighed weekly at the same time of day in June and July, when they were mainly sucking their dams (Martin-Rosset *et al.*, 1978), and then every 2 weeks at the same time as their dams when they increased their grazing time. Mares were weighed at the same time of day during the first half of their staying in a new paddock. Their BCS (Martin-Rosset *et al.*, 2008) was evaluated monthly by the same observer. Height at withers and cannon bone width was measured for the 16 foals at the end of March 2013, when foals were 322 (± 3) days old on average.

Voluntary intake and daily grazing time

Daily grass dry matter intake (GDMI) was measured for each mare once per cycle during four consecutive days during the second half of the staying of mares in the first paddock (cycle 1: 11 to 14 June; cycle 2: 10 to 13 July; cycle 3: 27 to 30 August) as:

$$\text{GDMI} = \text{FO} / (1 - \text{GDMD}),$$

where FO is the dry weight of faecal output over 24-h attributable to grass and GDMD is the dry matter digestibility of ingested grass expressed as a percentage.

In horses, faeces dry matter content makes it possible to collect them without losses or contamination. We therefore used the method of total faecal collection which has been considered as the reference method in the Herbage Intake Handbook (Penning, 2004). This method was used in a large number of horse studies (Duncan, 1992; Mésoschina *et al.*, 2000; Fleurance *et al.*, 2001; Grace *et al.*, 2002a and 2002b; Edouard *et al.*, 2009 and 2010; Fleurance *et al.*, 2010). Estimation of FO required collecting the total amount of faeces produced daily over 4 successive days after the paddock had been cleaned of faeces. Individualization of faeces was made possible by mixing the small plastic balls of different colours (one colour per mare) with the barley. Total daily FO were weighed individually, and a subsample was dried for 72 h at 80°C to determine faecal DM and CP (Dumas method) contents (InVivo Labs laboratory). Faecal DM output attributable to grass (FO) was then calculated by subtracting the indigestible DM attributable to barley (INRA, 2012) from the total faecal DM output (Delagarde *et al.*, 1999).

Dry matter digestibility of ingested grass (GDMD) was estimated from faecal CP content attributable to grass according to the equation of Mésoschina *et al.* (1998):

$$\text{GDMD} = 73.4 - (178.72/\text{faecal CP content})$$

This equation based on faecal CP also accounts for non-dietary faecal nitrogen losses (microbial, endogenous and metabolic). Mésoschina *et al.* (1998) stressed that the conditions of application of this equation were for herbage CP

content higher than 7 g/kg DM, which limits nitrogen recycling by horses; this was always the case in the present experiment (Table 1). The faecal CP content attributable to grass was calculated by dividing the amount of faecal CP attributable to grass by the faecal DM output attributable to grass (FO). The amount of faecal CP attributable to grass was calculated by subtracting the amount of faecal CP attributable to barley from the total CP amount excreted from faeces (Delagarde *et al.*, 1999). The amount of faecal CP attributable to barley was calculated from the CP content of barley and from the apparent CP digestibility of barley (INRA, 2012).

Total DM intake (TDMI) was calculated as the sum of GDMI and barley dry matter intake (BDMI) that was recorded when mares were supplemented. We then calculated the daily total digestible dry matter intake (TDDMI) as:

$$\text{TDDMI} = \text{GDMI} \times \text{GDMD} + \text{BDMI} \times \text{BDMD}$$

where BDMD is barley dry matter digestibility (INRA, 2012).

Net energy (NE) intake was estimated from net energy content of swards and barley according to Martin-Rosset *et al.* (1994):

$$\begin{aligned} \text{NE content of swards (kcal/kg DM)} \\ = (0.825 - 0.0011 \times \text{CF} + 0.0006 \times \text{CP}) \times 2250 \end{aligned}$$

where 2250 is the net energy content (kcal) of 1 kg of fresh standard barley (INRA, 2012).

Daily grazing time of the mares and their foals was recorded in the third paddock at each cycle using 22-h scan sampling (2 h were spent indoors for barley supplementation) with one observation every 10 min. The observer recorded whether the animals were grazing (including swallowing and searching for food) or not. Animals were previously habituated to the presence of the observers and to the use of a torch at night.

Statistical analyses

Data were analysed using the PROC Mixed procedure of SAS for repeated measurements. Mare liveweight time course was analysed separately from early June to early September (which includes the intake measurement period), and from early to late September using linear models. Foal growth was analysed at each grazing cycle. For liveweight and BCS, the model included the main effects of treatment, date, and the interaction between treatment and date (treatment \times date). Initial liveweight or BCS was taken as a covariate. Height at withers and cannon bone width were analysed in a model including the main effects of treatment, age and the interaction between treatment and age. Faecal egg excretion by mares was analysed in a model including the main effects of treatment, date, and the interaction between treatment and date (treatment \times date). Finally, daily intake and grazing time were analysed in a model including the main effects of treatment, grazing cycle and the interaction between treatment and grazing cycle (treatment \times cycle). Individual animal was taken as the statistical unit in each model, and this even for grazing time as Iason and Elston (2002) discussed that there is ample opportunity for variability

between individuals grazing together in total daily time grazing. Differences between treatments and between grazing cycle or date were investigated using the Tukey correction for multiple comparisons.

Results

Animal performance and faecal egg excretion

We did not find any treatment effect on mares' liveweight (treatment, $P > 0.05$; Figure 1) from the start of the experiment in June to early September. The mares gained 18.6 kg on average during this period (June v. early September, $P < 0.001$). In September, both supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares lost weight (-34.0 ± 3.2 kg, start v. end of September, $P < 0.001$; Figure 1). BCS of mares were high during the whole experiment (>3 for mares in both groups) and we found a significant treatment \times date interaction ($P < 0.01$, Figure 2).

Foals gained weight at each cycle (cycle 1: 1293 ± 114 g/day, start v. end, $P < 0.001$; cycle 2: 1029 ± 58 g/day, $P < 0.001$; cycle 3: 559 ± 148 g/day, $P < 0.001$; Figure 3) and grew similarly whether their mares were supplemented or not (treatment, $P > 0.05$). At 11 months, foals had the same height at withers (137.3 ± 0.9 cm, treatment: $P > 0.05$) and cannon bone width (3.6 ± 0.1 cm, treatment: $P > 0.05$).

Mares in both groups increased faecal egg excretion during the experiment (date, $P < 0.001$), with a tendency for

S mares to excrete nematode eggs earlier (treatment \times date, $P = 0.074$; Figure 4).

Mare daily intake

Daily GDMI of S mares remained stable at around 22.6 g DM/kg LW per day (i.e. 13.5 kg DM/al per day), whereas NS mares increased daily GDMI from 22.6 to 28.0 g DM/kg LW per day (13.5 to 17.2 kg DM/al per day) between mid-June and the end of August (treatment \times cycle, $P < 0.001$, Table 2). At the end of August, NS mares grazed more than S mares ($P < 0.01$). Similarly, TDMI (grass + barley) of S mares remained stable during the experiment, whereas that of NS mares increased (treatment \times cycle, $P < 0.001$, Table 2). No significant differences in TDMI were found between the two groups whatever the grazing cycle. TDDMI of supplemented mares tended to decrease during the experiment ($P = 0.081$ between the first and third cycles), whereas it increased in non-supplemented mares (treatment \times cycle, $P < 0.001$, Table 2). As a consequence, the net energy intake of NS mares increased during the experiment, whereas that of S mares remained stable (treatment \times cycle, $P < 0.001$). Net energy intake was similar between NS and S mares in cycles 2 and 3 (Table 2). Mares met their energy requirements with both treatments (between 122% and 137% according to grazing cycle in S mares, 97% to 144% in NS mares).

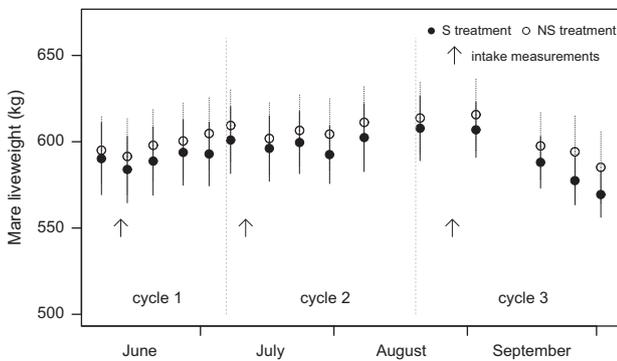


Figure 1 Liveweight time course of supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares (mean \pm s.e.) (June v. early September, $P < 0.001$ and start v. end of September, $P < 0.001$; treatment, $P > 0.05$).

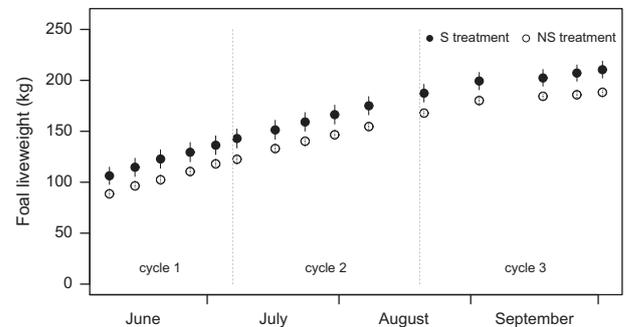


Figure 3 Influence of mare supplementation on foal growth (S, supplemented mares; NS, non-supplemented mares) (mean \pm s.e.) (cycle 1: start v. end, $P < 0.001$, cycle 2: start v. end, $P < 0.001$, cycle 3: start v. end, $P < 0.01$; treatment, $P > 0.05$).

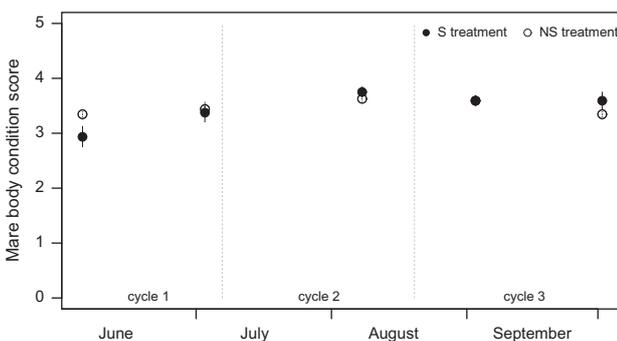


Figure 2 Body condition score time course of supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares (mean \pm s.e.) (treatment \times date, $P < 0.01$).

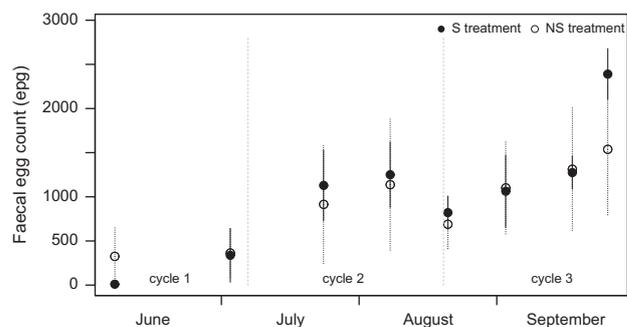


Figure 4 Changes in the faecal nematode egg excretion (FEC) of supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares throughout the experiment (mean \pm s.e.) (treatment \times date, $P = 0.074$).

Table 2 Grass dry matter intake, total dry matter intake, total digestible dry matter intake, net energy intake and daily grazing time for supplemented (S) and non-supplemented (NS) mares along the grazing season

| | Cycle 1 | | Cycle 2 | | Cycle 3 | | RMSE | P-value | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|-----------|-------|-------------------|
| | S | NS | S | NS | S | NS | | Treatment | Cycle | Treatment × cycle |
| Grass DM intake (g DM/kg LW per day) | 23.5 ^a | 22.6 ^a | 22.7 ^a | 25.4 ^a | 21.7 ^b | 28.0 ^a | 2.3 | 0.077 | ns | *** |
| Total DM intake (g DM/kg LW per day) | 27.5 ^a | 23.0 ^a | 26.7 ^a | 25.8 ^a | 25.2 ^a | 28.4 ^a | 2.4 | ns | ns | *** |
| Total DDM intake (g DDM/kg LW per day) | 17.0 ^a | 13.4 ^b | 16.8 ^a | 15.2 ^a | 15.1 ^a | 16.1 ^a | 1.4 | ns | 0.089 | *** |
| Net energy intake (kcal/kg LW per day) | 45.2 ^a | 34.9 ^b | 45.1 ^a | 40.1 ^a | 42.3 ^a | 44.2 ^a | 3.7 | * | 0.072 | *** |
| Daily grazing time (h/al per day) | 15.1 ^a | 15.2 ^a | 14.3 ^a | 14.0 ^a | 15.7 ^a | 16.6 ^a | 1.0 | ns | *** | ns |

S = supplemented mares; NS = non-supplemented mares; DM = dry matter; DDM = digestible dry matter; LW = liveweight.

^{a,b}For each variable and each grazing cycle, means with different letters are significantly different at $P < 0.05$.

* = $P < 0.05$; *** = $P < 0.001$.

Daily grazing time

Daily grazing time of mares did not significantly differ between S and NS mares ($P > 0.05$, Table 2). Mares in both groups decreased their grazing time between the first and second cycle, and spent more time grazing during the third cycle ($P < 0.001$).

Foals increased their daily grazing time ($P < 0.001$) during the experiment (cycle 1: 6.1 ± 0.4 h, cycle 2: 8.7 ± 0.3 h, cycle 3: 11.4 ± 0.6 h). Their daily grazing time was unaffected by mare supplementation (treatment, $P > 0.05$).

Discussion

This study aimed to test whether under unlimited grass growth is it possible to feed lactating mares with grazed herbage only without affecting performance of mares and foals. Daily intake was used as an explanatory variable, and we also analysed whether energy supplementation affects the expression of mare immunity against gastrointestinal nematodes.

Animal performance

Foals grew similarly whether the mares were supplemented or not, and their average daily gains between 1 and 5 months of age were satisfying according to recommendations for this type of horses (Trillaud-Geyl *et al.*, 1990; Miraglia *et al.*, 2006). Their size and bone growth at 11 months of age were also satisfying (Donabédian *et al.*, 2006), and similar between treatments. Mares maintained a high BCS (>3) and slightly increased their liveweight from June to early September. In September, they lost weight in both treatments, which could be explained by a decrease in herbage availability. Such weight loss may be partly explained by a decrease in digestive tract content (Martin-Rosset *et al.*, 1986) since mares' BCS were optimal and did not decrease, which suggests that body reserves were not affected. Our hypothesis that, under unlimited grass growth, lactating mares can be fed with grazed forages only without affecting performance of mares and foals was therefore confirmed.

Doreau *et al.* (1993) have discussed that mares fed a hay-based diet indoors equally allocated nutritional resources between milk yield to foal growth and their own body

condition. Given that mare liveweight, foal growth and foal grazing duration evolved similarly between S and NS mares, we can assume that supplementation did not affect the trade-off between reserve mobilization and foal growth. Whether this would also apply to mares in poorer body condition remains to be investigated as conflicting results have been reported in the literature (Martin-Rosset and Doreau, 1980; Henneke *et al.*, 1981; Doreau *et al.*, 1993). Mares from different breeds could also express different resource allocation patterns, as observed in suckler cows: under limited grass growth cattle breeds with a higher milk yield potential indeed maintained milk yield to the detriment of body condition, whereas those with lower milk potential reduced milk yield but lost less liveweight (D'hour *et al.*, 1995; Farruggia *et al.*, 2008).

Mare daily intake

Non-supplemented mares increased daily GDMI by 24% between mid-June and the end of August, and achieved a higher GDMI compared with supplemented mares during the third grazing cycle. Consequently, net energy intake was similar between S and NS mares during the second and third cycles, and mares met their energy requirements whether they were supplemented or not. Daily grazing time did not significantly differ between S and NS mares, which suggests that NS mares achieved higher herbage intake by increasing biting rate and/or bite mass. Consistently, lactating donkeys and ponies adapted their grazing behaviour to meet their nutritional requirements by increasing biting rate but not grazing time (Lamoot *et al.*, 2005).

In this study, we also confirmed that substitution rates (i.e. kg DM reduction in forage intake/kg DM of concentrates eaten) can be >1 in horses as it has been observed in indoor trials ($+0.3$ to $+2.4$ according to horse type and forage characteristics; INRA, 2012). This is almost never observed in cattle (Delagarde *et al.*, 2001) and suggests that intake regulation could be driven more by the energy metabolism in horses than in ruminants, where intake is mainly under the influence of physical regulation (Särkijärvi *et al.*, 2012). Variability of substitution rates between grazing cycles (-0.3 to $+1.6$) is however difficult to explain since variations in both mare requirements and sward characteristics were confounded.

Our values of voluntary intake by non-supplemented mares, between 22.6 and 28.0 g DM/kg LW per day, are consistent with those measured by Grace *et al.* (2002b) in lactating Thoroughbred mares grazing ryegrass and white clover pastures (24 g DM/kg LW per day on average). They are low compared with those reported by Duncan (1992) for Camargue lactating mares grazing wet grasslands (38 g DM/kg LW per day). In this last experiment, mares probably compensated for poor forage quality (mean DM digestibility of ingested grass = 48.9% *v.* 57.8% in our study) by increasing intake.

Faecal egg excretion

Egg outputs increased throughout the experiment from an average of 150 to 2011 epg, which corresponds to a high infection compared with the 200 epg considered as the cut-off for anthelmintic treatment (Cabaret, 2011). Faecal egg excretion did not differ between S and NS mares. The high herbage intake by NS mares, enabling them to ingest the same amount of energy as S mares from the second cycle, might explain why S mares did not improve their ability to regulate parasite burden. Due to the severe challenges caused by gastrointestinal nematodes of horse performance, welfare and health, it is important to test whether other types of supplementation could reduce horse parasite burden. Feeding small ruminants with protein-rich diets around parturition has been shown to partly alleviate peri-parturient rise in egg excretion (Donaldson *et al.*, 2001; Houdijk *et al.*, 2003). The consumption of tannin-rich legumes such as sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) also affects the rate of establishment of infective larvae when tannins are consumed concomitantly to animal infection: tannins can even reduce worm number and fertility in case of patent infection (Hoste *et al.*, 2012).

Conclusion

Our hypothesis that, under unlimited grass growth, it is possible to feed lactating mares with grazed herbage only without affecting performance of mares and foals was confirmed. Energy supplementation also did not affect the expression of mare immunity against gastrointestinal nematodes. Cereals need water, mineral fertilization and energy for sowing and harvesting. Relying more on grass for feeding horses thus reduces the environmental footprint of horse farming systems, and enables to spare resources and arable land for human food supply. Our results stress that energy supplementation should not be systematic for lactating mares, but rather be optimized according to sward availability and quality.

Acknowledgements

The PhD thesis of C. Collas is funded by the French Horse and Riding Institute (IFCE) and the Animal Physiology and Livestock Farming System (Phase) division of INRA. The authors thank the Carnot Institute for Animal Health (ICSA) for

complementary funding. They are also grateful to the staff of the experimental farm, particularly P. Dupuy, J. Bellonie, J.L. Larry, C. Dubois, to students C. Ceglowski and M. Duclouet for their technical assistance, and to R. Delagarde, J. Agabriel and N. Rossignol for methodological and statistical advice.

References

- Athanasiadou S, Houdijk J and Kyriazakis I 2008. Exploiting synergisms and interactions in the nutritional approaches to parasite control in sheep production systems. *Small Ruminant Research* 76, 2–11.
- Bedoin F and Kristensen T 2013. Sustainability of grassland-based beef production – case studies of Danish suckler farms. *Livestock Science* 158, 189–198.
- Cabaret J 2011. Gestion durable des strongyloses chez le cheval à l'herbe: réduire le niveau d'infestation tout en limitant le risque de résistance aux anthelmintiques. *Fourrages* 207, 215–220.
- Collobert-Laugier C, Hoste H, Sevin C and Dorchies P 2002. Prevalence, abundance and site distribution of equine small strongyles in Normandy, France. *Veterinary Parasitology* 110, 77–83.
- Coop RL and Holmes PH 1996. Nutrition and parasite interaction. *International Journal for Parasitology* 26, 951–962.
- D'hour P, Petit M, Pradel P and Garel JP 1995. Evolution du poids et de la production laitière au pâturage de vaches allaitantes Salers et Limousines dans deux milieux. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 2, 105–108.
- Delagarde R, Peyraud JL and Delaby L 1999. Influence of carbohydrate or protein supplementation on intake, behaviour and digestion in dairy cows strip-grazing low-nitrogen fertilized perennial ryegrass. *Annales de Zootechnie* 48, 81–96.
- Delagarde R, Prache S, D'hour P and Petit M 2001. Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage. *Fourrages* 166, 189–212.
- Donabédian M, Fleurance G, Peronad G, Roberte C, Lepagef O, Trillaud-Geyl C, Legerg S, Ricard A, Bergero D and Martin-Rosset W 2006. Effect of fast vs. moderate growth rate related to nutrient intake on developmental orthopaedic disease in the horse. *Animal Research* 55, 471–486.
- Donaldson J, van Houtert MFJ and Sykes AR 2001. The effect of dietary fish-meal supplementation on parasite burdens of periparturient sheep. *Animal Science* 72, 149–158.
- Doreau M, Boulot S and Chilliard Y 1993. Yield and composition of milk from lactating mares – effect of body condition at foaling. *Journal of Dairy Research* 60, 457–466.
- Drennan MJ and McGee M 2008. Performance of spring-calving beef suckler cows and their progeny on four contrasting grassland management systems. *Livestock Science* 117, 238–248.
- Dumont B, Fortun-Lamothe L, Jouven M, Thomas M and Tichit M 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7, 1028–1043.
- Duncan P 1992. *Horses and grasses: the nutritional ecology of equids and their impact on the Camargue*. Springer-Verlag, New York, USA.
- Edouard N, Fleurance G, Dumont B, Baumont R and Duncan P 2009. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Applied Animal Behaviour Science* 119, 219–228.
- Edouard N, Duncan P, Dumont B, Baumont R and Fleurance G 2010. Foraging in a heterogeneous environment – an experimental study of the trade-off between intake rate and diet quality. *Applied Animal Behaviour Science* 126, 27–36.
- Farruggia A, Dumont B, D'hour P and Egal D 2008. How does protein supplementation affect the selectivity and performance of Charolais cows on extensively grazed pastures in late autumn? *Grass and Forage Science* 63, 314–323.
- Ferre I, Brusa CM, Manzanera E, Rojo-Vázquez FA, Buratovich OF and Mantecón AR 1995. Effect of supplementary feeding on the gastrointestinal strongylid eggs shedding in grazing pregnant Merino ewes. *Journal of Animal and Feed Sciences* 4, 237–245.
- Fleurance G, Duncan P and Mallevalud B 2001. Daily intake and the selection of feeding sites by horses in heterogeneous wet grasslands. *Animal Research* 50, 149–156.
- Fleurance G, Duncan P, Fritz H, Gordon IJ and Grenier-Loustalot MF 2010. Influence of sward structure on daily intake and foraging behaviour by horses. *Animal* 4, 480–485.

- Goering HK and Van Soest PJ 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Agricultural Research Service, Washington, USA.
- Grace ND, Gee EK, Firth EC and Shaw HL 2002a. Digestible energy intake, dry matter digestibility and mineral status of grazing New Zealand Thoroughbred yearlings. *New Zealand Veterinary Journal* 50, 63–69.
- Grace ND, Shaw HL, Gee EK and Firth EC 2002b. Determination of the digestible energy intake and apparent absorption of macroelements in pasture-fed lactating Thoroughbred mares. *New Zealand Veterinary Journal* 50, 182–185.
- Gruner L and Sauve C 1982. The distribution of trichostrongyle infective larvae on pasture and grazing behaviour in calves. *Veterinary Parasitology* 11, 203–213.
- Henneke DR, Potter GD and Kreider JL 1981. Rebreeding efficiency in mares fed different levels of energy during late gestation. In 7th Equine Nutrition Physiology Symposium, Ettrick, VA, USA, pp. 101–104.
- Hoste H, Martinez-Ortiz-De-Montellano C, Manolaraki F, Brunet S, Ojeda-Robertos N, Fourquaux I, Torres-Acosta JFJ and Sandoval-Castro CA 2012. Direct and indirect effects of bioactive tannin-rich tropical and temperate legumes against nematode infections. *Veterinary Parasitology* 186, 18–27.
- Houdijk JGM, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF and Coop RL 2003. Is the allocation of metabolisable protein prioritized to milk production rather than to immune functions in *Teladorsagia circumcincta*-infected lactating ewes? *International Journal for Parasitology* 33, 327–338.
- Iason GR and Elston DA 2002. Groups, individuals, efficiency and validity of statistical analyses. *Applied Animal Behaviour Science* 75, 261–268.
- INRA 2012. Nutrition et alimentation des chevaux (ed. W Martin-Rosset). Editions Quae, Versailles, France.
- Jansson A, Saastamoinen M and Lindberg JE 2012. Forage feeding systems. In *Forages and grazing in horse nutrition*, pp. 289–303. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Kornaš S, Cabaret J, Skalska M and Nowosad B 2010. Horse infection with intestinal helminths in relation to age, sex, access to grass and farm system. *Veterinary Parasitology* 174, 285–291.
- Lamoot I, Vandenberghe C, Bauwens D and Hoffmann M 2005. Grazing behaviour of free-ranging donkeys and Shetland ponies in different reproductive states. *Journal of Ethology* 23, 19–27.
- Love S, Murphy D and Mellor D 1999. Pathogenicity of cyathostome infection. *Veterinary Parasitology* 85, 113–122.
- Martin-Rosset W and Doreau M 1980. Effect of variations in the level of feeding of heavy mares during late pregnancy. In 31st Annual Meeting of EAAP, München, Germany, p. 6.
- Martin-Rosset W, Doreau M and Cloix J 1978. Etude des activités d'un troupeau de poulinières de trait et de leurs poulains au pâturage. *Annales de Zootechnie* 27, 33–45.
- Martin-Rosset W, Doreau M and Espinasse R 1986. Variations simultanées du poids vif et des quantités ingérées chez la jument. *Annales de Zootechnie* 35, 341–350.
- Martin-Rosset W, Vermorel M, Doreau M, Tisserand JL and Andrieu J 1994. The French horse feed evaluation systems and recommended allowances for energy and protein. *Livestock Production Science* 40, 37–56.
- Martin-Rosset W, Vernet J, Dubroecq H, Arnaud G, Picard A and Vermorel M 2008. Variation of fatness and energy content of the body with body condition score in sport horses and its prediction. In 4th EWEN: Nutrition of the exercising horse (eds M Saastamoinen and W Martin-Rosset), EAAP publication No. 125, pp. 167–176. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Menard C, Duncan P, Fleurance G, Georges JY and Lila M 2002. Comparative foraging and nutrition of horses and cattle in European wetlands. *Journal of Applied Ecology* 39, 120–133.
- Mésouchina P, Peyraud JL, Duncan P, Micol D and Trillaud-Geyl C 2000. Ingestion d'herbe au pâturage par le cheval de selle en croissance: effet de l'âge des poulains et de la biomasse d'herbe. *Annales de Zootechnie* 49, 505–515.
- Mésouchina P, Martin-Rosset W, Peyraud JL, Duncan P, Micol D and Boulot S 1998. Prediction of the digestibility of the diet of horses: evaluation of faecal indices. *Grass and Forage Science* 53, 189–196.
- Miraglia N, Saastamoinen M and Martin-Rosset W 2006. Role of pasture in mares and foals management in Europe. In 3rd EWEN: Nutrition and feeding of the broodmares (eds N Miraglia and W Martin-Rosset), EAAP publication No. 120, pp. 279–298. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Morhain B 2011. Systèmes fourragers et d'alimentation du cheval dans différentes régions françaises. *Fourrages* 207, 155–163.
- Penning PD 2004. Animal-based techniques for estimating herbage intake. In *Herbage intake handbook*, 2nd edition (ed. PD Penning), pp. 53–93. The British Grassland Society, Reading, UK.
- Raynaud JP 1970. Etude de l'efficacité d'une technique de coproscopie quantitative pour le diagnostic et le contrôle des infestations parasitaires des bovins, ovins, équins et porcins. *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée* 85, 321–334.
- Särkijärvi S, Sormunen-Cristian R, Heikkilä T, Rinne M and Saastamoinen M 2012. Effect of grass species and cutting time on *in vivo* digestibility of silage by horses and sheep. *Livestock Science* 144, 230–239.
- Scantlebury C, Peachey L, Hodgkinson J, Matthews J, Trawford A, Mulugeta G, Tefera G and Pinchbeck G 2013. Participatory study of medicinal plants used in the control of gastrointestinal parasites in donkeys in Eastern Shewa and Arsi zones of Oromia region, Ethiopia. *BMC Veterinary Research* 9, 179–190.
- Thériez M, Petit M and Martin-Rosset W 1994. Caractéristiques de la conduite des troupeaux allaitants en zones difficiles. *Annales de Zootechnie* 43, 33–47.
- Traversa D, Castagna G, von Samson-Himmelstjerna G, Meloni S, Bartolini R, Geurden T, Pearce MC, Woringner E, Besognet B, Milillo P and D'Espois M 2012. Efficacy of major anthelmintics against horse cyathostomins in France. *Veterinary Parasitology* 188, 294–300.
- Trillaud-Geyl C, Brohier J, Baynast Ld, Baudoin N, Rossier E and Lapierre O 1990. Bilan de productivité sur 10 ans d'un troupeau de juments de selle conduites en plein air intégral. Croissance des produits de 0 à 6 mois. *World Review of Animal Production* 25, 65–70.

Chapitre 2

En dessous de quel niveau de disponibilité en herbe, une complémentation énergétique des juments de selle en lactation devient-elle nécessaire ?

Effets de la complémentation énergétique et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion de la jument

Nous avons précédemment observé que les capacités adaptatives des juments de selle en lactation leurs permettaient de couvrir leurs besoins et d'assurer une croissance satisfaisante de leur poulain à partir de rations 100% herbe dès lors que les conditions de pâturage ne sont pas limitantes. L'objectif de cette étude est de déterminer le seuil de disponibilité en herbe en-dessous duquel une complémentation énergétique des juments devient nécessaire.

L'expérimentation s'est déroulée durant six semaines durant l'été 2013, les animaux pâturant des repousses végétatives de même hauteur dans des parcelles expérimentales dont on faisait varier la surface. Dix-huit juments de selle en lactation ont été utilisées ; neuf étaient complémentées en orge à hauteur de 60% des besoins énergétiques de lactation (C), et les neuf autres n'étaient pas complémentées (NC). Chaque lot était divisé en trois groupes de trois juments afin de réaliser un plan expérimental en carré latin avec trois niveaux de quantités d'herbe offerte QO : faible (F), intermédiaire (I) et élevée (E), soit 35, 52,5 et 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ respectivement. Les animaux étaient conduits en pâturage aux fils avant et arrière (Figure 0). Les quantités d'herbe ingérées par les juments ont été mesurées par la méthode de récolte totale des fèces et la digestibilité de l'herbe a été estimée à partir de la teneur en matières azotées totales des fèces.

L'ingestion journalière des juments n'a pas été affectée par l'interaction concentré × QO ce qui signifie que les juments ont répondu de la même façon aux variations de QO qu'elles soient ou non complémentées. L'ingestion d'herbe (19,9 vs. 21,8 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; $P=0,148$), l'ingestion totale et l'ingestion de matières azotées digestible cheval (MADC) n'étaient jamais significativement différentes entre les juments C et NC. L'ingestion totale digestible (15 vs. 13 g MSD.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; $P<0,01$) et l'ingestion d'énergie nette (167 vs. 135 kJ.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; $P<0,001$) étaient en revanche supérieures pour les juments C par rapport aux juments NC. Quel que soit son mode d'expression, l'ingestion journalière augmentait linéairement avec la disponibilité en herbe, avec une augmentation de l'ingestion d'herbe de 0,13 kg de MS par kg de MS d'herbe offerte. Les apports énergétiques et protéiques ont augmenté linéairement avec l'augmentation de la QO ($P<0,001$) et étaient significativement

supérieurs pour les juments C. Les juments NC n'ont pas couverts leurs besoins énergétiques sur les deux plus faibles niveaux de QO.

L'apport de concentré n'a affecté ni l'ingestion d'herbe des juments, ni leur temps de pâturage. Sur un couvert de bonne qualité, une diminution de la quantité d'herbe offerte de 70 à 35 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ réduit linéairement leur ingestion d'herbe qu'elles reçoivent ou non un complément énergétique. Les effets de la QO et du concentré sont additifs puisque les juments C couvrent leurs besoins énergétiques sur chaque QO, alors que les juments NC sont limitées aux deux plus faibles niveaux de QO. La relation linéaire entre la QO et l'ingestion d'herbe a permis d'estimer à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ le seuil de QO en-dessous duquel les juments en lactation nécessitent une complémentation énergétique pour satisfaire pleinement leurs besoins. Dans nos conditions, ce seuil correspond à une hauteur d'herbe au stick après pâturage de 5,4 cm (4,5 cm à l'herbomètre plateau). De nouvelles études sur les interactions entre le niveau de concentré, la quantité d'herbe offerte et la valeur nutritive de l'herbe seront nécessaires pour affiner les recommandations alimentaires permettant de concilier les performances des chevaux au pâturage et la productivité de la prairie.



Figure 0. Trois juments suitées recevant une quantité d'herbe élevée (au premier plan) et trois juments suitées recevant une quantité d'herbe intermédiaire (au second plan).

Energy supplementation and herbage allowance effects on daily intake in lactating mares¹

C. Collas,*†‡ B. Dumont,†‡ R. Delagarde,§# W. Martin-Rosset,†‡ and G. Fleurance*†‡²

*IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Terrefort, BP207, 49411 Saumur, France; †INRA, UMR1213 Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France; ‡VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP35, 89 avenue de l'Europe, 63370 Lempdes, France; §INRA, UMR1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage, 35590 Saint-Gilles, France; and #Agrocampus Ouest, UMR1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage, 35000 Rennes, France

ABSTRACT: Little is known about how to manage grazing horses, including the thresholds under which energy supplementation is required. Here we investigated the effects of daily herbage allowance (DHA) and energy supplementation (ES) on daily herbage intake in lactating mares of light breeds grazing high-quality regrowth during summer. Three contrasting DHA, low (LOW), medium (MED), and high (HIGH), that is, 35.0, 52.5, and 70.0 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹, respectively, were obtained by adjusting pasture strip width. Eighteen Anglo-Arab and French Saddle lactating mares were either supplemented with 2.6 kg DM barley/d (SUP group; $n = 9$) or left nonsupplemented (NSUP group; $n = 9$) throughout the experiment. For 3 successive 2-wk periods, 3 groups of SUP mares ($n = 3$) and 3 groups of NSUP mares ($n = 3$) grazed each DHA according to a 3 × 3 Latin square design. Pregrazing sward surface height (SSH) was similar between treatments (26.6 cm), but postgrazing SSH differed significantly between each DHA (2.9, 4.4, and 5.7 cm for LOW, MED, and HIGH, respectively;

$P < 0.001$). Herbage DMI (HDMI) increased linearly from 18.5 to 23.4 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ with increasing DHA (i.e., 0.13 kg DM eaten/kg DM of herbage offered; $P < 0.001$) independently of ES and with no significant ES × DHA interaction. This increase in HDMI resulted from an increase in grazing time between LOW (961 min/d) and MED and HIGH (1,021 min/d; $P < 0.01$) and from an increase in intake rate between LOW and MED (11.8 g DM/min) and HIGH (13.6 g DM/min; $P < 0.01$). Total digestible DMI (TDDMI) and NE intake (NEI) increased linearly from 12.3 to 15.2 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ and from 136.6 to 165.8 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ with increasing DHA ($P < 0.001$), respectively. Total digestible DMI and NEI were significantly lower for NSUP than for SUP mares: 12.5 vs. 14.9 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ ($P < 0.01$) and 134.6 vs. 166.5 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ ($P < 0.001$), respectively. Whereas SUP mares always met their energy requirements, NSUP mares no longer met theirs when DHA fell below 66 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ (i.e., 39 kg DM·mare⁻¹·d⁻¹).

Key words: concentrate, grazing, horse, nutritional requirements, sward availability

© 2015 American Society of Animal Science. All rights reserved.

J. Anim. Sci. 2015.93:1–10
doi:10.2527/jas2015-8447

¹The PhD thesis of Claire Collas is funded by the French Horse and Riding Institute (IFCE) and the Animal Physiology and Livestock Farming System (Phase) division of INRA. We are grateful to the staff of the experimental farm of the IFCE for their technical assistance: Laurence Wimel, Patrice Dupuy, Joseph Bellonie, Ludivine Collon, Jacques Boulanger, Claude Larry, Cédric Dubois, and Patrick Paucard. We also thank Frédéric Anglard and Francis Decuq from INRA UMR1213 and students Nissirlany Cardoso Leal and Hélène Macé.

²Corresponding author: geraldine.fleurance@clermont.inra.fr
Received August 27, 2014.
Accepted March 4, 2015.

INTRODUCTION

Grazed pastures are known as the cheapest source of nutrients for domestic herbivores if accurately managed (e.g., horses [Micol and Martin-Rosset, 1995] and dairy cows [Peyraud and Delaby, 2001]). Under strip or rotational grazing, DMI and animal performance are primarily controlled by daily herbage allowance (DHA; Wales et al., 1998; Pérez-Prieto and Delagarde, 2013). In ruminants, the relationship is curvilinear,

with herbage intake increasing at a declining rate with increasing DHA (Dalley et al., 1999; Pérez-Prieto and Delagarde, 2013). Under low herbage allowance, concentrate supplementation increases total digestible DMI and performance (Delaby et al., 2001), whereas the response is low at high herbage allowance due to substitution between herbage and concentrate (Stockdale, 2000; Doyle et al., 2005). In spite of the increasing numbers of light horses in the last 30 to 40 yr (American Horse Council, 2005; European Horse Network, 2010), little is known about how to feed them at pasture (but see Mésochina et al. [2000], Grace et al. [2002a], and Edouard et al. [2009, 2010] for growing horses). Lactating mares are, therefore, commonly supplemented with concentrate feed at pasture to ensure their performance. Collas et al. (2014), however, observed that under unlimited herbage conditions, the adaptive capacities of mares of light breeds enabled them to meet their requirements between the first and the fifth month of lactation and to produce foals with a satisfactory growth and conformation while relying on only herbage. In the present study, we set out to determine the herbage allowance threshold under which energy supplementation (ES) is required to feed lactating mares of light breeds on high-quality regrowth.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in accordance to the national legislation on animal care (Certificate of Authorization to Experiment on Living Animals delivered by the Regional Ethic Committee for Animal Experimentation of Limousin, number 10-2013-10, Ministry of Agriculture, Food and Forestry, Limoges, France).

Treatments and Experimental Design

The experiment was conducted from 22 June to 2 August 2013 at the experimental farm of the French Horse and Riding Institute (IFCE) in Chamberet, France (01°43'14" E, 45°35'03" N, and 440 m altitude). We used 18 lactating mares of light breeds either supplemented with 2.6 kg DM barley/d (SUP; $n = 9$) or left nonsupplemented (NSUP; $n = 9$). Supplemented and NSUP mares were divided into 3 groups of 3 mares and tested in a Latin square design with 3 levels of DHA measured at ground level: low (LOW), medium (MED) and high (HIGH), that is., 35.0, 52.5, and 70.0 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹, respectively. Expecting a voluntary herbage intake of 25 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for NSUP lactating mares (i.e., mean value measured for NSUP lactating mares grazing the same pasture the previous summer; Collas et al., 2014), the high level of DHA (i.e., nonlimiting DHA) was chosen to be 2.5 to 3 times higher according to references obtained in dairy cows (Delagarde

et al., 2011). Medium and low DHA were arbitrary chosen to offer three-fourths and half of the high DHA as a gradient. Each measurement period lasted 2 wk: Period 1 from 22 June to 5 July, Period 2 from 6 July to 19 July, and Period 3 from 20 July to 2 August. Mean daily precipitation (SE) was 1.1 (0.5), 0.7 (0.7), and 8.2 mm/d (0.7) for periods 1, 2, and 3, respectively. Highs and lows for temperature were 20.0 ± 1.1 and 10.4 ± 0.7°C for period 1, 29.1 ± 0.2 and 15.5 ± 0.3°C for period 2, and 29.6 ± 0.9 and 15.1 ± 0.6°C for period 3, respectively.

Animals

Throughout the entire pregnancy, the 18 mares (Anglo-Arab and French Saddle breeds; 5–23 yr old) were collectively fed, according to their mean requirements (INRA, 2015), a diet composed of 43% grass hay (DM, 856 g/kg DM; CP, 79 g/kg DM; and crude fiber [CF], 361 g/kg DM; experimental farm of the IFCE, Chamberet, France), 41% haylage (DM, 614 g/kg; CP, 60 g/kg DM; and CF, 364 g/kg DM; experimental farm of the IFCE, Chamberet, France), and 16% concentrate (61.5% barley and 35% soybean meal [Agricentre Dumas, Espartignac, France] and 3.5% minerals and vitamins [Chauveau Nutrition, Cholet, France]). As voluntary intake is affected by the mare's body condition at foaling (Doreau et al., 1993), the objective was that all mares achieved an optimal BCS of 3 at the start of the experiment, using the INRA scoring scale ranging from 0 (emaciated) to 5 (obese; Martin-Rosset et al., 2008). This optimal BCS corresponds to a BCS of 5 according to the NRC system (Henneke et al., 1983). To estimate the intake capacity of each mare, initial intake measurements were made in March indoors, with grass hay offered ad libitum for 8 d after 6 adaptation days. Intake capacity is defined as the amount of food that a horse should consume to meet its energy requirements and that is permitted by its digestive volume (INRA, 2015). In April, all the mares were treated against gastrointestinal parasites with ivermectin (Eqvalan; Merial, Lyon, France). After foaling, mares were split into 2 groups (SUP and NSUP) balanced for mare intake capacity (23.7 ± 1.4 g DM·kgBW⁻¹·d⁻¹ for SUP and 24.1 ± 1.8 g DM·kgBW⁻¹·d⁻¹ for NSUP), foaling date (14 April to 31 May for SUP [i.e., 47.2 ± 4.6 lactating days at the start of the experiment] and 26 April to 9 June for NSUP: [i.e., 40.3 ± 5.7 lactating days at the start of the experiment]), BCS (3.2 ± 0.2 for SUP and 3.1 ± 0.2 for NSUP [i.e., BCS between 5 and 6 according to Henneke et al., 1983]), BW at foaling (547.2 ± 14.4 kg for SUP and 538.0 ± 10.4 kg for NSUP), height at withers (163.3 ± 1.3 cm for SUP and 161.9 ± 0.9 cm for NSUP), and age (8.6 ± 1.9 yr old for SUP and 6.8 ± 0.9 yr old for NSUP). The 18 mares were, therefore, at

2, 2.5, and 3 mo of lactation, on average, during the first, second, and third experimental periods, respectively.

From 22 June to 2 August, SUP mares received a daily supplement of 2.6 kg DM of rolled barley (Table 1; Agricentre Dumas) at pasture, which accounted for 63% of energy requirements for their mean stage of lactation (i.e., 2.5 mo; INRA, 2015; i.e., 67% according to the NRC [2007] feed evaluation system). During the second week of each period, NSUP mares were fed 260 g DM of rolled barley daily; the 18 mares ate 100 g of small colored plastic balls (1 color per mare) mixed with the barley to individualize feces at pasture (see Intake Measurements). All the mares were accustomed to being individually fed with barley at pasture by the week before measurements began. They were weighed at the same time of day on the first day of each period (for SUP, 589.3 ± 12.0 , 593.5 ± 13.6 , and 588.8 ± 12.0 kg for LOW, MED, and HIGH, respectively, and for NSUP, 584.5 ± 13.2 , 589.2 ± 12.9 , and 576.1 ± 10.1 kg for LOW, MED, and HIGH, respectively).

Pasture Composition and Grazing Management

Mares and their foals were strip grazed on a fertile permanent pasture (25 species; 60% grass cover). The most abundant species were rough bluegrass (*Poa trivialis*), perennial ryegrass (*Lolium perenne*), white clover (*Trifolium repens*), and dandelion (*Taraxacum officinale*). The pasture was divided into 3 paddocks. One paddock was used for each period and was, therefore, mown beforehand at a different date to ensure identical vegetation stage for measurements. Each paddock was divided into 6 subpaddocks, and each was used by 3 mares and their foals for 1 of the treatments (SUP-LOW, NSUP-LOW, SUP-MED, NSUP-MED, SUP-HIGH, and NSUP-HIGH).

As foals graze after 2 mo of age (INRA, 2015), it was necessary to estimate the amount of herbage they would consume during the second and the third periods so that strip width could be slightly increased. We calculated that foals consumed 5 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ during the second period (mean BW = 135 kg) and 6 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ during the third period (mean BW = 145 kg) by considering foal daily gain and requirements, mares' milk yield, and sward nutritive value (Trillaud-Geyl et al., 1990; INRA, 2015).

The strips of pasture were allocated for 2 d of grazing by moving electric fences. Mares and foals were moved into a new strip of fresh herbage every 2 mornings at 0915 h. Access by mares and foals to the previously grazed strip was prevented by back fencing. This management enabled us to offer the animals identical swards and DHA during the 2-wk period by adjusting strip width to herbage mass. Strip width to be

Table 1. Chemical composition and nutritive value of the supplement (barley)

| Item ^{1,2} | Barley |
|-------------------------------|--------|
| DM, g/kg | 867 |
| Chemical composition, g/kg DM | |
| OM | 974 |
| CP | 116 |
| CF | 52 |
| NDF | 216 |
| ADF | 63 |
| Nutritive value | |
| DM digestibility, g/kg DM | 81 |
| NE, MJ/kg DM | 10.7 |
| HDCP, g/kg DM | 82 |

¹CF = crude fiber; HDCP = horse digestible CP.

²From INRA feed tables (INRA, 2015).

offered for 2 d was determined using the mean sward surface height (SSH) measured every 2 d in the next area to be grazed and a SSH-herbage mass regression updated once weekly (see Vegetation Characteristics).

Vegetation Characteristics

Sward surface height and herbage mass were simultaneously measured once weekly in twelve 0.49-m² (70 by 70 cm) quadrats (i.e., 2 per subpaddock), randomly selected among areas of short (11 to 19 cm on average according to period), medium (14 to 24 cm on average according to period), and tall (16 to 30 cm on average according to period) SSH, on the next area to be grazed. Twelve SSH measurements were made before herbage cut in each quadrat by recording the first contact of a stick with the undisturbed sward surface. Herbage cut at ground level with hand shears was weighed and then divided into 2 samples. One sample per quadrat was dried for 24 h at 103°C to determine herbage DM content and then calculate herbage mass and establish the SSH-herbage mass regression. The other sample was dried for 72 h at 60°C and analyzed for CP (Dumas method NF V18-120; AFNOR, 1997), cellulose (CF; Weende method NF V03-040; AFNOR, 1993), and NDF and ADF (Goering and Van Soest, 1970). Thirty pregrazing SSH measurements were made in each subpaddock before the animals entered so that strip width could be determined using the SSH-herbage mass regression according to the targeted low, medium, and high DHA. Postgrazing SSH was also measured every 2 d with 15 random points per strip.

Daily Intake and Energy and Protein Balances

Daily herbage DMI (HDMI) was measured for each mare during the last 4 d of each period as

Table 2. Daily offered area and characteristics of herbage on offer for grazing according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])

| Item ¹ | SUP | | | NSUP | | | RMSE ² | P-value | | | | |
|--|------|------|-------|------|------|-------|-------------------|---------|--------|----------|------------------|-------------------|
| | LOW | MED | HIGH | LOW | MED | HIGH | | ES | DHA | ES × DHA | Lin ³ | Quad ³ |
| DHA, g DM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 35.0 | 52.5 | 70.0 | 35.0 | 52.5 | 70.0 | – | – | – | – | – | – |
| DHA, kg DM·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 20.6 | 30.9 | 41.2 | 20.6 | 30.9 | 41.2 | – | – | – | – | – | – |
| DOA, m ² ·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 59.2 | 90.2 | 122.3 | 65.1 | 86.1 | 121.2 | 19.0 | 0.972 | <0.001 | 0.438 | <0.001 | 0.477 |
| Sward surface height, cm | | | | | | | | | | | | |
| Pregrazing | 27.6 | 25.9 | 28.2 | 23.7 | 27.0 | 27.3 | 6.7 | 0.295 | 0.377 | 0.225 | 0.560 | 0.460 |
| Postgrazing | 2.8 | 4.6 | 5.8 | 3.1 | 4.1 | 5.6 | 1.5 | 0.699 | <0.001 | 0.422 | <0.001 | <0.001 |
| Pregrazing HM, t DM/ha | 3.86 | 3.62 | 3.86 | 3.38 | 3.82 | 3.86 | 0.70 | 0.448 | 0.281 | 0.077 | 0.334 | 0.933 |
| DM, g/kg | 236 | 259 | 249 | 264 | 255 | 232 | 0.05 | 0.865 | 0.687 | 0.459 | 0.792 | 0.607 |
| Sward quality, g/kg DM | | | | | | | | | | | | |
| OM | 899 | 897 | 876 | 889 | 908 | 896 | 0.04 | 0.368 | 0.193 | 0.245 | 0.430 | 0.123 |
| CP | 144 | 156 | 163 | 145 | 147 | 154 | 0.03 | 0.443 | 0.237 | 0.837 | 0.176 | 0.960 |
| CF | 268 | 245 | 230 | 248 | 256 | 265 | 0.05 | 0.509 | 0.800 | 0.274 | 0.505 | 0.908 |
| NDF | 571 | 540 | 545 | 555 | 577 | 566 | 0.04 | 0.340 | 0.911 | 0.289 | 0.670 | 0.939 |
| ADF | 321 | 298 | 301 | 311 | 324 | 319 | 0.03 | 0.221 | 0.841 | 0.235 | 0.617 | 0.876 |

¹DOA = daily offered area; HM = herbage mass; CF = crude fiber.

²RMSE = root mean square error.

³Lin = linearity of DHA effect; Quad = quadraticity of DHA effect.

$$\text{HDMI} = \text{FO}/(1 - \text{HDMD}),$$

in which **FO** is the dry weight of fecal output over 24 h attributable to herbage and **HDMD** is the DM digestibility of ingested herbage expressed as a decimal value.

In horses, feces are dry enough to collect them without losses or contamination. Fecal output was, therefore, determined by total fecal collection, which is the reference method (Penning, 2004) previously used in a large number of horse studies (e.g., Duncan, 1992; Mésochina et al., 2000; Grace et al., 2002a,b; Edouard et al., 2009, 2010; Collas et al., 2014). Feces were collected once a day over 4 successive days after the paddock had been cleaned of feces. Individualization of feces was made possible identifying the small plastic balls of different colors (1 color per mare) that were mixed with the barley (see Animals). Total daily fecal outputs were individually weighed, and a subsample was dried for 72 h at 80°C to determine fecal DM and CP contents. Fecal DM output attributable to herbage was then calculated by subtracting the indigestible DM attributable to barley (INRA, 2015; Table 1) from the total fecal DM output (Delagarde et al., 1999; Collas et al., 2014).

Dry matter digestibility of ingested herbage was estimated from fecal CP content attributable to herbage according to the equation of Mésochina et al. (1998):

$$\text{HDMD} = 0.734 - (17.872/\text{fecal CP content}),$$

in which fecal CP content is expressed in grams per kilogram DM.

Mésochina et al. (1998) stressed that the conditions of applicability of this equation are for herbage CP contents greater than 70 g/kg DM, which limits N recycling by horses. This was always the case in the present experiment (Table 2). The fecal CP content attributable to herbage was calculated by dividing the amount of fecal CP attributable to herbage by the fecal DM output attributable to herbage. The amount of fecal CP attributable to herbage was calculated by subtracting the amount of fecal CP attributable to barley from the total CP amount excreted from feces (Delagarde et al., 1999; Collas et al., 2014). The amount of fecal CP attributable to barley was calculated from the CP content of barley and from the apparent CP digestibility of barley (INRA, 2015; Table 1).

Total DMI (**TDMI**) was calculated as the sum of HDMI and barley DMI (**BDMI**) recorded daily when mares were supplemented. Daily total digestible DMI (**TDDMI**) was then calculated as the sum of herbage digestible DMI and barley digestible DMI:

$$\text{TDDMI} = \text{HDMI} \times \text{HDMD} + \text{BDMI} \times \text{BDMD},$$

in which **BDMD** is the DM digestibility of barley (INRA, 2015; Table 1).

Net energy intake was estimated from herbage and barley NE contents according to the INRA (INRA, 2015) feed evaluation system:

$$\text{herbage NE content} = [(0.825 - 0.0011 \times \text{CF} + 0.0006 \times \text{CP}) \times 2,250] \times 4.18,$$

in which herbage NE content is expressed in kilojoules per kilogram DM, CF and CP are expressed in grams per kilogram DM, and 2,250 is the NE content (kcal) of 1 kg of fresh standard barley (INRA, 2015).

Horse digestible CP (**HDCP**) intake was estimated from herbage and barley digestible CP (**DCP**) contents according to the INRA (INRA, 2015) feed evaluation system:

$$\text{herbage DCP content} = (-74.52 + 0.9568 \times \text{CP} + 0.1167 \times \text{CF}) \times 0.9,$$

in which herbage DCP content is expressed as grams DCP per kilogram DM and CP and CF are expressed in grams per kilogram DM.

Individual consumptions of energy and protein were then expressed in relation to the mares' requirements at each period. Mares' requirements were estimated using their reference BW at foaling, their stage of lactation, and INRA nutrient requirements tabulated per BW classes (INRA, 2015).

Individual energy and protein intakes were also calculated according to the NRC (2007) feed evaluation system and were expressed in relation to the mares' requirements using tabulated NRC requirements and the same procedure as previously described.

Digestible energy intake was estimated from herbage and barley DE contents according to the NRC (2007) feed evaluation system:

$$\text{herbage DE content} = (4.22 - 0.11 \times \text{ADF} + 0.0332 \times \text{CP} + 0.00112 \times \text{ADF}^2) \times 4.18 \times 10^3 \text{ and}$$

$$\text{barley DE content} = (4.07 - 0.055 \times \text{ADF}) \times 4.18 \times 10^3,$$

in which herbage DE content and barley DE content are expressed in kilojoules per kilogram DM and ADF and CP are expressed as a percentage of DM.

Crude protein intake was estimated from herbage and barley CP contents according to the NRC (2007) feed evaluation system.

Grazing Behavior

Daily grazing time of the mares was recorded over 48 h in the middle of the first week of each period using Ethosys collars (Greenway System GmbH, Frankfurt, Germany) to record head position and movements (1 recording every 5 min; Scheibe et al., 1998). Animals were accustomed to wearing the collars by the week before measurements began. We also evaluated grazing time during the first 12 h (from 0915 to 2115 h),

after the animals entered a new strip, and during the last 12 h (from 2115 to 0915 h), before they left it. Herbage intake rate was estimated by dividing daily herbage intake by daily grazing time.

Statistical Analyses

Data were analyzed using the PROC GLM procedure of SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC). Sward and grazing management data were analyzed in a model that included the effects of period, DHA, ES, and the ES \times DHA interaction. Animal data were analyzed in a model that included the effects of period, DHA, ES, mare nested within ES (as mares were either supplemented or not for all the experiment), and the ES \times DHA interaction. Effect of ES was tested separately using the mare effect as residual term. Orthogonal contrasts were used to test whether the DHA effect was linear or quadratic. Differences between DHA were investigated using the Tukey correction for multiple comparisons; the significance threshold was $P < 0.05$.

RESULTS

Vegetation Characteristics

Pregrazing SSH (26.6 cm) and pregrazing herbage mass (3.73 t DM/ha) were similar across all the treatments (Table 2). The 3 contrasting DHA chosen were obtained by linearly increasing the area offered daily (Table 2). Postgrazing SSH was not affected by ES and increased by 0.13 cm/kg of dry herbage offered (linear and quadratic effects, $P < 0.001$; Table 2). Herbage DM (249 g/kg), OM (895 g/kg DM), CP (151 g/kg DM), CF (252 g/kg DM), NDF (559 g/kg DM), and ADF (312 g/kg DM) contents were independent of ES and DHA levels (Table 2).

Daily Intake and Energy and Protein Balances

None of the intake variables were affected by ES \times DHA (Table 3; Fig. 1), which means that the mares responded similarly to DHA variations whether supplemented or not. Fecal output attributable to herbage (FO), HDMD, HDMI, herbage digestible DMI (**HDDMI**), TDMI, and HDCP intake did not significantly differ between SUP and NSUP mares, despite a tendency for FO to be greater in NSUP mares and for TDMI to be greater in SUP mares (Table 3; Fig. 1). Mares ate all the barley offered during the experiment. Consequently, SUP mares achieved greater TDDMI (14.9 g digestible DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for SUP and 12.5 g DDM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for NSUP; $P < 0.01$) and NE intake (**NEI**; 166.5 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ for SUP and 134.6 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ for NSUP; $P < 0.001$) than NSUP mares (Table 3; Fig. 1). Dry matter digestibility of ingested herbage increased linearly

Table 3. Mares' daily intake according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])

| Item ¹ | SUP | | | NSUP | | | RMSE ² | P-value | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|-------------------|---------|--------|----------|------------------|-------------------|
| | LOW | MED | HIGH | LOW | MED | HIGH | | ES | DHA | ES × DHA | Lin ³ | Quad ³ |
| FO, g DM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 7.8 | 8.4 | 9.7 | 8.5 | 9.8 | 10.7 | 0.6 | 0.064 | <0.001 | 0.635 | <0.001 | 0.669 |
| HDMD, g/kg DM | 560 | 566 | 570 | 551 | 556 | 557 | 0.5 | 0.146 | <0.05 | 0.754 | <0.01 | 0.599 |
| HDMI, g DM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 17.9 | 19.2 | 22.5 | 19.0 | 22.0 | 24.3 | 2.4 | 0.148 | <0.001 | 0.590 | <0.001 | 0.655 |
| HDMI, kg DM·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 10.6 | 11.4 | 13.2 | 11.1 | 12.9 | 14.0 | 1.4 | 0.241 | <0.001 | 0.568 | <0.001 | 0.976 |
| HDDMI, g DDM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 10.1 | 10.9 | 12.8 | 10.5 | 12.3 | 13.6 | 1.3 | 0.281 | <0.001 | 0.561 | <0.001 | 0.661 |
| HDDMI, kg DM·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 5.9 | 6.5 | 7.5 | 6.1 | 7.2 | 7.8 | 0.8 | 0.390 | <0.001 | 0.543 | <0.001 | 0.945 |
| TDMI, g DM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 22.4 | 23.7 | 27.0 | 19.5 | 22.5 | 24.8 | 2.4 | 0.118 | <0.001 | 0.585 | <0.001 | 0.634 |
| TDMI, kg DM·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 13.2 | 14.1 | 15.8 | 11.4 | 13.2 | 14.2 | 1.4 | 0.083 | <0.001 | 0.568 | <0.001 | 0.976 |
| TDDMI, g DDM·kg BW ⁻¹ ·d ⁻¹ | 13.7 | 14.5 | 16.5 | 10.9 | 12.6 | 14.0 | 1.4 | <0.01 | <0.001 | 0.542 | <0.001 | 0.614 |
| TDDMI, kg DM·mare ⁻¹ ·d ⁻¹ | 8.1 | 8.6 | 9.7 | 6.3 | 7.4 | 8.0 | 0.8 | <0.01 | <0.001 | 0.543 | <0.01 | 0.973 |

¹FO = fecal output attributable to herbage; HDMD = DM digestibility of ingested herbage; HDMI = herbage DMI; HDDMI = herbage digestible DMI; DDM = digestible DM; TDMI = total DMI; TDDMI = total digestible DMI.

²RMSE = root mean square error.

³Lin = linearity of DHA effect; Quad = quadratic of DHA effect.

with increasing DHA and was significantly lower on LOW than on HIGH (556 vs. 564 g/kg DM). Fecal output attributable to herbage (8.2, 9.1, and 10.2 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), HDMI (18.4, 20.6, and 23.4 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), HDDMI (10.3, 11.6, and 13.2 g DDM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), TDMI (20.9, 23.1, and 25.9 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), TDDMI (12.3, 13.6, and 15.2 g DDM·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), NEI (136.6, 149.3, and 165.8 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively), and HDCP intake (1.9, 2.1, and 2.3 g HDCP·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively) increased linearly with increasing DHA ($P < 0.001$), with significant differences between each DHA (Table 3; Fig. 1). Mares increased their HDMI and their TDMI by 0.13 kg DM/kg dry herbage offered ($P < 0.001$). Mares' consumption of energy and protein in relation to their requirements increased linearly with increasing DHA ($P < 0.001$), although no significant difference was observed for protein requirements between LOW and MED (Fig. 2). Supplemented mares met a higher proportion of both their energy ($P < 0.001$) and protein ($P = 0.051$) requirements than NSUP mares (Fig. 2). Supplemented mares always met their energy requirements, but NSUP mares fell short at the low and medium DHA (Fig. 2). All the mares met their protein requirements irrespective of DHA and ES (Fig. 2). The same conclusions were obtained when expressing our results according to the NRC system: SUP and NSUP mares increased their DE intakes with DHA (for SUP mares, 247.6 ± 12.3, 260.2 ± 8.6, and 293.0 ± 14.4 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively, and for

NSUP mares, 196.4 ± 11.1, 226.7 ± 12.6, and 249.4 ± 9.8 kJ·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively) but NSUP mares did not meet their energy requirements on low and medium DHA (for SUP mares, 104, 110, and 123% for LOW, MED, and HIGH, respectively, and for NSUP mares, 82, 95, and 102% for LOW, MED, and HIGH, respectively). Consumption of protein (for SUP mares, 3.3 ± 0.2, 3.4 ± 0.1, and 3.9 ± 0.2 g CP·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively, and for NSUP mares, 2.9 ± 0.2, 3.4 ± 0.2, and 3.7 ± 0.2 g CP·kg BW⁻¹·d⁻¹ for LOW, MED, and HIGH, respectively) always met the mares' requirements whatever the treatment (119 to 142% for SUP mares according to DHA and 106 to 133% for NSUP mares according to DHA).

Grazing Behavior

Mares' grazing behavior was affected by neither ES nor ES × DHA (Table 4). Both SUP and NSUP mares grazed significantly longer on medium and high than on low DHA (1,021 vs. 962 min/d; $P < 0.01$; Table 4). The lower daily grazing time spent by mares on LOW resulted from a significantly lower activity from 2115 to 0915 h (359 vs. 420 min; $P < 0.01$; Table 4), with DHA mainly influencing grazing activity on the second day on a strip (Fig. 3). All the mares achieved a significantly greater herbage intake rate when DHA was highest than with MED and LOW (13.6 vs. 11.8 g DM/min; $P < 0.01$; Table 4).

DISCUSSION

The aim of this experiment was to assess the effect of herbage allowance and ES on herbage intake by

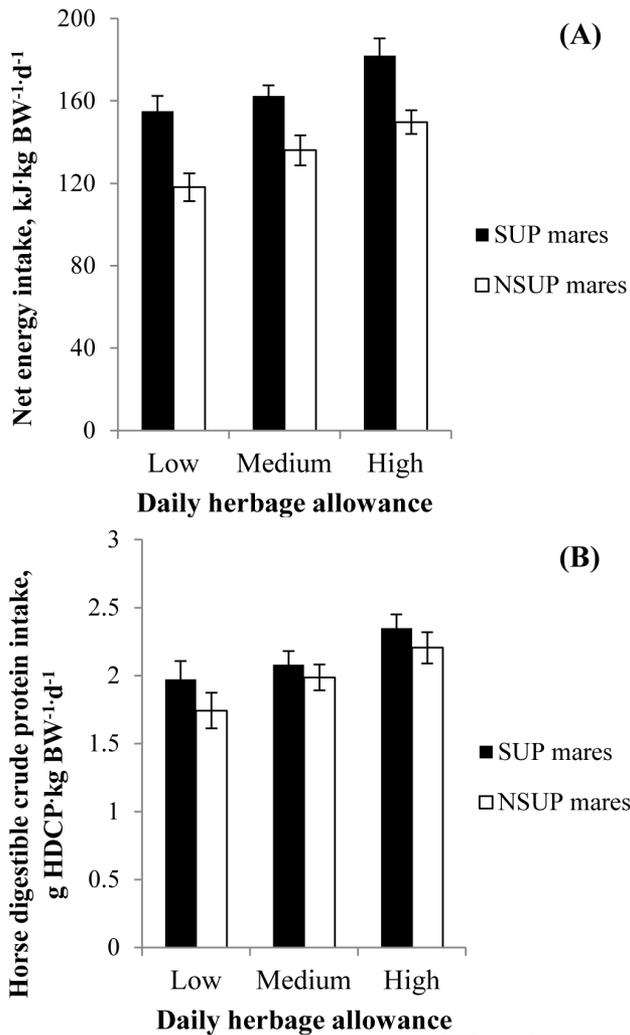


Figure 1. (A) Net energy intake according to energy supplementation (ES; $P < 0.001$) and daily herbage allowance (DHA; $P < 0.001$; mean \pm SE; ES \times DHA interaction, $P > 0.05$; linearity of DHA effect, $P < 0.01$; and quadraticity of DHA effect, $P > 0.05$). (B) Horse digestible CP intake according to ES ($P > 0.05$) and DHA ($P < 0.001$; mean \pm SE; ES \times DHA interaction, $P > 0.05$; linearity of DHA effect, $P < 0.001$; and quadraticity of DHA effect, $P > 0.05$). SUP = supplemented with 2.6 kg DM barley/d; NSUP = nonsupplemented; HDCP = horse digestible CP.

lactating mares. Most of the work showing that these factors are major determinants of DMI, grazing time, and animal performance has, so far, been performed with ruminants (mainly dairy cows), and therefore, it is not known whether the same rules apply to horses.

Daily Herbage Allowance

The 3 DHA used in this experiment resulted in contrasting HDMI by lactating mares ranging from 77 to 98% of their intake capacity (i.e., intake measurements performed in March indoors, with grass hay offered ad libitum; see Materials and Methods). The effect of DHA on HDMI was linear, and we could calculate an increase of 0.13 kg DM eaten by mares/kg DM of herbage offered at ground level. This value is close to that

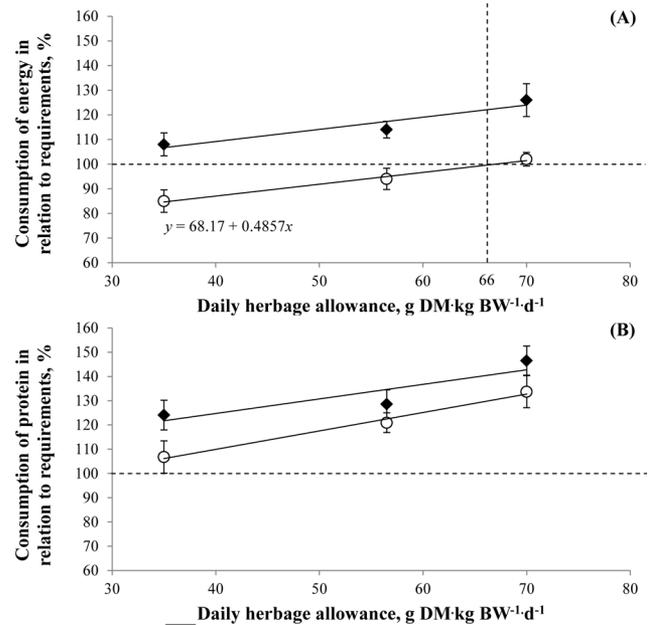


Figure 2. (A) Consumption of energy in relation to requirements according to energy supplementation (ES; \blacklozenge = supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] mares and \circ = nonsupplemented [NSUP] mares; $P < 0.001$) and daily herbage allowance (DHA; $P < 0.001$) using INRA (INRA, 2015) recommendations (ES \times DHA interaction, $P > 0.05$; linearity of DHA effect, $P < 0.01$; and quadraticity of DHA effect, $P > 0.05$). From the linear effect of DHA on herbage DMI we estimate at 66 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ (i.e., 39 kg DM·mare⁻¹·d⁻¹) the DHA threshold under which ES is needed for lactating mares to meet their energy requirements on high-quality regrowth. (B) Consumption of protein in relation to requirements according to ES (\blacklozenge = SUP mares and \circ = NSUP mares; $P = 0.051$) and DHA ($P < 0.001$) using INRA (INRA, 2015) recommendations (ES \times DHA interaction, $P > 0.05$; linearity of DHA effect, $P < 0.001$; and quadraticity of DHA effect, $P > 0.05$).

reported by Peyraud and Delagarde (2013) for dairy cows (i.e., 0.15 kg DM eaten/kg DM of herbage offered) within the typical range of herbage allowance for dairy systems. Herbage intake by growing horses (1 and 2 yr old) was unaffected by DHA in the range of 130 to 200 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ (Mésochina et al., 2000), which suggests that herbage intake reaches a plateau for high DHA. No study on grazing horses has been reported with the same range of DHA as that tested in this experiment. Conversely, under low DHA conditions, mares grazed closer to the ground (2.9 cm on LOW vs. 5.7 cm on HIGH) and probably ingested a greater proportion of fiber, which decreased herbage digestibility by 10 g/kg DM from high to low DHA, that is, a 2% relative variation. However, the decrease in HDDMI observed between HIGH and LOW (-22%) was mostly explained by a decrease in HDMI (-21%), with regrowth quality remaining high (15% DM for CP and 56% DM for NDF). Our results are entirely consistent with those previously reported for dairy cows grazing at 3 DHA (Peyraud et al., 1996): herbage OM digestibility linearly decreased by 2% from high to low DHA, with a simultaneous curvilinear decrease in herbage intake (-4% between high and medium DHA

Table 4. Grazing time and herbage intake rate according to energy supplementation (ES; supplemented with 2.6 kg DM barley/d [SUP] and nonsupplemented [NSUP]) level and daily herbage allowance (DHA; low [LOW], medium [MED], and high [HIGH])

| Item | SUP | | | NSUP | | | RMSE ¹ | P-value | | | | |
|-----------------------------------|------|-------|-------|------|-------|------|-------------------|---------|-------|----------|------------------|-------------------|
| | LOW | MED | HIGH | LOW | MED | HIGH | | ES | DHA | ES × DHA | Lin ² | Quad ² |
| Grazing time | | | | | | | | | | | | |
| Total, min/d | 956 | 1,018 | 1,050 | 965 | 1,028 | 989 | 52.7 | 0.673 | <0.01 | 0.115 | <0.05 | <0.05 |
| First 12 h, ³ min | 661 | 656 | 654 | 631 | 635 | 632 | 12.4 | 0.182 | 0.848 | 0.597 | 0.599 | 0.832 |
| Last 12 h, ⁴ min | 359 | 438 | 439 | 357 | 397 | 406 | 46.5 | 0.317 | <0.01 | 0.508 | <0.01 | 0.073 |
| Herbage IR, ⁵ g DM/min | 11.4 | 11.3 | 12.9 | 11.7 | 12.6 | 14.3 | 1.6 | 0.149 | <0.01 | 0.682 | <0.01 | 0.249 |

¹RMSE = root mean square error.

²Lin = linearity of DHA effect; Quad = quadraticity of DHA effect.

³First 12 h in a strip from 0915 to 2115 h.

⁴Last 12 h in a strip from 2115 to 0915 h.

⁵IR = intake rate.

vs. -15% between medium and low DHA). In the present experiment, mares first decreased their intake rate from high to medium DHA (-12%) and then their daily grazing time from medium to low DHA (-6%). At a low DHA, the mares' grazing activity was mainly reduced during the last hours of their presence on a strip, probably as a result of limiting grazing conditions such as low postgrazing sward height. Here, a reduction in DHA of 50% decreased pasture intake per mare by 21% and increased pasture intake per unit area by 54%. This reveals that grazing management designed to maximize individual animal performance is unlikely to maximize pasture utilization rate. Additional studies, therefore, are needed to establish the relationship between herbage allowance, animal intake, and pasture utilization by lactating mares to reach the best equilibrium between individual performance and efficient pasture utilization (Peyraud and Delagarde, 2013).

Energy Supplementation

Energy supplementation affected neither mares' herbage intake nor their grazing behavior. The substitution rate (i.e., kg DM reduction in herbage intake/kg DM of concentrate eaten) was, therefore, close to zero (0.36 ± 0.12), which could be explained by the relatively restricted pasture conditions. Substitution rates have been reported to be higher in dairy cows when DHA is high (Meijs and Hoekstra, 1984; Grainger and Mathews, 1989; Bargo et al., 2002; McEvoy et al., 2008). Literature is scarce on substitution between forages and concentrate in horses. However, substitution has been observed at the trough when horses received forages ad libitum, which may indicate a general trend (Agabriel et al., 1982; Martin-Rosset and Doreau, 1984; Martin-Rosset and Dulphy 1987; Winsco et al., 2013; INRA, 2015). The substitution rate calculated in the present experiment (i.e., 0.36 on average) is, therefore,

logically among the lowest values reported for horses fed indoors, which are between 0.3 and 2.4 according to forage type and quality (INRA, 2015). Here, mares receiving barley thus achieved a greater total daily intake (i.e., +19% TDDMI and +24% NEI) than NSUP mares. Supplemented mares met their energy requirements whatever the DHA, whereas NSUP mares fell short of their requirements at low or medium DHA: 85 and 94%, respectively, using the INRA system or 82 and 95%, respectively, using the NRC system. From the linear effect of DHA on HDMI, we estimate at $66 \text{ g DM} \cdot \text{kg BW}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (i.e., $39 \text{ kg DM} \cdot \text{mare}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) the DHA threshold under which ES is needed for lactating mares to meet their energy requirements on high-quality regrowth (Fig. 2). This DHA threshold corresponds to a postgrazing sward height of 5.4 cm considering the positive linear relationship between DHA and postgrazing SSH. A postgrazing SSH of 5 cm could, therefore, be considered a rough reference indicator for this type of pasture and grazing management. However, because postgrazing SSH is usually linked to the pregrazing SSH under rotational grazing, at least in dairy cows (Pérez-Prieto et al., 2013), it would be worthwhile extending this analysis to a wider range of pregrazing sward structures.

Energy Supplementation × Daily Herbage Allowance Interaction

We did not find any effect of the ES × DHA interaction on herbage intake using an amount of barley representative of what is observed in commercial farms. However, on the high-DHA treatment, mares may have decreased herbage intake if they had received more concentrate. Increasing the proportion of concentrate from 15 to 64% of TDMI in growing horses fed maize silage offered ad libitum decreased silage intake (Agabriel et al., 1982). Also, in a previous grazing study in which supplemented mares received 2.6 kg DM barley, their herbage intake was

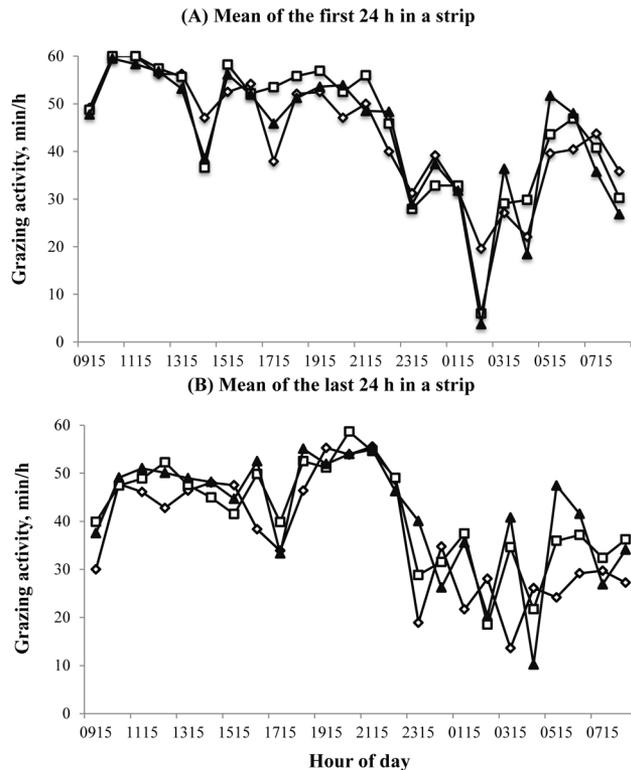


Figure 3. Daily pattern of grazing activity of mares during the 2 d of grazing in a strip according to daily herbage allowance (◇ = low, □ = medium, and ▲ = high). (A) Mean of the first 24 h in a strip and (B) mean of the last 24 h in a strip (mean grazing time in a strip: low vs. medium, $P < 0.05$; low vs. high, $P < 0.05$; and medium vs. high, $P > 0.05$).

significantly lower than that of NSUP mares when DHA was greater than in this study ($124 \text{ g DM} \cdot \text{kg BW}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; Collas et al., 2014). These different results suggest possible ES \times DHA interactions outside the range tested in the present experiment, with substitution rate being positively related to DHA as observed in ruminant studies.

Conclusion

For lactating mares grazing high-quality regrowth during the summer, increasing DHA from 35 to 70 g DM·kg BW⁻¹·d⁻¹ linearly increased HDMI (0.13 kg DM eaten/kg DM of herbage offered), whether or not mares were supplemented with barley. The effects of DHA and ES were additive, so that supplemented mares always met their energy requirements, whereas NSUP mares were underfed at low or medium DHA. The positive linear relationship we established between DHA and HDMI enables us to estimate the herbage allowance threshold ($66 \text{ g DM} \cdot \text{kg BW}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ or $39 \text{ kg DM} \cdot \text{mare}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) under which lactating mares should be supplemented with barley to meet their energy requirements. Further investigation of the interactions between concentrate supplementation level, herbage allowance, and herbage nutritive value are needed to improve the efficiency of mare nutrition and maintain a high pasture utilization rate.

LITERATURE CITED

- Agabriel, J., C. Trillaud-Geyl, W. Martin-Rosset, and M. Jussiaux. 1982. Utilisation de l'ensilage de maïs par le poulain de boucherie. (In French.) Bull. Tech. Centre de recherches zootechniques et vétérinaires de Theix, INRA, 49:5-13.
- American Horse Council. 2005. National Economic Impact of the U.S. Horse Industry. <http://www.horsecouncil.org/national-economic-impact-us-horse-industry>. (Accessed 16 June 2014.)
- Association Française de Normalisation (AFNOR). 1993. Produits agricoles et alimentaires: Détermination de la cellulose brute, méthode générale. (In French.) Norme Française NF V03-40, octobre 1993, Afnor, Paris, France.
- Association Française de Normalisation (AFNOR). 1997. NF V18-120, animal feeding stuffs. Determination of nitrogen content. Combustion method (DUMAS). AFNOR Editions, La Plaine Saint-Denis, France.
- Bargo, F., L. D. Muller, J. E. Delahoy, and T. W. Cassidy. 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *J. Dairy Sci.* 85:1777-1792. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74252-5.
- Collas, C., G. Fleurance, J. Cabaret, W. Martin-Rosset, L. Wimel, J. Cortet, and B. Dumont. 2014. How does the suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism in lactating saddle mares? *Animal* 8:1290-1297. doi:10.1017/S175173111400127X.
- Dalley, D. E., J. R. Roche, C. Grainger, and P. J. Moate. 1999. Dry matter intake, nutrient selection and milk production of dairy cows grazing rainfed perennial pastures at different herbage allowances in spring. *Aust. J. Exp. Agric.* 39:923-931. doi:10.1071/EA99022.
- Delaby, L., J. L. Peyraud, and R. Delagarde. 2001. Effect of the level of concentrate supplementation, herbage allowance and milk yield at turn-out on the performance of dairy cows in mid lactation at grazing. *Anim. Sci.* 73:171-181.
- Delagarde, R., P. Faverdin, C. Baratte, and J.-L. Peyraud. 2011. GrazeIn: A model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 2. Prediction of intake under rotational and continuously stocked grazing management. *Grass Forage Sci.* 66:45-60. doi:10.1111/j.1365-2494.2010.00770.x.
- Delagarde, R., J. L. Peyraud, and L. Delaby. 1999. Influence of carbohydrate or protein supplementation on intake, behaviour and digestion in dairy cows strip-grazing low-nitrogen fertilized perennial ryegrass. *Ann. Zootech.* 48:81-96. doi:10.1051/animres:19990201.
- Doreau, M., S. Boulot, and Y. Chilliard. 1993. Yield and composition of milk from lactating mares - Effect of body condition at foaling. *J. Dairy Res.* 60:457-466. doi:10.1017/S0022029900027825.
- Doyle, P. T., S. A. Francis, and C. R. Stockdale. 2005. Associative effects between feeds when concentrate supplements are fed to grazing dairy cows: A review of likely impacts on metabolisable energy supply. *Aust. J. Agric. Res.* 56:1315-1329. doi:10.1071/AR05087.
- Duncan, P. 1992. Horses and grasses: The nutritional ecology of equids and their impact on the Camargue. Springer-Verlag, New York, NY.
- Edouard, N., P. Duncan, B. Dumont, R. Baumont, and G. Fleurance. 2010. Foraging in a heterogeneous environment - An experimental study of the trade-off between intake rate and diet quality. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 126:27-36. doi:10.1016/j.applanim.2010.05.008.

- Edouard, N., G. Fleurance, B. Dumont, R. Baumont, and P. Duncan. 2009. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Appl. Anim. Behav. Sci.* 119:219–228. doi:10.1016/j.applanim.2009.03.017.
- European Horse Network. 2010. The European horse industry in the European regions. www.europeanhorsenetwork.eu/horse-industry-in-europe. <http://www.europeanhorsenetwork.eu/the-horse-industry>. (Accessed 19 March 2015.)
- Goering, H. K., and P. J. Van Soest. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). ARS, Washington, DC.
- Grace, N. D., E. K. Gee, E. C. Firth, and H. L. Shaw. 2002a. Digestible energy intake, dry matter digestibility and mineral status of grazing New Zealand thoroughbred yearlings. *N. Z. Vet. J.* 50:63–69. doi:10.1080/00480169.2002.36252.
- Grace, N. D., H. L. Shaw, E. K. Gee, and E. C. Firth. 2002b. Determination of the digestible energy intake and apparent absorption of macroelements in pasture-fed lactating thoroughbred mares. *N. Z. Vet. J.* 50:182–185. doi:10.1080/00480169.2002.36308.
- Grainger, C., and L. Mathews. 1989. Positive relation between substitution rate and pasture allowance for cows receiving concentrates. *Aust. J. Exp. Agric.* 29:355–360. doi:10.1071/EA9890355.
- Henneke, D. R., G. D. Potter, J. L. Kreider, and B. F. Yeates. 1983. Relationship between condition score physical measurements and body fat percentage in mares. *Equine Vet. J.* 15:371–372. doi:10.1111/j.2042-3306.1983.tb01826.x.
- INRA. 2015. Equine nutrition. INRA nutrient requirements, recommended allowances and feed tables. W. Martin-Rosset, editor.
- Martin-Rosset, W., and M. Doreau. 1984. Consommation d'aliments et d'eau. In: R. Jarrige and W. Martin-Rosset, editors, *Le cheval: Reproduction, sélection, alimentation, exploitation*. (In French.) INRA, Paris, France. p. 333–354.
- Martin-Rosset, W., and J. P. Dulphy. 1987. Digestibility interactions between forages and concentrates in horses: Influence of feeding level – Comparison with sheep. *Livest. Prod. Sci.* 17:263–276. doi:10.1016/0301-6226(87)90071-6.
- Martin-Rosset, W., J. Vernet, H. Dubroeuq, G. Arnaud, A. Picard, and M. Vermorel. 2008. Variation of fatness and energy content of the body with body condition score in sport horses and its prediction. In: *Proc. 4th European Workshop on Equine Nutrition. Nutrition of the Exercising Horse*. EAAP publication no. 125. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. p. 167–176.
- McEvoy, M., E. Kennedy, J. P. Murphy, T. M. Boland, L. Delaby, and M. O'Donovan. 2008. The effect of herbage allowance and concentrate supplementation on milk production performance and dry matter intake of spring-calving dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 91:1258–1269. doi:10.3168/jds.2007-0710.
- Meijs, J. A. C., and J. A. Hoekstra. 1984. Concentrate supplementation of grazing dairy cows. 1. Effect of concentrate intake and herbage allowance on herbage intake. *Grass Forage Sci.* 39:59–66. doi:10.1111/j.1365-2494.1984.tb01665.x.
- Mésochina, P., W. Martin-Rosset, J. L. Peyraud, P. Duncan, D. Micol, and S. Boulot. 1998. Prediction of the digestibility of the diet of horses: Evaluation of faecal indices. *Grass Forage Sci.* 53:189–196. doi:10.1046/j.1365-2494.1998.5320189.x.
- Mésochina, P., J. L. Peyraud, P. Duncan, D. Micol, and C. Trillaud-Geyl. 2000. Ingestion d'herbe au pâturage par le cheval de selle en croissance: Effet de l'âge des poulains et de la biomasse d'herbe. (In French.) *Ann. Zootech.* 49:505–515. doi:10.1051/animres:2000141.
- Micol, D., and W. Martin-Rosset. 1995. Feeding systems for horses on high forage diets in the temperate zone. In: *Proc. 4th International Symposium on the Nutrition of Herbivores. Recent Developments in the Nutrition of Herbivores*. INRA editions, Versailles, France. p. 569–580.
- NRC. 2007. The nutrient requirements of horses, 6th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Penning, P. D. 2004. Animal-based techniques for estimating herbage intake. In: P. D. Penning, editor, *Herbage intake handbook*. 2nd ed. The British Grassland Society, Reading, UK. p. 53–93.
- Pérez-Prieto, L. A., and R. Delagarde. 2013. Meta-analysis of the effect of pasture allowance on pasture intake, milk production, and grazing behavior of dairy cows grazing temperate grasslands. *J. Dairy Sci.* 96:6671–6689. doi:10.3168/jds.2013-6964.
- Pérez-Prieto, L. A., J. L. Peyraud, and R. Delagarde. 2013. Does pre-grazing herbage mass really affect herbage intake and milk production of strip-grazing dairy cows? *Grass Forage Sci.* 68:93–109. doi:10.1111/j.1365-2494.2012.00876.x.
- Peyraud, J. L., E. A. Comeron, M. H. Wade, and G. Lemaire. 1996. The effect of daily herbage allowance, herbage mass and animal factors upon herbage intake by grazing dairy cows. *Ann. Zootech.* 45:201–217. doi:10.1051/animres:19960301.
- Peyraud, J. L., and L. Delaby. 2001. Ideal concentrate feeds for grazing dairy cows - Responses to supplementation in interaction with grazing management and grass quality. In: P. C. Garnsworthy and J. Wiseman, editors, *Recent advances in animal nutrition*. Nottingham Univ. Press, Nottingham, UK. p. 203–220.
- Peyraud, J. L., and R. Delagarde. 2013. Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing. *Animal* 7:57–67. doi:10.1017/S1751731111002394.
- Scheibe, K. M., T. Schleusner, A. Berger, K. Eichhorn, J. Langbein, L. Dal Zotto, and W. J. Streich. 1998. ETHOSYS® – New system for recording and analysis of behavior of free-ranging domestic animals and wildlife. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 55:195–211. doi:10.1016/S0168-1591(97)00072-5.
- Stockdale, C. R. 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. *Aust. J. Exp. Agric.* 40:913–921. doi:10.1071/EA00034.
- Trillaud-Geyl, C., J. Brohier, L. de Baynast, N. Baudoin, E. Rossier, and O. Lapierre. 1990. Bilan de productivité sur 10 ans d'un troupeau de juments de selle conduites en plein air intégral: Croissance des produits de 0 à 6 mois. (In French.) *World Rev. Anim. Prod.* 25:65–70.
- Wales, W. J., P. T. Doyle, and W. Dellow. 1998. Dry matter intake and nutrient selection by lactating cows grazing irrigate pastures at different pasture allowances in summer and autumn. *Aust. J. Exp. Agric.* 38:451–460. doi:10.1071/EA98043..
- Winsco, K. N., J. A. Coverdale, T. A. Wickersham, J. L. Lucia, and C. J. Hammer. 2013. Influence of maternal plane of nutrition on mares and their foals: Determination of mare performance and voluntary dry matter intake during late pregnancy using a dual-marker system. *J. Anim. Sci.* 91:4208–4215. doi:10.2527/jas.2013-6373.

Chapitre 3

Vers des solutions alternatives aux traitements chimiques pour la gestion du parasitisme équin : effet d'un apport de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d'un excès d'azote de court-terme

Effets des métabolites secondaires du sainfoin ou d'une alimentation enrichie en protéines à court-terme sur l'état parasitaire du cheval

Le pâturage est source d'infestation des chevaux par les nématodes gastro-intestinaux, principalement les petits strongles ou cyathostomes. Ces parasites occasionnent classiquement chez l'hôte une entéropathie responsable d'une fuite des protéines, et dans les cas les plus graves, la mort de l'animal peut survenir lorsqu'un grand nombre de larves en hypobiose émergent de la muqueuse du gros intestin (cyathostomose larvaire). Du fait de l'accroissement des phénomènes de résistance des cyathostomes aux anthelminthiques, il est nécessaire de développer des méthodes alternatives aux traitements chimiques pour gérer efficacement et durablement le parasitisme. Notre première étude n'a pas permis de mettre en évidence un intérêt de la complémentation énergétique au pâturage. Ici nous testons en box si une cure de sainfoin, légumineuse riche en tanins condensés, dans l'alimentation ou un apport protéique de court-terme peuvent accroître la résistance des chevaux aux cyathostomes.

L'expérimentation s'est déroulée en box fin 2013. Trente chevaux de selle en croissance naturellement infestés par des nématodes ont été répartis en trois lots de 10 animaux sur la base de leur nombre d'œufs de vers excrétés dans les fèces (NOF). Chaque lot a reçu durant 18 jours un régime expérimental constitué de 70% de granulés et 30% de paille de blé : régime sainfoin (en granulés) riche en métabolites secondaires, en particulier en tanins condensés (S), régime riche en protéines (P) ou régime témoin (T). Les trois régimes étaient isoénergétiques tandis que les régimes S et P étaient isoprotéiques et 2,5 fois plus riches en protéines que le régime T qui couvrait les besoins énergétiques et protéiques des animaux. Suite à la constitution des lots, des coproscopies individuelles ont été réalisées au début de la période d'habituation aux régimes expérimentaux et en début et fin d'application des régimes. Le dénombrement des vers présents dans les fèces des chevaux a été réalisé en fin d'expérimentation après vermifugation des animaux. Des coprocultures ont été réalisées à partir des fèces prélevées au début de la période d'habituation et en fin d'expérimentation, pour suivre le développement des œufs en larves infestantes L3. Enfin, un test d'éclosion des œufs en larves L1 et un test de développement des œufs en larves infestantes L3 ont été réalisés *in vitro* avec des extraits de sainfoin pour confirmer l'action anthelminthique des métabolites secondaires de la plante.

Les NOF ont diminué au cours du temps mais n'ont pas été affectés par la nature des régimes expérimentaux (S : 635 opg, P : 770 opg, T : 667 opg ; $P=0,722$). Le comptage des vers n'a également pas permis de mettre en évidence de différences entre les trois régimes. Par contre, les coprocultures réalisées à partir des fèces collectées dans chaque groupe ont montré une réduction du taux de développement des œufs en larves infestantes pour le traitement S entre la période d'habituation (30,5%) et la fin de l'expérimentation (8,1%). Les expérimentations conduites *in vitro* avec des extraits de sainfoin ont confirmé l'effet des métabolites secondaires du sainfoin sur le développement des cyathostomes. Ainsi, le pourcentage d'œufs éclos en larves L1 a été réduit de 37% pour une concentration de sainfoin égale ou supérieure à $7,5 \text{ mg.mL}^{-1}$ de solution à 0.5% de diméthylsulfoxyde (DMSO) ($P<0,001$) tandis que l'addition de sainfoin au matériel fécal a réduit le taux de développement des œufs en larves L3 de 82% lorsque le sainfoin représentait 29% du mélange ($P<0,001$).

Le fait d'offrir aux chevaux durant une courte période un régime riche en protéines ne semble pas accroître leur résistance au parasitisme par rapport au régime T. Il est possible que le niveau d'infestation des chevaux dans notre étude n'ait pas été suffisamment élevé pour induire une limitation suffisante des protéines métabolisables et observer un bénéfice d'une suralimentation azotée. En revanche, notre étude révèle pour la première fois que l'utilisation du sainfoin dans l'alimentation du cheval peut contribuer à réduire la contamination des prairies par les larves infestantes de strongles du fait de l'action des métabolites secondaires de la plante sur leur développement.

1 *Article en préparation pour PLOS ONE*

2

3 **Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) or extra proteins in the diet as an alternative**
4 **to control horse strongyle infection?**

5

6 Claire Collas^{1,2,3}, Guillaume Sallé⁴, Bertrand Dumont^{2,3}, Jacques Cabaret⁴, Jacques Cortet⁴,
7 William Martin-Rosset^{2,3}, Laurence Wimmel¹, Géraldine Fleurance^{1,2,3*}

8

9 ¹Direction des Connaissances et de l'Innovation, IFCE, Saumur, France

10

11 ²UMR1213 Herbivores, INRA, Saint-Genès-Champanelle, France

12

13 ³UMR1213 Herbivores, VetAgroSup, Lempdes, France

14

15 ⁴UMR1282 Infectiologie et Santé Publique, INRA & Université François Rabelais Tours,
16 Nouzilly, France

17

18 *Corresponding author

19 E-mail: geraldine.fleurance@clermont.inra.fr (GF)

20

21 Abstract

22 The spread of anthelmintic resistance in equine strongyle nematodes has become a
23 major problem, creating an urgent need to develop alternatives for strongyle control. Here we
24 investigate for the first time the efficacy of a short-term consumption of tannin-rich sainfoin
25 (*Onobrychis viciifolia*) or extra proteins in naturally-infected horses. We used 30 horses
26 divided into three groups of 10 individuals to receive for 18 days either i) a tannin-rich diet
27 with 70% DM sainfoin pellets (SD), ii) a protein-rich diet with 52% DM Italian rye-grass
28 pellets and 18% DM grinded linseed expeller (PD), or iii) a control diet with 45% DM barley
29 and 25% DM cereal-based pellets (CD). The three diets were isoenergetic, covering on
30 average 94% of animal energy requirements, and the SD and PD diets provided extra proteins
31 (227% of protein requirements vs 93% for the CD diet). PD and CD were compared to test for
32 benefits of receiving extra proteins, while SD and PD were compared to account for the effect
33 of sainfoin secondary metabolites. There were no between-diet differences in faecal egg
34 counts or worm counts in faeces of drenched horses at the end of the experiment. However,
35 coprocultures from the faeces collected in each group suggested a lower rate of strongyle
36 larval development in the SD group (SD: 8.1%, PD: 30.5%, CD: 22.6%). *In vitro* tests using
37 sainfoin extracts confirmed the influence of sainfoin on strongyle larval development: adding
38 29% of sainfoin extract to faeces reduced the strongyle egg development into L3 by 82%
39 ($P<0.001$) and using solutions with sainfoin concentrations higher than $7.5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ reduced
40 egg hatching by 37% ($P<0.05$). The short-term use of tannin-rich plants in horse diet could
41 thus constitute a promising strategy to reduce pasture infectivity.

42 Keywords: equids, tannin-rich plant, nitrogen, strongyle nematodes, integrated health
43 management

44 **Introduction**

45 Infections with gastrointestinal nematodes remain a major threat for herbivore
46 production, health and welfare in both intensive and extensive agricultural systems [1]. In
47 horses, strongyle nematodes (mostly cyathostomins) are the biggest parasite group, with more
48 than 50 identified species [2, 3]. The typical impact of these parasites involves enteropathy
49 leading to protein losses [4] and potentially horse death when large numbers of encysted
50 larvae are released from the mucosa of the large intestine, causing tissue damage with
51 extensive fluid and protein loss, so called ‘larval cyathostomosis’ [5].

52 Strongyle control in horses and ruminants has long been reliant on constant use of synthetic
53 anthelmintics. However, the expanding diffusion of anthelmintic resistance among strongyles
54 [6, 7] and the dumping of residues into the environment [8] have accelerated the need to
55 explore alternative solutions for a sustainable control of these parasites. There is now a
56 consensus among parasitologists that only integrated approaches, based on a combination of
57 different principles of control, are appropriate [9]. The three main principles of action to
58 disrupt strongyle lifecycle consist in i) reducing the contact between host and infective larvae,
59 ii) stimulating the host response (resistance to infection), and iii) eliminating strongyle worms
60 in the host [10]. Knowledge on pathophysiological processes associated with nematode
61 infections points to the hypothesis that the host’s ability to respond to strongyles could be
62 improved by feed complementation, particularly with nutrients that are the limiting factors of
63 the diet [11]. Energy supplementation with barley accounting for 60% of energy requirements
64 for lactation did not improve the ability of mares to regulate their strongyle burden at pasture
65 [12]. As proteins are more likely to be a limiting factor, it is worth testing the benefits of extra
66 protein supplementation in parasitized horses, especially as feeding protein-rich diets to
67 parturient small ruminants can partly alleviate the periparturient rise in egg excretion [13-17].

68 Another principle is strongyle control via non-conventional anthelmintic materials. Bioactive
69 forages containing plant secondary metabolites such as tannins have proven anthelmintic
70 effects in small ruminants [18, 19]. Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) in particular has
71 demonstrated anthelmintic properties in several *in vitro* and *in vivo* studies [20-22]. In equids,
72 only two *in vitro* studies have analyzed the influence of different plant extracts but both
73 reported an anthelmintic activity against strongyle for a number of them [23, 24].

74 Therefore, the current study aimed to i) evaluate the efficacy of a short-term consumption of
75 either extra proteins or sainfoin to reduce faecal egg excretion and total strongyle burden in
76 naturally-infected horses, and ii) analyze *in vitro* the influence of the secondary metabolites of
77 sainfoin on strongyle egg hatching and larval development.

78 **Materials and Methods**

79 ***In vivo* experiment**

80 The *in vivo* experiment was conducted from 29 November to 16 December 2013 at the
81 experimental farm of the French Horse and Riding Institute (IFCE) in Chamberet, France.
82 Thirty horses naturally parasitized with nematodes were divided into three groups of 10
83 individuals to receive either: i) a tannin-rich diet consisting of 70% DM sainfoin pellets (SD),
84 ii) a protein-rich diet (PD), or iii) a control diet (CD) during an 18-day trial following a 1-
85 week adaptation period. The experiment followed the established standards for the human
86 care and use of animals as testified by the authorization 11-2013-11 of the Regional Ethics
87 Committee on Animal Experimentation.

88

89 **Animals and pre-experimental housing conditions**

90 Horses (Anglo-Arab and French Saddle breeds, 1.5–3.5 years old) which had not been treated
91 with anthelmintics since end-March (Ivermectin: Eqvalan®, Merial, France) were measured

92 for strongyle faecal egg count (FEC) before being housed on 5 November. The horses were
93 subsequently allocated into three groups of 10 individuals with similar average FEC (SD:
94 1175 ± 291 SE eggs per gram (epg) faeces; PD: 1175 ± 247 epg; CD: 1144 ± 260 epg), age
95 (SD: 2.3 ± 0.2 years old; PD: 2.4 ± 0.2 years old; CD: 2.5 ± 0 years old) and liveweight (SD:
96 435.9 ± 16.9 kg; PD: 429.9 ± 17.9 kg; CD: 438.4 ± 6.9 kg). From 5 to 21 November, each
97 group of horses was collectively fed to mean requirements (5.8 HFU.d⁻¹, 309 g HDCP.d⁻¹,
98 where HFU is horse feed unit, HDCP is horse digestible crude protein) [25] with a transition
99 diet composed of 60% grass hay, 10% wheat straw, 30% concentrate (made of 61.5% barley,
100 35% soybean meal, 3.5% minerals and vitamins; Table 1). During the adaptation period (22–
101 28 November), horses in each group were individually fed with decreasing proportions of
102 grass hay and increasing proportions of the foods composing their experimental diet.

103

104 **Experimental diets**

105 From 29 November to 16 December 2013, horses were individually fed with their
106 experimental diet. The tannin-rich diet (SD) (3.6% DM condensed tannins; acetone-butanol-
107 HCl assay [26]) consisted of 70% DM sainfoin pellets (*Onobrychis viciifolia*; provided by
108 Multifolia and animal nutrition firm Mg2Mix) (5.2% DM condensed tannins) and 30% wheat
109 straw (Table 1). The protein-rich diet (PD) consisted of 52% Italian rye-grass pellets, 18%
110 grinded linseed expeller and 30% wheat straw (Table 1). Control diet (CD) was 45% rolled
111 barley, 30% wheat straw, and 25% pellets (made of 55.3% wheat straw, 28.7% maize, 6%
112 soybean oil, 5% cane molasses, 5% calcium carbonate) (Table 1).

113 Proportions of the various diet components were chosen to ensure each diet covered 100% of
114 animal energy requirements. Both SD and PD were assumed to cover 230% of protein
115 requirements vs 100% for CD. Individual requirements were estimated based on INRA [25]
116 tables for HFU and HDCP in 18–36-month-old saddle horses:

117 HFU requirements (per kg Liveweight^{0.75}) = $0.0594 + 0.0252 \times \text{LWG}^{1.4}$ (where LWG is
118 liveweight gain, i.e. between 0.1 and 0.25 kg.d⁻¹ according to age),

119 Horse DCP requirements (in g.d⁻¹) = $2.8 \times \text{LW}^{0.75} + 270 \times \text{LWG}$.

120 Animals received half of their diet in the morning (8 a.m.) and half in the afternoon (4 p.m.).

121 Quantities were adjusted weekly based on LW change. In addition, refusals were collected
122 every morning. Each time an animal's refusals amounted to more than 5% of feed offered on
123 three consecutive days, the quantities of pellets and wheat straw offered were reduced by 5%.

124 In this case, we reduced not only the quantities offered to this animal but also the quantities
125 offered to one animal in each of the other two groups. This enabled the diets offered in the
126 three groups to remain isoenergetic, and the SD and PD diets to remain isoproteic and 2.3-fold
127 higher than CD. Thus PD and CD were compared to test for the benefits of receiving extra
128 proteins; SD and PD were compared to account for the effect of sainfoin secondary
129 metabolites. Once refused from each of the three paired animals amounted to less than 5% on
130 three consecutive days, the initial levels of quantities offered were restored.

131

132 **Parasitology measurements**

133 FEC was measured 24 days before the start of the experiment (denoted FEC-24) to determine
134 infection level and balance individual FEC across experimental groups. FEC was then re-
135 measured in the adaptation period (day -4, denoted FEC-4) and at the start (day 4, denoted
136 FEC4) and end (day 18, denoted FEC18) of the experimental period. For these counts, faecal
137 samples were collected and the McMaster technique modified by Raynaud [27] was applied
138 with a minimal detection level of 15 strongyle eggs per g of faeces.

139 Faecal samples collected on D-4 and D18 were incubated for 14 days at 25°C, and rate of
140 strongyle eggs that developed into infective larvae (L3) was determined within each group as
141 part of routine control.

142 At the close of the experimental period, we tested for diet-associated variations in worm
143 burden: horses were drenched with 200 µg/kg bodyweight ivermectin (Eqvalan®, Merial,
144 France) and faecal samples (200 g each) were subsequently collected in the horses' individual
145 boxes 18 h, 21 h and 24 h post-drenching. Each sample was diluted in 1600 mL tap water, and
146 four 40 mL aliquots were prepared to determine number of larval and adult strongyles. Worm
147 counts were subsequently multiplied by ten to obtain the worm burden for 200 g of faecal
148 material. The average level of female strongyle fecundity within each horse was computed as
149 FEC18 divided by the number of female strongyles recovered.

150

151 ***In vitro* experiments**

152 Two *in vitro* experiments were run in April 2014 at INRA–Nouzilly in order to confirm the
153 anthelmintic effect of sainfoin pellets on early-stage strongyle development. For this purpose,
154 a larval development assay and an egg hatch assay were performed using faecal samples from
155 naturally infected horses.

156

157 **Larval development assay (LDA)**

158 This assay was performed to determine the effect of sainfoin extract in faeces on larval
159 development. Sainfoin pellets (700g) were added to 422 mL tap water to reach the same water
160 content as faecal samples, *i.e.* 60%. Different amounts of this rehydrated sainfoin were then
161 mixed with 130 g of faeces to bring sainfoin content up to 0, 6, 12 or 29% of the global
162 mixture. Six replicates were done for each of the four proportions. Each sample was incubated
163 at 25°C during 14 days, and L3 larvae were extracted overnight by means of a Baermann
164 apparatus [28]. Number of infective larvae was determined in repeated 10 µL droplets
165 representing 0.1% of total recovered larval volume (10 or 25 replicates accordingly). This

166 number was then multiplied by 1000 and divided by the expected computed number of larvae
167 (faecal sample weight \times faecal egg count per gram).

168

169 **Egg hatch assay (EHA)**

170 We also performed an egg hatch assay to gauge the effect of sainfoin on strongyle hatching.
171 Strongyle eggs were extracted from faeces by passing through a series of fine-mesh sieves
172 (125 μ M and 20 μ M mesh size) then re-suspended in a solution of distilled water at a
173 concentration of 10 eggs per 10 μ L. Sainfoin extract was prepared from 42 g of sainfoin
174 pellets crushed and diluted into 420 mL of a 0.5% dimethyl sulfoxide (DMSO) solution
175 overnight. The extract was then centrifuged at 5000 *g* for 30 min at 4°C, the supernatant was
176 recovered, and four concentrations (30 mg.mL⁻¹, 15 mg.mL⁻¹, 7.5 mg.mL⁻¹, 3.6 mg.mL⁻¹)
177 were tested in triplicates against the control 0.5% DMSO solution (five replicates). Next, 50
178 μ L of each concentration was added to 100 μ L of the strongyle eggs solution (containing
179 roughly 100 eggs) in 5 mL borex tubes incubated for 48 h at 20°C. Following incubation, the
180 number of first-stage larvae (L1) was determined in the total mix volume (150 μ L).

181

182 **Statistical analysis**

183 Data analyses were performed using *R* software (3.0.2) [29]. Strongyle faecal egg excretion
184 data were analyzed with a generalized linear mixed model (GLMM) including diet, sampling
185 date (FEC-24, FEC-4, FEC4, FEC18) and diet \times sampling date interaction as fixed effects and
186 horse as random effect. GLMM was performed using the *lme* function of the *nlme* package.
187 We tested for differences between sampling dates using the *glht* function of *multcomp*
188 package (Tukey correction). We also tested for between-diet differences in estimated worm
189 count, juvenile-to-adult strongyle ratio, and estimated female fecundity (i.e. FEC-to-female

190 strongyle count ratio) using the Kruskal-Wallis non-parametric test (`kruskal.test()` function of
191 the R software).

192 Percent eggs developed into L3 larvae and percentages of eggs hatched to L1 larvae during *in*
193 *vitro* experiments were arcsin square-root transformed for statistical analysis. These data were
194 analyzed in a general linear model (GLM) including the main effect of sainfoin concentration.
195 Differences between treatment concentrations were tested using Tukey's HSD function.

196 **Results**

197 ***In vivo* experiment**

198 The nutritional requirement goals were satisfied: horses almost met their energy requirements
199 in all three groups (SD: $96 \pm 0.4\%$, PD: $94 \pm 0.3\%$, CD: $92 \pm 0.6\%$ [25]; $P=0.180$) while the
200 SD and PD diets provided extraprotein (230% and 224% of protein requirements, $P=0.699$)
201 compared to CD (93%) [25]; $P<0.001$). As expected, all diets offered were isoenergetic while
202 SD and PD diets remained isoproteic with a much higher protein concentration than CD.

203 Overall, FEC decreased from an average 1165 eggs.g^{-1} to 313 eggs.g^{-1} between FEC-24 and
204 the end of the experiment ($P<0.001$; Figure 1), but without significant effects of diet (SD:
205 $635.0 \pm 205.5 \text{ epg}$, PD: $770.0 \pm 227.4 \text{ epg}$, CD: $666.7 \pm 190.3 \text{ epg}$; $P=0.722$) or diet \times sampling
206 date interaction ($P=0.463$), i.e. rate of FEC decrease was unaffected by treatments (Figure 1).

207 Worm counts were not significantly different between diets ($P=0.270$). Furthermore, neither
208 development rate, i.e. juvenile-to-adult strongyle count ratio ($P=0.810$), nor estimated average
209 female strongyle fecundity ($P=0.310$) differed significantly between experimental diets.
210 Interestingly, routine coprocultures performed from faeces collected in each group found a
211 lower rate of development in the SD group (SD: 8.1%, PD: 30.5%, CD: 22.6% at FEC18) that
212 was not observed at FEC-4 (rate of strongyle eggs to L3 larvae development: SD: 25.2%, PD:

213 23.7%, CD: 26.7%). We cannot test whether this difference is significant as no replicates
214 were done.

215

216 ***In vitro* experiment**

217 To confirm the putative effect of sainfoin pellets on strongyle egg development after the *in*
218 *vivo* experiment, we ran *in vitro* tests, i.e. a larval development assay and an egg hatch assay
219 in presence of sainfoin extracts.

220 Rate of strongyle eggs to L3 larvae development was lower than what is generally observed at
221 the INRA–Nouzilly station, *i.e.* 18% *v* 30% over the past five years (Sallé, pers. com.).
222 Sainfoin added to the faecal material further reduced the rate of strongyle eggs to L3 larvae
223 development: no significant differences were found between 0, 6 and 12% added sainfoin in
224 faeces, but 29% added sainfoin reduced larval development by 82% ($P<0.001$; Figure 2).

225 The 0.5% DMSO solution had no effect on rate of eggs hatching, which averaged 91% of
226 strongyle eggs hatching. Conversely, there was a significant 37% reduction in egg hatching
227 for sainfoin concentrations higher than 7.5 mg.mL⁻¹ ($P<0.05$). Overall, sainfoin concentration
228 in the solution had a negative effect on proportion of eggs hatching ($P<0.001$; Figure 3).

229 **Discussion**

230 The adverse effect of sainfoin diet on larval development that was suggested by
231 routine coprocultures performed during the *in vivo* experiment was confirmed by the *in vitro*
232 tests: sainfoin reduced both larval development and egg hatching. The use of sainfoin in horse
233 diets could therefore reduce pasture contamination with strongyle infective larvae by reducing
234 larval development rate. This effect seems to occur at a minimum sainfoin content of 29% in
235 the faecal material, while a minimum concentration of 7.5 mg.mL⁻¹ sainfoin extract inhibited

236 egg hatching. To our knowledge, this is the first report of the toxic properties of sainfoin on
237 strongyle eggs in horses. So far, only two *in vitro* studies have revealed benefits of plant
238 extracts as an alternative way to control equine strongyle [23, 24]. Significant effects on
239 strongyle development rate were observed for seven out of 14 Australian plant extracts used
240 at 1.4 mg.mL⁻¹ concentration [23], but after chemical binding of tannins with
241 polyvinylpyrrolidone, only two tested extracts still showed anthelmintic activity [23]. Of
242 the five Ethiopian and five UK plant extracts tested by Peachey et al. [24], eight showed
243 efficacy in an egg hatch assay and/or larval migration assay, but the authors gave no
244 information on the secondary metabolites involved, and there is still no *in vivo* confirmation
245 of these results [23, 24]. In our case, results from the *in vitro* trials were entirely consistent
246 with those from the *in vivo* experiment.

247 Sainfoin has already been demonstrated as an anthelmintic plant in ruminants, although there
248 is broad variability in the data recorded. Many *in vitro* studies report anthelmintic effects of
249 sainfoin extracts on L1 feeding ability [30], L3 migration [20,31], larval exsheathment [21]
250 and penetration into the digestive mucosae [32]. The overall conclusion of these studies is that
251 some sainfoin secondary metabolites, particularly condensed tannins, have direct mechanisms
252 of action against larval development. Molan et al. [33] also demonstrated the *in vitro* effect of
253 sainfoin condensed tannins on egg hatching and larval development rate of *Trichostrongylus*
254 *colubriformis*, a sheep strongyle. Results are less consistent under *in vivo* conditions, but the
255 consumption of sainfoin has been associated with a decrease in nematode fertility or counts in
256 sheep [22, 34-36] and goat [37, 38]. Our data do not support any effect of sainfoin on
257 strongyle worm counts or faecal egg counts. However, the reported worm count was only a
258 proxy of the true total worm burden, as the horses could not be necropsied.

259 We also investigated the effect of a protein-rich diet as a means to regulate strongyle worm
260 burden. However, the results do not support any positive influence of extraproteins on host
261 resistance to strongyle in horses, which contrasts with some results in other ruminants [17,
262 39]. In particular, a positive effect of added dietary protein has been reported when
263 metabolizable protein is a limiting factor in feed. Additional protein given to ewes or goat
264 does nearing parturition has been shown to partly or even totally alleviate the rise in egg
265 output at the parturition and early lactation period (termed ‘periparturient rise’ [13-16]) even
266 if some studies failed to find any significant effect [40]. In dairy goats, some results suggested
267 that the benefits of protein supplementation were more pronounced in the most productive
268 animals and at the peak of lactation [41]. Strongyles are usually associated to weight loss and
269 hypoalbuminemia [4], prompting us to hypothesize that protein enrichment could increase the
270 resistance of parasitized horses. However, our data could not validate this hypothesis, possibly
271 as a result of proteins not being limiting enough due to an insufficient level of nematode
272 infection. Protein source and/or quality is another potential factor, as a previous study
273 conducted in bearing ewes highlighted significant differences in nematode infection outcome
274 according to the extra protein supplied [42].

275 Overall, our study brings the first evidence that sainfoin affects the development of equine
276 strongyles. Further work is now needed to determine the underlying mode of action against
277 different parasitic stages, including the suspected role of condensed tannins and the potential
278 involvement of other flavonoids, as observed elsewhere in small ruminants [32, 43, 44].

279 **Acknowledgments**

280 The PhD thesis of Claire Collas was funded by the French Horse and Riding Institute
281 (IFCE) and the INRA’s Animal Physiology and Livestock Systems (PHASE) division. The
282 experiment was funded by the IFCE and the Integrated Management of Animal Health meta-

283 programme (GISA-Strep). The authors thank Multifolia and Mg2Mix for providing us with
284 sainfoin pellets. We also thank the staff of the IFCE experimental farm — Patrice Dupuy,
285 Cédric Dubois, Jacques Boulanger, Claude Larry, Joseph Bellonie and Patrick Paucard — for
286 their technical assistance, Aline Le Morvan and Angélique Quereuil from INRA UMR1213,
287 and Hélène Macé, student at Angers Agriculture School (ESA).

288 **References**

- 289 1. Stear MJ, Doliglska M, Donskow-Schmelter K (2007) Alternatives to anthelmintics for the
290 control of nematodes in livestock. *Parasitology* 134: 139-151.
- 291 2. Lichtenfels JR, Kharchenko VA, Krecek RC, Gibbons LM (1998) An annotated checklist
292 by genus and species of 93 species level names for 51 recognised species of small
293 strongyles (*Nematoda: Strongyloidea: Cyathostominae*) of horses, asses and zebras of the
294 world. *Vet Parasitol* 79: 65-79.
- 295 3. Lichtenfels JR, Gibbons LM, Krecek RC (2002) Recommended terminology and advances
296 in the systematics of the *Cyathostominae* (*Nematoda: Strongyloidea*) of horses. *Vet*
297 *Parasitol* 107: 337-342.
- 298 4. Love S, Murphy D, Mellor D (1999) Pathogenicity of cyathostome infection. *Vet Parasitol*
299 85: 113-121.
- 300 5. Lyons ET, Tolliver SC, Drudge JH (1999) Historical perspective of cyathostomes:
301 prevalence, treatment and control programs. *Vet Parasitol* 85: 97-112.
- 302 6. Kaplan RM (2004) Drug resistance in nematodes of veterinary importance: a status report.
303 *Trends Parasitol* 20: 477-481.

- 304 7. Wolstenholme AJ, Fairweather I, Prichard RK, von Samson-Himmelstjerna G, Sangster NC
305 (2004) Drug resistance in veterinary helminths. *Trends Parasitol* 20: 469-476.
- 306 8. Horvat AJM, Petrovic M, Babic S, Pavlovic DM, Asperger D et al. (2012). Analysis,
307 occurrence and fate of anthelmintics and their transformation products in the environment.
308 *Trac-Trend Anal Chem* 31: 61-84.
- 309 9. Molento MB (2009) Parasite control in the age of drug resistance and changing agricultural
310 practices. *Vet Parasitol* 163: 229-234.
- 311 10. Hoste H, Torres-Acosta JFJ (2011) Non chemical control of helminths in ruminants:
312 adapting solutions for changing worms in a changing world. *Vet Parasitol* 180: 144-154.
- 313 11. Coop RL, Kyriazakis I (1999) Nutrition–parasite interaction. *Vet Parasitol* 84: 187-204.
- 314 12. Collas C, Fleurance G, Cabaret J, Martin-Rosset W, Wimel L et al. (2014) How does the
315 suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism
316 in lactating saddle mares? *Animal* 8: 1290-1297.
- 317 13. Houdijk JG, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF, Coop RL (2000) Can an increased
318 metabolizable protein intake affect the periparturient relaxation of immunity against
319 *Teladorsagia circumcincta* in sheep? *Vet Parasitol* 91: 43-62.
- 320 14. Houdijk JG, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF, Coop RL (2003) Is the allocation of
321 metabolisable protein prioritized to milk production rather than to immune functions in
322 *Teladorsagia circumcincta*-infected lactating ewes? *Int J Parasitol* 33: 327-338.
- 323 15. Donaldson J, van Houtert MFJ, Sykes AR (2001) The effect of dietary fish-meal
324 supplementation on parasite burdens of periparturient sheep. *Anim Sci* 72: 149-158.

- 325 16. Kahn LP (2003) Regulation of resistance and resilience of periparturient ewes to infection
326 with gastrointestinal nematode parasites by dietary supplementation. *Aust J Exp Agr* 43:
327 1477-1486.
- 328 17. Athanasiadou S, Houdijk J, Kyriazakis I (2008) Exploiting synergisms and interactions in
329 the nutritional approaches to parasite control in sheep production systems. *Small*
330 *Ruminant Res* 76: 2-11.
- 331 18. Hoste H, Jackson F, Athanasiadou S, Thamsborg SM, Hoskin SO (2006) The effects of
332 tannin-rich plants on parasitic nematodes in ruminants. *Trends Parasitol* 22: 253-261.
- 333 19. Rochfort S, Parker AJ, Dunshea FR (2008) Plant bioactives for ruminant health and
334 productivity. *Phytochemistry* 69: 299-322.
- 335 20. Paolini V, Fouraste I, Hoste H (2004) *In vitro* effects of three woody plant and sainfoin
336 extracts on third-stage larvae and adult worms of three gastrointestinal nematodes.
337 *Parasitology* 129: 69-77.
- 338 21. Brunet S, Aufrere J, El Babili F, Fouraste I, Hoste H (2007) The kinetics of exsheathment
339 of infective nematode larvae is disturbed in the presence of a tannin-rich plant extract
340 (sainfoin) both *in vitro* and *in vivo*. *Parasitology* 134: 1253–1262.
- 341 22. Heckendorn F, Haring DA, Maurer V, Senn M, Hertzberg H (2007) Individual
342 administration of three tanniferous forage plants to lambs artificially infected with
343 *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei*. *Vet Parasitol* 146:123-134.
- 344 23. Payne SE, Kotze AC, Durmic Z, Vercoe PE (2013) Australian plants show anthelmintic
345 activity toward equine cyathostomins *in vitro*. *Vet Parasitol* 196: 153-160.

- 346 24. Peachey LE, Pinchbeck GL, Scantlebury CE, Tefera G, Getachew M et al. (2012) The
347 evaluation of African and UK bioactive plant extracts for the control of equid
348 gastrointestinal nematodes. *J Equine Vet Sci* 32: S37-S38.
- 349 25. INRA (2015) Equine nutrition: INRA nutrient requirements, recommended allowances
350 and feed tables. Wageningen: Wageningen Academic publisher. In press.
- 351 26. Grabber JH, Zeller WE, Mueller-Harvey I (2013) Acetone enhances the direct analysis of
352 procyanidin- and prodelphinidin-based condensed tannins in lotus species by the Butanol-
353 HCl-Iron assay. *J Agric Food Chem* 61: 2669-2678.
- 354 27. Raynaud JP (1970) Etude de l'efficacité d'une technique de coproscopie quantitative pour
355 le diagnostic et le contrôle des infestations parasitaires des bovins, ovins, équins et
356 porcins. *Ann Parasitol Hum Comp* 85: 321.
- 357 28. Baermann G (1917) Eine einfache Methode zur Auffindung von Ankylostomum -
358 (Nematoden)- Larven in Erdproben. *Weltevreden. Batavia, Geneesk. Lab. Feestbundel*:
359 41-47.
- 360 29. R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical
361 computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 409 p.
- 362 30. Novobilský A, Stringano E, Hayot Carbonero C, Smith LMJ, Enemark HL et al. (2013) *In*
363 *vitro* effects of extracts and purified tannins of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) against
364 two cattle nematodes. *Vet Parasitol* 196: 532-537.
- 365 31. Barrau E, Fabre N, Fouraste I, Hoste H (2005) Effect of bioactive compounds from
366 Sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) on the *in vitro* larval migration of *Haemonchus*
367 *contortus*: role of tannins and flavonol glycosides. *Parasitology* 131: 531-538.

- 368 32. Brunet S, Jackson F, Hoste H (2008) Effects of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) extract
369 and monomers of condensed tannins on the association of abomasal nematode larvae with
370 fundic explants. *Int J Parasitol* 38: 783-790.
- 371 33. Molan AL, Waghorn GC, McNabb WC (2002) Effect of condensed tannins on egg
372 hatching and larval development of *Trichostrongylus colubriformis* *in vitro*. *Vet Rec* 150:
373 65-69.
- 374 34. Heckendorn F, Häring DA, Maurer V, Zinsstag J, Langhans W et al. (2006) Effect of
375 sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage and hay on established populations of *Haemonchus*
376 *contortus* and *Cooperia curticei* in lambs. *Vet Parasitol* 142: 293-300.
- 377 35. Valderrábano J, Calvete C, Uriarte J (2010) Effect of feeding bioactive forages on
378 infection and subsequent development of *Haemonchus contortus* in lamb faeces. *Vet*
379 *Parasitol* 172: 89-94.
- 380 36. Werne S, Isensee A, Maurer V, Perler E, Drewek A et al. (2013). Integrated control of
381 gastrointestinal nematodes in lambs using a bioactive feed × breed approach. *Vet*
382 *Parasitol* 198: 298-304.
- 383 37. Paolini V, Dorchies P, Hoste H (2003) Effects of sainfoin hay on gastrointestinal
384 nematode infections in goats. *Vet Rec* 152: 600-601.
- 385 38. Paolini V, de la Farge F, Prevot F, Dorchies P, Hoste H (2005) Effects of the repeated
386 distribution of sainfoin hay on the resistance and the resilience of goats naturally infected
387 with gastrointestinal nematodes. *Vet Parasitol* 127: 277-283.
- 388 39. van Houtert MFJ, Sykes AR (1996) Implications of nutrition for the ability of ruminants
389 to withstand gastrointestinal nematode infections. *Int J Parasitol* 26: 1151-1168.

- 390 40. Rocha RA, Bricarello PA, Silva MB, Houdijk JGM, Almeida FA et al. (2011) Influence of
391 protein supplementation during late pregnancy and lactation on the resistance of Santa
392 Ines and Ile de France ewes to *Haemonchus contortus*. *Vet Parasitol* 181: 229-238.
- 393 41. Etter E, Hoste H, Chartier C, Pors I, Koch C et al. (2000) The effect of two levels of
394 dietary protein on resistance and resilience of dairy goats experimentally infected with
395 *Trichostrongylus colubriformis*: comparison between high and low producers. *Vet Res*
396 31: 247-258.
- 397 42. Sakkas P, Houdijk JGM, Athanasiadou S, Kyriazakis I (2012) Sensitivity of periparturient
398 breakdown of immunity to parasites to dietary protein source. *J Anim Sci* 90: 3954-3962.
- 399 43. Brunet S, Hoste H (2006) Monomers of condensed tannins affect the larval exsheathment
400 of parasitic nematodes of ruminants. *J Agr Food Chem* 54: 7481-7487.
- 401 44. Ojeda-Robertos NF, Manolaraki F, Theodoridou K, Aufrere J, Halbwirth H et al. (2010)
402 The anthelmintic effect of sainfoin (silage, hay, fresh) and the role of flavonoid
403 glycosides. Meeting of the European Association for Animal Production, Heraclion,
404 Creta Island, 20-24th August 2010.
- 405

406 **Figure legends**

407 **Figure 1. Results of faecal egg counts (FEC).** Changes in FEC (epg) of the 10 individuals
408 per group (● = tannin-rich diet, ■ = protein-rich diet, ○ = control diet) (mean ± SE) (diet:
409 $P>0.05$, sampling date: $P<0.05$, diet × sampling date: $P>0.05$). Means with different letters (a,
410 b, c) are significantly different at $P<0.05$.

411

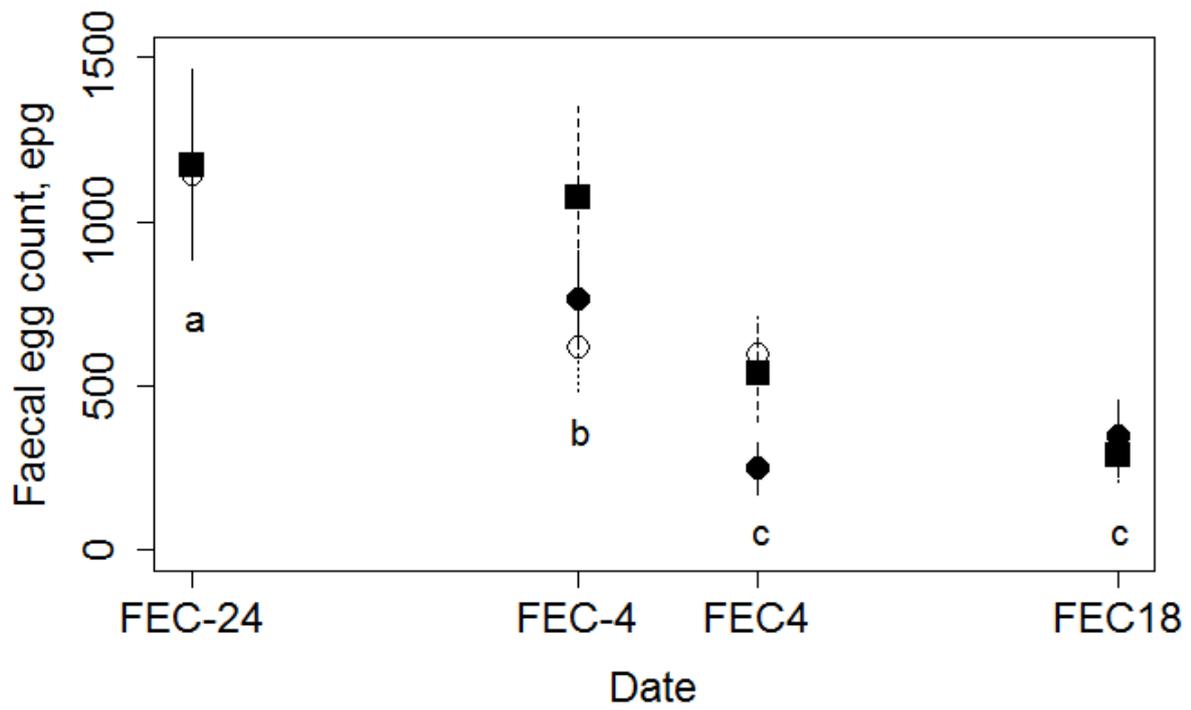
412 **Figure 2. Results of the larval development assay.** Percentage of strongyle eggs that
413 developed into L3 larvae following 15-day *in vitro* incubation, according to proportion of
414 sainfoin in faeces (mean ± SE). Means with different letters (a, b) are significantly different at
415 $P<0.05$.

416

417 **Figure 3. Results of the egg hatch assay.** Percentage of strongyle eggs hatched into L1
418 larvae following 48-hour *in vitro* incubation, according to sainfoin content of the solution
419 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) (mean ± SE). Means with different letters (a, b) are significantly different at
420 $P<0.05$.

421 **Figures**

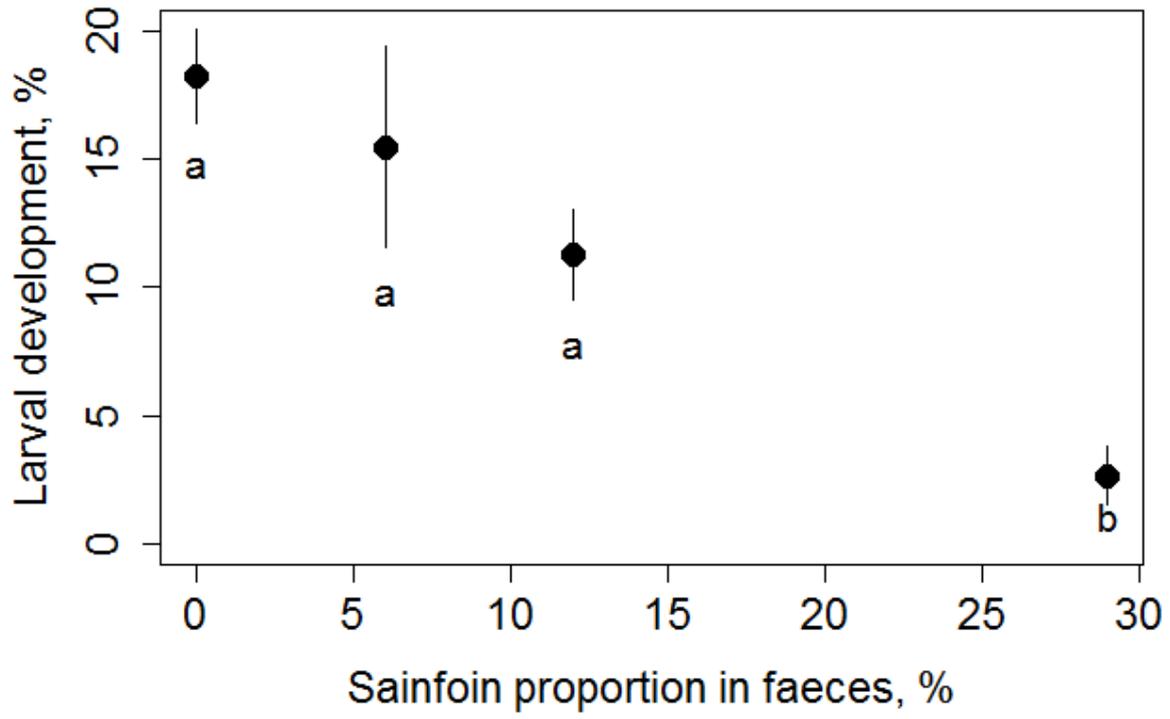
422 **Figure 1**



423

424

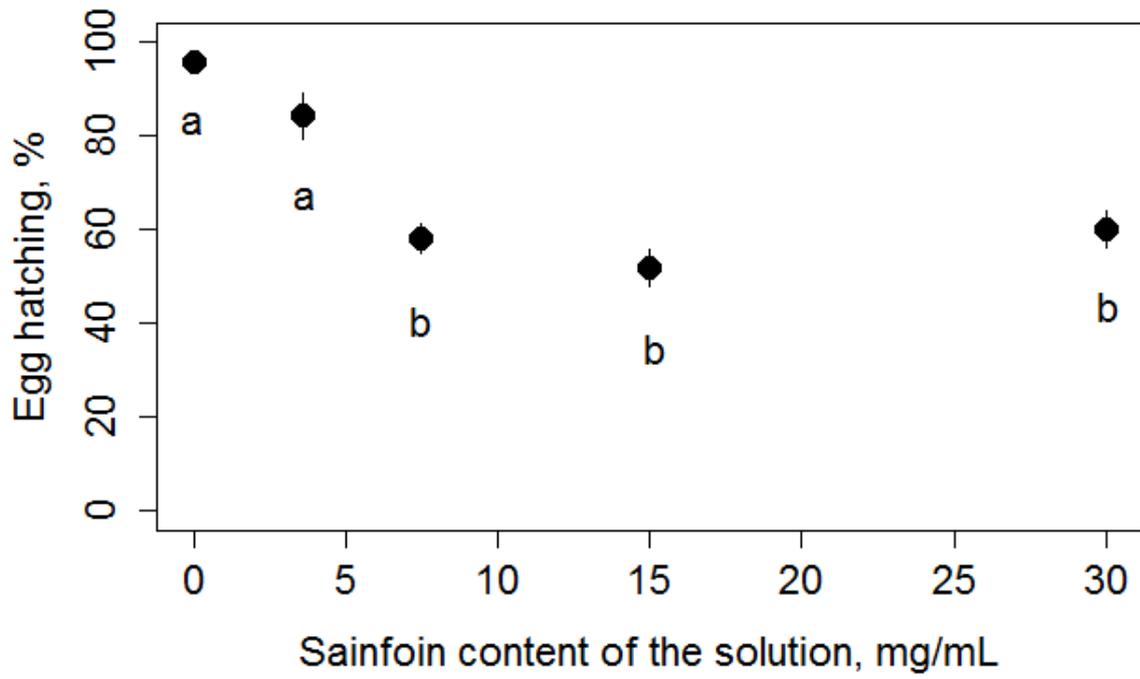
425 **Figure 2.**



426

427

428 **Figure 3.**



429

430 **Table**

431 **Table 1. Chemical composition and nutritive value of foodstuffs**

| | Transition foodstuffs | | | Experimental foodstuffs | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| | Grass hay | Concentrate ¹ | Wheat straw | Sainfoin pellets | Italian rye-grass pellets | Grinded linseed expeller | Rolled barley | Concentrate ² |
| DM (g.kg⁻¹) | 927 | 895 | 871 | 882 | 955 | 934 | 803 | 894 |
| CP (g.kg DM⁻¹)^a | 42 | 262 | 35 | 185 | 114 | 342 | 116 | 47 |
| CF (g.kg DM⁻¹)^b | 342 | 53 | 420 | 172 | 310 | 113 | 52 | 251 |
| HFU (HFU.kg DM⁻¹)^c | 0.59 | 1.06 | 0.29 | 0.74 | 0.72 | 0.94 | 1.14 | 0.75 |
| HDCP (g.kg DM⁻¹)^c | 8 | 221 | 0 | 110 | 59 | 273 | 82 | 26.4 |

432 ¹Concentrate made of 61.5% barley, 35% soybean meal, 3.5% minerals and vitamins

433 ²Concentrate made of 55.3% wheat straw, 28.7% maize, 6% soybean oil, 5% cane molasses, 5% calcium carbonate

434 Analyses were performed by InVivo Labs, Château-Thierry, France

435 ^aDumas method

436 ^bWeende method

437 ^cFrom INRA equations [25]

Discussion générale

I. Rappel de l'objectif et du déroulé de la thèse

Dans un contexte où on comprend l'intérêt de promouvoir les systèmes d'élevages d'herbivores qui valorisent les ressources herbagères, il apparaît nécessaire d'améliorer les connaissances sur la régulation de l'ingestion au pâturage par la jument en lactation. Il s'agit en particulier de préciser les conditions de pâturage qui nécessitent de mettre en place une complémentation, et d'analyser les leviers permis par la nutrition du cheval vis-à-vis de la régulation de leurs parasites gastro-intestinaux. Ainsi, l'objectif global de ma thèse était de préciser l'influence de variations dans la conduite au pâturage de la jument de selle en lactation (c'est-à-dire de tester différents niveaux de disponibilité en herbe et différents types de complémentation) sur son niveau d'ingestion, la couverture de ses besoins ou sa résistance aux parasites. Cette thèse a été réalisée dans la perspective d'optimiser l'utilisation des intrants et d'améliorer les performances économiques et environnementales des élevages équins.

Trois expérimentations ont été réalisées au cours de ma thèse pour atteindre cet objectif. La première, réalisée en 2012, consistait à suivre tout au long d'une saison de pâturage les performances zootechniques, l'état parasitaire et le comportement alimentaire de juments suitées complémentées en orge (C) ou non (NC). Il s'agissait de vérifier que la complémentation énergétique n'est pas indispensable pour couvrir les besoins des juments et permettre une bonne croissance de leurs poulains lorsque la disponibilité du couvert et sa valeur nutritive sont élevées. Il s'agissait aussi de tester si un apport énergétique pouvait améliorer la résistance des chevaux à une infestation par des nématodes gastro-intestinaux. Les deux expérimentations suivantes, conduites en 2013, ont permis d'approfondir des questions posées par la première expérimentation.

La deuxième expérimentation consistait à quantifier les variations selon la disponibilité en herbe du niveau d'ingestion de juments suitées complémentées en orge ou non. Cette étude visait en particulier à déterminer le seuil de disponibilité en herbe en-dessous duquel une complémentation énergétique devient nécessaire pour maintenir le niveau d'ingestion des juments et couvrir leurs besoins sur un couvert de bonne valeur nutritive.

La troisième expérimentation visait à apprécier les effets d'une cure de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d'un excès d'azote dans l'alimentation de courte durée sur la

régulation du parasitisme gastro-intestinal chez le cheval. Il était fait l'hypothèse que les chevaux recevant un régime riche en protéines ou riche en sainfoin (une plante bioactive contenant des tanins condensés) présenteraient une résistance aux parasites accrue. Cette expérimentation *in vivo* a été complétée par des tests *in vitro* pour confirmer l'effet inhibiteur des métabolites secondaires du sainfoin sur le développement des œufs de parasites en larves infestantes L3.

II. Conduite du pâturage et couverture des besoins nutritionnels de la jument en lactation

1. Méthodologie : estimation de la digestibilité de l'herbe et calcul de l'ingestion

Dans cette thèse, l'ingestion d'herbe individuelle des juments (QIh, g MS) a été mesurée à partir de la récolte totale des fèces sur quatre jours consécutifs :

$$QIh = PFh / (1 - digh)$$

où : PFh = production fécale (en g MS) liée à l'ingestion d'herbe sur 24 h,

et digh = digestibilité de l'herbe ingérée, exprimée en valeur décimale.

En effet, chez les chevaux, la teneur en MS des fèces rend possible leur collecte sans perte de matériel fécal ou contamination. Cette méthode de collecte totale des fèces, considérée comme la méthode de référence dans l'ouvrage « Herbage Intake Handbook » (Penning, 2004), a été utilisée dans plusieurs études relatives à l'ingestion du cheval au pâturage (Duncan, 1992; Mésochina *et al.*, 2000; Fleurance *et al.*, 2001; Grace *et al.*, 2002a, 2002b ; Edouard *et al.*, 2009, 2010 ; Fleurance *et al.*, 2010). Elle a également été employée pour déterminer l'ingestion d'herbe chez les bovins lorsque leurs fèces sont suffisamment secs (e.g. en conditions tropicales, Boval *et al.*, 2007).

La digestibilité de l'herbe (digh) a été estimée à partir de la teneur en MAT fécales attribuable à l'herbe (exprimée en g.kg MS⁻¹) (Mésochina *et al.*, 1998) :

$$digh = 0,734 - (17,872 / MATfh).$$

Cette équation intègre les pertes d'azote non alimentaire (microbien, endogène, métabolique) et est valide pour des teneurs en MAT de l'herbe supérieure à 70 g.kg MS⁻¹ (limitation du recyclage de l'azote par les chevaux) (Mésochina *et al.*, 1998), ce qui a toujours été le cas dans nos expérimentations.

La production fécale attribuable à l'herbe (PFh) a été calculée en soustrayant de la production fécale totale la MS indigestible attribuable à l'orge (Delagarde *et al.*, 1999 ; INRA, 2015). La teneur en MAT fécales attribuable à l'herbe a été calculée en divisant la quantité de MAT fécales attribuable à l'herbe par la production fécale de MS attribuable à l'herbe. La quantité de MAT fécales attribuable à l'herbe a été calculée en soustrayant de la quantité totale de

MAT fécales excrétée la quantité de MAT fécales attribuable à l'orge (Delagarde *et al.*, 1999). La quantité de MAT fécales attribuable à l'orge a été déterminée à partir de la teneur en MAT de l'orge et de la digestibilité apparente des MAT de l'orge (INRA, 2015). L'ingestion totale de MS a été calculée en ajoutant à l'ingestion d'herbe la part d'orge consommée (Delagarde *et al.*, 1999).

Chez le cheval, les interactions digestives entre le fourrage et le concentré sont négligeables puisqu'il est rapporté que la digestibilité du régime est équivalente à la somme pondérée de la digestibilité du fourrage et de celle du concentré qui lui est associé (Martin-Rosset et Dulphy, 1987). La digestibilité du fourrage n'est donc pas affectée par l'apport de différentes proportions de concentré dans le régime. Toutefois, afin de conforter nos résultats à partir d'une méthode alternative, nous nous sommes inspirés de l'article de Pérez-Ramirez *et al.* (2012) qui compare la méthode que nous avons utilisée à une méthode sans correction, i.e. où l'ingestion totale de MS est calculée à partir de la production fécale totale et de la digestibilité de la MS du régime global ($\text{dig}_{\text{tot}} = 0,734 - (17,872 / \text{MAT}_{\text{ftot}})$). L'ingestion d'herbe est ensuite estimée en soustrayant de l'ingestion totale de MS la quantité de concentrés ingérée. Dans le cas des vaches laitières, les deux méthodes ont donné des résultats similaires. Lorsque nous avons comparé ces deux méthodes sur les données de notre première expérimentation réalisée en 2012 (Collas *et al.*, 2014), nous avons trouvé une différence d'ingestion de MS journalière de 4% seulement et nos conclusions relatives à l'effet de la complémentation énergétique sur l'ingestion d'herbe et l'ingestion totale n'ont pas été modifiées. En conséquence, nous avons conservé la méthode initiale pour l'ensemble de la thèse car il nous paraissait plus rigoureux d'utiliser l'équation de Mésochina *et al.* (1998), établie pour les fourrages, pour estimer la digestibilité de l'herbe uniquement.

2. Influence de la complémentation énergétique et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion et la couverture des besoins nutritionnels de la jument

2.1. Estimation des quantités d'herbe offertes au ras du sol

Pour pouvoir analyser conjointement les résultats des expérimentations de 2012 et 2013 dans cette discussion, il est important d'estimer les quantités d'herbe offertes avec la

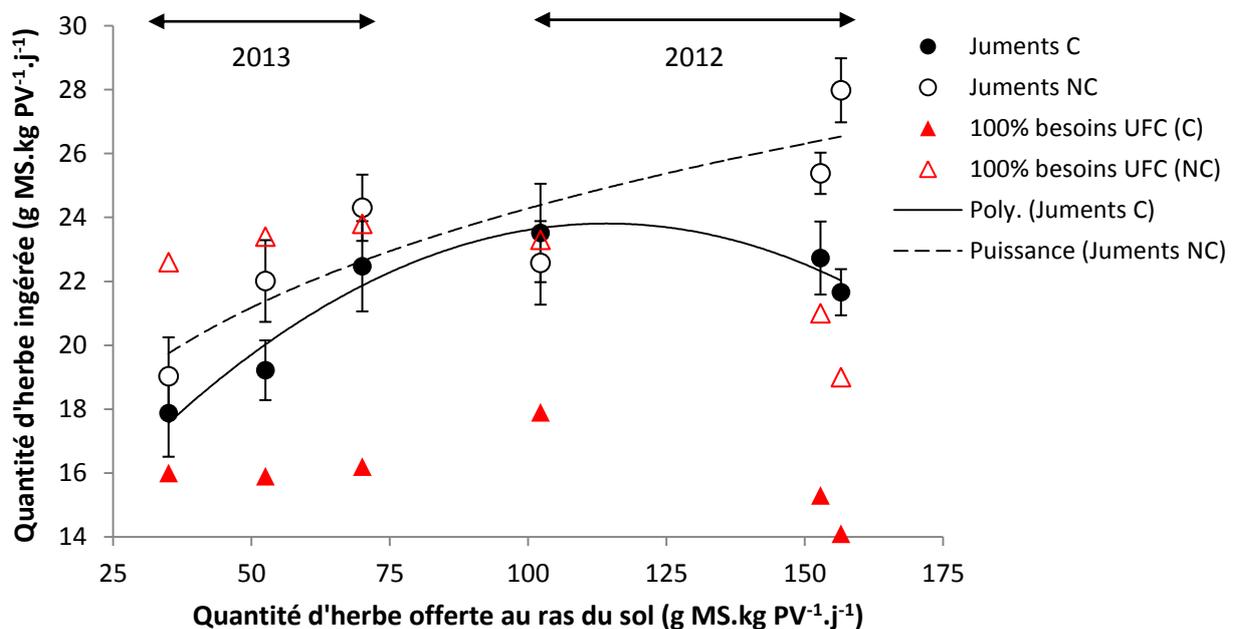
même méthode pour les deux années. En 2012, les prélèvements d'herbe destinés à estimer la biomasse (g MS.m^{-2}) et la quantité d'herbe disponible pour les juments suitées ($\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) ont été réalisés à l'aide d'une tondeuse manuelle. En 2013, les prélèvements d'herbe ont été réalisés en deux temps : d'abord à la tondeuse manuelle puis au ras du sol avec des ciseaux. Des mesures de hauteurs d'herbe ont été effectuées suite au passage de la tondeuse afin de préciser la hauteur de coupe et les biomasses ont été estimées séparément pour les deux prélèvements (tondeuse et ciseaux). Nous avons ainsi pu estimer à 1,9 cm la hauteur moyenne de coupe à la tondeuse et à 79 g MS.m^{-2} la biomasse au ras du sol de l'herbe résiduelle après le passage de la tondeuse. Les quantités d'herbe offertes estimées en 2012 (Collas *et al.*, 2014) ont ainsi pu être ré-estimées au ras du sol : 102,2 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ au premier cycle (soit 61,3 au lieu de 50,2 kg MS par jument), 152,8 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ au second cycle (soit 91,7 au lieu de 77,8 kg MS par jument), et 156,5 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ au troisième cycle (soit 93,9 au lieu de 74,5 kg MS par jument).

2.2. Adaptation du comportement d'ingestion des juments complémentées et non complémentées face aux variations de disponibilité de la ressource

2.2.1. Ingestion journalière

Lorsque nous considérons l'ensemble des résultats obtenus en 2012 et 2013, nous n'observons pas d'influence de la complémentation énergétique sur l'ingestion d'herbe des juments pour des quantités d'herbe offerte comprises entre 35 et 102 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ (Figure 1). Pour des quantités d'herbe offerte supérieures, l'ingestion d'herbe des juments complémentées devient progressivement inférieure à celle des juments non complémentées, avec un écart significatif pour une quantité d'herbe offerte de 157 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ (expérimentation 2012) (Figure 1). L'évolution de l'ingestion d'herbe en fonction de la quantité d'herbe offerte suit dans nos conditions une relation curvilinéaire, plus marquée pour les juments complémentées que pour les juments non-complémentées dans la gamme de quantité d'herbe offerte étudiée (Figure 1). Chez les juments complémentées, l'ingestion d'herbe est toujours supérieure à celle permettant de couvrir les besoins énergétiques. L'ingestion d'herbe maximale (22,6 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ pour une QO de 102 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$), a conduit, avec l'ingestion d'orge, à un taux de couverture des besoins énergétiques de 130%

environ (Figure 1). Chez les juments non-complémentées, l'ingestion n'est pas encore stabilisée pour les quantités d'herbe offerte étudiées (Figure 1). Les juments NC couvrent leurs besoins énergétiques à partir d'une QO de 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ jusqu'à atteindre un taux de couverture des besoins de 144% pour la disponibilité en herbe la plus élevée. Des mesures d'ingestion supplémentaires réalisées sur des niveaux d'herbe offerte plus élevés seraient nécessaires pour préciser la forme de la relation chez les juments NC.



$$\text{Juments C : } y = -0.001x^2 + 0.2274x + 10.826 ; R^2 = 0.9417$$

$$\text{Juments NC : } y = 9.7878x^{0.1973} ; R^2 = 0.7995$$

Figure 1. Variations de l'ingestion journalière d'herbe (g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol (QO, g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 (QO 102 à 157 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) et 2013 (QO 35 à 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) (moyenne ± SEM). Pour chaque QO, l'ingestion d'herbe à réaliser pour couvrir 100% des besoins énergétiques, en considérant l'apport énergétique de l'orge, est représentée pour les juments C et NC par des triangles rouges fermés et ouverts respectivement.

Chez des poulains en croissance exclusivement nourris à l'herbe, Mésochina *et al.*, (2000) ont rapporté des niveaux d'ingestion stables pour des quantités offertes comprises entre 129 et 201 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (i.e. ce qui correspondait à des taux d'utilisation de l'herbe par les animaux compris entre 16 et 10% ; taux d'utilisation de l'herbe = ingestion d'herbe × 100 / quantité d'herbe offerte). Dans notre étude, le niveau maximal d'ingestion d'herbe des

juments NC ($28 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) enregistré sur le plus fort niveau de disponibilité en herbe ($157 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) correspondait à un taux d'utilisation du couvert de 18%. Nos résultats montrent que les juments en lactation complémentées ou non sont capables de réaliser des niveaux d'ingestion largement supérieurs à ceux nécessaires pour satisfaire leurs besoins énergétiques.

L'ajustement de l'ingestion en fonction de la dépense énergétique s'effectue d'une part à court terme, c'est-à-dire au niveau du repas ou de la journée, d'autre part à long terme pour permettre à l'animal de corriger une éventuelle inadéquation entre les besoins et les apports énergétiques. Une limitation de l'ingestion liée à l'effet d'encombrement de la ration n'est pas retenue chez le cheval (Frape *et al.*, 1982 ; Aiken *et al.*, 1989 ; Dulphy *et al.*, 1997a). La faible capacité de l'estomac ne provoque pas d'arrêt de l'ingestion et la motricité efficace au niveau de l'estomac, de l'intestin grêle et du caecum contribue certainement à empêcher l'encombrement de ces compartiments lors du repas. Toutefois, dans le cas d'un fourrage de faible valeur nutritive comme la paille, le fort rétrécissement du colon au niveau de la courbure pelvienne pourrait limiter le passage des aliments et se traduire par un contenu digestif trop volumineux réduisant l'ingestion (Boulot, 1987 ; INRA, 2012). Les produits terminaux de la digestion (glucose, certains acides gras volatils) peuvent provoquer l'arrêt du repas ou les différer (Boulot, 1987). A long terme, semaines ou mois, plusieurs travaux montrent que la régulation de l'ingestion n'est pas parfaite, pour les aliments concentrés en particulier mais aussi dans le cas de fourrages (INRA, 2012).

Dans l'étude de Kuntz *et al.* (2006), des chevaux de Przewalski pâturant des prairies naturelles en Autriche ont ingéré en été et en automne jusqu'à 5,1% de leur poids vif alors que l'ingestion recommandée pour couvrir leurs besoins énergétiques était de 2,5 à 3% du PV. Les auteurs interprètent leurs résultats comme une stratégie de constitution des réserves corporelles qui seront consommées au cours de l'hiver. A l'inverse, Kazmin *et al.* (2013) rapportent que les apports en énergie métabolisable réalisés par des chevaux à l'entretien pâturant des steppes de Russie (île Vodny, lac Manych-Gudilo) excédaient les apports recommandés quelle que soit la saison étudiée. Dans l'étude d'Edouard *et al.* (2009a), des poulains de 2 ans pâturant une herbe de bonne qualité offerte en quantité non limitante ont réalisé une ingestion d'herbe leur permettant de couvrir respectivement 111 et 293% de leurs besoins énergétiques et protéiques. Sur un couvert ras de bonne qualité, une autre étude sur des poulains de 2 ans rapporte une ingestion d'énergie nette et de protéines digestibles permettant de couvrir respectivement 108 et 214% de leurs besoins énergétiques et protéiques

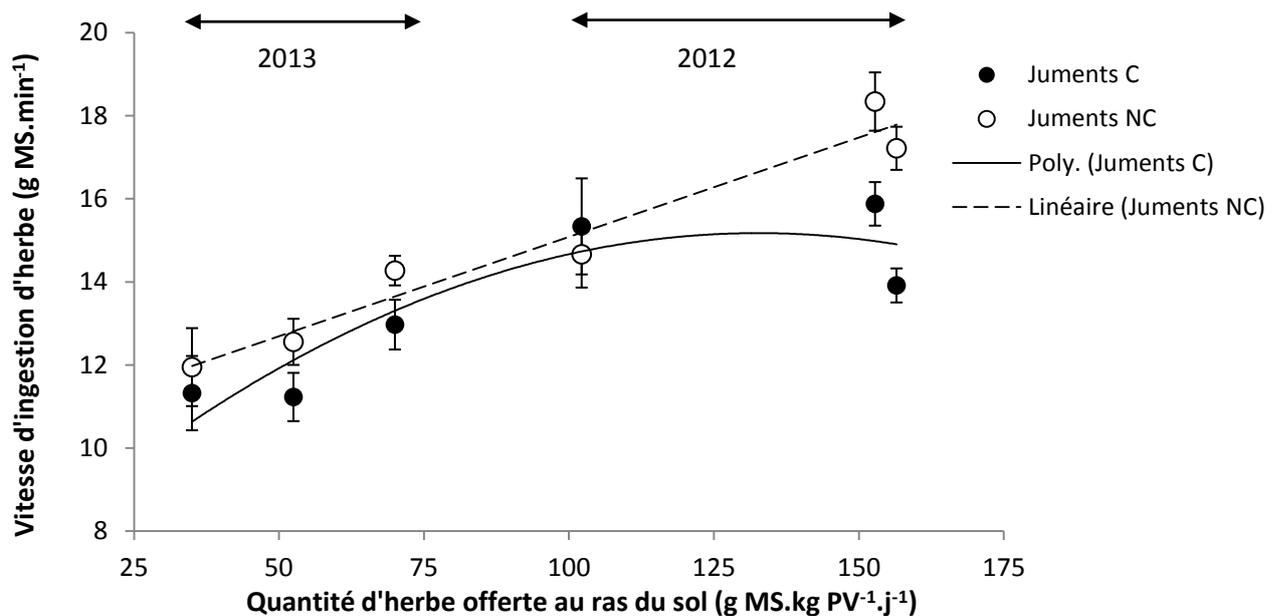
(Edouard *et al.*, 2010). Dans le cas de fourrages conservés distribués *ad libitum*, Winsco *et al.* (2013) rapportent des niveaux d'ingestion de foin de graminée couvrant 130% des besoins en énergie digestible pour des juments de selle en fin de gestation non-complémentées. Pour des juments de selle en fin de gestation et début de lactation recevant un foin de graminée de bonne qualité distribué à volonté, Doreau *et al.* (1990) ont évalué l'ingestion d'énergie entre 113 et 151% des besoins et celle de protéines entre 106 et 165% des besoins. Par ailleurs, Doreau *et al.* (1991) ont étudié l'ingestion d'un régime composé à 90% de fourrage et 10% de concentré par des juments de selle et de trait en période *peripartum* et rapportent des apports énergétiques (111 et 133% respectivement) et protéiques (144 et 165% respectivement) supérieurs aux recommandations. Des niveaux d'ingestion permettant de couvrir 110% des besoins énergétiques ont également été mesurés chez des juments lourdes en fin de gestation et début de lactation alimentées par un régime à base de fourrage (Doreau *et al.*, 1981). Plusieurs travaux conduits sur des poulains de 1 an recevant du foin de graminée et un concentré énergétique ou protéique mettent également en évidence des niveaux d'ingestion permettant aux poulains de réaliser des apports en énergie digestible et en protéines largement supérieurs aux recommandations pour ce type d'animal (Ott *et al.*, 1979 ; Ott et Asquith, 1986).

La jument étant capable d'ingérer des quantités d'herbe supérieures à celles permettant de couvrir ses besoins, l'éleveur doit maîtriser les quantités d'herbe offertes, en particulier si sa valeur nutritive est élevée, pour éviter les problèmes de santé (Müller, 2012; Roberts et Murray, 2013) et limiter les pertes d'herbe (Hardy *et al.*, 2001).

2.2.2. Vitesse d'ingestion et temps de pâturage

La vitesse d'ingestion est le produit de la masse et de la fréquence des bouchées. La masse des bouchées augmente lorsque la quantité de ressource disponible augmente mais la fréquence de bouchées diminue du fait de la compétition entre prélèvement et manipulation de la bouchée (Spalinger et Hobbs, 1992). Ainsi, la forme de la réponse fonctionnelle (i.e. évolution de la vitesse d'ingestion en fonction de la disponibilité en herbe) est de forme asymptotique pour la majorité des herbivores, dont le cheval (Gross *et al.*, 1993 ; Fleurance *et al.*, 2009). Dans le cas des juments complémentées en orge, la vitesse d'ingestion atteint un plateau à environ $15 \text{ g MS} \cdot \text{min}^{-1}$ à partir d'une quantité d'herbe offerte de $102 \text{ g MS} \cdot \text{kg PV}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$, alors que la vitesse d'ingestion des juments non-complémentées continue de s'accroître

dans la gamme de quantité d'herbe offerte testée (Figure 2). Les variations de la vitesse d'ingestion avec la quantité d'herbe offerte sont proches de celles de l'ingestion journalière d'herbe. Les valeurs de vitesses d'ingestion enregistrées dans notre étude (11,3 à 17,2 g MS.min⁻¹) sont supérieures à celles rapportées par Mésochina *et al.* (2000) pour des animaux de format inférieur, i.e. des poulains de selle pâtureant un couvert ad libitum (en moyenne 9,7 g MS.min⁻¹). Elles sont par contre cohérentes avec des mesures réalisées chez des juments en lactation pâtureant un couvert hétérogène en conditions non limitantes (15,3 g MS.min⁻¹). Ces flux d'ingestion mesurés au pâturage sont inférieurs aux valeurs de vitesses d'ingestion instantanées mesurés chez des animaux à jeun auxquels des plateaux d'herbe ont été offerts en box au cours de tests de quelques minutes (e.g. 18 à 58 g MS.min⁻¹ selon la biomasse offerte chez des chevaux de selle à l'entretien, Fleurance *et al.*, 2009 ; 13,5 à 43,1 g MS.min⁻¹ chez des poulains de 2 ans, Edouard *et al.*, 2009, 2010).

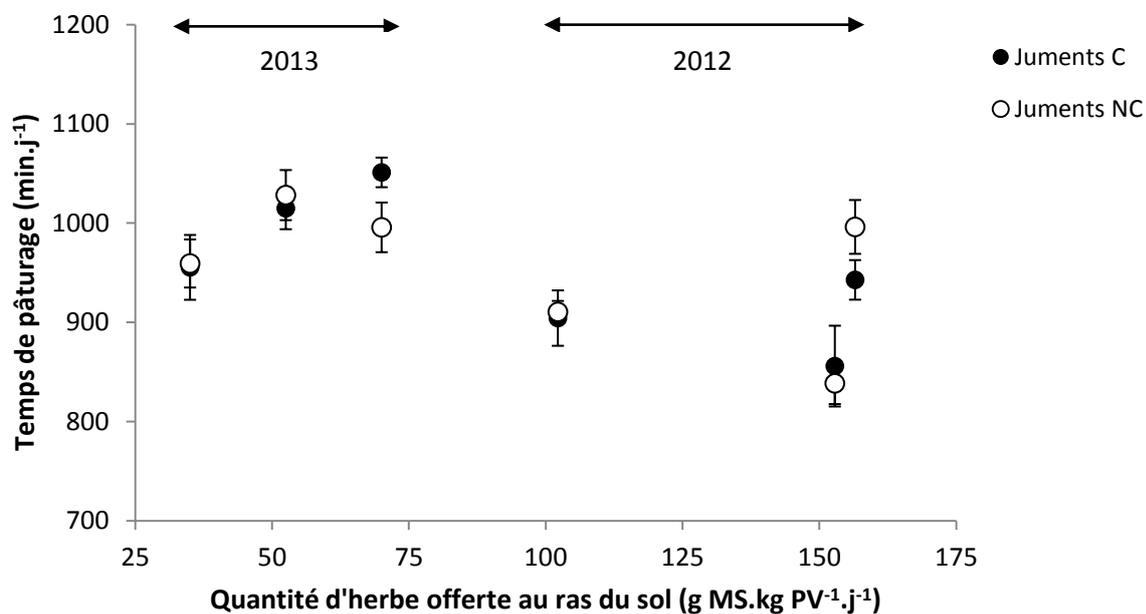


$$\text{Juments C : } y = -0.0005x^2 + 0.1263x + 6.7961 ; R^2 = 81,8\%$$

$$\text{Juments NC : } y = 0.0479x + 10.297 ; R^2 = 9\%$$

Figure 2. Variations de la vitesse d'ingestion d'herbe (g MS.min⁻¹) selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol (QO, g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 (QO 102 à 157 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) et 2013 (QO 35 à 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) (moyenne ± SEM).

Nos résultats montrent que le temps de pâturage des juments complémentées et non-complémentées est moins bien corrélé que la vitesse d'ingestion et l'ingestion journalière avec la quantité d'herbe offerte (juments C : $R^2 = 44\%$, juments NC : $R^2=25\%$; Figure 3). En moyenne, les juments ont pâturé 955 min.j^{-1} soit environ 16 h.j^{-1}). Les valeurs de temps de pâturage mesurées sur les juments en lactation au cours de la thèse sont cohérentes avec celles de la littérature (Duncan, 1992 ; Fleurance *et al.*, 2012). Dans l'étude de Mésochina (2000), des poulains ont augmenté leur temps de pâturage jusqu'à 1032 min.j^{-1} en moyenne dans des conditions de disponibilité en herbe limitantes et de qualité d'herbe variable (suite à une défoliation importante par les poulains) (couverts inférieurs à 3 cm, en moyenne 21 kg MS par animal). Dans l'étude que nous avons conduite en 2013, il est possible que les quantités d'herbe offertes faibles aient été trop limitantes sur la quantité d'herbe offerte la plus faible pour permettre une augmentation du temps de pâturage. Comme nous l'avons observé sur le niveau de disponibilité en herbe le plus faible en 2013, des vaches laitières ont également réduit leur temps de pâturage face à des conditions de disponibilités en herbe sévères (Pérez-Prieto *et al.*, 2011).



Juments C : $R^2 = 44,4\%$

Juments NC : $R^2 = 25,4\%$

Figure 3. Variations du temps de pâturage (min.j^{-1}) selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol (QO, $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC) lors des expérimentations de 2012 (QO 102 à 157 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) et 2013 (QO 35 à 70 $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) (moyenne \pm SEM).

2.3. Implications pour la conduite alimentaire de la jument à l'herbe

2.3.1. Détermination du seuil de quantité d'herbe offerte en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire

En dessous d'un certain seuil, la disponibilité en herbe n'est plus suffisante pour permettre aux juments d'ingérer la quantité d'herbe nécessaire à la couverture de leurs besoins énergétiques. La réponse linéaire de l'ingestion d'herbe aux variations de quantité d'herbe offerte établie dans la gamme étudiée en 2013 a permis d'estimer ce seuil de disponibilité en herbe à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (ou 39 kg MS par jument) (Figure 4). Ce seuil correspond à une ingestion d'herbe de 22,7 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (ou 13,3 kg MS par jument). Selon la quantité d'herbe offerte aux juments dans la gamme étudiée, une équation a été établie pour déterminer la quantité d'énergie à apporter par le complément pour couvrir 100% des besoins énergétiques (Figure 5). Dans nos conditions de disponibilité et de qualité d'herbe (0,6 UFC.kg MS⁻¹ et 90 g MADC.kg MS⁻¹), les besoins protéiques des juments, même non complétementées en orge, ont toujours été couverts (Figure 4).

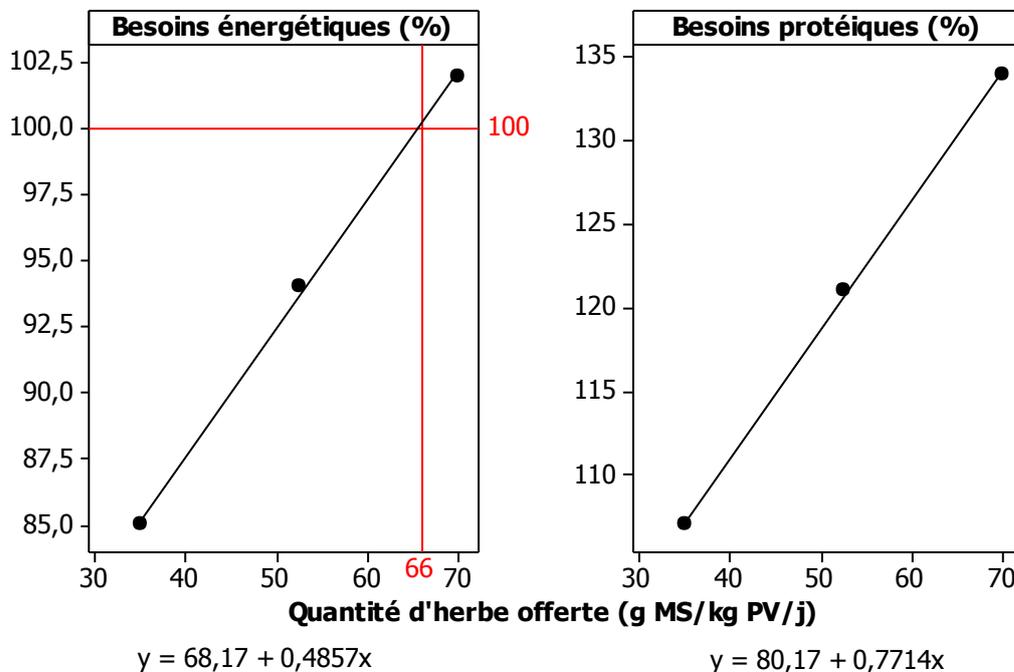
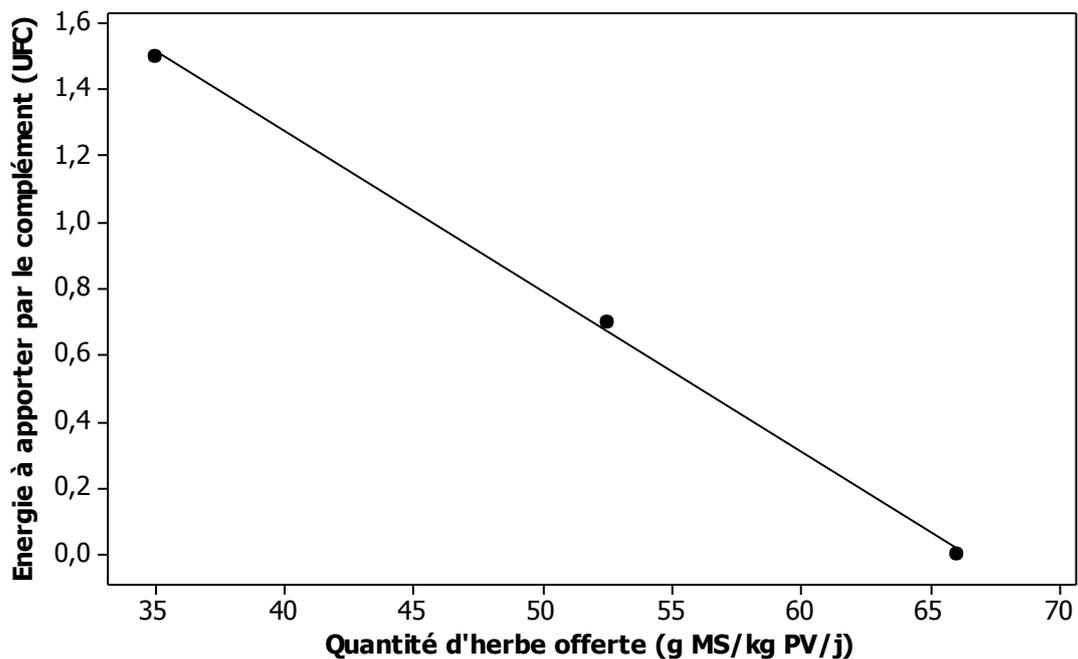


Figure 4. Effet linéaire de la quantité d'herbe offerte (g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) sur la couverture des besoins liée à l'ingestion d'herbe (%) chez les juments non complétementées en orge (expérimentation 2013).



$$y = 3,203 - 0,04826x$$

Figure 5. Quantité d'énergie (UFC) à apporter par le complément pour couvrir 100% des besoins énergétiques des juments selon la quantité d'herbe offerte (g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹) (expérimentation 2013).

2.3.2. Vers des indicateurs simples pour la conduite du pâturage

2.3.2.1. La hauteur d'herbe après pâturage

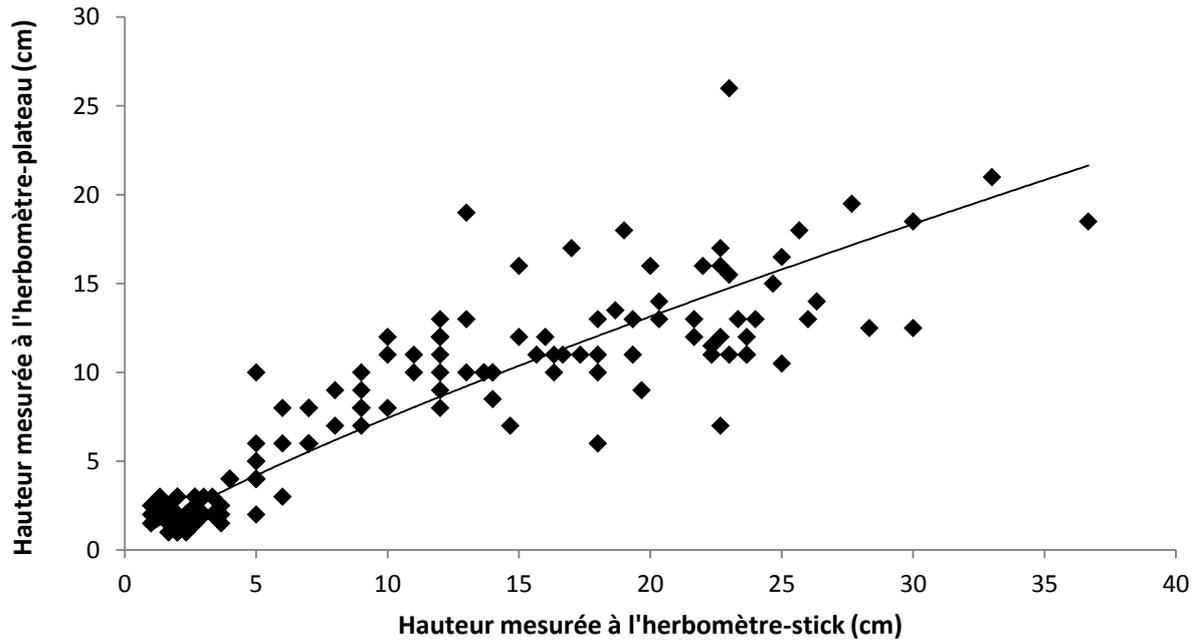
La relation linéaire établie en 2013 entre la quantité d'herbe offerte et la hauteur d'herbe après pâturage a permis d'estimer que le seuil de 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ correspondait à une hauteur d'herbe après pâturage de 5,4 cm. Ainsi, des juments en lactation conduites au pâturage au fil avant - fil arrière sur une herbe de printemps de qualité ne devraient pas être complétées tant que la hauteur d'herbe à leur sortie reste supérieure à cette valeur. L'ingestion d'herbe est d'autant plus élevée que la hauteur d'herbe après pâturage est élevée ($R^2 = 60,9\%$; Figure 8, graphique de gauche).

Lors de nos expérimentations, les hauteurs d'herbe ont été mesurées à l'herbomètre stick (mesure le premier contact avec un organe végétal ; Barthram, 1985 ; Figure 6). Toutefois, sur le terrain, l'herbomètre le plus communément utilisé est l'herbomètre plateau pour lequel la hauteur indiquée dépend de la résistance de l'herbe à la pression exercée par le

plateau (30 cm × 30 cm, 405 g ; Houssin, 2004 ; Figure 6). Afin de transformer les valeurs de hauteurs d'herbe enregistrées avec le stick en valeurs de hauteurs d'herbe « plateaux », plusieurs mesures ont été réalisées en doublon à l'herbomètre plateau (1 mesure) et à l'herbomètre stick (3 mesures sur la surface du plateau) sur une large gamme de hauteurs d'herbe en 2013 (Figure 7). Les mesures réalisées avec l'herbomètre plateau ont été réalisées en second de façon à ne pas exercer de pression sur l'herbe avant la mesure au stick. Ainsi, d'après la relation établie sur nos prairies entre les deux herbomètres, une hauteur stick de 26,6 cm (soit la hauteur moyenne avant pâturage mesurée en 2013) correspond à une hauteur plateau de 16,6 cm. Une hauteur stick de 5,4 cm (soit la hauteur seuil après pâturage mesurée en 2013) correspond à une hauteur plateau de 4,5 cm.



Figure 6. Photos d'un herbomètre stick (à gauche) et d'un herbomètre plateau (à droite) (C. Collas ; <http://www.agrodirect.fr>).



$$y = 1,1146x^{0,8235} ; R^2 = 86,4\%$$

Figure 7. Relation entre la hauteur d’herbe mesurée à l’herbomètre plateau (cm) et la hauteur d’herbe mesurée à l’herbomètre stick (cm) établie en 2013. Chaque mesure réalisée à l’herbomètre plateau a été associée à une moyenne de trois mesures réalisées sur la même zone de végétation à l’herbomètre stick.

2.3.2.2. La hauteur d’herbe disparue

Dans l’objectif d’analyser les variations de l’ingestion d’herbe en fonction de la hauteur d’herbe disparue (% de la hauteur initiale), nous avons utilisé les données de l’expérimentation 2013 pour laquelle les hauteurs d’herbe à l’entrée des animaux ont varié pour une même quantité d’herbe offerte entre les 3 périodes de tests. La hauteur d’herbe disparue semble mieux prédire les quantités d’herbe ingérées ($R^2 = 77,8\%$; Figure 8, graphique de droite) que la hauteur d’herbe après pâturage. L’ingestion d’herbe diminue lorsque la hauteur disparue augmente suivant une relation polynomiale (Figure 8, graphique de droite). Ainsi, pour une quantité d’herbe ingérée de $22,7 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$, qui correspond à une couverture des besoins énergétiques de 100% dans nos conditions, la hauteur disparue est d’environ 82%. Cela signifie qu’en-dessous d’une hauteur d’herbe représentant environ 18% de la hauteur avant pâturage, il est conseillé de compléter les juments ou de leur offrir une nouvelle surface en herbe pour que leurs besoins énergétiques restent couverts. Le seuil de hauteur d’herbe après pâturage de 5,4 cm proposé précédemment représente 20% de la

hauteur d'herbe moyenne avant pâturage (26,6 cm) ce qui est cohérent avec la relation proposée.

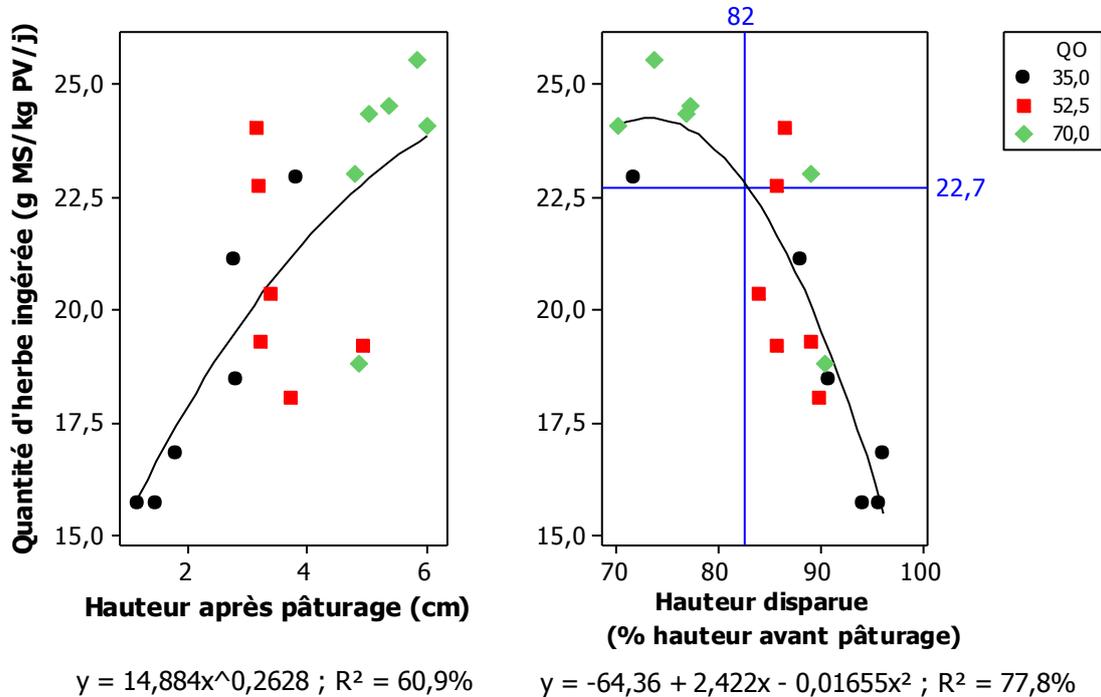


Figure 8. Variations de l'ingestion journalière d'herbe par les juments en lactation ($\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) selon la hauteur d'herbe après pâturage (cm) (à gauche) ou la hauteur d'herbe disparue (% de la hauteur avant pâturage) (à droite) en 2013. Pour chacune des trois quantités d'herbe offertes (QO, $\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$), les six symboles correspondent à différentes hauteurs d'herbe entrée aux 3 périodes pour les juments complémentées et non-complémentées.

2.3.3. Conditions d'application du seuil de quantité d'herbe offerte

Le seuil de quantité d'herbe offerte de $66 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$, en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire, est valide dans des situations où les conditions sont similaires à celles de l'expérimentation réalisée en 2013. Ainsi, les animaux concernés sont des juments de selle d'environ 600 kg PV entre le premier et le quatrième mois de lactation. Les prairies sont des prairies permanentes fertiles, exploitées au printemps au pâturage au fil avant - fil arrière ou en pâturage tournant avec des rotations courtes.

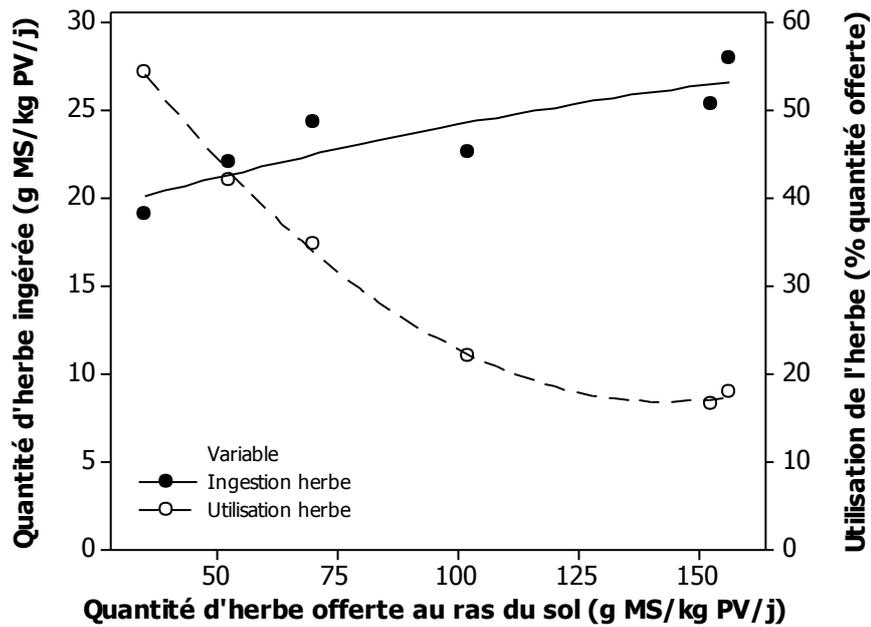
2.3.4. Cas d'un pâturage hétérogène ou de couverts de faible qualité

Dans le cas d'un pâturage au fil avant - fil arrière ou d'un pâturage tournant avec rotations courtes, les chevaux ont peu la possibilité d'exprimer leur sélectivité alimentaire et des indicateurs de hauteur moyenne à la sortie des animaux ou de hauteur moyenne disparue semblent pouvoir être utilisés pour décider de la mise en place d'une complémentation. En revanche, lorsque les chevaux sont conduits en pâturage continu sur de grandes surfaces, ou en pâturage tournant avec des rotations longues, ils sont connus pour pâturer de manière hétérogène. Ainsi, ils entretiennent des zones d'herbes rases où ils concentrent leur alimentation, au sein d'une matrice d'herbes hautes contaminées par leurs déjections (Ödberg et Francis-Smith, 1976 ; Edwards et Hollis, 1982) ; ces patches bien consommés et délaissés restent stables spatialement d'une année sur l'autre (Edwards et Hollis, 1982 ; Dumont *et al.*, 2012). Ce comportement singulier du cheval au pâturage a longtemps été interprété comme une stratégie anti-parasitaire (Taylor, 1954) mais des recherches récentes suggèrent que la sélection de zones rases par les chevaux serait davantage liée à une stratégie de maximisation du flux d'ingestion de protéines digestibles (Fleurance *et al.*, 2005 ; Edouard *et al.*, 2010). Dans le cas d'un pâturage continu ou de rotations longues pour lesquelles les chevaux sont libres d'exprimer leurs choix alimentaires, des indicateurs tels que la hauteur moyenne des zones rases ou la proportion de zones de refus mériteraient d'être testés.

Chez la jument de loisir, voire de sport, conduite dans des zones herbagères qui peuvent être plus ou moins humides ou en zones collinaires ou montagneuses qui peuvent être sèches en été (INRA, 2012), la valeur azotée de l'herbe peut devenir limitante pour des niveaux de disponibilité en herbe même élevés. A notre connaissance, aucune étude n'a analysé l'effet de la complémentation protéique chez la jument sur son ingestion d'un couvert de faible qualité et sur la couverture de ses besoins. A l'auge, le fait d'apporter du tourteau de soja à des chevaux alimentés avec de la paille de faible ingestibilité distribuée en quantité limitée a entraîné un accroissement de l'ingestion du fourrage du fait d'une amélioration de la digestibilité du régime (Wolter *et al.*, 1982). Au pâturage, la complémentation azotée (0, 30 ou 60% des besoins azotés liés à la lactation couverts par le complément) n'a pas modifié la sélectivité alimentaire de juments de selle en lactation pour des repousses végétatives de bonne qualité (en moyenne 84% du temps de pâturage) offertes face à un couvert plus haut mais de faible valeur nutritive).

3. Compromis entre performances animales individuelles et efficacité d'utilisation du couvert

Les données obtenues en 2012 et 2013 montrent que tandis que l'ingestion d'herbe des juments NC s'accroît avec la quantité d'herbe offerte (+35% entre 35 et 157 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹), le taux d'utilisation (% de la quantité offerte consommé) du couvert décroît (-67%) (Figure 9). Ainsi, dans nos conditions, la quantité d'herbe offerte maximisant à la fois l'ingestion d'herbe, donc les performances individuelles, et l'utilisation de l'herbe est estimée à 52,5 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, soit le niveau d'offert intermédiaire de l'expérimentation de 2013 (Figure 9). Pour cette quantité d'herbe offerte, le taux de couverture des besoins énergétiques des juments a été estimé à 94% (120% pour les besoins protéiques). Chez les vaches laitières il est également constaté que le taux d'utilisation de l'herbe est fortement réduit avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte, et que l'ingestion par animal est moins sensible aux variations de quantité d'herbe offerte que l'ingestion par unité de surface (Peyraud et Delagarde, 2013). Chez la vache laitière, pour satisfaire le compromis délicat entre performances individuelles et performances par hectare, plusieurs auteurs recommandent de ne nourrir les vaches qu'à 90% de leurs besoins et d'accepter une chute de la production de lait en limitant la quantité d'herbe offerte (Houssin, 2004 ; Peyraud et Delagarde, 2013). Dans le cas de la jument de selle en lactation, les éleveurs de races de sport seront certainement réticents à ne pas satisfaire 100% des besoins des animaux puisque les objectifs sont de maximiser les performances sportives des produits. Par contre, pour les races destinées à l'équitation de loisir ou à la production de viande, trouver un équilibre entre les performances individuelles et l'efficacité d'utilisation du couvert paraît plus facilement envisageable.



Ingestion herbe : $y = 17,32 + 0,0852x - 0,000166x^2$; $R^2 = 76,7\%$
 Utilisation herbe : $y = 81,89 - 0,9076x + 0,003166x^2$; $R^2 = 99,8\%$

Figure 9. Variations de l'ingestion d'herbe ($\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) et du taux d'utilisation du couvert (% de la quantité d'herbe offerte) selon la quantité d'herbe offerte au ras du sol ($\text{g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$) avec les données mesurées pour les juments non-complémentées en 2012 et 2013.

III. Nutrition et parasitisme

Dans cette thèse l'effet d'une complémentation sur la résistance des chevaux aux nématodes gastro-intestinaux a d'abord été testé par le biais d'une complémentation énergétique au pâturage avant de faire l'objet d'une expérimentation spécifique en box. Dans celle-ci, nous avons testé les effets d'une alimentation enrichie en protéines ou basée sur le sainfoin, une plante riche en métabolites secondaires, en particulier en tanins condensés, en faisant l'hypothèse que la résistance des chevaux serait accrue par rapport à un régime iso-énergétique, ou iso-énergétique et iso-protéique, respectivement, couvrant la totalité de leurs besoins. Cette expérimentation a été complétée par des tests *in vitro* pour confirmer l'effet inhibiteur des métabolites secondaires du sainfoin sur le développement des œufs de parasites en larves infestantes.

1. Un apport énergétique au pâturage ne semble pas renforcer la résistance des juments vis-à-vis des nématodes gastro-intestinaux

Les coproscopies réalisées lors de l'expérimentation au pâturage ont révélé une augmentation de 150 à 2011 œufs de nématodes excrétés par gramme de fèces au cours de la saison de pâturage, sans différence entre les juments complémentées en orge et les juments non-complémentées. Cette absence d'effet peut résulter de la forte ingestion d'herbe des juments non-complémentées, qui leur a permis d'atteindre les mêmes niveaux d'ingestion totale digestible et d'apports énergétiques que les juments complémentées aux deuxième et troisième cycles de pâturage. Puisque les juments des deux lots ont satisfait leurs besoins et avaient des apports énergétiques équivalents durant la majeure partie de la saison de pâturage, il n'est pas possible de conclure à un quelconque effet d'un apport énergétique sur la régulation de l'état parasitaire des juments en lactation.

La période prépatente, c'est-à-dire la durée entre l'ingestion des larves infestantes L3 et l'émission des premiers œufs dans les fèces, est de deux mois pour les cyathostomes (Cabaret, 2011). Les analyses d'infestation de l'herbe réalisées régulièrement dans les parcelles, ont révélé que celles-ci commençaient à être contaminées par des nématodes gastro-

intestinaux fin juillet. L'infestation des juments attribuable aux larves ingérées au pâturage n'aurait ainsi pu se répercuter sur l'émission d'œufs dans les fèces que deux mois plus tard, soit à partir de fin septembre. L'expérimentation s'étant terminée début octobre, elle ne permet pas d'analyser si la complémentation énergétique est susceptible de réduire l'infestation des juments au pâturage en réduisant leur ingestion d'herbe. Un tel effet a déjà été observé chez des agneaux recevant un complément énergétique (Prache, 1988), mais nécessite que la complémentation entraîne une substitution d'herbe par l'aliment concentré ce qui n'est pas toujours le cas chez le cheval (cf. les résultats de notre expérimentation en carré latin). Ferre *et al.* (1995) ont également rapporté une tendance à ce que l'apport d'orge accroisse la résistance de brebis en lactation aux parasites gastro-intestinaux. Ces auteurs n'ont toutefois pas mesuré l'ingestion d'herbe des brebis afin de vérifier si les apports énergétiques différaient entre les animaux complémentés et non-complémentés. On ne peut également pas savoir si l'apport d'orge a pu réduire l'ingestion de larves infestantes par les brebis du fait d'une moindre ingestion d'herbe. Globalement, le métabolisme énergétique ne semble pas être le plus affecté par une infestation par des nématodes gastro-intestinaux (Bown *et al.*, 1991 ; Love *et al.*, 1999), au contraire du métabolisme protéique, en particulier en période *peripartum*. C'est la raison pour laquelle nous avons testé l'effet d'une complémentation protéique à l'occasion de l'expérimentation conduite en box pour approfondir cette question.

2. Une alimentation enrichie en protéines semble inefficace à court-terme vis-à-vis de la résistance des chevaux au parasitisme

Une suralimentation azotée, c'est-à-dire une ration couvrant près de 240% des besoins azotés, durant 18 jours n'a pas permis de réduire le nombre d'œufs de nématodes excrétés par les poulains (NOF) par rapport à un régime témoin iso-énergétique couvrant 100% de leurs besoins. L'excrétion d'œufs a fortement diminué au cours du temps sans variations significatives entre les régimes. Une telle diminution du nombre d'œufs excrétés par les poulains suite à leur mise en box reste inexpliquée. Les coprocultures réalisées pour tester l'effet des régimes offerts sur le développement des œufs de parasites en larves infestantes n'ont également révélé aucun bénéfice d'une suralimentation azotée. Dans une étude

comparative réalisée sur des brebis de race Santa Ines et Ile de France en fin de gestation et en lactation, Rocha *et al.* (2011) ont observé un NOF plus faible pour les brebis Santa Ines, mais pas d'effet du régime riche ou pauvre en protéines appliqué de 21 jours avant la mise-bas jusqu'à 58 jours de lactation. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que, contrairement à ce qui était attendu, l'azote n'était pas limitant dans cette étude. Les niveaux d'anticorps, contre les antigènes de l'espèce de nématode avec laquelle les brebis étaient infestées, étaient cependant plus importants pour les brebis recevant le régime riche en protéines, ce qui traduit une ébauche d'effet. Houdijk *et al.* (2003) ont quant à eux observé un effet de différentes quantités de protéines métabolisables sur l'excrétion fécale, la charge parasitaire finale et la production d'anticorps par des brebis en lactation. Ce résultat a été confirmé par d'autres travaux mettant en évidence l'intérêt d'une complémentation protéique pour alléger la charge parasitaire des petits ruminants en période *peripartum* (Donaldson *et al.* 1998, 2001; Kidane *et al.* 2009), ce qui peut conduire à une adaptation des pratiques d'alimentation avant la mise à l'herbe. L'application d'un régime riche en protéines se révèle intéressant chez les femelles en période *peripartum* pour lesquelles il est souvent observé une relaxation de l'expression de la réponse immunitaire car les besoins azotés augmentent avec la fin de la gestation et le début de la lactation. D'après les priorités d'allocation des ressources proposées par Coop et Kyriazakis (1999), les besoins liés à la reproduction sont prioritaires par rapport à ceux liés aux défenses immunitaires, ainsi, les femelles sont plus vulnérables au parasitisme à cette période. Certains auteurs ont mis en évidence l'intérêt d'une alimentation riche en protéines appliquée dès 7 à 12 semaines avant la mise-bas (Donaldson *et al.*, 1998, 2001). D'autres auteurs ont démontré l'intérêt d'un régime riche en protéines (jusqu'à 1,2 fois les besoins) pour réduire la charge parasitaire des brebis lorsqu'il est appliqué seulement en période de lactation pendant les 20 à 40 jours qui suivent la mise-bas (Houdijk *et al.*, 2003, 2006, 2009 ; Zaralis *et al.*, 2009). Dans ces expérimentations, les réserves protéiques des brebis étaient volontairement diminuées en période de mi- et fin de gestation (apports couvrant 0,7 à 0,9 fois les besoins protéiques) pour mettre en évidence la relaxation de l'immunité. Enfin, des résultats convaincants ont également été obtenus lorsque le régime riche en protéines est appliqué strictement pendant la période *peripartum* (environ 20 jours avant la mise-bas et 20 à 40 jours après) (Houdijk *et al.*, 2005 ; Kidane *et al.*, 2009), les réserves protéiques ayant été volontairement réduites avant la fin de la gestation. Dans notre étude, comme dans celle de Rocha *et al.* (2011), il est possible que les protéines n'aient pas été suffisamment limitantes du fait d'un niveau d'infestation par les nématodes insuffisant. Il aurait été intéressant de réaliser

notre expérimentation sur des juments en début de lactation afin de se placer dans des conditions plus favorables du fait du phénomène de relaxation de l'expression immunitaire autour de la mise bas. Néanmoins, nous n'avons pas pu prendre le risque d'utiliser ce modèle animal pour tester en parallèle l'effet d'un apport élevé de sainfoin car nous ne connaissions pas la potentielle toxicité des métabolites secondaires du sainfoin. Enfin, au regard de ce qui a été démontré par Sakkas *et al.* (2012) chez les ruminants, nous ne pouvons pas exclure l'hypothèse selon laquelle la nature des protéines pourrait conduire à des différences d'efficacité vis-à-vis de la régulation du parasitisme gastro-intestinal.

3. Les métabolites secondaires du sainfoin, une piste à développer pour réduire les traitements anthelminthiques

3.1. Des résultats originaux

Le fait d'apporter durant 18 jours du sainfoin dans le régime, une légumineuse riche en tanins condensés, n'a pas permis de mettre en évidence une diminution du nombre de vers dans les fèces même si ce comptage ne constitue qu'un indicateur partiel de la charge parasitaire réelle. De la même manière, nous n'avons pas observé d'effet du sainfoin sur l'excrétion d'œufs dans les fèces. La méthode de comptage du nombre d'œufs excrétés par gramme de fèces (coproscopie) peut être influencée par différents facteurs liés à la production fécale ou encore à la consistance des fèces et ne pas toujours bien refléter le niveau d'infestation de l'animal (Nielsen *et al.*, 2010a ; Wood *et al.*, 2013). Toutefois, dans les situations où il n'est pas possible d'abattre les animaux pour évaluer leur charge parasitaire par autopsie, elle reste la méthode de référence *in vivo*. Par ailleurs, elle est une donnée intéressante puisque c'est bien le nombre d'œufs excrétés dans l'environnement que l'on cherche à diminuer. Lorsque cela est possible, les effets anthelminthiques testés *in vivo* par des coproscopies doivent toutefois être complétés par des tests *in vitro*.

Dans notre étude, les coprocultures réalisées à partir de fèces prélevées durant l'expérimentation puis les tests d'éclosion réalisés *in vitro* ont ainsi permis de mettre en évidence un effet inhibiteur des métabolites secondaires du sainfoin sur le développement des œufs de nématodes en larves infestantes. Cela permet d'envisager de réduire la contamination des pâtures et l'infestation future des chevaux par les larves infestantes. Chez les petits

ruminants, plusieurs études ont montré que la consommation de plantes riches en tanins condensés pouvait contribuer à réguler le parasitisme gastro-intestinal (Marley *et al.*, 2003 ; Paolini *et al.*, 2005a ; Hoste *et al.*, 2006 ; Brunet *et al.*, 2007 ; Iqbal *et al.*, 2007 ; Hoste *et al.*, 2012 ; Moreno-Gonzalo *et al.*, 2013a, 2013b ; Werne *et al.*, 2013). En élevage ovin bio, une cure de sainfoin est ainsi parfois réalisée avant la mise à l'herbe pour « déparasiter » les animaux (Prache *et al.*, 2011). Le résultat obtenu durant ma thèse constitue une première mise en évidence des bénéfices potentiels du sainfoin vis-à-vis de l'infestation par les nématodes chez le cheval. Au-delà de ce résultat original, l'effet différé des métabolites secondaires du sainfoin sur le cycle des nématodes (i.e. réduction du nombre d'œufs excrétés et donc de l'infestation suivante des hôtes potentiels au pâturage) souligne l'intérêt d'investiguer l'influence des plantes bioactives sur la viabilité des œufs excrétés (voir également Molan *et al.*, 2002).

3.2. Un effet uniquement direct ?

Dans notre étude, l'effet direct des métabolites secondaires du sainfoin sur le développement des œufs de nématodes en larves infestantes, mis en évidence grâce aux coprocultures de fèces prélevées durant l'expérimentation *in vivo*, a été ensuite confirmé par les tests *in vitro* d'éclosion des œufs et de développement larvaire. Il a en effet été constaté une réduction de 37% du nombre d'œufs qui éclosent en larves L1 en 48 h lorsque les œufs sont mis en contact d'une solution à 0,5% de diméthylsulfoxyde (DMSO) dont la concentration de sainfoin est égale ou supérieure à 7,5 mg.mL⁻¹. De même, nous avons constaté une réduction de 83% du nombre d'œufs qui se développent en larves infestantes L3 au bout de quinze jours lorsque les fèces mises en culture comprennent 29% de sainfoin contenant 5,2% MS de tanins condensés. A ce jour seule l'étude de Payne *et al.* (2013) est la seule étude *in vitro* à s'être intéressée au potentiel effet anthelminthique d'extraits de plantes bioactives vis-à-vis des strongles gastro-intestinaux du cheval. Les auteurs ont mis en évidence une réduction significative du taux de développement des cyathostomes avec sept extraits de plantes australiennes à partir d'une concentration de 1,4 mg.mL⁻¹. L'effet de ces plantes nécessite cependant d'être confirmé par des tests *in vivo*. Les tests *in vitro* rapportés dans la littérature sur des espèces de nématodes GI infestant les chevaux ou des petits ruminants mettent en évidence des effets anthelminthiques à partir de concentrations nettement plus faibles. Ainsi, Payne *et al.* (2013) rapportent une réduction significative du

taux de développement des cyathostomes pour des concentrations d'extraits de plantes australiennes de $1,4 \text{ mg.mL}^{-1}$. Chez les petits ruminants, Molan *et al.* (2000, 2002) ont observé une réduction de l'éclosion des œufs de 34%, du développement en larves infestantes de 87 à 100% et de la mobilité des larves de 21 à 39% avec une concentration de $400 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$ d'extraits de divers fourrages bioactifs tels que le lotier ou le sulla. Avec le sainfoin, plusieurs auteurs s'accordent sur une concentration comprise entre 300 et $600 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$ pour observer des effets AH *in vitro* sur les nématodes des ruminants (Paolini *et al.*, 2004 ; Alonso-Diaz *et al.*, 2008). En étudiant les effets de plusieurs espèces de bruyère (extraits de *Calluna vulgaris*, *Erica cinerea*, *Erica umbellata*), Moreno-Gonzalo *et al.* (2013a, 2013b) ont observé une réduction de l'éclosion des œufs de 50% pour une concentration de $450 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$, une inhibition, ou un ralentissement (selon l'espèce de ver considérée), du dégainement larvaire pour des concentrations entre 150 et $1200 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$, ainsi qu'une réduction de la mobilité des vers adultes pour une concentration de $1200 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$. Avec plusieurs extraits de fourrages, Molan et Faraj (2010) ont montré une réduction de l'éclosion des œufs à partir d'une concentration de $900 \text{ } \mu\text{g.mL}^{-1}$. Une étude de Al-Rofaai *et al.* (2012) rapporte cependant des effets sur l'éclosion des œufs pour une concentration de fourrages (*Azadirachta indica* et *Manihot esculenta*) élevée de $12,5 \text{ mg.mL}^{-1}$. Plusieurs facteurs tels que l'espèce ou le stade de la plante, l'espèce de nématode ou le stade du parasite semblent influencer le degré d'efficacité anthelminthique des plantes contenant des métabolites secondaires.

Chez les ruminants, il a été montré que les tanins condensés pouvaient exercer un effet direct sur les parasites gastro-intestinaux mais aussi qu'ils avaient des effets nutritionnels indirects sur les parasites, en protégeant les protéines alimentaires de la dégradation ruminale et en favorisant leur absorption intestinale. Comme nous l'avons vu, l'amélioration de la nutrition protéique peut en effet permettre un apport de nutriments supplémentaires qui renforcent la capacité de résilience de l'animal après une infestation et/ou son immunité vis-à-vis du parasitisme (Aerts *et al.*, 1999). Lors de notre expérimentation, un apport à court terme de protéines n'a pas eu d'effet sur l'état parasitaire des animaux, ce qui pourrait laisser supposer une absence d'effet antiparasitaire indirect du sainfoin chez le cheval. De plus, même si le pH neutre du tube digestif du cheval (Wolter, 1984) pourrait favoriser la formation des complexes tanins condensés-protéines, il n'est pas certain que ces complexes parviennent ensuite à se dissocier puisque le pH reste proche de la neutralité dans tous ses compartiments digestifs, alors qu'une telle dissociation est réalisée dans l'intestin des ruminants dont le pH est acide. Bien que cette hypothèse mérite d'être approfondie, il est peu probable qu'on

observe chez le cheval un effet anthelminthique indirect des tanins condensés occasionné par une meilleure absorption des protéines.

3.3. Quelles conditions pratiques d'utilisation ?

Afin d'aboutir à des préconisations pratiques, il serait utile de préciser la dose à partir de laquelle l'apport de sainfoin se révèle efficace vis-à-vis du parasitisme, sans provoquer chez l'hôte d'effets antinutritionnels liés aux métabolites secondaires. Pour cela, il faudrait analyser les teneurs en MAT, azote microbien et azote ammoniacal d'échantillons de fèces de chevaux consommant du sainfoin offert en proportion variable dans les rations, et sous différentes formes. Chez les petits ruminants, il est classiquement rapporté que les tanins condensés ont des effets bénéfiques sur la nutrition des animaux, leurs performances et leur état parasitaire lorsque 2 à 5% MS de tanins condensés sont inclus dans la ration (Aerts *et al.*, 1999 ; Barry et McNabb, 1999 ; Brunet, 2008). Des effets antinutritionnels ont en revanche été rapportés pour des teneurs en tanins condensés entre 5 et 10% MS du régime (Barry et McNabb, 1999 ; Min et Hart, 2003 ; Brunet, 2008). Dans notre expérimentation, les granulés de sainfoin qui ont permis d'apporter 3,6% MS en tanins condensés dans le régime, ont été bien ingérés par les chevaux et aucun problème de santé n'a été détecté ni durant la semaine d'habituance, ni dans les 18 jours de mise en régime. Les doses offertes pourraient même être réduites puisque les résultats *in vitro* révèlent que les effets anthelminthiques des métabolites secondaires sur le développement des œufs en larves infestantes sont observés pour des proportions de sainfoin dans les fèces de l'ordre de 29%. Dans le cas où cette proportion correspondrait à 29% de sainfoin dans la ration (c'est-à-dire que la digestibilité soit la même pour l'ensemble des composants du régime), cela impliquerait une proportion de 1,5% MS de tanins condensés dans le régime avec un sainfoin contenant 5,2% MS de tanins condensés).

L'étude des effets de différents régimes sur l'état parasitaire des chevaux vise à développer des solutions alternatives aux anthelminthiques chimiques pour une gestion plus durable du parasitisme qui limite les résistances et les rejets de molécules toxiques dans l'environnement. Nos premiers résultats mis en avant sur les effets inhibiteurs du sainfoin sur le développement larvaire sont prometteurs mais ne peuvent pas nécessairement être extrapolés à toutes les situations. Des différences d'efficacité des tanins condensés sur la régulation du parasitisme ont en effet été rapportées chez les petits ruminants (Paolini *et al.*, 2005b). Elles sont en particulier liées à des différences de teneurs et de structure des tanins,

elles-mêmes liées à des différences de mode de conservation de la plante (Brunet, 2008 ; Theodoridou, 2010). Les propriétés des tanins condensés dépendent en partie de leur degré de polymérisation (Brunet *et al.*, 2011). Koupai-Abyazani *et al.* (1993) rapportent que les tanins condensés du sainfoin sont généralement composés de 5 à 8 monomères. Les monomères de tanins condensés, ou flavan-3-ols, sont également présents dans le sainfoin et peuvent interagir avec les nématodes GI (Brunet et Hoste, 2006 ; Moreno-Gonzalo *et al.*, 2013a, 2013b). Des études complémentaires sont donc nécessaires pour déterminer si l'action anthelminthique du sainfoin est attribuable uniquement aux tanins condensés ou aussi à d'autres flavonoïdes.

IV. Conclusion générale

Les résultats obtenus au cours de la thèse ont démontré qu'une complémentation énergétique au pâturage ne devait pas être systématique puisque les juments en lactation peuvent réaliser des performances zootechniques tout à fait satisfaisantes en l'absence de complémentation lorsqu'elles pâturent un couvert non limitant ni en quantité, ni en qualité (Figure 10). Les facteurs de variation du taux de substitution entre l'herbe et les concentrés restent mal connus chez le cheval : nos résultats indiquent qu'une substitution apparaît pour les quantités d'herbe offerte élevées mais l'effet de la disponibilité du fourrage reste à préciser. Il faudra également analyser les variations de taux de substitution liées aux besoins des animaux et aux autres caractéristiques de la ressource telles que la nature du concentré, la quantité offerte et la valeur nutritionnelle du fourrage.

D'autre part, les résultats de la thèse ont permis de déterminer un seuil de quantité d'herbe offerte au stade végétatif en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire pour couvrir les besoins de juments de selle en lactation (Figure 11). Ces résultats ont été intégrés aux nouvelles recommandations alimentaires de l'INRA pour la jument de selle en lactation (INRA, 2015). Des études complémentaires sont à présent nécessaires pour valider ou infléchir ce seuil pour différentes gestions du pâturage : d'une part un pâturage continu ou en rotation longue sur des surfaces plus importantes permettant au cheval de créer de l'hétérogénéité spatiale ; d'autre part des prairies couvrant une plus large gamme de valeurs nutritives, notamment des couverts de qualité médiocre, ou des hauteurs d'herbe plus contrastées lors de l'entrée des animaux dans les parcelles (Figure 11). Dans nos conditions expérimentales avec un couvert de bonne qualité majoritairement au stade végétatif, le seuil de quantité d'herbe offerte établit correspond à une hauteur d'herbe après pâturage d'environ 5 cm, soit 20% de la hauteur entrée de pâturage. La hauteur d'herbe résiduelle, ou le pourcentage de hauteur consommée, pourraient constituer des indicateurs de gestion simples à mesurer pour assurer que le pâturage couvre les besoins des animaux et cela même en l'absence de complémentation. Parce qu'enfin, une gestion optimale du pâturage nécessite d'atteindre le bon équilibre entre performances individuelles des animaux et efficacité d'utilisation de l'herbe, la relation entre quantité d'herbe offerte, ingestion et utilisation de l'herbe par les juments en lactation nécessite d'être précisée.

Par ailleurs, ma thèse a permis de tester les effets de différentes complémentations alimentaires sur la régulation de l'état parasitaire du cheval. Les complémentations énergétiques ou azotées n'ont pas eu d'effet sur celle-ci dans nos conditions expérimentales. Les bénéfices liés à une réduction de l'infestation au pâturage liée à une moindre ingestion d'herbe, et donc de larves infestantes, du fait de la complémentation n'ont pas été abordés, mais nécessiterait que la complémentation entraîne une substitution d'herbe par l'aliment concentré ce qui n'a pas toujours été le cas. Nos résultats originaux sur l'effet anthelminthique des métabolites secondaires du sainfoin qui réduisent le développement des œufs en larves infestantes, nécessitent d'être approfondis avant d'aboutir à des recommandations pratiques. En particulier, il convient encore de préciser l'effet de la teneur du régime en sainfoin, de sa durée de distribution, et les variations d'efficacité liées à son mode de distribution (granulés, foin ou fourrage pâturé).

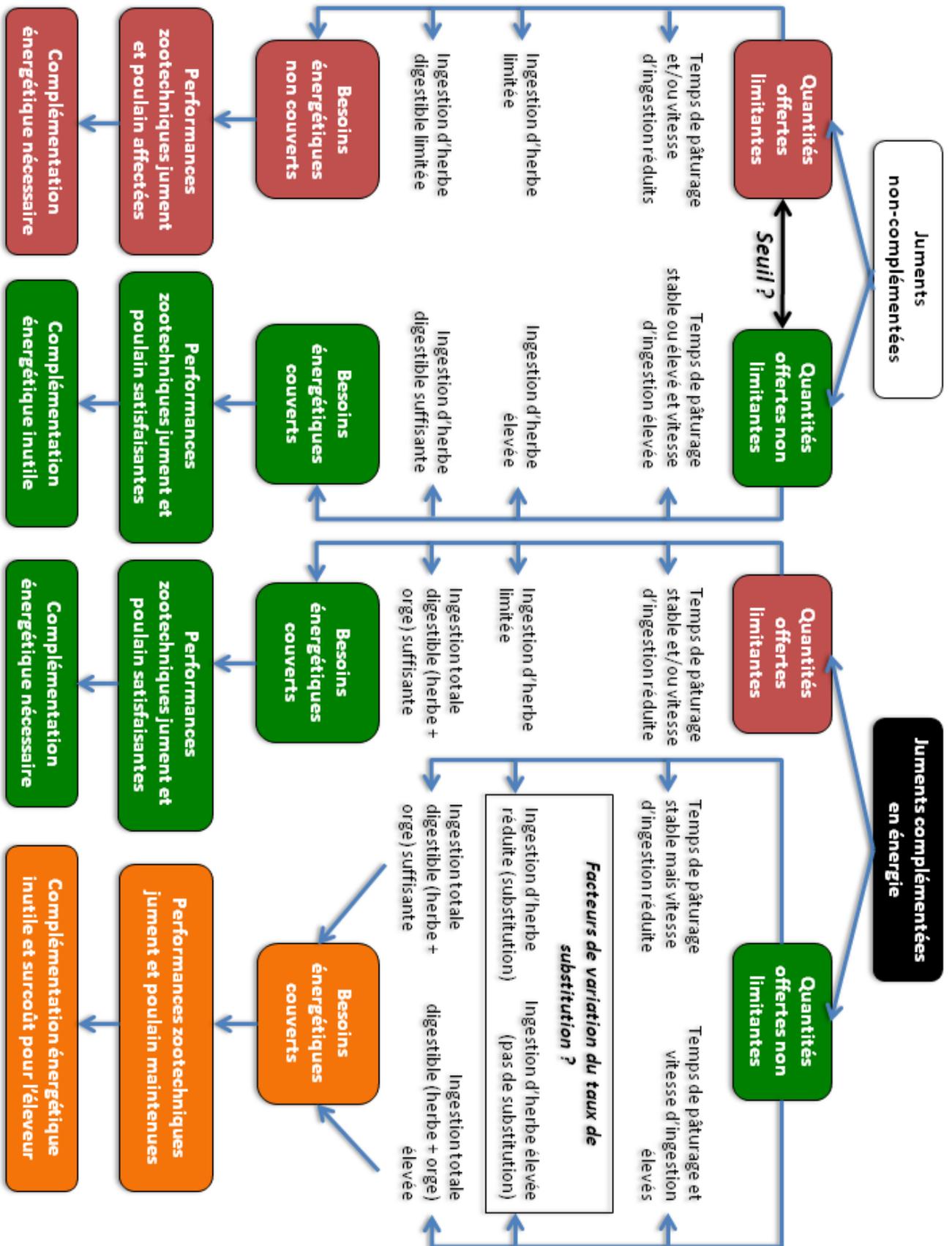


Figure 10. Schéma récapitulatif de l'ingestion et du comportement alimentaires des juments en lactation complémentées en orge ou non dans différentes situations de quantités d'herbe offertes.

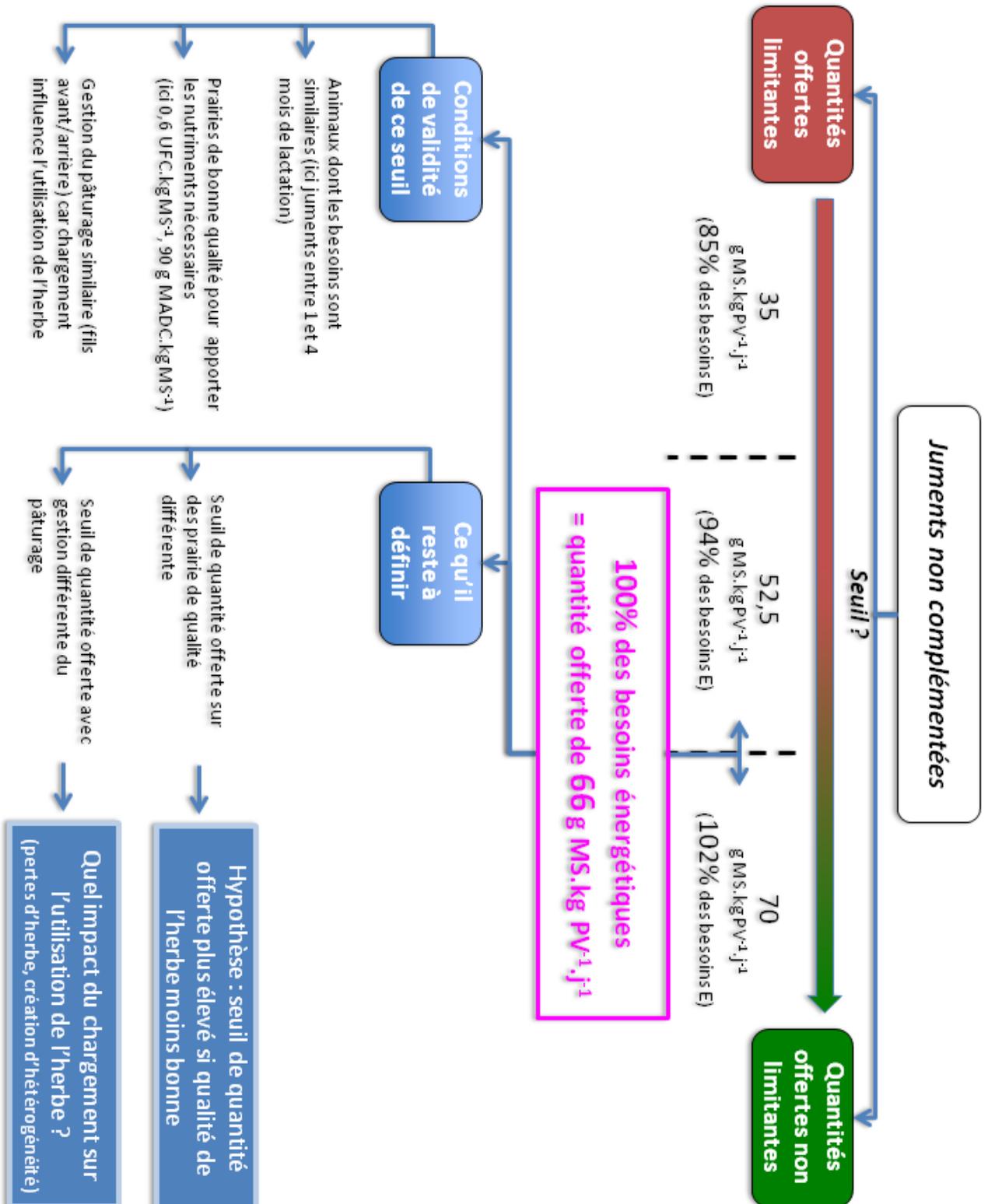


Figure 11. Seuil de quantité d’herbe offerte en-dessous duquel une complémentation énergétique des juments en lactation est nécessaire, et conditions de validité de ce seuil. Ce schéma est un « zoom » sur la réponse des juments non-complémentées présentée sur la figure 10.

Références

- Aerts RJ, Barry TN and McNabb WC 1999. Polyphenols and agriculture: beneficial effects of proanthocyanidins in forages. 75, 1-12.
- AFNOR 1993. NF V03-040, agricultural food products. Determination of crude fibre. <http://www.afnor.org/en>. (Accessed 01 March 2012).
- AFNOR 1997. NF V18-120, animal feeding stuffs. Determination of nitrogen content. Combustion method (DUMAS). Assoc. Française Normalisation. AFNOR Editions, La Plaine Saint-Denis, France.
- Aiken MS, Potter GD, Conrad BE and Evans JW 1989. Voluntary intake and digestion of coastal bermuda grass hay by yearling and mature horses. *Equine Veterinary Science* 9, 262-264.
- Agabriel J, Trillaud-Geyl C, Martin-Rosset W et Jussiaux M 1982. Utilisation de l'ensilage de maïs par le poulain de boucherie. *Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix INRA* 49, 5-13.
- Albers GAA, Gray GD, Piper LR, Barber JSF, LeJambre LF and Barger IA 1987. The genetics of resistance and resilience to *Haemonchus contortus* infection in young merino sheep. *International Journal for Parasitology* 17, 1355-1367.
- Alonso-Díaz MA, Torres-Acosta JFJ, Sandoval-Castro CA, Hoste H and Aguilar-Caballero AJ 2008. In vitro larval migration and kinetics of exsheathment of *Haemonchus contortus* larvae exposed to four tropical tanniferous plant extracts. *Veterinary Parasitology* 153, 313-319.
- Al-Rofaai A, Rahman WA, Sulaiman SF and Yahaya ZS 2012. *In vitro* activity of neem (*Azadirachta indica*) and cassava (*Manihot esculenta*) on three pre-parasitic stages of susceptible and resistant strains of *Teladorsagia (Ostertagia) circumcincta*. *Veterinary Parasitology* 188, 85-92.
- American Horse Council 2005. Complete national economic impact study. <http://www.horsecouncil.org/national-economic-impact-us-horse-industry>. (Accessed 16 June 2014).
- Athanasiadou S, Kyriazakis I, Jackson F and Coop RL 2000. Effects of short-term exposure to condensed tannins on adult *Trichostrongylus colubriformis*. *Veterinary Record* 146, 728-732.

- Athanasidou S, Kyriazakis I, Jackson F and Coop RL 2001. Direct anthelmintic effects of condensed tannins towards different gastrointestinal nematodes of sheep: in vitro and in vivo studies. *Veterinary Parasitology* 99, 205-219.
- Athanasidou S, Tzamaloukas O, Kyriazakis I, Jackson F and Coop RL 2005. Testing for direct anthelmintic effects of bioactive forages against *Trichostrongylus colubriformis* in grazing sheep. *Veterinary Parasitology* 127, 233-243.
- Athanasidou S, Houdijk J and Kyriazakis I 2008. Exploiting synergisms and interactions in the nutritional approaches to parasite control in sheep production systems. *Small Ruminant Research* 76, 2-11.
- Aufrère J, Theodoridou K et Baumont R 2012. Valeur alimentaire pour les ruminants des légumineuses contenant des tannins condensés en milieux tempérés. *INRA Productions Animales* 25, 29-44.
- Austbo D 1986. Digestibility of feeds for horses - 1 - Hay, NH₃-treated/untreated straw - 2 - Whole oats, rolled oats, Na-OH treated oats. In 37th Annual Meeting EAAP, Budapest, Hongrie.
- Barger IA 1999. The role of epizootiological knowledge and grazing management for helminth control in small ruminants. *International Journal for Parasitology* 29, 41-47.
- Bargo F, Muller LD, Delahoy JE and Cassidy TW 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of Dairy Science* 85, 1777-1792.
- Barrau E, Fabre N, Fouraste I. and Hoste H 2005. Effect of bioactive compounds from Sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) on the *in vitro* larval migration of *Haemonchus contortus*: role of tannins and flavonol glycosides. *Parasitology* 131, 531-538.
- Barrier I et Laugier C 2011. Les parasites digestifs. <http://www.harasnationaux.fr/information/accueil-equipaedia/maladies/maladies-parasitaires/les-parasites-digestifs.html> (Accès le 05 octobre 2014).
- Barry TN and McNabb WC 1999. The implications of condensed tannins on the nutritive value of temperate forages fed to ruminants. *British Journal of Nutrition* 81, 263-272.

- Barthram GT 1985. Experimental techniques: the HFRO sward stick. *_/ Bienn.Rep. 1984_/85, 29_/30. Hill Farming Res. Org., Penicuik, UK.*
- Baumont R, Prache S, Meuret M and Morhand Fehr P 2000. How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: a review. *Livestock Production Science* 61, 15-28.
- Bedoin F and Kristensen T 2013. Sustainability of grassland-based beef production - Case studies of Danish suckler farms. *Livestock Science* 158, 189-198.
- Bennick A 2002. Interaction of plant polyphenols with salivary proteins. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine* 13, 184-196.
- Bernués A, Ruiz R, Olaizola A, Villalba D and Casasús I 2011. Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science* 139, 44-57.
- Boulot S 1987. L'ingestion chez la jument. Etude de quelques facteurs de variation au cours du cycle gestation-lactation ; implications nutritionnelles et métaboliques. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Boval M, Fanchone A, Archimède H and Gibb MJ 2007. Effect of structure of a tropical pasture on ingestive behaviour, digestibility of diet and daily intake by grazing cattle. *Grass and Forage Science* 62, 44-54.
- Bown MD, Poppi DP and AR Sykes 1991. The effect of post-ruminal infusion of protein or energy on the pathophysiology of *Trichostrongylus colubriformis* infection and bodycomposition in lambs. *Australian Journal of Agricultural Research* 42, 253–267.
- Bricarello PA, Amarante AFT, Rocha RA, Cabral Filho SL, Huntley JF, Houdijk JMG, Abdalla AL and Gennari SM 2005. Influence of dietary protein supply on resistance to experimental infections with *Haemonchus contortus* in Ile de France and Santa Ines lambs. *Veterinary Parasitology* 134, 99-109.
- Brunet S 2008. Analyse des mécanismes d'action antiparasitaire de plantes riches en substances polyphénoliques sur les nématodes du tube digestifs des ruminants. Université Paul Sabatier, Toulouse.

- Brunet S and Hoste H 2006. Monomers of condensed tannins affect the larval exsheathment of parasitic nematode of ruminants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 7481-7487.
- Brunet S, Aufrère J, El Babili F, Fouraste I and Hoste H 2007. The kinetics of exsheathment of infective nematode larvae is disturbed in the presence of a tannin-rich plant extract (sainfoin) both *in vitro* and *in vivo*. *Parasitology* 134, 1253-1262.
- Brunet S, Jackson F and Hoste H 2008. Effects of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) extract and monomers of condensed tannins on the association of abomasal nematode larvae with fundic explants. *International Journal for Parasitology* 38, 783-790.
- Brunet S, Hoste H, Arroyo-López C, Manolaraki F, Martínez-Ortiz de Montellano C, Sotiraki S and Torres-Acosta, F 2011. The anthelmintic properties of tannin-rich legume forages: from knowledge to exploitation in farm conditions. In: *Challenging strategies to promote the sheep and goat sector in the current global context*. Zaragoza: CIHEAM/CSIC/ Universidad de León/FAO. p. 295-304.
- Cabaret J 2011. Gestion durable des strongyloses chez le cheval à l'herbe : réduire le niveau d'infestation tout en limitant le risque de résistance aux anthelminthiques. *Fourrages* 207, 215-220.
- Carstensen H, Larsen L, Ritz C and Nielsen MK 2013. Daily variability of strongle fecal egg counts in horses. *Journal of Equine Veterinary Science* 33, 161-164.
- Cenci FB, Louvandini H, Mcmanus CM, Dell'porto A, Costa DM, Araujo SC, Minho AP and Abdalla AL 2007. Effects of condensed tannin from *Acacia mearnsii* on sheep infected naturally with gastrointestinal helminthes. *Veterinary Parasitology* 144, 132-137.
- Chenost M et Martin-Rosset W 1985. Comparaison entre espèces (mouton, cheval, bovin) de la digestibilité et des quantités ingérées des fourrages verts. *Annales de Zootechnie* 34, 291-312.
- Clausen TP, Provenza FD, Burrit EA, Reichardt PB and Bryant JP 1990. Ecological implications of condensed tannins structure: a case study. *Journal of Chemical Ecology* 16, 2381-2392.

-
- Coles GC, Jackson F, Pomroy WE, Prichard RK, von Samson-Himmelstjerna G, Silvestre A, Taylor MA and Vercruyse J 2006. The detection of anthelmintic resistance in nematodes of veterinary importance. *Veterinary Parasitology* 136, 167-185.
- Collas C, Fleurance G, Cabaret J, Martin-Rosset W, Wimel L, Cortet J and Dumont B 2014. How does the suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism in lactating saddle mares? *Animal* 8, 1290-1297.
- Collobert-Laugier C, Hoste H, Sevina C, Chartier C and Dorchies P 2002a. Mast cell and eosinophil mucosal responses in the large intestine of horses naturally infected with cyathostomes. *Veterinary Parasitology* 107, 251-264.
- Collobert-Laugier C, Hoste H, Sevina C and Dorchies P 2002b. Prevalence, abundance and site distribution of equine small strongyles in Normandy, France. *Veterinary Parasitology* 110, 77-83.
- Coop RL and Field AC 1983. Effects of phosphorus intake on growth rate, food intake and quality of the skeleton of growing lambs infected with the intestinal nematode *Trichostrongylus vitrinus*. *Research Veterinary Science* 35, 175-181.
- Coop RL and Holmes PH 1996. Nutrition and parasite interaction. *International Journal for Parasitology* 26, 951-962.
- Coop RL and Kyriazakis I 1999. Nutrition-parasite interaction. *Veterinary Parasitology* 84, 187-204.
- Craig TM, Diamond PL, Ferwerda NS and Thompson JA 2007. Evidence of ivermectin resistance by *Parascaris equorum* on a Texas horse farm. *Journal of Equine Veterinary Science* 27, 67-71.
- Craven J, Bjorn H, Henriksen SA, Nansen P, Larsen M and Lendal S 1998. Survey of anthelmintic resistance on Danish horse farms, using 5 different methods of calculating faecal egg count reduction. *Equine Veterinary Journal* 30, 289-293.
- Cringoli G, Rinaldi L, Veneziano V, Capelli G and Scala A 2004. The influence of flotation solution, sample dilution and the choice of McMaster slide area (volume) on the reliability of the McMaster technique in estimating the faecal egg counts of

- gastrointestinal strongyles and *Dicrocoelium dendriticum* in sheep. *Veterinary Parasitology* 123, 121-131.
- Crozier JA, Allen VG, Jack NE, Fontenot JP and Cochran MA 1997. Digestibility, apparent mineral absorption, and voluntary intake by horses fed alfalfa tall fescue, and caucasian bluestem. *Journal of Animal Science* 75, 1651-1658.
- Cymbaluk NF 1990. Comparison of forage digestion by cattle and horses. *Canadian Journal of Animal Science* 70, 601-610.
- Dalley DE, Roche JR, Grainger C and Moate PJ 1999. Dry matter intake, nutrient selection and milk production of dairy cows grazing rainfed perennial pastures at different herbage allowances in spring. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 39, 923-931.
- Datta FU, Nolan JV, Rowe JB and Gray GD 1998. Protein supplementation improves the performance of parasitised sheep fed a straw based diet. *International Journal for Parasitology* 28, 1269-1278.
- Dargie JD 1980. The pathophysiological effects of gastrointestinal and liver parasites in sheep. In *Digestive physiology and Metabolism in Ruminants* (eds. Ruckebusch and Thivend). MTP Press, Lancaster, UK.
- Delaby L, Peyraud JL and Delagarde R 2001. Effect of the level of concentrate supplementation, herbage allowance and milk yield at turn-out on the performance of dairy cows in mid lactation at grazing. *Animal Science* 73, 171-181.
- Delaby L, Peyraud JL et Delagarde R 2003. Faut-il compléter les vaches laitières au pâturage ? *INRA Productions Animales* 16, 183-195.
- Delagarde R, Peyraud JL and Delaby L 1999. Influence of carbohydrate or protein supplementation on intake, behaviour and digestion in dairy cows strip-grazing low-nitrogen fertilized perennial ryegrass. *Annales de Zootechnie* 48, 81-96.
- Delagarde R, Prache S, D'Hour P et Petit M 2001. Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage. *Fourrages* 166, 189-212.

- D'Hour P, Petit M, Pradel P et Garel JP 1995. Evolution du poids et de la production laitière au pâturage de vaches allaitantes Salers et Limousines dans deux milieux. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 2, 105-108.
- Donabédian M, Fleurance G, Peronad G, Roberte C, Lepagef O, Trillaud-Geyl C, Legerg S, Ricard A, Bergero D and Martin-Rosset W 2006. Effect of fast vs. moderate growth rate related to nutrient intake on developmental orthopaedic disease in the horse. *Animal Research* 55, 471-486.
- Donald AD 1994. Parasites, production and sustainable development. *Veterinary Parasitology* 54, 27-47.
- Donaldson J, van Houtert MFJ and Sykes AR 1998. The effect of nutrition on the periparturient parasite status of mature ewes. *Animal Science* 67, 523-533.
- Donaldson J, van Houtert MFJ and Sykes AR 2001. The effect of dietary fish-meal supplementation on parasite burdens of periparturient sheep. *Animal Science* 72, 149-158.
- Doreau M 1978. Comportement alimentaire du cheval à l'écurie. *Annales de Zootechnie* 27, 291-302.
- Doreau M, Martin-Rosset W, et Barley JP 1981. Variations de quelques constituants plasmatiques chez la jument allaitante en fin de gestation et en début de lactation. *Annales de Recherches Vétérinaires* 12, 219-225.
- Doreau M, Martin-Rosset W and Boulot S 1988. Energy-Requirements and the Feeding of Mares During Lactation - A Review. *Livestock Production Science* 20, 53-68.
- Doreau M, Moretti C and Martin-Rosset W 1990. Effect of quality of hay given to mares around foaling on their voluntary intake and foal growth. *Annales de Zootechnie* 39, 125-131.
- Doreau M, Boulot S and Martin-Rosset W 1991. Effect of Parity and Physiological-State on Intake, Milk-Production and Blood Parameters in Lactating Mares Differing in Body Size. *Animal Production* 53, 111-118.
- Doreau M, Boulot S and Chilliard Y 1993. Yield and Composition of Milk from Lactating Mares - Effect of Body Condition at Foaling. *Journal of Dairy Research* 60, 457-466.

- Doyle PT, Francis SA and Stockdale CR 2005. Associative effects between feeds when concentrate supplements are fed to grazing dairy cows: a review of likely impacts on metabolisable energy supply. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1315-1329.
- Dulphy JP, Martin-Rosset W et Jouany JP 1995. Ingestion et digestion comparées des fourrages chez différentes espèces d'herbivores. *INRA Productions Animales* 8, 293-307.
- Dulphy JP, Martin-Rosset W, Dubroeuq H, Ballet JM, Detour A and Jailler M 1997a. Compared feeding patterns in ad libitum intake of dry forages by horses and sheep. *Livestock Production Science* 52, 49-56.
- Dulphy JP, Martin-Rosset W, Dubroeuq H and Jailler M 1997b. Evaluation of voluntary intake of forage trough-fed to light horses. Comparison with sheep. Factors of variation and prediction. *Livestock Production Science* 52, 97-104.
- Parsons AJ and Dumont B 2003. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal Research* 52, 161-179.
- Dumont B, Rossignol N, Loucougaray G, Carrère P, Chadoeuf J, Fleurance G, Bonis A, Farruggia A, Gaucherand S, Ginane C, Louault F, Marion B, Mesléard F and Yavercovski N 2012. When does grazing generate stable vegetation patterns in temperate pastures? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 153, 50-56.
- Dumont B, Fortun-Lamothe L, Jouven M, Thomas M and Tichit M 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7, 1028-1043.
- Duncan P 1992. *Horses and grasses: the nutritional ecology of equids and their impact on the camargue*. Springer-Verlag, New-York, USA.
- Duncan P, Foose TJ, Gordon I, Gakahu CG and Lloyd M 1990. Comparative nutrient extraction from forages by grazing bovids and equids: a test of the nutritional model of equid/bovid competition and coexistence. *Oecologia* 84, 411-418.
- Edouard N, Fleurance G, Martin-Rosset W, Duncan P, Dulphy R, Grange S, Baumont R, Dubroeuq H, Perez-Barberia FJ and Gordon IJ 2008. Voluntary intake and

- digestibility in horses: effect of forage quality with emphasis on individual animal variability. *Animal* 2, 1526-1533.
- Edouard N, Fleurance G, Dumont B, Baumont R and Duncan P 2009a. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Applied Animal Behaviour Science* 119, 219-228.
- Edouard N, Fleurance G, Duncan P, Baumont R et Dumont B 2009b. Déterminants de l'utilisation de la ressource pâturée par le cheval. *INRA Productions Animales* 22, 363-373.
- Edouard N, Duncan P, Dumont B, Baumont R and Fleurance G 2010. Foraging in a heterogeneous environment-An experimental study of the trade-off between intake rate and diet quality. *Applied Animal Behaviour Science* 126, 27-36.
- Edwards PJ and Hollis S 1982. The distribution of excreta on New Forest grassland used by cattle, ponies and deer. *Journal of Applied Ecology* 19, 953-964.
- Etter E, Chartier C, Hoste H, Pors I, Bouquet W, Lefrileux Y and Borgida LP 1999. The influence of nutrition on the periparturient rise in fecal egg counts in dairy goats: results from a two-year study. *Revue de Médecine Vétérinaire* 150, 975-980.
- Etter E, Chartier C, Hoste H, Pors I, Lefrileux Y, Broqua C, Vallade S et Goudeau C 2000. Parasitisme par les nématodes du tube digestif et utilisation du pâturage : épidémiologie de l'infestation dans les troupeaux caprins laitiers en France. *Epidémiologie et Santé Animale* 37, 75-86.
- European Horse Network. 2010. The European Horse Industry in the European Regions. <http://www.europeanhorsenetwork.eu/horse-industry-in-europe>. (Accessed 16 June 2014).
- Eysker M, Jansen J and Mirck MH 1986. Control of strongylosis in horses by alternate grazing of horses and sheep and some other aspects of the epidemiology of strongylidae infections. *Veterinary Parasitology* 19, 103-115.
- Farrugia A, Dumont B, D'Hour P and Egal D 2008. How does protein supplementation affect the selectivity and performance of Charolais cows on extensively grazed pastures in late autumn? *Grass and Forage Science* 63, 314-323.

- Ferre I, Brusa CM, Manzanera E, Rojo-Vázquez FA, Buratovich OF and Mantecón AR 1995. Effect of supplementary feeding on the gastrointestinal strongylid eggs shedding in grazing pregnant Merino ewes. *Journal of Animal and Feed Sciences* 4, 237-245.
- Ferris CP 2007. Sustainable pasture-based dairy systems – meeting the challenges. *Canadian Journal of Plant Science* 87, 723-738.
- Feucht W, Treutter D and Christ E 1997. Role of flavanols in yellowing beech trees of the Black forest. *Tree Physiology* 17, 335-340.
- Finneran E, Crosson P, O'Kiely P, Shalloo L, Forristal D and Wallace M 2011. Economic modelling of an integrated grazed and conserved perennial ryegrass forage production system. *Grass and Forage Science* 67, 162-176.
- Fleurance G, Duncan P and Mallevaud B 2001. Daily intake and the selection of feeding sites by horses in heterogeneous wet grasslands. *Animal Research* 50, 149-156.
- Fleurance G, Duncan P, Fritz H, Cabaret J and Gordon IJ 2005. Importance of nutritional and anti-parasite strategies in the foraging decisions of horses: an experimental test. *Oikos* 110, 602-612.
- Fleurance G, Fritz H, Duncan P, Gordon IJ, Edouard N and Vial C 2009. Instantaneous intake rate in horses of different body sizes: Influence of sward biomass and fibrousness. *Applied Animal Behaviour Science* 117, 84-92.
- Fleurance G, Duncan P, Fritz H, Gordon IJ and Grenier-Loustalot MF 2010. Influence of sward structure on daily intake and foraging behaviour by horses. *Animal* 4, 480-485.
- Fleurance G, Collas C et Dumont B 2012. Influence de la complémentation azotée au pâturage sur les choix alimentaires et l'ingestion de la jument de selle en lactation. 38ème Journée de la Recherche Equine, 185-188.
- Foo LY, Newman R, Waghorn G, Mc Nabb WC and Ulyatt MJ 1996. Proanthocyanidins from *Lotus corniculatus*. *Phytochemistry* 41, 617-624.
- Foo LY, Lu Y, McNabb WC, Waghorn G and Ulyatt, MJ 1997. Proanthocyanidins from *Lotus pedunculatus*. *Phytochemistry* 45, 1689-1696.

- Frape DL, Tuck MG, Suttcliffe NH and Jones DB 1982. The use of inert markers in the measurement of the digestibility of cubed concentrates and of hay given in several proportions to the pony, horse and white rhinoceros (*Diceros simus*). *Comparative Biochemistry and Physiology* 72, 77-83.
- Fraser MD, Davies DA, Vale JE, Nute GR, Hallett KG, Richardson RI and Wright IA 2009. Performance and meat quality of native and continental cross steers grazing ryegrass/white clover improved pasture or semi-natural rough grazing. *Livestock Science* 123, 70-82.
- Friend MA, Nash D and Avery A 2004. Intake of improved and unimproved pastures in two seasons by grazing weanling horses. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*, 61-64.
- Fritzen B, Rohn K, Schnieder T and von Samson-Himmelstjerna G 2010. Endoparasite control management on horse farms - lessons from worm prevalence and questionnaire data. *Equine Veterinary Journal* 42, 79-83.
- Frutos P, Hervás G, Giráldez FJ and Mantecón AR 2004. Review. Tannins and ruminant nutrition. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2, 191-202.
- Gibon A 2005. Managing grassland for production, the environment and the landscape. Challenges at the farm and the landscape level. *Livestock Production Science* 96, 11-31.
- Glade MJ 1983. Nutrition and performance of racing Thoroughbreds. *Equine Veterinary Journal* 15, 31-36.
- Goering HK and Van Soest PJ 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). *Agricultural Research Service, Washington, USA*.
- Gordon HM 1980. The contribution of McMaster. *Modern Veterinary Practice*. 91, 97-100.
- Grace ND, Gee EK, Firth EC and Shaw HL 2002a. Digestible energy intake, dry matter digestibility and mineral status of grazing New Zealand Thoroughbred yearlings. *New Zealand Veterinary Journal* 50, 63-69.

- Grace ND, Shaw HL, Gee EK and Firth EC 2002b. Determination of the digestible energy intake and apparent absorption of macroelements in pasture-fed lactating Thoroughbred mares. *New Zealand Veterinary Journal* 50, 182-185.
- Grainger C and Mathews L 1989. Positive relation between substitution rate and pasture allowance for cows receiving concentrates. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 29, 355-360.
- Gross JE, Shipley LA, Thomson Hobbs N, Spalinger DE and Wunder BA 1993. Functional response of herbivores in food-concentrated patches: tests of a mechanistic model. *Ecology* 74, 778-791.
- Gruner L and Sauve C 1982. Behavioral observations on calves and *Trichostrongyle* infective larvae on pasture. *Veterinary Parasitology* 11, 203-213.
- Hardy A, Le Bris X et Pelletier P 2001. Herb'ITCF® : une méthode d'aide à la gestion du pâturage. *Fourrages* 166, 399-415.
- Heckendorn F, Häring DA, Maurer V, Zinsstag J, Langhans W and Hertzberg H 2006. Effect of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage and hay on established populations of *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei* in lambs. *Veterinary Parasitology* 142, 293-300.
- Heckendorn F, Haring DA, Maurer V, Senn M and Hertzberg H 2007. Individual administration of three tanniferous forage plants to lambs artificially infected with *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei*. *Veterinary Parasitology* 146, 123-134.
- Hedqvist H, Mueller-Harvey I, Reed JD, Krueger CG and Murphy M 2000. Characterization of tannins and *in vitro* protein digestibility of several *Lotus corniculatus* varieties. *Animal Feed Science and Technology* 87, 41-56.
- Henneke DR, Potter GD and Kreider JL 1981. Rebreding efficiency in mares fed different levels of energy during late gestation. In 7th Equine Nutrition Physiology Symposium, Ettrick, VA, USA, pp. 101-104.
- Henneke DR, Potter GD, Kreider JL and Yeates BF 1983. Relationship between condition score physical measurements and body fat percentage in mares. *Equine Veterinary Journal* 15, 371-372.

- Hoffman CJ, Costa LR and Freeman LM 2009. Survey of feeding practices, supplement use, and knowledge of equine nutrition among a subpopulation of horse owners in New-England. *Journal of Equine Veterinary Science* 29, 719-724.
- Holling CS 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Canadian Entomologist* 41, 385-398.
- Horvat AJM, Petrovic M, Babic S, Pavlovic DM, Asperger D, Pelko S, Mance AD and Kastelan-Macan M 2012. Analysis, occurrence and fate of anthelmintics and their transformation products in the environment. *Trac-Trends in Analytical Chemistry* 31, 61-84.
- Hoskin SO, Wilson PR, Barry TN, Charleston WA and Waghorn GC 2000. Effect of forage legumes containing condensed tannins on lungworm (*Dictyocaulus sp.*) and gastrointestinal parasitism in young red deer (*Cervus elaphus*). *Research Veterinary Science* 68, 223-230.
- Hoste H, Gaillard H. and Le Frileux Y 2005a. Consequences of the regular distribution of sainfoin hay on gastrointestinal parasitism with nematodes and milk production in dairy goats. *Small Ruminant Research* 59, 265-271.
- Hoste H, Torres-Acosta JF, Paolini V, Aguilar-Caballero A, Etter E, Lefrileux Y, Chartier C and Broqua C 2005b. Interactions between nutrition and gastrointestinal infections with parasitic nematodes in goats. *Small Ruminant Research* 60, 141-151.
- Hoste H, Jackson F, Athanasiadou S, Thamsborg SM and Hoskin SO 2006. The effects of tannin-rich plants on parasitic nematodes in ruminants. *Trends in Parasitology* 22, 253-261.
- Hoste H and Torres-Acosta JFJ 2011. Non chemical control of helminths in ruminants: Adapting solutions for changing worms in a changing world. *Veterinary Parasitology* 180, 144-154.
- Hoste H, Martinez-Ortiz-De-Montellano C, Manolaraki F, Brunet S, N. O-R, Fourquaux I, Torres-Acosta JFJ and Sandoval-Castro CA 2012. Direct and indirect effects of bioactive tannin-rich tropical and temperate legumes against nematode infections. *Veterinary Parasitology* 186, 18-27.

- Houdijk JGM, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF and Coop RL 2000. Can an increased metabolisable protein intake affect the periparturient relaxation in immunity against *Teladorsagia circumcincta* in sheep? . *Veterinary Parasitology* 91, 43-62.
- Houdijk JGM and Athanasiadou S 2003. Direct and indirect effects of host nutrition on ruminant gastrointestinal nematodes. In VI International Symposium on the Nutrition of Herbivores (eds. L Mannetje, L Ramírez-Avilés, CA Sandoval-Castro et JC KuVera), pp. 213-236. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Mexico.
- Houdijk JGM, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF and Coop RL 2003. Is the allocation of metabolisable protein prioritised to milk production rather than to immune functions in *Teladorsagia circumcincta*-infected lactating ewes? *International Journal for Parasitology* 33, 327-338.
- Houdijk JGM, Kyriazakis I, Jackson F, Huntley JF and Coop RL 2005. Effects of protein supply and reproductive status on local and systemic immune responses to *Teladorsagia circumcincta* in sheep. *Veterinary Parasitology* 129, 105-117.
- Houdijk JGM, Jackson F, Coop RL and Kyriazakis I 2006. Rapid improvement of immunity to *Teladorsagia circumcincta* is achieved through a reduction in the demand for protein in lactating ewes. *International Journal for Parasitology* 36, 219-227.
- Houdijk JGM, Jackson F and Kyriazakis I 2009. Nutritional sensitivity of resistance to *Trichostrongylus colubriformis* in lactating ewes. *Veterinary Parasitology* 160, 258-266.
- Houdijk JGM 2012. Differential effects of protein and energy scarcity on resistance to nematode parasites. *Small Ruminant Research* 103, 41-49.
- Houssin B 2004. La gestion du pâturage - Des outils et indicateurs pour piloter le pâturage. *Prairiales Normandie du Pin*, 31-34.
- Huyghe C, De Vliegher A, van Gils B and Peeters A 2014. Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policies. Editions Quae, Versailles, France.
- Iason GR and Elston DA 2002. Groups, individuals, efficiency and validity of statistical analyses. *Applied Animal Behaviour Science* 75, 261-268.

- Ihler CF 1995. A field survey on anthelmintic resistance in equine small strongyles in Norway. *Acta Veterinaria Scandinavica* 36, 135-143.
- INRA 2012. Nutrition et alimentation des chevaux. (coord. W. Martin-Rosset). Editions Quae, Versailles, France.
- INRA 2015. Nutrition of Equine: INRA nutritional recommendations. W. Martin-Rosset, editor. Wageningen Academic publisher, Wageningen, The Netherlands, in press.
- Iqbal Z, Sarwar M, Jabbar A, Ahmed S, Nisa M, Sohail Sajid M, Nisar Khan M, Aftab Mufti K and Yaseen M 2007. Direct and indirect anthelmintic effects of condensed tannins in sheep. *Veterinary Parasitology* 144, 125-131.
- Isselstein J, Griffith BA, Pradel P and Venerus S 2007. Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing systems. 1. Nutritive value of herbage and livestock performance. *Grass and Forage Science* 62, 145-158.
- Janis C., 1976. The evolutionary strategy of the equidae and the origins of rumen and cecal digestion. *Evolution*, 30: 757-774.
- Jansson A, Saastamoinen M and Lindberg JE 2012. Forage feeding systems. In Forages and grazing in horse nutrition. EAAP publication No. 132, pp. 289-303. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Jean-Blain C 1998. Aspects nutritionnels et toxicologiques des tanins. *Revue de Médecine Vétérinaire* 149, 911-920.
- Johnson DE, Borman MM and Rittenhouse LR 1982. Intake, apparent utilization and rate of digestion in mares and cows. In Western Section - American Society of Animal Science
- Jordan RM 1979. Effect of corn silage and turkey litter on the performance of gestating pony mares and weanlings. *Journal of Animal Science* 49, 651-653.
- Kabasa JD, Opuda-Asibo J and ter Meulen U 2000. The effect of oral Administration of polyethelene glycol on faecal helminth egg counts in pregnant goats grazed on browse containing condensed tannins. *Tropical Animal Health Production* 32, 73-86.

- Kahn LP 2003. Regulation of resistance and resilience of periparturient ewes to infection with gastrointestinal nematode parasites by dietary supplementation. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 43, 1477-1486.
- Kahn LP, Knox MR, Gray GD, Lea JM and Walkden-Brown SW 2003. Enhancing immunity to nematode parasites in single-bearing Merino ewes through nutrition and genetic selection. *Veterinary Parasitology* 112, 211-225.
- Kaldy MS, Hanna MR and Smoliak S 1979. Amino acid composition of sainfoin forage. *Grass and Forage Science* 34, 145-148.
- Kaplan RM 2002. Anthelmintic resistance in nematodes of horses. *Veterinary Research* 33, 491-508.
- Kaplan RM 2004. Drug resistance in nematodes of veterinary importance: a status report. *Trends in Parasitology* 20, 477-481.
- Kaplan RM, Klei TR, Lyons ET, Lester G, Courtney CH, French DD, Tolliver SC, Vidyashankar AN and Zhao Y 2004. Prevalence of anthelmintic resistant cyathostomes on horse farms. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 225, 903-910.
- Kazmin VD, Pozdnyakova MK, Kolesnikov MP and Abaturov BD 2013. Quantitative characterization of nutrition in a free-living horse (*Equus caballus*) on Vodnyi Island (Manych-Gudilo lake). *Zoologicheskyy Zhurnal* 92, 337-345.
- Kenyon F, Greer AW, Coles GC, Cringoli G, Papadopoulos E, Cabaret J, Berrag B, Varady M, van Wyk JA, Thomas E, Vercruysse J and Jackson F 2009. The role of targeted selective treatments in the development of refugia-based approaches to the control of gastrointestinal nematodes of small ruminants. *Veterinary Parasitology* 164, 3-11.
- Kidane A, Houdijk JGM, Tolcamp BJ, Athanasiadou S and Kyriazakis I 2009. Consequences of infection pressure and protein nutrition on periparturient resistance to *Teladorsagia circumcincta* and performance in ewes. *Veterinary Parasitology* 165, 78-87.
- Klei TR and Chapman MR 1999. Immunity in equine cyathostome infections. *Veterinary Parasitology* 85, 123-136.

- Knox MR and Steel JW 1999. The effects of urea supplementation on production and parasitological responses of sheep infected with *Haemonchus contortus* and *Trichostrongylus colubriformis*. *Veterinary Parasitology* 83, 123-135.
- Knox MR, Torres-Acosta JFJ and Aguilar-Caballero AJ 2006. Exploiting the effect of dietary supplementation of small ruminants on resilience and resistance against gastrointestinal nematodes. *Veterinary Parasitology* 139, 385-393.
- Kornaś S, Cabaret J, Skalska M and Nowosada B 2010. Horse infection with intestinal helminths in relation to age, sex, access to grass and farm system. *Veterinary Parasitology* 174, 285-291.
- Koski KG and Scott ME 2003. Gastrointestinal nematodes, trace elements, and immunity. *Journal of Trace Elements in Experimental Medicine* 16, 237-251.
- Koupai-Abyazani MR, Muir AD, Bohm BA, Towers GHN and Gruber MY 1993. The proanthocyanidin polymers in some species of *Onobrychis*. *Phytochemistry* 34, 113-117.
- Kuntz R, Kubalek C, Ruf T, Tataruch F and Arnold W 2006. Seasonal adjustment of energy budget in a large wild mammal, the Przewalski horse (*Equus ferrus przewalskii*) I. Energy intake. *Journal of Experimental Biology* 209, 4557-4565.
- Kuzmina TA and Kharchenko VO 2008. Anthelmintic resistance in cyathostomins of brood horses in Ukraine and influence of anthelmintic treatments on strongylid community structure. *Veterinary Parasitology* 154, 277-288.
- LaCasha PA, Brady HA, Allen VG, Richardson CR and Pond KR 1999. Voluntary intake, digestibility, and subsequent selection of *Matua* bromegrass, coastal bermudagrass, and alfalfa hays by yearling horses. *Journal of Animal Science* 77, 2766-2773.
- Lamoot I, Vandenberghe C, Bauwens D and Hoffmann M 2005. Grazing behaviour of free-ranging donkeys and Shetland ponies in different reproductive states. *Journal of Ethology* 23, 19-27.
- Lavin TE, Nielsen BD, Zingsheim JN, O'Connor-Robison CI, Link JE, Hill GM and Shelton J 2013. Effects of phytase supplementation in mature horses fed alfalfa hay and pelleted concentrate diets. *Journal of Animal Science* 91, 1719-1727.

- Lawrence LM, Moore KJ, Hintz HF, Jaster EH and Wischover L 1987. Acceptability of alfalfa hay treated with an organic acid preservative for horses. *Canadian Journal of Animal Science* 67, 217-220.
- Lees GL, Gruber MY and Suttill NH 1995. Condensed tannins in sainfoin – II. Occurrence and changes during leaf development. *Canadian Journal of Botany* 73, 1540-1547.
- Lichtenfels JR, Kharchenko VA, Krecek RC and Gibbons LM 1998. An annotated checklist by genus and species of 93 species level names for 51 recognised species of small strongyles (*Nematoda: Strongyloidea: Cyathostominae*) of horses, asses and zebras of the world. *Veterinary Parasitology* 79, 65-79.
- Lichtenfels JR, Gibbons LM and Krecek RC 2002. Recommended terminology and advances in the systematics of the *Cyathostominae* (*Nematoda: Strongyloidea*) of horses. *Veterinary Parasitology* 107, 337-342.
- Liljenstolpe C 2009. Horses in Europe. Report funded by the Swedish Horse Council Foundation, the Swedish Board of Agriculture and the Swedish University of Agricultural Sciences for EU Equus 2009, Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 28 p.
- Lind EO, Kuzmina T, Ugglå A, Waller PJ and Höglund J 2007. A field study on the effect of some anthelmintics on cyathostomins of horses in Sweden. *Veterinary Research Communications* 31, 53-65.
- Louvandini H, Veloso CFM, Paludo GR, Dell'Porto A, Gennari SM and McManus CM 2006. Influence of protein supplementation on the resistance and resilience on young hair sheep naturally infected with gastrointestinal nematodes during rainy and dry seasons. *Veterinary Parasitology* 137, 103-111.
- Love S and Duncan JL 1992. The development of naturally acquired cyathostome infection in ponies. *Veterinary Parasitology* 44, 127-142.
- Love S, Escala J, Duncan JL and MacLean JM 1991. Studies on the pathogenic effects of experimental cyathostome infections in ponies. In 6th International Conference of Equine Infectious Diseases, pp. 149-155. R and W Publications, Newmarket, UK.

- Love S, Murphy D and Mellor D 1999. Pathogenicity of cyathostome infection. *Veterinary Parasitology* 85, 113-122.
- Lyons ET, Tolliver SC and Drudge JH 1999. Historical perspective of cyathostomes: prevalence, treatment and control programs. *Veterinary Parasitology* 85, 97-112.
- Lyons ET, Tolliver SC, Collins SS, Ionita M, Kuzmina TA and Rossano M 2011. Field tests demonstrating reduced activity of ivermectin and moxidectin against small strongyles in horses on 14 farms in Central Kentucky in 2007–2009. *Parasitology Research* 108, 355-360.
- Marley CL, Cook R, Keatinge R, Barrett J and Lampkin NH 2003. The effect of birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) and chicory (*Chicorium intybus*) on parasite intensities and performance of lambs naturally infected with helminth parasites. *Veterinary Parasitology* 112, 147-155.
- Martin-Rosset W and Doreau M 1980. Effect of variations in the level of feeding of heavy mares during late pregnancy. In 31st. Annual Meeting of EAAP, p. 6. München, Germany.
- Martin-Rosset W et Doreau M 1984. Consommation d'aliments et d'eau. In *Le Cheval - Reproduction Sélection Alimentation Exploitation* (eds. R Jarrige and W Martin-Rosset), pp. 333-354, INRA, Paris, France.
- Martin-Rosset W, Doreau M et Cloix J 1978. Etude des activités d'un troupeau de poulinières de trait et de leurs poulains au pâturage. *Annales De Zootechnie* 27, 33-45.
- Martin-Rosset W, Doreau M et Espinasse R 1986. Variations simultanées du poids vif et des quantités ingérées chez la jument. *Annales De Zootechnie* 35, 341-350.
- Martin-Rosset W and Dulphy JP 1987. Digestibility interactions between forages and concentrates in horses: influence of feeding level - comparison with sheep. *Livestock Production Science* 17, 263-276.
- Martin-Rosset W, Vermorel M, Doreau M, Tisserand JL and Andrieu J 1994. The French horse feed evaluation systems and recommended allowances for energy and protein. *Livestock Production Science* 40, 37-56.

- Martin-Rosset W, Vernet J, Dubroeuç H, Arnaud G, Picard A and Vermorel M 2008. Variation of fatness and energy content of the body with body condition score in sport horses and its prediction. In 4th EWEN: Nutrition of the exercising horse. EAAP publication No. 125 Eds. M Saastamoinen and W Martin-Rosset), pp. 167-176. Wageningen Academic publishers, Wageningen, The Netherlands.
- May GJ, van Tassell LW, Waggoner JW and Smith MA 1999. Relative costs and feeding strategies associated with winter/spring calving. *Journal of Range Management* 52, 560-568.
- McEvoy M, Kennedy E, Murphy JP, Boland TM, Delaby L and O'Donovan M 2008. The effect of herbage allowance and concentrate supplementation on milk production performance and dry matter intake of spring-calving dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science* 91, 1258-1269.
- McKellar QA 1997. Ecotoxicology and residues of anthelmintic compounds. *Veterinary Parasitology* 72, 413-435.
- Meier A and Hertzberg H 2005. Equine strongyles II. Occurrence of anthelmintic resistance in Switzerland. *Schweiz. Arch. Tierheilkd* 147, 389-396.
- Meijs JAC and Hoekstra JA 1984. Concentrate supplementation of grazing dairy cows. 1. Effect of concentrate intake and herbage allowance on herbage intake. *Grass and Forage Science* 39, 59-66.
- Menard C, Duncan P, Fleurance G, Georges JY and Lila M 2002. Comparative foraging and nutrition of horses and cattle in European wetlands. *Journal of Applied Ecology* 39, 120-133.
- Mésochina P 2000. Niveau d'ingestion du cheval en croissance au pâturage : mise au point méthodologique et étude de quelques facteurs de variation. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Mésochina P, Martin-Rosset W, Peyraud JL, Duncan P, Micol D and Boulot S 1998. Prediction of the digestibility of the diet of horses: evaluation of faecal indices. *Grass and Forage Science* 53, 189-196.

- Mésochina P, Peyraud JL, Duncan P, Micol D et Trillaud-Geyl C 2000. Ingestion d'herbe au pâturage par le cheval de selle en croissance : effet de l'âge des poulains et de la biomasse d'herbe. *Annales de Zootechnie* 49, 505-515.
- Meyer, DW and Badaruddin M 2001. Frost tolerance of ten seedling legume species at four growth stages. *Crop Science* 41, 1838–1842.
- Micol D and Martin-Rosset W 1995. Feeding systems for horses on high forage diets in the temperate zone. In IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores (eds. M Journet, E Grenet, M-H Farce, M.Thérierz and C Demarquilly), pp. 569-584. INRA Editions, Paris.
- Min BR and Hart SP 2003. Tannins for suppression of internal parasites. *Journal of Animal Science* 81, 102-109.
- Min BR, Fernandez JM, Barry TN, McNabb WC and Kemp PD 2001. The effect of condensed tannins in *Lotus corniculatus* upon reproductive efficiency and wool production in ewes during autumn. *Animal Feed Science and Technology* 92, 185-202.
- Min BR, Barry TN, Attwood GT and McNabb WC 2003. The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages: a review. *Animal Feed Science and Technology* 106, 3-19.
- Min BR, Pomroy WE, Hart SP and Sahlu T 2004. The effect of shortterm consumption of a forage containing condensed tannins on gastro-intestinal nematode parasite infections in grazing wether goats. *Small Ruminant Research* 51, 279-283.
- Min BR, Hart SP, Miller D, Tomita GM, Loetz E and Sahlu T 2005. The effect of grazing forage containing condensed tannins on gastro-intestinal parasite infection and milk composition in Angora does. *Veterinary Parasitology* 130, 105-113.
- Miraglia N, Saastamoinen M and Martin-Rosset W 2006. Role of pasture in mares and foals management in Europe. In 3rd EWEN: Nutrition and feeding of the broodmares. EAAP publications No 120. Eds. N Miraglia and W Martin-Rosset), pp. 279-298. Wageningen Academic publishers, Wageningen, The Netherlands.

- Molan AL, Waghorn GC and McNabb WC 1999. Condensed tannins and parasites. Proceedings of New-Zealand Grassland Society 61, 57-61.
- Molan AL, Waghorn GC, Min BR and McNabb WC 2000. The effect of condensed tannins from seven herbages on *Trichostrongylus colubriformis* larval migration in vitro. Folia Parasitology 47, 39-44.
- Molan AL, Waghorn GC and McNabb WC 2002. Effect of condensed tannins on egg hatching and larval development of *Trichostrongylus colubriformis* in vitro. Veterinary Record 19, 65-69.
- Molan AL and Faraj AM 2010. The effects of condensed tannins extracted from different plant species on egg hatching and larval development of *Teladorsagia circumcincta* (Nematoda: Trichostrongylidae). Folia Parasitology 57, 62-68.
- Molento MB 2009. Parasite control in the age of drug resistance and changing agricultural practices. Veterinary Parasitology 163, 229-234.
- Moreno-Gonzalo J, Manolaraki F, Frutos P, Hervás G, Celaya R, Osoro K, Ortega-Mora LM, Hoste H and Ferre I 2013a. *In vitro* effect of heather (*Ericaceae*) extracts on different development stages of *Teladorsagia circumcincta* and *Haemonchus contortus*. Veterinary Parasitology 197, 235-243.
- Moreno-Gonzalo J, Manolaraki F, Frutos P, Hervás G, Celaya R, Osoro K, Ortega-Mora LM, Hoste H and Ferre I 2013b. *In vitro* effect of heather extracts on *Trichostrongylus colubriformis* eggs, larvae and adults. Veterinary Parasitology 197, 586-594.
- Morhain B 2011. Systèmes fourragers et d'alimentation du cheval dans différentes régions françaises. Fourrages 207, 155-163.
- Morrill WL, Ditterline RL and Cash SD 1998. Insect pests and associated root pathogens of sainfoin in Western USA. Field Crops Research 59, 129-134.
- Moulin C 1995. Fonctionnement des systèmes d'alimentation à l'herbe pour différents types de chevaux - Proposition de méthodologie et premiers éléments d'analyse. Institut de l'Élevage, Paris, France.

- Mueller-Harvey I and Mc Allan AB 1992. Tannins: their biochemistry and nutritional properties. *Adv. Plant Cell Biochem. Biotechnol.* 1, 151-217.
- Mullen PA, Hopes R and Sewell J 1979. The biochemistry, haematology, nutrition and racing performance of 2-year-old Thoroughbreds throughout their training and racing season. *Veterinary Record* 104, 90-93.
- Müller CE 2012. Equine digestion of diets based on haylage harvested at different plant maturities. *Animal Feed Science and Technology* 177, 65-74.
- Murphy D and Love S 1997. The pathogenic effects of experimental cyathostome infections in ponies. *Veterinary Parasitology* 70, 99-110.
- Naujeck A and Hill J 2003. Influence of sward height on bite dimensions of horses. *Animal Science* 77, 95-100.
- Nielsen MK 2010. Utilisation des anthelminthiques chez le cheval. *Pratique Vétérinaire Equine* 42, 1-8.
- Nielsen MK, Monrad J and Olsen SN 2006. Prescription-only anthelmintics—A questionnaire survey of strategies for surveillance and control of equine strongyles in Denmark. *Veterinary Parasitology* 135, 47-55.
- Nielsen MK, Baptiste KE, Tolliver SC, Collins SS and Lyons ET 2010a. Analysis of multiyear studies in horses in Kentucky to ascertain whether counts of eggs and larvae per gram of feces are reliable indicators of numbers of strongyles and ascarids present. *Veterinary Parasitology* 174, 77-84.
- Nielsen MK, Fritzen B, Duncan JL, Guillot J, Eysker M, Dorchies P, Laugier C, Beugnet F, Meana A, Lussot-Kervern I and von Samson-Himmelstjerna G 2010b. Practical aspects of equine parasite control: a review based upon a workshop discussion consensus. *Equine Veterinary Journal* 42, 460-468.
- Niezen JH, Waghorn TS, Charleston WAG and Waghorn GC 1995. Growth and gastrointestinal nematode parasitism in lambs grazing either lucerne (*Medicago sativa*) or sulla (*Hedysarum coronarium*) which contains condensed tannins. *Journal of Agricultural Science* 125, 281-289.

- Niezen JH, Robertson HA, Waghorn GC and Charleston WAG 1998. Production, faecal egg counts and worm burdens of ewe lambs which grazed six contrasting forages. *Veterinary Parasitology* 80, 15-27.
- Niezen JH, Charleston WAG, Robertson HA, Shelton D, Waghorn GC and Green R 2002. The effect of feeding sulla (*Hedysarum coronarium*) or lucerne (*Medicago sativa*) on lamb parasite burdens and development of immunity to gastrointestinal nematodes. *Veterinary Parasitology* 105, 229-245.
- NRC 2007. The Nutrient Requirements of Horses, 6th revised edition. National Academy Press, Washington DC.
- Odberg FO and Francis-Smith K 1976. A study on eliminative and grazing behaviour. The utilisation of field by captive horses. *Equine Veterinary Journal* 8, 147-149.
- Ogbourne CP 1978. Pathogenesis of cyathostome (*Trichonema*) infections of the horse: a review. In Commonwealth Institute of Helminthology, Commonwealth Agricultural Bureau of the United Kingdom, pp. 5-15.
- Ojeda-Robertos NF, Manolaraki F, Theodoridou K, Aufrere J, Halbwirth H, Stich K, Regos I, Treutter D, Mueller-Harvey I and Hoste H 2010. The anthelmintic effect of sainfoin (silage, hay, fresh) and the role of flavonoid glycosides. In: Meeting of the European Association for Animal Production, Heraclion, Creta Island, 20-24th August 2010.
- Oliveira JEG, Soares JB, Barioni LG, Leite GG, Braga AC and Menezes ME 2010. Optimized feed planning for a grazing horse production systems. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39, 932-940.
- Osborne NTJ and McNeill DM 2004. Characterization of Leucaenia condensed tannins by size and protein precipitation capacity. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81, 1113-1119.
- Ott EA and Asquith RL 1986. Influence of Level of Feeding and Nutrient Content of the Concentrate on Growth and Development of Yearling Horses. *Journal of Animal Science* 62, 290-299.
- Ott EA, Asquith RL, Feaster JP and Martin FG 1979. Influence of protein level and quality on the growth and development of yearling foals. *Journal of Animal Science* 49, 620-628.

- Owen J and Slocombe D 1985. Pathogenesis of helminths in equines. *Veterinary Parasitology* 18, 139-153.
- Paolini V, Bergeaud JP, Grisez C, Prevot F, Dorchies P and Hoste H 2003a. Effects of condensed tannins on goats experimentally infected with *Haemonchus contortus*. *Veterinary Parasitology* 113, 253-261.
- Paolini V, Frayssines A, De La Farge F, Dorchies P and Hoste H 2003b. Effects of condensed tannins on established populations and on incoming larvae of *Trichostrongylus colubriformis* and *Teladorsagia circumcincta* in goats. *Veterinary Research* 34, 331-339.
- Paolini V, Dorchies P and Hoste H 2003. Effects of sainfoin hay on gastrointestinal infection with nematodes in goats. *Veterinary Record* 152, 600-601.
- Paolini V, Fouraste I and Hoste H 2004. In vitro effects of three woody plant and sainfoin extracts on 3rd-stage larvae and adult worms of three gastrointestinal nematodes. *Parasitology* 129, 69-77.
- Paolini V, De La Farge F, Prevot F, Dorchies P and Hoste H 2005a. Effects of the repeated distribution of sainfoin hay on the resistance and the resilience of goats naturally infected with gastrointestinal nematodes. *Veterinary Parasitology* 127, 277-283.
- Paolini V, Prevot F, Dorchies P and Hoste H 2005b. Lack of effects of quebracho and sainfoin hay on incoming third-stage larvae of *Haemonchus contortus* in goats. *The Veterinary Journal* 170, 260-263.
- Payne SE, Kotze AC, Durmic Z and Vercoe PE 2013. Australian plants show anthelmintic activity toward equine cyathostomins *in vitro*. *Veterinary Parasitology* 196, 153-160.
- Peiretti PG, Meineri G, Miraglia N, Mucciarelli M and Bergero D 2006. Intake and apparent digestibility of hay or hay plus concentrate diets determined in horses by total collection of faeces and n-alkanes as internal markers. *Livestock Science* 100, 189-194.
- Penning PD 2004. Animal-based techniques for estimating herbage intake. In: PD. Penning, editor, *Herbage Intake Handbook (Second Edition)*, The British Grassland Society, Reading, UK. p. 53-93.

- Pérez-Prieto LA, Peyraud JL and Delagarde R 2011. Substitution rate and milk yield response to corn silage supplementation of late-lactation dairy cows grazing low-mass pastures at 2 daily allowances in autumn. *Journal of Dairy Science* 94, 3592-3604.
- Pérez-Prieto LA, Peyraud JL and Delagarde R 2012. Does pre-grazing herbage mass really affect herbage intake and milk production of strip-grazing dairy cows? *Grass and Forage Science* 68, 93-109.
- Pérez-Prieto LA and Delagarde R 2013. Meta-analysis of the effect of pasture allowance on pasture intake, milk production, and grazing behavior of dairy cows grazing temperate grasslands. *J. Dairy Sci.* 96, 6671-6689.
- Perez-Ramirez E, Peyraud JL and Delagarde R 2012. N-alkanes v. ytterbium/faecal index as two methods for estimating herbage intake of dairy cows fed on diets differing in the herbage: maize silage ratio and feeding level. *Animal* 6, 232-244.
- Petit M, D'Hour P and Garel JP 1995. Le troupeau de vaches allaitantes au pâturage. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 2, 45-54.
- Peyraud, J. L., E. A. Comeron, M. H. Wade, and G. Lemaire. 1996. The effect of daily herbage allowance, herbage mass and animal factors upon herbage intake by grazing dairy cows. *Ann. Zoot.* 45: 201-217.
- Peyraud, J. L., and L. Delaby. 2001. Ideal concentrate feeds for grazing dairy cows responses to supplementation in interaction with grazing management and grass quality. In: P. C. Garnsworthy and J. Wiseman (eds.) *Recent advances in animal nutrition*. p 203. Nottingham University Press, UK.
- Peyraud, J. L., and R. Delagarde. 2013. Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing. *Animal* 7: 57-67.
- Pflimlin 2012. Quel avenir pour les prairies en Europe ? Evolution des prairies et des systèmes d'élevage herbagers en Europe : bilan et perspectives. Académie d'Agriculture de France – Séance du 28 novembre 2012.
- Pomroy WE and Adlington BA 2006. Efficacy of short-term feeding of sulla (*Hedysarum coronarium*) to young goats against a mixed burden of gastrointestinal nematodes. *Veterinary Parasitology* 136, 363-366.

- Prache S 1988. Effets de l'apport d'aliment concentré à des agneaux au pâturage sur le parasitisme par les strongles gastro-intestinaux. *Reproduction Nutrition Développement* 28, 85-86.
- Prache S, Thériez M et Béchet G 1992. Complémentation des agneaux au pâturage pendant la phase d'allaitement - Interaction entre le niveau de complémentation et la quantité d'herbe offerte et effet sur le niveau de parasitisme. *INRA Productions Animales* 5, 137-148.
- Prache S, Benoit M, Tournadre H, Cabaret J, Laignel G, Ballet J, Thomas Y, Hoste H, Pellicer M, Andueza D, Hostiou N, Giraud JM et Sepchat B 2011. Plateforme INRA de recherches en production ovine allaitante AB : de l'étude de verrous techniques à la conception de systèmes d'élevage innovants. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 18, 61-64.
- Prosperi JM, Angevain M, Génier G and Mansat P 1994. Genetic variation for growth rhythms in alfalfa, in two contrasted and cold Mediterranean environments. In *Proceedings of the FAO Pastures and Fodder Crops Network – EUCARPIA Medicago sativa group Meeting*. September 4 August 1994. INRA Lusignan, France.
- Provenza FD and Roop J 2001. Understanding herbivores response to anti-quality factors in forages. In *Anti-quality factors in Rangeland and Pastureland Forages*. Station Bulletin (ed. Launchbaugh, K.). Vol.73, Idaho Forest, Wildlife and Range Experiment Station, University of Idaho, Moscow, pp 5-10.
- Ramis HA and Betlejewska K 1993. Resistant strain of small strongyles (Cyathostominae) of horses on Fenbesan. In *14th Conference WAAVP*, Cambridge.
- Raynaud JP 1970. Etude de l'efficacité d'une technique de coproscopie quantitative pour le diagnostic et le contrôle des infestations parasitaires des bovins, ovins, équins et porcins. *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée* 85, 321-334.
- R Development Core Team, 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Réseau Economique de la Filière Equine (REFErences), 2009. Annuaire ECUS 2009 : Tableau économique, statistique et graphique de cheval en France. Données 2008-2009, Institut Français du Cheval et de l'Equitation.
- Réseau Economique de la Filière Equine (REFErences), 2010. Annuaire ECUS 2010 : Tableau économique, statistique et graphique de cheval en France. Données 2009-2010, Institut Français du Cheval et de l'Equitation.
- Réseau Economique de la Filière Equine (REFErences), 2012. Annuaire ECUS 2012 : Tableau économique, statistique et graphique de cheval en France. Données 2011-2012, Institut Français du Cheval et de l'Equitation.
- Riffkin GC and Dobson C 1979. Predicting resistance of sheep to *Haemonchus contortus* infections. *Veterinary Parasitology* 5, 365-378.
- Roberts JL and Murray J-A 2013. Survey of Equine Nutrition: Perceptions and Practices of Veterinarians in Georgia, USA. *Journal of Equine Veterinary Science* 33, 454-459.
- Rocha RA, Bricarello PA, Silva MB, Houdijk JGM, Almeida FA, Cardia DFF and Amarante AFT 2011. Influence of protein supplementation during late pregnancy and lactation on the resistance of Santa Ines and Ile de France ewes to *Haemonchus contortus*. *Veterinary Parasitology* 181, 229-238.
- Rochfort S, Parker AJ and Dunshea FR 2008. Plant bioactives for ruminant health and productivity. *Phytochemistry* 69, 299-322.
- Rodiek AV and Jones BE 2012. Voluntary Intake of Four Hay Types by Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* 32, 579-583.
- Sakkas P, Houdijk JGM, Athanasiadou S and Kyriazakis I 2012. Sensitivity of periparturient breakdown of immunity to parasites to dietary protein source. *Journal of Animal Science* 90, 3954-3962.
- Stear MJ, Doliglska M and Donskow-Schmelter K 2007. Alternatives to anthelmintics for the control of nematodes in livestock. *Parasitology* 134, 139-151.
- Sandoval-Castro CA, J.F.J. T-A, Hoste H, Salem AZM and Chan-Pérez JI 2012. Using plant bioactive materials to control gastrointestinal tract helminths in livestock. *Animal Feed Science and Technology* 176, 192-201.

- Särkijärvi S, Sormunen-Cristian R, Heikkilä T, Rinne M and Saastamoinen M 2012. Effect of grass species and cutting time on in vivo digestibility of silage by horses and sheep. *Livestock Science* 144, 230-239.
- Sasimowski E, Budzynski M, Jelen B, Kapron M, Dziedzic R, Sapula M, Seweryn A and Slomka Z 1979. Observations on the behaviour of horses in an open stable and the fodder consumption when offered ad libitum. *Prace i Materiały Zootechniczne* 20, 69-86.
- Scantlebury C, Peachey L, Hodgkinson J, Matthews J, Trawford A, Mulugeta G, Tefera G and Pinchbeck G 2013. Participatory study of medicinal plants used in the control of gastrointestinal parasites in donkeys in Eastern Shewa and Arsi zones of Oromia region, Ethiopia. *BMC Veterinary Research* 9, 179-190.
- Scheibe KMT, Schleusner A, Berger K, Eichhorn J, Langbein L, Zotto D and Streich WJ 1998. ETHOSYS® - new system for recording and analysis of behavior of free-ranging domestic animals and wildlife. *Applied Animal Behaviour Science* 55, 195-211.
- Schofield P, Mbugua DM and Pell AN 2001. Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology* 91, 21-40.
- Scott JM, Behrendt K, Colvin A, Scott F, Shakhane LM, Guppy C, Hoad J, Gaden CA, Edwards C, Hinch GN, Cacho OJ, Donald GE, Cottle D, Coventry T, Williams G and Mackay DF 2013. Integrated overview of results from a farmlet experiment which compared the effects of pasture inputs and grazing management on profitability and sustainability. *Animal Production Science* 53, 841-855.
- Sengul S 2003. Performance of some forage grasses or legumes and their mixtures under dry land conditions. *European Journal of Agronomy* 19, 401-409.
- SLU 2001. The Horse Industry in the European Union. Final Report, EU Equus (2001), Uppsala, Sweden: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Spalinger DE and Hobbs NT 1992. Mechanisms of foraging in mammalian herbivores: new models of functional response. *The American Naturalist* 140, 325-348.

- Stear MJ, Bairden K, Mckeller QA, Scott I, Strain S and Bishop SC 1999. The relationship between the number and size of nematodes in the abomasum and the concentration of pepsinogen in ovine plasma. *Research in Veterinary Science* 67, 89-92.
- Stockdale CR 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 40, 913-921.
- Sykes AR 1987. Endoparasites and Herbivore Nutrition. *The Nutrition of Herbivores* (eds. Hacker and Ternouth). Sydney Academic Press.
- Sykes AR and Coop RL 1976. Intake and utilization of food by growing lambs with parasitic damage to the small intestine caused by daily dosing with *Trichostrongylus colubriformis* larvae. *Journal of Agricultural Science* 86, 507-515.
- Sykes AR and Coop RL 1977. Intake and utilisation of food by growing sheep with abomasal damage caused by daily dosing with *Ostertagia circumcincta* larvae. *Journal of Agricultural Science* 88, 671-677.
- Sykes AR and Greer AW 2003. Effects of parasitism on the nutrient economy of sheep: An overview. *Australian Journal of Agriculture* 43, 1393-1398.
- Sykes AR and Kyriazakis I 2007. Opportunities to control herbivore nematodes through manipulation of the grazing environment. In *7th International Symposium Nutrition Herbivores*, pp. 329-353. China Agricultural University Press, Beijing, China.
- Taylor EL 1954. Grazing behaviour and helminthic disease. *British Journal of Animal Behaviour* 2, 61-62.
- Terrill TH, Mosjidis JA, Moore DA, Shaik SA, Miller JE, Burke JM, Muir JP and Wolfe R 2007. Effect of pelleting on efficacy of sericea lespedeza hay as a natural dewormer in goats. *Veterinary Parasitology* 146, 117-122.
- Thamsborg SM, Jörgensen SM, Waller PJ and Nansen P 1996. The influence of stocking rate on gastrointestinal nematode infections of sheep over a two-year grazing period. *Veterinary Parasitology* 67, 207-224.
- Thamsborg SM, Mejer H, Bandier M and Larsen M 2003. Influence of different forages on gastrointestinal nematode infections in grazing lambs. In *19th International*

- Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology, New Orleans, USA, p. 189.
- Theodoridou K 2010. Les effets des tannins condensés du sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) sur sa digestion et sa valeur nutritive. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Thériez M, Petit M et Martin-Rosset W 1994. Caractéristiques de la conduite des troupeaux allaitants en zones difficiles. *Annales de Zootechnie* 43, 33-47.
- Thornley JHM, Parsons AJ, Newman J and Penning PD 1994. A cost-benefit model of grazing intake and diet selection in a two-species temperate grassland sward. *Functional Ecology* 8, 5-16.
- Torres-Acosta JFJ and Hoste H 2008. Alternative or improved methods to limit gastrointestinal parasitism in grazing sheep and goats. *Small Ruminant Research* 77, 159-173.
- Traversa D, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Milillo P, Schurmann S, Barnes H, Otranto D, Perrucci S, Frangipane di Regalbano A, Beraldo P, Boeckh A and Cobb R 2009. Anthelmintic resistance in cyathostomin populations from horse yards in Italy, UK and Germany. *Parasit. Vectors* 2 (Suppl. 2), S2.
- Traversa D, Milillo P, Barnes H, von Samson-Himmelstjerna G, Schurmann S, Demeler J, Otranto D, Lia RP, Perrucci S, Frangipane di Regalbano A, Beraldo P, Amodie D, Rohn K, Cobb R and Boeckh A 2010. Distribution and species-specific occurrence of cyathostomins (Nematoda, Strongylida) in naturally infected horses from Italy, United Kingdom and Germany. *Veterinary Parasitology* 168, 84-92.
- Traversa D, Castagna G, von Samson-Himmelstjerna G, Meloni S, Bartolini R, Geurden T, Pearce MC, Woringer E, Besognet B, Milillo P and D'Espois M 2012. Efficacy of major anthelmintics against horse cyathostomins in France. *Veterinary Parasitology* 188, 294-300.
- Trillaud-Geyl C, Bigot G, Jussiaux M et Martin-Rosset W 1986. Production de chevaux de selle : mode d'élevage et d'alimentation. In 12ème Journée d'Etude du CEREOPA, pp. 60-79. Paris, France.

- Trillaud-Geyl C, Brohier J, de Baynast L, Baudoin N, Rossier E et Lapiere O 1990. Bilan de productivité sur 10 ans d'un troupeau de juments de selle conduites en plein air intégral. Croissance des produits de 0 à 6 mois. *World Review of Animal Production* 25, 65-70.
- Turner KE and Neel JPS 2003. Quebracho tannins influence on nitrogen balance in small ruminants and *in vitro* parameters when utilizing alfafa forage. *Sheep and Goats Research Journal* 18, 34-43.
- Tzamaloukas O, Athanasiadou S, Kyriazakis I, Jackson F and Coop RL 2005. The consequences of short-term grazing of bioactive forages on established adult and incoming larvae populations of *Teladorsagia circumcincta* in lambs. *International Journal for Parasitology* 35, 329-335.
- Valderrábano J, Delfa R and Uriarte J 2002. Effect of level of feed intake on the development of gastrointestinal parasitism in growing lambs. *Veterinary Parasitology* 104, 327-338.
- Valderrábano J, Calvete C and Uriarte J 2010. Effect of feeding bioactive forages on infection and subsequent development of *Haemonchus contortus* in lamb faeces. *Veterinary Parasitology* 172, 89-94.
- van Houtert MFJ and Sykes AR 1996. Implications of nutrition for the ability of ruminants to withstand gastrointestinal nematode infections. *International Journal for Parasitology* 26, 1151-1168.
- van Houtert MFJ, Barger IA, Steel JW, Windon RG and Emery DL 1995. Effects of dietary protein intake on responses of young sheep to infection with *Trichostrongylus colubriformis*. *Veterinary Parasitology* 56, 163-180.
- van Wyk JA and Malan FS 1988. Resistance of field strains of *Haemonchus contortus* to ivermectin, closantel, radoxanide and the benzimidazoles in South Africa. *Veterinary Record* 123, 226-228.
- Vermorel M, Martin-Rosset W and Vernet J 1997. Energy utilization of twelve forages or mixed diets for maintenance by sport horses. *Livestock Production Science* 47, 157-167.

- von Samson-Himmelstjerna G 2012. Anthelmintic resistance in equine parasites - detection, potential clinical relevance and implications for control. *Veterinary Parasitology* 185, 2-8.
- Waghorn GC, Jones WT, Shelton ID, McNabb and W.C. 1990. Condensed tannins and the nutritive value of herbage. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 51, 171-176.
- Waghorn TS, Molan AL, Deighton M, Alexander RA, Leathwick DM, Mc Nabb WC and Meagher LP 2006. In vivo anthelmintic activity of *Dorycnium rectum* and grape seed extract against *Ostertagia (Teladorsagia) circumcincta* and *Trichostrongylus colubriformis* in sheep. *New-Zealand Veterinary Journal* 54, 21-27.
- Waghorn G 2008. Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production - progress and challenges. *Animal Feed Science and Technology* 147, 116-139.
- Wales WJ, Doyle PT and Dellow W 1998. Dry matter intake and nutrient selection by lactating cows grazing irrigate pastures at different pasture allowances in summer and autumn. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 451-460.
- Waller PJ 2006. Sustainable nematode parasite control strategies for ruminant livestock by grazing management and biological control. *Animal Feed Science and Technology* 126, 277-289.
- Werne S, Isensee A, Maurer V, Perler E, Drewek A and Heckendorn F 2013. Integrated control of gastrointestinal nematodes in lambs using a bioactive feed × breed approach. *Veterinary Parasitology* 198, 298-304.
- Winsco KN, Coverdale JA, Wickersham TA, Lucia JL and Hammer CJ 2013. Influence of maternal plane of nutrition on mares and their foals: Determination of mare performance and voluntary dry matter intake during late pregnancy using a dual-marker system. *Journal of Animal Science* 91, 4208-4215.
- Witzendorff C, Quintana TM, Sievers G, Schnieder T and von Samson-Himmelstjerna G 2003. A survey of benzimidazole resistance in small strongyles (Cyathostominae) in the south of Chile. *Archives of Medicine* 35, 187-194.

- Wolstenholme AJ, Fairweather I, Prichard RK, von Samson-Himmelstjerna G and Sangster NC 2004. Drug resistance in veterinary helminths. *Trends in Parasitology* 20, 469-476.
- Wolter R, Valette JP et Morel-Garay G 1982. Digestibilité de la paille traitée à la soude chez le poney. *Annales de Zootechnie* 31, 459-470.
- Wolter R 1984. La digestion chez le cheval. In *Le Cheval : Reproduction, Sélection, Alimentation, Exploitation* (eds. R Jarrige et W Martin-Rosset), pp. 189-208, INRA, Paris, France.
- Wood ELD, Matthews JB, Stephenson S, Slote M and Nussey DH 2013. Variation in fecal egg counts in horses managed for conservation purposes: individual egg shedding consistency, age effects and seasonal variation. *Parasitology* 140, 115-128.
- Woods TF, Lane TJ, Zeng QY and Courtney CH 1998. Anthelmintic resistance on horse farms in north-central Florida. *Equine Practice* 14, 14-17.
- Youket RJ, Carnevale JM, Houpt KA and Houpt TR 1985. Humoral, hormonal and behavioral correlates of feeding in ponies: The effects of meal frequency. *Journal of Animal Science* 61, 1103-1110.
- Zaralis K, Tolkamp BJ, Houdijk JGM, Wylie ARG and Kyriazakis I 2009. Consequences of protein supplementation for anorexia, expression of immunity and plasma leptin concentrations in parasitized ewes of two breeds. *British Journal of Nutrition* 101, 499-509.

Valorisation de la thèse

Articles scientifiques

- Collas C, Dumont B, Delagarde R, Martin-Rosset W and Fleurance G. 2015. Energy supplementation and herbage allowance effects on daily intake in lactating mares. *Journal of Animal Science*, doi: 10.2527/jas2015-8447. *In press*.
- Collas C, Fleurance G, Cabaret J, Martin-Rosset W, Wimel L, Cortet J and Dumont B. 2014. How does the suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism in lactating saddle mares? *Animal* 8, 1290-1297.
- Collas C, Sallé G, Dumont B, Cabaret J, Cortet J, Martin-Rosset W, Wimel L and Fleurance G. Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) or extra proteins in the diet as an alternative to control horse strongyle infection? *En préparation pour PLOS ONE*.

Communications orales

- Collas C, Dumont B, Delagarde R, Martin-Rosset W et Fleurance G. 2015. Dans quelles conditions de disponibilité en herbe est-il nécessaire de compléter en énergie la jument en lactation au pâturage ? 41^{ème} Journée de la Recherche Equine. 12 mars 2015, Paris, France. pp. 103-112. *Communication orale et article de vulgarisation*.
- Collas C. 2014. Conduite alimentaire de la jument en lactation au pâturage : influence sur l'ingestion, la couverture des besoins et l'état parasitaire. Journées de l'Ecole Doctorale Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement. 12-13 juin 2014, Clermont-Ferrand, France.
- Collas C, Fleurance G, Cabaret J, Martin-Rosset W, Wimel L, Cortet J et Dumont B. 2014. Est-il utile de compléter une jument en lactation au pâturage ? Journée d'information sur les actualités en élevage équin. 23 janvier 2014, Le Pin-au-Haras, France.
- Collas C, Fleurance G, Martin-Rosset W, Cabaret J, Wimel L and Dumont B. 2013. Effect of energy supplementation on grass intake, performance and parasitism in lactating mares. 64th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science. EAAP publication No. 19. 26-30 August 2013, Nantes, France.

Communications affichées

- Collas C, Sallé G, Dumont B, Cabaret J, Cortet J, Martin-Rosset W, Wimel L et Fleurance G. 2015. Quelle efficacité d'un apport de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d'un excès d'azote de courte durée dans l'alimentation du cheval pour lutter contre les strongles digestifs ? 41^{ème} Journée de la Recherche Equine. 12 mars 2015, Paris, France. pp. 158-161. *Poster et article de vulgarisation.*
- Collas C, Fleurance G, Martin-Rosset W, Cabaret J, Wimel L, Dumont B. 2013. Alimentation à l'herbe de la jument de selle en lactation : quels effets d'une complémentation énergétique sur l'ingestion, les performances zootechniques et l'état parasitaire ? 39^{ème} Journée de la Recherche Equine. 28 février 2013, Paris, France. pp. 131-134. *Poster et article de vulgarisation.*
- Collas C, Sallé G, Dumont B, Cabaret J, Cortet J, Martin-Rosset W, Wimel L and Fleurance G. The effect of short-term consumption of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) or extra proteins on strongyle infection in horses. 25th International Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology. 16-20 August 2015, Liverpool, United Kingdom. *Résumé accepté pour un poster.*
- Participation aux Prairiales Normandie du Pin, 18 juin 2015, Le Pin-au-Haras, France. *Communications affichées en prévision.*

Actions de vulgarisation

- Collas C, Fleurance G, Cabaret J, Martin-Rosset W, Wimel L, Cortet J et Dumont B. 2014. Est-il utile de compléter en énergie une jument de selle en lactation au pâturage ? Equ'idée, mars 2014, article 2, pp. 1-4.
- Contribution à la réactualisation des fiches Equipaedia sur la jument (2014, site internet IFCE).
- Contribution aux nouvelles recommandations alimentaires de l'INRA pour la jument de selle en lactation (INRA 2015, *In press*).

Annexes

Liste des Annexes

Annexe 1. Caractéristiques de l’herbe et gestion du pâturage lors des expérimentations de 2012 et 2013.....207

Annexe 2. Performances, ingestion et comportement des juments selon la quantité d’herbe offerte lors des expérimentations de 2012 et 2013 pour les juments complémentées (C) et non-complémentées (NC).....209

Annexe 3. Dans quelles conditions de disponibilité en herbe est-il nécessaire de compléter en énergie la jument en lactation au pâturage ?

Article de vulgarisation publié dans les actes de colloque de la 41^{ème} Journée de la Recherche Equine. 12 mars 2015, Paris, France. pp.103-112.....211

Annexe 4. Quelle efficacité d’un apport de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d’un excès d’azote de courte durée dans l’alimentation du cheval pour lutter contre les strongles digestifs ?

Article de vulgarisation publié dans les actes de colloque de la 41^{ème} Journée de la Recherche Equine. 12 mars 2015, Paris, France. pp.158-161.....221

Annexe 5. Alimentation à l’herbe de la jument de selle en lactation : quels effets d’une complémentation énergétique sur l’ingestion, les performances zootechniques et l’état parasitaire ?

Article de vulgarisation publié dans les actes de colloque de la 39^{ème} Journée de la Recherche Equine. 28 février 2013, Paris, France. pp.131-134.....225

Annexe 6. Est-il utile de compléter en énergie une jument de selle en lactation au pâturage ?

Article de vulgarisation publié dans Equ’idée, Le magazine en ligne de l’actualité technique et scientifique équine (IFCE), mars 2014, article 2, pp. 1-4.....229

Annexe 1

| Traitement | Complémenté et non-complémenté | | | | | |
|---|--------------------------------|------|---------------|---------------|---------------|-------|
| Année d'expérimentation | 2013 | | | 2012 | | |
| Dates | 22/06 – 02/08 | | 06/06 – 05/07 | 06/07 – 19/08 | 20/08 – 02/10 | |
| QO, g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 35,0 | 52,5 | 70,0 | 102,2 | 152,8 | 156,5 |
| Gestion du pâturage | | | | | | |
| Chargement, UGB.ha ⁻¹ | 14,3 | 10,1 | 7,6 | 3,1 | 1,5 | 1,5 |
| Hauteur avant pâturage, cm | 25,7 | 26,5 | 27,8 | 52,2 | 26,5 | 11,9 |
| Hauteur après pâturage, cm | 2,9 | 4,4 | 5,7 | 13,3 | 7,5 | 5,3 |
| Qualité de l'herbe | | | | | | |
| MS, g.kg ⁻¹ | 250 | 257 | 241 | 240 | 205 | 421 |
| MO, g.kg MS ⁻¹ | 894 | 903 | 886 | 867 | 774 | 740 |
| MAT, g.kg MS ⁻¹ | 145 | 152 | 159 | 125 | 112 | 101 |
| CB, g.kg MS ⁻¹ | 258 | 251 | 248 | 215 | 191 | 182 |
| NDF, g.kg MS ⁻¹ | 563 | 559 | 556 | 453 | 438 | 470 |

QO : quantité d'herbe offerte au ras du sol ; MS : matière sèche ; PV : poids vif

UGB : unité gros bétail (1 jument suitée = 1,2 UGB selon grille INRA 2012)

MO : matière organique ; MAT : matières azotées totales ; CB : cellulose brute

NDF : neutral detergent fiber

Annexe 2

| Traitement | Juments C | | | | | | Juments NC | | | | | |
|--|---------------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|---------------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|
| Année d'expérimentation | 2013 | | | 2012 | | | 2013 | | | 2012 | | |
| Dates | 22/06 – 02/08 | | | 06/06 – 05/07 | 06/07 – 19/08 | 20/08 – 02/10 | 22/06 – 02/08 | | | 06/06 – 05/07 | 06/07 – 19/08 | 20/08 – 02/10 |
| QO, g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 35,0 | 52,5 | 70,0 | 102,2 | 152,8 | 156,5 | 35,0 | 52,5 | 70,0 | 102,2 | 152,8 | 156,5 |
| Performances zootechniques | | | | | | | | | | | | |
| Poids, kg PV | 589 | 594 | 589 | 587 | 599 | 607 | 585 | 589 | 576 | 595 | 606 | 615 |
| Note d'état corporel | 3,3 | | | 2,9 | 3,4 | 3,6 | 3,2 | | | 3,3 | 3,4 | 3,6 |
| Poids des poulains, kg PV | 118 | 117 | 116 | 110 | 147 | 193 | 105 | 106 | 105 | 93 | 128 | 174 |
| Ingestion | | | | | | | | | | | | |
| PF liée à l'herbe, g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 7,8 | 8,4 | 9,7 | 6,2 | 5,9 | 6,1 | 8,5 | 9,8 | 10,7 | 5,7 | 6,4 | 7,5 |
| Digestibilité de l'herbe ingérée, g.kg MS ⁻¹ | 560 | 566 | 570 | 585 | 597 | 565 | 551 | 556 | 557 | 579 | 584 | 562 |
| QI herbe, g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 17,9 | 19,2 | 22,5 | 23,5 | 22,7 | 21,7 | 19,0 | 22,0 | 24,3 | 22,6 | 25,4 | 28,0 |
| QI herbe dig, g MSD.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 10,1 | 10,9 | 12,8 | 13,7 | 13,5 | 12,2 | 10,5 | 12,3 | 13,6 | 13,1 | 14,8 | 15,7 |
| QI totale, g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 22,4 | 23,7 | 27,0 | 27,5 | 26,7 | 25,2 | 19,5 | 22,5 | 24,8 | 23,0 | 25,8 | 28,4 |
| QI totale dig, g MSD.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 13,7 | 14,5 | 16,5 | 17,0 | 16,8 | 15,1 | 10,9 | 12,6 | 14,0 | 13,4 | 15,2 | 16,1 |
| QI énergie nette, kJ.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹ | 155,0 | 162,5 | 182,0 | 188,9 | 188,5 | 176,8 | 118,1 | 136,0 | 149,7 | 145,9 | 167,6 | 184,8 |
| Besoins énergétiques couverts, % des apports recommandés | 108 | 114 | 126 | 122 | 134 | 137 | 85 | 94 | 102 | 97 | 120 | 144 |
| Utilisation de l'herbe (% QO) | 51 | 37 | 32 | 23 | 15 | 14 | 54 | 42 | 35 | 22 | 17 | 18 |
| Comportement | | | | | | | | | | | | |
| Temps de pâturage, min.j ⁻¹ | 956 | 1018 | 1050 | 906 | 858 | 942 | 965 | 1028 | 989 | 912 | 840 | 996 |
| Vitesse d'ingestion, g MS.min ⁻¹ | 11,4 | 11,3 | 12,9 | 15,3 | 15,9 | 13,9 | 11,7 | 12,6 | 14,3 | 14,7 | 18,3 | 17,2 |

QO : quantité d'herbe offerte au ras du sol ; MS : matière sèche ; PV : poids vif ; PF : production fécale ; QI : quantité ingérée ; MSD : matière sèche digestible



41^{ème} Journée de la Recherche Équine
Jeudi 12 mars 2015

Dans quelles conditions de disponibilité en herbe est-il nécessaire de compléter en énergie la jument en lactation au pâturage ?

Par

C. Collas^{1,2}, B. Dumont², R. Delagarde³, W. Martin-Rosset², L. Wimel¹, G. Fleurance^{1,2}

¹ IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Terrefort, BP207, 49411 Saumur

² INRA et VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle

³ INRA et Agrocampus Ouest, UMR1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage, 35590 Saint-Gilles

Résumé

Notre étude a analysé les effets de la quantité d'herbe offerte (QO) et de la complémentation énergétique sur l'ingestion d'herbe de juments de selle en lactation pâturant des repousses de bonne qualité. Trois niveaux de QO au ras du sol : bas, moyen et haut, *i.e.* 35, 52,5 et 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, ont été testés en ajustant la surface offerte au fil. Pendant 3 périodes de 2 semaines, 3 groupes de 3 juments complémenteées (C, 2,6 kg MS orge.j⁻¹) et 3 groupes de 3 juments non complémenteées (NC) ont pâturé chaque QO selon un carré latin. Toutes les juments, qu'elles soient complémenteées ou non, ont répondu de la même façon aux variations de QO en augmentant linéairement leur ingestion d'herbe de 18,5 à 23,4 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte. Cependant, l'apport d'orge a permis aux juments C de réaliser une ingestion de matière sèche totale digestible et une ingestion d'énergie nette supérieures à celles des juments NC. Contrairement aux juments C, les juments NC ne couvraient plus leurs besoins énergétiques sur les QO basse et moyenne. La relation linéaire entre la QO et l'ingestion d'herbe a permis d'estimer à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (*i.e.* 39 kg MS.jument⁻¹.j⁻¹) le seuil de QO en-dessous duquel les juments en lactation nécessitent une complémentation énergétique pour satisfaire pleinement leurs besoins dans nos conditions de pâturage.

Mots clés : concentré, pâturage, cheval, besoins nutritionnels, disponibilité en herbe

Summary

Our study investigated the effects of daily herbage allowance (DHA) and energy supplementation on daily herbage intake in lactating saddle mares grazing high-quality regrowths. Three contrasting DHAs at ground level: low, medium and high, *i.e.* 35, 52.5 and 70 g DM.kg BW⁻¹.d⁻¹, were obtained by adjusting pasture strip width. For 3 successive 2-week periods, 3 groups of 3 supplemented mares (S, 2.6 kg DM barley.d⁻¹) and 3 groups of 3 non supplemented mares (NS) grazed each DHA according to a Latin-square design. Whichever their level of supplementation, all the mares responded in the same way to DHA variations by linearly increasing their herbage intake from 18.5 to 23.4 g DM.kg BW⁻¹.d⁻¹ with increasing DHA. However, barley supplementation allowed to S mares to realize total digestible dry matter intake and net energy intake higher than the ones of NS mares. Contrary to S mares, NS mares no longer met their energy requirements on low and medium DHA. The linear relation between DHA and herbage intake allowed to estimate at 66 g DM.kg BW⁻¹.d⁻¹ (*i.e.* 39 kg DM.mare⁻¹.d⁻¹) the DHA threshold below which lactating mares need an energy supplementation to fully meet their requirements in our grazing conditions.

Key-words: concentrate, grazing, horse, nutritional requirements, sward availability



Introduction

L'herbe pâturée, si elle est bien gérée, est connue pour être l'aliment le moins coûteux pour nourrir les herbivores domestiques (*e.g.* chevaux : Micol et Martin-Rosset 1995 ; vaches laitières : Peyraud et Delaby 2001). Dans le cas d'un pâturage rationné (tournant ou aux fils), l'ingestion de matière sèche et les performances zootechniques dépendent principalement de la quantité d'herbe offerte chaque jour (QO ; Pérez-Prieto et Delagarde 2013). Chez les ruminants, la relation est curvilinéaire puisque l'ingestion d'herbe augmente à un taux décroissant avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte (Pérez-Prieto et Delagarde 2013). Lorsque la disponibilité en herbe est faible, l'apport d'une complémentation augmente l'ingestion de matière sèche totale digestible et améliore les performances (Delaby *et al.* 2001), alors que la réponse à la complémentation est faible lorsque la disponibilité en herbe est élevée en raison d'une substitution entre l'herbe et le concentré (Stockdale 2000). Dans les élevages équin en France, les charges d'alimentation représentent en moyenne 30% des charges opérationnelles (Morhain 2011). L'utilisation de l'herbe pâturée est freinée par un manque de confiance des éleveurs vis-à-vis d'une ressource alimentaire dont la disponibilité et la qualité varient au cours de la saison et selon les conditions climatiques. De plus, les références sur lesquelles s'appuyer pour alimenter les chevaux à l'herbe sont peu nombreuses malgré des travaux récents conduits chez le cheval en croissance (*e.g.* Mésochina *et al.* 2000 ; Grace *et al.* 2002a ; Edouard *et al.* 2009, 2010). Les animaux dont les besoins sont élevés (*i.e.* juments en lactation, poulains : INRA 2012) sont de ce fait couramment complétés au pâturage pour sécuriser leurs performances. Dans une précédente expérimentation, nous avons pourtant montré que, dans des conditions où la disponibilité et la qualité de l'herbe ne sont pas limitantes, la jument de selle en lactation est capable de couvrir ses besoins et ceux de son poulain à partir de l'herbe seule (Collas *et al.* 2014). Dans la présente étude conduite sur des juments suitées pâturant aux fils des repousses de bonne qualité, nous avons cherché à préciser les conditions de disponibilité en herbe qui nécessitent la mise en place d'une complémentation énergétique.

1. Matériel et méthodes

L'expérimentation a été conduite avec l'autorisation du comité d'éthique régional pour l'expérimentation animale du Limousin (10-2013-10).

1.1. Traitements et plan expérimental

L'expérimentation s'est déroulée du 22 juin au 2 août 2013 à la station expérimentale de l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation (Ifce) de Chamberet (Corrèze, altitude 440 m). Dix-huit juments de selle ont été soit complétementées avec 2,6 kg MS d'orge par jour (groupe C, n=9), soit non-complétementées (groupe NC, n=9). Les 18 juments ont été réparties en 3 groupes de 3 juments C et 3 groupes de 3 juments NC, afin de réaliser un plan expérimental en carré latin avec 3 niveaux de quantité d'herbe offerte mesurés au ras du sol : bas (B), moyen (M) et haut (H), *i.e.* 35,0, 52,5 et 70,0 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ respectivement. Le niveau bas visait à limiter l'ingestion volontaire des juments ; il représentait 1,4 fois l'ingestion d'herbe maximale mesurée par des juments en lactation non-complétementées pâturant les mêmes pâtures l'été précédent (soit 25 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; Collas *et al.* 2014). Les niveaux de QO moyen et haut correspondaient à 1,5 et 2 fois le niveau faible, respectivement. Chaque période de mesures a duré 2 semaines : période 1 du 22/06 au 05/07, période 2 du 06/07 au 19/07 et période 3 du 20/07 au 02/08.

1.2. Animaux

Durant la gestation, les 18 juments (race Selle Français et Anglo-arabe, 5–23 ans) ont reçu un régime composé de 43% de foin de graminées (MS : 856 g.kg⁻¹ ; MAT : 79 g.kg MS⁻¹ ; CB : 361 g.kg MS⁻¹), 41% d'enrubané (MS : 614 g.kg⁻¹ ; MAT : 60 g.kg MS⁻¹ ; CB : 364 g.kg MS⁻¹) et 16% de concentré (61,5% d'orge, 35% de tourteau de soja et 3,5% de minéraux et vitamines) dans l'objectif de couvrir leurs besoins nutritionnels (INRA 2012). Comme il a été montré que l'ingestion volontaire des juments est affectée par leur état corporel au poulinage (Doreau *et al.* 1993), les juments en gestation ont été alimentées de façon à présenter une note d'état corporel proche de 3 au début de l'expérimentation (sur une échelle de 0 : cheval émacié à 5 : cheval obèse ; Martin-Rosset *et al.* 2008). La capacité d'ingestion de chaque jument a été déterminée en mars par des mesures d'ingestion d'un foin de graminées distribué à volonté pendant 8 jours après 6 jours d'adaptation. En avril, les 18 juments ont reçu un traitement anthelminthique à l'ivermectine (Équalan ; Merial, Lyon, France). Après le poulinage, les juments ont été réparties en 2 groupes (C et NC) équilibrés selon la capacité d'ingestion des juments (C : 23,7 ± 1,4 erreur standard g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; NC : 24,1 ± 1,8 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹), leur date de poulinage (C : 14 avril au 31 mai 2013, 47 ± 5 jours de lactation au début



de l'expérimentation ; NC : 26 avril au 9 juin, 40 ± 6 jours de lactation au début de l'expérimentation), leur note d'état corporel (C : $3,2 \pm 0,2$; NC : $3,1 \pm 0,2$), leur poids vif au poulinage (C : $547,2 \pm 14,4$ kg ; NC : $538,0 \pm 10,4$ kg), leur hauteur au garrot (C : $163,3 \pm 1,3$ cm ; NC : $161,9 \pm 0,9$ cm) et leur âge (C : 9 ± 2 ans ; NC : 7 ± 2 ans). Du 22 juin au 2 août, les juments C ont reçu au pâturage 2,6 kg MS d'orge aplatie par jour (MS : 881 g.kg^{-1} ; MAT : 116 g.kg MS^{-1}), ce qui couvrait 60% de leurs besoins énergétiques de lactation (INRA 2012). Durant la seconde semaine de chaque période, les juments NC ont reçu 260 g MS d'orge aplatie par jour afin de distribuer aux 18 juments 100 g de petites billes plastiques colorées (une couleur par jument) dans l'orge et de permettre l'individualisation des fèces lors de leur récolte au pâturage pour les mesures d'ingestion. Les juments ont été habituées à recevoir l'orge individuellement au pâturage une semaine avant le début de l'expérimentation. Elles ont été pesées à la même heure le premier jour de chaque période (C, bas : $589,3 \pm 12,0$ kg, moyen : $593,5 \pm 13,6$ kg, haut : $588,8 \pm 12,0$ kg ; NC, bas : $584,5 \pm 13,2$ kg, moyen : $589,2 \pm 12,9$ kg, haut : $576,1 \pm 10,1$ kg).

1.3. Composition botanique de la prairie et conduite du pâturage

Les juments et les poulains ont été conduits au pâturage aux fil avant et fil arrière sur une prairie permanente fertile (25 espèces ; 60% de graminées). Les espèces les plus abondantes étaient le pâturin commun (*Poa trivialis*), le ray-grass anglais (*Lolium perenne*), le trèfle blanc (*Trifolium repens*) et le pissenlit (*Taraxacum officinale*). La prairie a été divisée en 3 parcs. Un parc a été utilisé à chacune des périodes, les 3 parcs ont donc été tondus au préalable à des dates différentes pour offrir des stades de végétation identiques à chaque période. Chaque parc a été divisé en 6 sous-parcs pour les 6 traitements (C-B, NC-B, C-M, NC-M, C-H, NC-H). Lorsque les poulains étaient âgés de plus de deux mois il est devenu nécessaire d'estimer la quantité d'herbe qu'ils allaient consommer durant la seconde et troisième périodes, ainsi, les surfaces offertes ont été légèrement augmentées. Nous avons calculé que les poulains consommaient $5 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ pendant la seconde période (PV moyen = 135 kg) et $6 \text{ g MS.kg PV}^{-1}.\text{j}^{-1}$ pendant la troisième période (PV moyen = 145 kg) en considérant le gain de poids moyen quotidien des poulains et leurs besoins, la production laitière des juments et la valeur nutritive de l'herbe (Trillaud-Geyl *et al.* 1990 ; INRA 2012). Les surfaces à pâturer ont été allouées pour 2 jours en déplaçant des clôtures électriques. Les juments et les poulains ont été déplacés dans une nouvelle surface en herbe à pâturer tous les deux matins à 9h15. Des fils arrière évitaient que les juments et les poulains aient accès aux zones précédemment pâturées. Cette conduite du pâturage a permis d'offrir aux juments soumises à un traitement donné au cours d'une période des disponibilités en herbe similaires tout au long des 2 semaines. Pour un traitement donné, la surface à offrir pour 2 jours était calculée à partir de la hauteur d'herbe mesurée tous les 2 jours dans la prochaine zone à pâturer et d'une régression hauteur-biomasse établie une fois par semaine afin d'estimer tous les 2 jours la biomasse disponible (voir paragraphe 1.4).

1.4. Caractéristiques de la végétation

La hauteur et la biomasse d'herbe ont été mesurées une fois par semaine dans 2 quadrats de $0,49 \text{ m}^2$ ($70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$) par sous-parc, sélectionnés aléatoirement parmi des zones de hauteurs courtes, moyennes et hautes sur la prochaine surface à offrir. Douze mesures de hauteur ont été réalisées à l'herbomètre stick (enregistre le premier contact du stick avec l'herbe) dans chaque quadrat avant la coupe. La coupe a été réalisée aux ciseaux au ras du sol et l'herbe récoltée a été divisée en 2 échantillons : un échantillon par quadrat a été séché 24 h à 103°C pour estimer la teneur en matière sèche (MS) de l'herbe, donc la biomasse disponible, et établir la régression hauteur-biomasse ; l'autre échantillon a été séché 72 h à 60°C et analysé pour déterminer sa teneur en matières azotées totales (MAT ; méthode Dumas NF V18-120), cellulose brute (CB, méthode Weende NF V03-040) et en parois (neutral detergent fiber NDF ; méthode Goering et Van Soest 1970). Trente mesures de hauteur d'herbe avant pâturage ont été réalisées dans chaque sous-parc tous les 2 jours avant l'entrée des animaux, afin d'estimer la biomasse disponible à partir de la régression hauteur-biomasse établie chaque semaine, et de pouvoir calculer les surfaces à offrir pour les disponibilités basses, moyennes et hautes. Des mesures de hauteur d'herbe après pâturage ont également été réalisées tous les 2 jours sur 15 points par surface en herbe offerte.

1.5. Ingestion d'herbe

L'ingestion journalière de matière sèche d'herbe a été mesurée pour chaque jument pendant les 4 derniers jours de chaque période par la formule :

$$\text{Ingestion d'herbe} = \text{PF} / (1 - \text{DMSH})$$

où PF est la production fécale en kg de matière sèche sur 24 h attribuable à l'herbe, et DMSH est la digestibilité de la matière sèche de l'herbe ingérée exprimée en valeur décimale.



La totalité des fèces de chaque jument a été récoltée chaque jour pendant 4 jours successifs après que les parcs aient été nettoyés des fèces du jour précédent. Le poids total des fèces produites chaque jour a été déterminé individuellement, et un échantillon des fèces de chaque jument a été séché pendant 72 h à 80 °C pour déterminer ses teneurs en MS et MAT.

La production fécale attribuable à l'herbe ingérée a ensuite été calculée en soustrayant la matière sèche indigestible de l'orge (INRA 2012) de la production fécale totale (Delagarde *et al.* 1999 ; Collas *et al.* 2014).

La digestibilité de la MS de l'herbe (DMSH) a été estimée à partir de la teneur en MAT fécales attribuable à l'herbe d'après l'équation établie par Mésoschina *et al.* (1998) :

$$\text{DMSH} = 0,734 - (17,872/\text{teneur MAT fécales})$$

où la teneur en MAT fécales est exprimée en g.kg MS⁻¹.

La quantité de MAT fécales attribuable à l'herbe a été obtenue en soustrayant la quantité de MAT fécales attribuable à l'orge de la quantité de MAT fécales totales (Delagarde *et al.* 1999 ; Collas *et al.* 2014).

L'ingestion d'énergie nette (EN) a été estimée à partir des teneurs en énergie nette de l'herbe et de l'orge d'après le système INRA (2012) :

$$\text{Teneur en EN de l'herbe (}\text{g.kg MS}^{-1}\text{)} = [(0,825 - 0,0011 \times \text{CB} + 0,0006 \times \text{MAT}) \times 2250] \times 4,18$$

où CB et MAT sont exprimées en g.kg MS⁻¹, et 2250 est la teneur en EN (kcal) de 1 kg d'orge (INRA 2012).

L'ingestion de matières azotées digestibles (MAD) a été estimée à partir des teneurs en MAD de l'herbe et de l'orge d'après le système INRA (2012) :

$$\text{Teneur en MAD de l'herbe (g MAD.kg MS}^{-1}\text{)} = -74,52 + 0,9568 \times \text{MAT} + 0,1167 \times \text{CB}$$

où MAT et CB sont exprimées en g.kg MS⁻¹.

1.6. Comportement de pâturage

Le temps de pâturage journalier de chaque jument a été enregistré sur 48 h au milieu de la première semaine de chaque période en utilisant des colliers Ethosys qui enregistrent la position (haute/basse) et les mouvements de la tête (un enregistrement toutes les 5 min, Decuq *et al.* 1996). Les juments ont été habituées à porter les colliers pendant la semaine précédant le début de l'expérimentation. Nous avons également évalué le temps de pâturage des juments pendant les 12 premières heures qui suivaient l'entrée des animaux dans une nouvelle zone non pâturée du sous-parc (J1 de 9h15 à 21h15), et pendant les 12 dernières heures avant que les animaux ne quittent cette zone (J2 de 21h15 à 9h15). La vitesse d'ingestion d'herbe a été estimée en divisant l'ingestion d'herbe journalière par le temps de pâturage.

1.7. Analyses statistiques

Les données ont été analysées en utilisant la procédure PROC GLM de SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC). Les données sur la végétation et la gestion du pâturage ont été analysées dans un modèle incluant les effets période, quantité d'herbe offerte, complémentation énergétique et l'interaction entre la complémentation énergétique et la quantité d'herbe offerte. Les données sur les animaux ont été analysées dans un modèle incluant les effets période, quantité d'herbe offerte, complémentation énergétique, jument hiérarchisé dans complémentation énergétique (car chaque jument était soit complémentée, soit non-complémentée pendant toute l'expérimentation) et l'interaction entre la complémentation énergétique et la quantité d'herbe offerte. L'effet de la complémentation énergétique a été testé sur la résiduelle Jument. Les contrastes orthogonaux ont été utilisés pour tester si l'effet de la quantité d'herbe offerte était linéaire ou quadratique. Les différences entre quantité d'herbe offerte ont été analysées en utilisant la correction de Tukey pour les comparaisons multiples. Le seuil de significativité considéré est $P < 0,05$.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques de la végétation

La hauteur et la biomasse d'herbe avant pâturage (26,6 cm et 3,73 t MS.ha⁻¹) étaient similaires entre les 3 niveaux de quantité d'herbe offerte (Tableau 1). Les 3 niveaux de quantité d'herbe offerte visés ont été obtenus en augmentant linéairement la surface offerte journalièrement aux animaux. L'apport d'orge n'a pas affecté la hauteur d'herbe après pâturage qui a augmenté de 0,13 cm par kilogramme de matière sèche



d'herbe offerte d'après la relation linéaire entre la hauteur d'herbe après pâturage et la quantité d'herbe offerte ($P < 0,001$; Tableau 1). Les teneurs de l'herbe en matière sèche (249 g.kg⁻¹), matière organique (895 g.kg MS⁻¹), MAT (151 g.kg MS⁻¹), CB (252 g.kg MS⁻¹) et NDF (552 g.kg MS⁻¹) étaient similaires quels que soient le niveau de complémentation et la quantité d'herbe offerte (Tableau 1).

Tableau 1 : Surface offerte par jour et caractéristiques de l'herbe offerte au ras du sol selon le niveau de complémentation (C : complémenté ; NC : non-complémenté) et la quantité d'herbe offerte (QO ; B : bas ; M : moyen ; H : haut)

Table 1: Daily offered area and characteristics of herbage offered at ground level according to energy supplementation level (C: supplemented; NC: non-supplemented) and daily herbage allowance (QO; B: low; M: medium; H: high)

| | Juments C | | | Juments NC | | | RMSE | P-value | | |
|--|-----------|------|-------|------------|------|-------|------|---------|--------|--------|
| | B | M | H | B | M | H | | QO | Lin | Quad |
| QO (g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 35,0 | 52,5 | 70,0 | 35,0 | 52,5 | 70,0 | - | - | - | - |
| QO (kg MS.jument ⁻¹ .j ⁻¹) | 20,6 | 30,9 | 41,2 | 20,6 | 30,9 | 41,2 | - | - | - | - |
| Surface offerte (m ² .jument ⁻¹ .j ⁻¹) | 59,2 | 90,2 | 122,3 | 65,1 | 86,1 | 121,2 | 19,0 | <0,001 | <0,001 | 0,477 |
| Hauteur d'herbe (cm) | | | | | | | | | | |
| Avant-pâturage | 27,6 | 25,9 | 28,2 | 23,7 | 27,0 | 27,3 | 6,7 | 0,377 | 0,560 | 0,460 |
| Après-pâturage | 2,8 | 4,6 | 5,8 | 3,1 | 4,1 | 5,6 | 1,5 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| BH avant pâturage (t MS.ha ⁻¹) | 3,86 | 3,62 | 3,86 | 3,38 | 3,82 | 3,86 | 0,70 | 0,281 | 0,334 | 0,933 |
| Qualité de l'herbe | | | | | | | | | | |
| MS (g.kg ⁻¹) | 236 | 259 | 249 | 264 | 255 | 232 | 0,05 | 0,687 | 0,751 | 0,632 |
| MO (g.kg MS ⁻¹) | 899 | 897 | 876 | 889 | 908 | 896 | 0,04 | 0,193 | 0,415 | 0,147 |
| MAT (g.kg MS ⁻¹) | 144 | 156 | 163 | 145 | 146 | 154 | 0,03 | 0,240 | 0,165 | 0,974 |
| CB (g.kg MS ⁻¹) | 268 | 245 | 230 | 248 | 256 | 265 | 0,05 | 0,800 | 0,534 | 0,858 |
| NDF (g.kg MS ⁻¹) | 571 | 540 | 545 | 555 | 532 | 566 | 0,06 | 0,510 | 0,754 | 0,251 |

RMSE : root mean square error (= racine du carré moyen de l'erreur) ; BH : biomasse d'herbe

Lin : linéarité de l'effet QO ; Quad : quadricité de l'effet QO

MO : matière organique ; MAT : matières azotées totale ; CB : cellulose brute ; NDF : neutral detergent fiber

2.2. Ingestion journalière, et balance énergétique et protéique

L'interaction entre la complémentation énergétique et la quantité d'herbe offerte n'a affecté aucune des variables d'ingestion, ce qui signifie que les juments ont répondu de façon similaire aux variations de quantités d'herbe offerte, qu'elles soient complémentées ou non.

La production fécale attribuable à l'herbe, la digestibilité de la MS de l'herbe, l'ingestion d'herbe, l'ingestion totale, et l'ingestion de matières azotées digestibles n'ont pas différé significativement entre les juments C et NC, bien qu'il existe une tendance à ce que la production fécale attribuable à l'herbe soit supérieure pour les juments NC, et à ce que l'ingestion totale soit supérieure pour les juments C. Les juments C ont consommé tout l'orge distribué au cours de l'expérimentation, ainsi, elles ont réalisé une ingestion de MS totale digestible (C : 14,9 vs. NC : 12,5 g MSD.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; $P < 0,01$) et une ingestion d'énergie nette (C : 166,5 vs. NC : 134,6 kJ.kg PV⁻¹.j⁻¹ ; $P < 0,001$) supérieures à celle des juments NC.

La digestibilité de la MS de l'herbe a augmenté linéairement avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte et était significativement plus faible sur le niveau bas que sur le niveau haut (556 vs. 564 g.kg MS⁻¹). La production fécale attribuable à l'herbe, l'ingestion d'herbe (B : 18,4, M : 20,6, H : 23,4 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹), l'ingestion totale, l'ingestion de MS totale digestible (B : 12,3, M : 13,6, H : 15,2 g MSD.kg PV⁻¹.j⁻¹), l'ingestion d'énergie nette (B : 136,6, M : 149,3, H : 165,8 kJ.kg PV⁻¹.j⁻¹) et l'ingestion de MAD ont augmenté linéairement avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte ($P < 0,001$) avec des différences significatives entre chaque niveau (Tableau 2). Les juments ont augmenté leur ingestion d'herbe et leur ingestion totale de 0,13 kg de MS par kg de MS d'herbe offerte ($P < 0,001$).



La couverture des besoins énergétiques et protéiques a augmenté linéairement avec l'augmentation de la quantité d'herbe offerte ($P < 0,001$), mais il n'a pas été constaté de différence significative d'apports protéiques entre les niveaux bas et moyen (Tableau 2). Les juments C ont reçu des apports énergétiques ($P < 0,001$) et protéiques ($P = 0,051$) supérieurs à ceux reçus par les juments NC. Les juments C ont couvert leur besoins énergétiques quelle que soit la quantité d'herbe offerte, alors que les juments NC ne les ont pas couverts sur les niveaux bas et moyen (Tableau 2). Les besoins protéiques ont été satisfaits pour toutes les juments quels que soient le niveau de complémentation et la quantité d'herbe offerte (Tableau 2).

Tableau 2 : Ingestion journalière et couverture des besoins nutritionnels selon le niveau de complémentation (C : complétement ; NC : non-complétement) et la quantité d'herbe offerte (QO ; B : bas ; M : moyen ; H : haut)
Table 2: Daily intake and fitting of nutritional requirements according to energy supplementation level (C: supplemented; NC: non-supplemented) and daily herbage allowance (QO; B: low; M: medium; H: high)

| | Juments C | | | Juments NC | | | RMSE | P-value | | |
|---|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|------|---------|--------|-------|
| | B | M | H | B | M | H | | QO | Lin | Quad |
| Production fécale ¹ (g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 7,8 | 8,4 | 9,7 | 8,5 | 9,8 | 10,7 | 0,6 | <0,001 | <0,001 | 0,669 |
| DMSH (g.kg MS ⁻¹) | 560 | 566 | 570 | 551 | 556 | 557 | 0,5 | <0,05 | <0,01 | 0,599 |
| Ingestion d'herbe (g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 17,9 | 19,2 | 22,5 | 19,0 | 22,0 | 24,3 | 2,4 | <0,001 | <0,001 | 0,655 |
| Ingestion totale (g MS.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 22,4 | 23,7 | 27,0 | 19,5 | 22,5 | 24,8 | 2,4 | <0,001 | <0,001 | 0,634 |
| IMSTD (g MSD.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 13,7 | 14,5 | 16,5 | 10,9 | 12,6 | 14,0 | 1,4 | <0,001 | <0,001 | 0,614 |
| Ingestion EN (MJ.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 155,0 | 162,5 | 182,0 | 118,1 | 136,0 | 149,7 | 14,1 | <0,001 | <0,01 | 0,795 |
| Besoins énergétiques couverts ² (%) | 108,1 | 114,1 | 126,1 | 85,4 | 94,1 | 101,7 | 0,1 | <0,001 | <0,01 | 0,809 |
| Ingestion MAD (g MAD.kg PV ⁻¹ .j ⁻¹) | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 1,9 | 2,2 | 2,4 | 0,2 | <0,001 | <0,001 | 0,733 |
| Besoins protéiques couverts ² (%) | 124,1 | 128,6 | 146,5 | 106,8 | 120,9 | 133,7 | 0,1 | <0,001 | <0,001 | 0,577 |

RMSE : root mean square error (= racine du carré moyen de l'erreur) ; Lin : linéarité de l'effet QO ; Quad : quadricité de l'effet QO

DMSH : digestibilité de l'herbe ingérée ; IMSTD : ingestion de MS totale digestible

EN : énergie nette ; MAD : matières azotées digestibles

¹Production fécale attribuable à l'herbe

²D'après les recommandations INRA (2012)

2.3. Comportement de pâturage

Le comportement de pâturage des juments n'a été affecté ni par la complémentation énergétique ni par l'interaction entre la complémentation énergétique et la quantité d'herbe offerte. Les juments C et NC ont pâturé significativement plus longtemps sur les quantités d'herbe offerte moyenne et haute que sur la quantité basse (1021 vs. 962 min.j⁻¹ ; $P < 0,01$; Tableau 3). Le plus faible temps de pâturage journalier des juments sur la quantité d'herbe offerte basse a résulté d'une activité de pâturage significativement plus faible entre 21h15 et 9h15 (359 vs. 420 min ; $P < 0,01$), la quantité d'herbe offerte influençant surtout l'activité de pâturage du deuxième jour suivant l'entrée des animaux dans une nouvelle surface.

Toutes les juments ont réalisé une vitesse d'ingestion d'herbe plus élevée sur le niveau d'offert le plus haut par rapport aux niveaux moyen et bas (13,6 vs. 11,8 g MS.min⁻¹ ; $P < 0,01$).



Tableau 3 : Temps de pâturage et vitesse d'ingestion d'herbe selon le niveau de complémentation (C : complétement ; NC : non-complétement) et la quantité d'herbe offerte (QO ; B : bas ; M : moyen ; H : haut)

Table 3: Grazing time and herbage intake rate according to energy supplementation level (C: supplemented; NC: non-supplemented) and daily herbage allowance (QO; B: low; M: medium; H: high)

| | Juments C | | | Juments NC | | | RMSE | P-value | | |
|----------------------------------|-----------|------|------|------------|------|------|------|---------|-------|-------|
| | B | M | H | B | M | H | | QO | Lin | Quad |
| Temps de pâturage, min | | | | | | | | | | |
| Total | 958 | 1018 | 1050 | 965 | 1028 | 989 | 52,7 | <0,01 | <0,05 | <0,05 |
| 12 premières heures ¹ | 661 | 656 | 654 | 631 | 635 | 632 | 12,4 | 0,848 | 0,599 | 0,832 |
| 12 dernières heures ² | 359 | 438 | 439 | 357 | 397 | 406 | 46,5 | <0,01 | <0,01 | 0,073 |
| VIH, g MS.min ⁻¹ | 11,4 | 11,3 | 12,9 | 11,7 | 12,6 | 14,3 | 1,6 | <0,01 | <0,01 | 0,249 |

VIH : vitesse d'ingestion d'herbe ; RMSE : root mean square error (= racine du carré moyen de l'erreur)

Lin : linéarité de l'effet QO ; Quad : quadricité de l'effet QO

¹12 premières heures de 9h15 à 21h15 sur une surface offerte pour 2 jours

²12 dernières heures de 21h15 à 9h15 sur une surface offerte pour 2 jours

3. Discussion

L'objectif de cette expérimentation était d'évaluer l'effet de la disponibilité en herbe et de la complémentation énergétique sur l'ingestion d'herbe par la jument en lactation. Aucun effet de l'interaction entre la complémentation énergétique et la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion d'herbe n'a été mis en évidence lors de cette expérimentation réalisée avec une quantité d'orge représentative de ce qui est pratiqué dans les élevages.

3.1. Quantité d'herbe offerte

Les 3 niveaux de quantité d'herbe offerte (QO) testés ont résulté en des ingestions d'herbe différentes par les juments en lactation représentant de 77 à 98% de leur capacité d'ingestion. L'effet de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion d'herbe était linéaire, avec une augmentation de 0,13 kg MS d'herbe ingérée par kg MS d'herbe offerte au ras du sol. Cette valeur est proche de celle rapportée par Peyraud et Delagarde (2013) pour les vaches laitières (i.e. 0,15 kg MS ingéré par kg d'herbe offerte) au sein d'une gamme de disponibilités classiques pour des vaches laitières. Dans l'étude de Mésochina *et al.* (2000), l'ingestion d'herbe de chevaux en croissance n'a pas été affectée par la quantité d'herbe offerte dans une gamme de 130 à 200 g MS. kg PV⁻¹.j⁻¹, ce qui suggère que l'ingestion d'herbe atteint un plateau pour des hauts niveaux de disponibilités en herbe. Les niveaux de quantité d'herbe offerte testés lors de notre expérimentation n'avaient jamais été étudiés au préalable. Plus la quantité d'herbe offerte était faible, plus les juments ont pâturé ras (2,9 cm sur le niveau bas vs. 5,7 cm sur le niveau haut) et ont probablement ingéré une proportion de fibres plus importante, ce qui a diminué la digestibilité de l'herbe de 10 g.kg⁻¹ MS entre les niveaux haut et bas (soit une variation de 2%). Nos résultats sont cohérents avec ceux précédemment rapportés pour des vaches laitières pâturent 3 niveaux de quantité d'herbe offerte (Peyraud *et al.* 1996) : diminution de 2% de la digestibilité de la matière organique de l'herbe entre une QO haute et une QO basse, et une diminution de l'ingestion d'herbe (-4% entre les QO haute et moyenne vs. -15% entre les QO moyenne et basse). Dans notre étude, l'augmentation de l'ingestion d'herbe des juments entre les trois niveaux de quantité d'herbe offerte s'explique par une augmentation de leur temps de pâturage entre le niveau bas et le niveau moyen, et par une augmentation de leur vitesse d'ingestion entre le niveau moyen et le niveau haut. Sur la quantité d'herbe offerte basse, l'activité de pâturage des juments était principalement réduite durant les dernières heures de présence sur une zone de 2 jours, du fait d'une disponibilité en herbe très faible. En effet, la quantité d'herbe disponible sur le niveau bas était encore plus limitante à la fin des 2 jours que lorsque les juments venaient d'entrer dans une nouvelle zone à pâturer ce qui explique que leur temps de pâturage moyen pendant les 12 dernières heures soit réduit par rapport à celui des 12 premières heures.

3.2. Complémentation énergétique

Nous n'avons pas observé de différence d'ingestion d'herbe ou de comportement de pâturage entre les juments complémentées et les juments non-complémentées. Le taux de substitution (i.e. nombre de kg de MS d'herbe ingéré en moins par kg de MS de concentré ingéré) était donc proche de 0 (0,36 ± 0,12), ce qui pourrait être expliqué par une disponibilité en herbe globalement peu élevée dans la présente étude. Chez les vaches laitières, il a été rapporté des taux de substitution plus élevés lorsque le niveau d'offert était élevé



(Bargo *et al.* 2002 ; McEvoy *et al.* 2008). Il existe peu d'études sur la substitution fourrage/concentré chez le cheval ; cependant, une substitution est observée pour des fourrages distribués à volonté, ce qui pourrait indiquer une tendance générale (Agabriel *et al.* 1982 ; Martin-Rosset et Doreau 1984 ; INRA 2012). Dans notre expérimentation précédente (Collas *et al.* 2014), les juments pâturent une herbe abondante ont par ailleurs présenté des taux de substitution plus élevés au cours des 2^{ème} (0,7) et 3^{ème} cycles (1,6) de pâturage.

Les juments recevant de l'orge ont réalisé une ingestion totale (+19%) et une ingestion d'énergie nette (+24%) supérieures à celle des juments non-complémentées. Les juments complémentées ont satisfait leurs besoins énergétiques quelle que soit la QO, alors que les juments NC ne les ont pas couverts sur les QO basse et moyenne (85 et 94% respectivement). L'effet linéaire de la QO sur l'ingestion d'herbe a permis d'estimer à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (i.e. 39 kg MS.jument⁻¹.j⁻¹) le seuil de QO en-dessous duquel une complémentation énergétique est nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques de juments en lactation pâturent des repousses de bonne qualité dans nos conditions de pâturage. Ce seuil de quantité d'herbe offerte correspond à une hauteur d'herbe après-pâturage d'environ 5 cm. Cependant, la hauteur d'herbe après-pâturage étant généralement liée à la hauteur d'herbe avant-pâturage lors d'un pâturage tournant ou au fil, au moins chez la vache laitière (Pérez-Prieto *et al.* 2012), il semble important d'étendre cette analyse à une plus large gamme de hauteurs d'herbe avant-pâturage.

Conclusion

Lorsque les juments de selle en lactation pâturent en été des repousses de bonne qualité, une augmentation de leur quantité d'herbe offerte de 35 à 70 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ entraîne une augmentation linéaire de leur ingestion d'herbe d'environ 0,13 kg MS par kg de MS d'herbe offerte, que les juments soient ou non complémentées en orge. Dans nos conditions de disponibilité en herbe, les juments complémentées ont additionné l'herbe et l'orge ce qui leur a permis de couvrir leurs besoins énergétiques quelle que soit la quantité d'herbe offerte, alors que les juments non-complémentées n'ont pas couverts leurs besoins énergétiques sur les niveaux d'offert bas et moyen. La relation linéaire positive établie entre la quantité d'herbe offerte et l'ingestion d'herbe nous permet d'estimer à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹ (ou 39 kg MS.jument⁻¹.j⁻¹) le seuil de disponibilité en herbe en-dessous duquel les juments en lactation nécessitent une complémentation pour satisfaire leurs besoins énergétiques. De nouvelles études sur les interactions entre le niveau de concentré, la quantité d'herbe offerte et la valeur nutritive de l'herbe seront nécessaires pour affiner les recommandations alimentaires permettant de concilier les performances des chevaux au pâturage et la productivité de la prairie.

Remerciements

La thèse de doctorat de Claire Collas a été financée par l'Ifce et le département Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage de l'INRA. Nous remercions l'équipe de la station expérimentale de Chamberet pour leur aide sur le terrain, en particulier Patrice Dupuy, Joseph Bellonie, Ludivine Collon, Jacques Boulanger, Claude Larry, Cédric Dubois et Patrick Paucard. Nous remercions également Frédéric Anglard et Francis Decuq de l'UMR1213 Herbivores de l'INRA, ainsi que les étudiantes Nissirlany Cardoso Leal et Hélène Macé.

Références

- Agabriel, J., Trillaud-Geyl, C., Martin-Rosset, W., Jussiaux, M. 1982. Utilisation de l'ensilage de maïs par le poulain de boucherie. Tech. Bull. C.R.Z.V No.49. INRA, Theix, France. p. 5-13.
- Bargo, F., Muller, L.D., Delahoy, J.E., Cassidy, T.W. 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of Dairy Science*. 85, 1777-1792.
- Collas, C., Fleurance, G., Cabaret, J., Martin-Rosset, W., Wimel, L., Cortet, J., Dumont, B. 2014. How does the suppression of energy supplementation affect herbage intake, performance and parasitism in lactating saddle mares? *Animal* 8, 1290-1297.
- Decuq, F., Micol, D., Dubroeuq, H. 1996. Utilisation du système d'enregistrement automatique du comportement alimentaire "Ethosys" sur des troupeaux de bovins et de chevaux. *Rencontres Recherches Ruminants*. 3, p.74.
- Delaby, L., Peyraud, J.L., Delagarde, L. 2001. Effect of the level of concentrate supplementation, herbage allowance and milk yield at turn-out on the performance of dairy cows in mid lactation at grazing. *Animal Science*. 73, 171-181.



- Delagarde, R., Peyraud, J.L., Delaby, L. 1999. Influence of carbohydrate or protein supplementation on intake, behaviour and digestion in dairy cows strip-grazing low-nitrogen fertilized perennial ryegrass. *Annales de Zootechnie*. 48, 81-96.
- Doreau, M., Boulot, S., Chilliard, Y. 1993. Yield and composition of milk from lactating mares – effect of body condition at foaling. *Journal of Dairy Research*. 60, 457-466.
- Edouard, N., Fleurance, G., Dumont, B., Baumont, R., Duncan, P. 2009. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Applied Animal Behaviour Science*. 119, 219-228.
- Edouard, N., Duncan, P., Dumont, B., Baumont, R., Fleurance, G. 2010. Foraging in a heterogeneous environment – an experimental study of the trade-off between intake rate and diet quality. *Applied Animal Behaviour Science*. 126, 27-36.
- Goering, H.K., Van Soest, P.J. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). *Agric. Handbook*, No. 379. Agricultural Research Service, Washington, USA.
- Grace, N.D., Gee, E.K., Firth, E.C., Shaw, H.L. 2002a. Digestible energy intake, dry matter digestibility and mineral status of grazing New Zealand thoroughbred yearlings. *New-Zealand Veterinary Journal*. 50, 63-69.
- Grace, N.D., Shaw, H.L., Gee, E.K., Firth, E.C. 2002b. Determination of the digestible energy intake and apparent absorption of macroelements in pasture-fed lactating thoroughbred mares. *New-Zealand Veterinary Journal*. 50, 182-185.
- INRA. 2012. Nutrition et alimentation des chevaux : Nouvelles recommandations alimentaires. Ed. W. Martin-Rosset. Editions Quae, Versailles. pp 624.
- Martin-Rosset, W., Doreau, M. 1984. Consommation d'aliments et d'eau. In: R. Jarrige and W. Martin-Rosset, editors, *Le cheval : Reproduction, sélection, alimentation, exploitation*. INRA, Paris, France. p 333-354.
- Martin-Rosset, W., Vernet, J., Dubroeuq, H., Arnaud, G., Picard, A., Vermorel, M. 2008. Variation of fatness and energy content of the body with body condition score in sport horses and its prediction. In: *Proc. 4th European Workshop on Equine Nutrition. Nutrition of the exercising horse*. EAAP publication No. 125, Wageningen Academic publishers, Wageningen, The Netherlands. p. 167-176.
- McEvoy, M., Kennedy, E., Murphy, J.P., Boland, T.M., Delaby, L., O'Donovan, M. 2008. The effect of herbage allowance and concentrate supplementation on milk production performance and dry matter intake of spring-calving dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 91, 1258-1269.
- Mésochina, P., Martin-Rosset, W., Peyraud, J.L., Duncan, P., Micol, D., Boulot, S. 1998. Prediction of the digestibility of the diet of horses: Evaluation of faecal indices. *Grass and Forage Science*. 53, 189-196.
- Mésochina, P., Peyraud, J.L., Duncan, P., Micol, D., Trillaud-Geyl, C. 2000. Ingestion d'herbe au pâturage par le cheval de selle en croissance : Effet de l'âge des poulains et de la biomasse d'herbe. *Annales de Zootechnie*. 49, 505-515.
- Micol, D., Martin-Rosset, W. 1995. Feeding systems for horses on high forage diets in the temperate zone. In: *Proc. 4th International Symposium on the Nutrition of Herbivores. Recent developments in the nutrition of herbivores*. INRA editions, Versailles, France. p.569-580.
- Morhain, B. 2011. Systèmes fourragers et d'alimentation du cheval dans différentes régions françaises. *Fourrages*. 207, 155-163.
- Pérez-Prieto, L.A., Delagarde, R. 2013. Meta-analysis of the effect of pasture allowance on pasture intake, milk production, and grazing behavior of dairy cows grazing temperate grasslands. *Journal of Dairy Science*. 96, 6671-6689.
- Pérez-Prieto, L.A., Peyraud, J.L., Delagarde, R. 2012. Does pre-grazing herbage mass really affect herbage intake and milk production of strip-grazing dairy cows? *Grass and Forage Science*. 68, 93-109.
- Peyraud, J.L., Comeron, E.A., Wade, M.H., Lemaire, G. 1996. The effect of daily herbage allowance, herbage mass and animal factors upon herbage intake by grazing dairy cows. *Annales de Zootechnie*. 45, 201-217.
- Peyraud, J.L., Delaby, L. 2001. Ideal concentrate feeds for grazing dairy cows responses to supplementation in interaction with grazing management and grass quality. In: P. C. Garnsworthy and J. Wiseman, editors, *Recent advances in animal nutrition*. Nottingham University Press, UK. p. 203-220.



Peyraud, J.L., Delagarde, R. 2013. Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing. *Animal* 7, 57-67.

Stockdale, C.R. 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 40, 913-921.

Trillaud-Geyl, C., Brohier, J., de Baynast, L., Baudoin, N., Rossier, E., Lapierre, O. 1990. Bilan de productivité sur 10 ans d'un troupeau de juments de selle conduites en plein air intégral : croissance des produits de 0 à 6 mois. *World Review Animal Production*. 25, 65-70.



41^{ème} Journée de la Recherche Équine
Jeudi 12 mars 2015

Quelle efficacité d'un apport de sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) ou d'un excès d'azote de courte durée dans l'alimentation du cheval pour lutter contre les strongles digestifs ?

Par

C. Collas^{1,2,3}, G. Salle⁴, B. Dumont^{2,3}, J. Cabaret⁴, J. Cortet⁴, W. Martin-Rosset^{2,3}, L. Wimel¹, G. Fleurance^{1,2,3}

¹ IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Saumur, France

² INRA, UMR1213 Herbivores, Saint-Genès-Champanelle, France

³ VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, Lempdes, France

⁴ INRA et Université François Rabelais Tours, UMR1282 Infectiologie et Santé Publique, Nouzilly, France

Résumé

L'émergence de résistances aux anthelminthiques chez les nématodes nécessite de développer des solutions alternatives de lutte contre le parasitisme. Nous avons testé l'efficacité d'une cure de sainfoin, plante riche en tanins, et d'une suralimentation azotée de courte durée chez des poulains parasités. 3 lots de 10 poulains ont reçu pendant 18j un régime soit : (i) « témoin » : 100% des besoins énergétiques (UFC) et protéiques (MADC), (ii) « azote » : 100% UFC, 230% MADC, (iii) « sainfoin » : 100% UFC, 230% MADC, 3,6%MS de tanins condensés. Aucun effet des régimes n'a été mis en évidence sur le nombre d'œufs de strongles excrétés. Toutefois, les coprocultures réalisées à partir du mélange des fèces de chaque lot ont suggéré un plus faible taux de développement des œufs de strongles en larves L3 dans le lot « sainfoin » en fin d'expérimentation (8,1% vs. 30,5% : « azote » et 22,6% : « témoin ») sans que cette différence puisse être testée statistiquement. Des tests conduits *in vitro* ont confirmé les effets du sainfoin sur l'éclosion des œufs ($P < 0,05$) et leur développement en L3 ($P < 0,001$). D'autres études sont nécessaires pour confirmer l'effet du sainfoin *in vivo* et préciser ses conditions d'utilisation pour limiter l'infestation des pâtures par les strongles.

Mots clés : poulains, plante riche en tanins, azote, strongles digestifs, résistance

Summary

The spread of anthelmintic resistance in nematodes has become a major problem, so that there is an urgent need to develop alternatives for parasite control. Here, we investigated the efficacy of a short-term consumption of sainfoin, a tannin rich plant, or of extra proteins in naturally infected horses. 3 groups of 10 individuals received for 18 days either (i) a 'control' diet: 100% of UFC and MADC requirements, (ii) a 'protein-rich' diet: 100% UFC, 230% MADC, (iii) a 'sainfoin' diet: 100% UFC, 230% MADC, 3.6%DM of condensed tannins. Faecal egg counts did not reveal any difference between the three feeding regimes. However, coprocultures from the faeces pooled in each group at the end of the experiment suggested a lower rate of larval development in the 'sainfoin' group (8.1% vs. 30.5%: 'protein-rich' and 22.6%: 'control'). *In vitro* tests using sainfoin extracts confirmed the influence of the secondary metabolites on egg hatching ($P < 0.05$) and their development into L3 ($P < 0.001$). Further work is needed to confirm the results *in vivo* and to determine how to use sainfoin in the diet of horses to reduce pasture contamination with strongyle larvae.

Key-words: growing horses, tannin-rich plant, nitrogen, strongyles, resistance



Introduction

L'émergence de résistances aux anthelminthiques chez les nématodes des équins, en particulier chez les petits strongles, nécessite de développer des solutions alternatives pour un contrôle durable de ces parasites. Les parasitologues s'accordent sur le fait que seules des approches intégrées, basées sur une combinaison de principes d'action, sont appropriées. Les trois principaux principes d'action permettant d'affecter le cycle des nématodes consistent à : (i) réduire le contact entre l'hôte et les larves infestantes, (ii) stimuler la résistance de l'hôte, (iii) éliminer les vers dans l'hôte. A partir des connaissances des processus pathophysiologiques associés aux infections par les nématodes, Coop & Kyriazakis (1999) ont avancé l'hypothèse selon laquelle l'amélioration de la nutrition, en particulier protéique, pourrait accroître la capacité d'un hôte infesté à lutter contre le parasitisme. Ceci a été confirmé par certains travaux conduits chez les petits ruminants qui ont montré qu'une complémentation protéique apportée à des femelles autour de la mise bas permettait de limiter le phénomène de relaxation de l'expression immunitaire généralement observé à cette période (e.g. Houdijk *et al.* 2000). Plus récemment, le rôle anthelminthique de plantes bioactives contenant des métabolites secondaires comme les tanins a été mis en évidence chez des ovins et des caprins. En particulier, des études conduites *in vitro* mais également *in vivo* rapportent les propriétés antiparasitaires du sainfoin (*Onobrychis viciifolia*). Chez le cheval, l'impact de la nutrition sur le parasitisme gastro-intestinal est très peu connu puisqu'une seule étude récente rapporte l'effet d'extraits de plantes australiennes sur des larves de cyathostomes *in vitro* (Payne *et al.* 2013). Dans ce contexte, l'objectif de notre étude était : (i) d'évaluer *in vivo* l'efficacité d'une suralimentation azotée ou d'un apport de sainfoin de courte durée pour réduire l'excrétion d'œufs de strongles chez des poulains parasités, (ii) d'analyser *in vitro* l'effet des métabolites secondaires du sainfoin sur l'éclosion des œufs de strongles et leur développement en larves infestantes.

1. Matériel et méthodes

1.1. Expérimentation *in vivo*

L'essai *in vivo* a été conduit du 29 novembre au 16 décembre 2013 à la station expérimentale de l'IFCE (Chamberet, Corrèze). 30 poulains de selle (AA et SF, 1 à 3 ans), naturellement infestés par des strongles au pâturage, ont été rentrés en boxes le 5 novembre et répartis en 3 groupes de 10 individus destinés à recevoir pendant 18j de test soit (i) un régime « témoin » visant à couvrir 100% des besoins énergétiques (mesuré en UFC) et protéiques (mesuré en MADC), (ii) un régime « azote » : 100% des besoins UFC, 230% des besoins MADC, (iii) un régime « sainfoin » : 100% des besoins UFC, 230% des besoins MADC, dont 3,6% MS de tanins condensés (dosage avec la méthode HCl-butanol-acétone). Du 5 au 21 novembre, tous les animaux ont été nourris selon leurs besoins avec un régime de transition composé de 60% de foin, de 10% de paille de blé et de 30% de concentrés. Du 22 au 28 novembre, chaque animal a reçu une proportion croissante des aliments correspondant à son régime expérimental en remplacement du régime de transition. Le régime « témoin » comportait 45% d'orge, 25% de granulés (29% maïs, 55% paille blé, 6% huile de soja, 5% mélasse de canne et 5% carbonate de calcium) et 30% de paille de blé ; le régime « azote » comportait 52% de granulés de ray-grass italien, 18% de tourteau de lin et 30% de paille de blé ; le régime « sainfoin » comportait 70% de granulés de sainfoin et 30% de paille de blé. Les animaux recevaient leur régime en 2 distributions par jour, matin et soir. Les refus étaient pesés chaque matin. Lorsqu'un animal laissait 5 à 10% de refus sur 3j consécutifs, sa ration était réduite de 5% ainsi que celle de 2 de ses pairs dans les 2 autres lots afin de respecter les écarts d'apports entre lots. Lorsque chacun des 3 animaux constituant le trio réalisait moins de 5% de refus sur 3j consécutifs, les quantités distribuées initialement étaient restaurées. Le nombre d'œufs de strongles excrétés par gramme de fèces a été mesuré sur chaque animal le 5 novembre, pour équilibrer les lots d'animaux, puis pendant la période d'habituation aux régimes et en début et fin d'application des régimes. Les échantillons de fèces collectés durant la période d'habituation aux régimes et en fin d'expérimentation ont été mélangés au sein de chaque traitement et mis en culture pour déterminer ultérieurement les espèces présentes à partir des larves infestantes (L3).

1.2. Expérimentation *in vitro*

Suite aux résultats obtenus *in vivo*, deux expérimentations ont été conduites en avril 2014 pour tester *in vitro* les effets du sainfoin sur le développement des œufs de strongles en larves de type L3 d'une part, et sur la phase d'éclosion des œufs d'autre part. Pour l'essai de développement des œufs en L3, différentes proportions de granulés de sainfoin réhydratés ont été mélangées avec 130g de fèces issus de chevaux parasités (n'ayant pas participé au protocole *in vivo*) de sorte que le sainfoin représente 0, 6, 12 ou 29% du mélange. 6 réplicats ont été réalisés pour chaque proportion et chaque échantillon a été incubé à 25°C pendant 14j. Pour l'essai d'éclosion des œufs, ceux-ci ont été extraits des fèces des mêmes chevaux par



tamisages puis mis en suspension dans une solution d'eau distillée. Un extrait de sainfoin a été préparé à partir de granulés broyés et dilués dans une solution à 0,5% de diméthylsulfoxyde (DMSO). 4 concentrations (30, 15, 7,5 et 3,6 mg.mL⁻¹) ont été testées face à la solution contrôle 0,5% DMSO (5 réplicats). 50µL de chaque concentration ont été ajoutés à 100µL d'une solution contenant approximativement 100 œufs de strongles et mis à incuber à 20°C pendant 48h. Suite à l'incubation, le nombre de larves au 1^{er} stade (L1) a été déterminé.

2. Résultats

2.1. Expérimentation *in vivo*

Comme attendu, les 3 régimes étaient iso-énergétiques (94% des besoins UFC, $P=0,180$) et les régimes « azote » et « sainfoin » étaient iso-protéiques (227% des besoins MADC, $P=0,699$) et plus riches en azote que le régime « témoin » (93% des besoins MADC, $P<0,001$). Une diminution du nombre d'œufs de strongles excrétés de 1165 à 313 opg a été observée entre la mise en lots des animaux et la fin de l'expérimentation ($P<0,001$, Figure I). Toutefois, le nombre d'œufs excrétés n'a pas été affecté par le régime (« témoin » : 667 ± 190 , « azote » : 770 ± 227 , « sainfoin » : 635 ± 205 , $P=0,722$) ni par l'interaction entre le régime et la date de mesure ($P=0,463$). Cela signifie que la diminution de l'excrétion est identique quel que soit le régime.

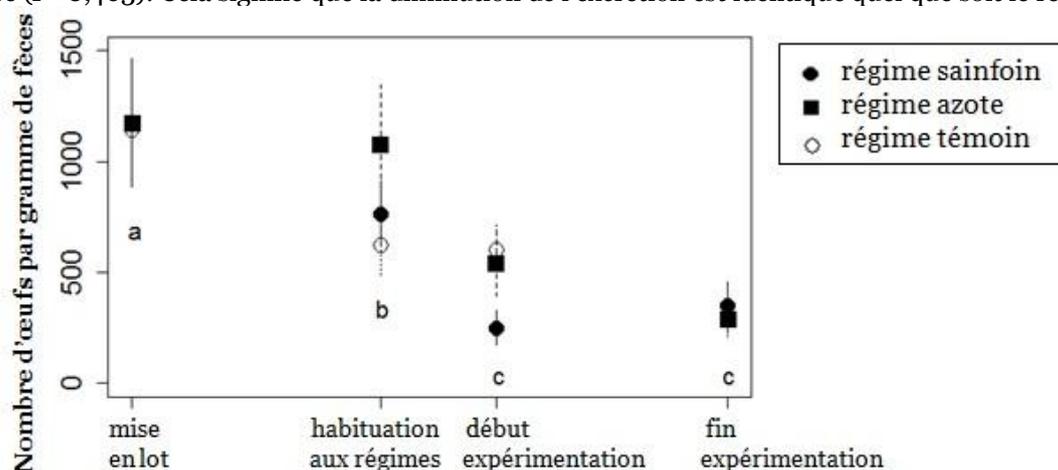


Figure I : Evolution du nombre d'œufs de strongles excrétés par les 10 chevaux de chaque régime (moy ± e.s.) (régime: $P>0,05$, date: $P<0,05$, régime × date: $P>0,05$). Les moyennes avec des lettres différentes (a, b, c) sont significativement différentes à $P<0,05$.

Figure I: Changes in the faecal egg counts of the 10 individuals per group (mean ± s.e.) (diet: $P>0,05$, sampling date: $P<0,05$, diet × sampling date: $P>0,05$). Means with different letters (a, b, c) are significantly different at $P<0,05$.

Les coprocultures réalisées à partir du mélange de fèces collectés dans chaque groupe ont mis en évidence un taux de développement des œufs en L3 inférieur pour le lot « sainfoin » à la fin de l'expérimentation (« témoin » : 22,6%, « protéines » : 30,5%, « sainfoin » : 8,1%) ce qui n'était pas observé au moment de la phase d'habitude des animaux aux régimes (« témoin » : 26,7%, « protéines » : 23,7%, « sainfoin » : 25,2%). Néanmoins, l'absence de réplicats ne nous a pas permis de tester statistiquement cette différence.

2.2. Expérimentation *in vitro*

L'ajout d'extraits de granulés de sainfoin au matériel fécal a réduit le taux de développement des œufs de strongles en L3 (-82%) lorsque le sainfoin représentait 29% du mélange (Figure II, $P<0,001$).

Nos résultats montrent également que la phase d'éclosion des œufs est significativement affectée, avec une diminution de 37% de l'éclosion pour des concentrations en extraits de sainfoin $>7,5$ mg.mL⁻¹ ($P<0,05$).

3. Discussion

Notre étude révèle que le sainfoin affecte le développement des œufs de strongles équins en larves infestantes en conditions *in vitro*. Plusieurs études conduites *in vitro* sur les nématodes spécifiques des petits ruminants ont également rapporté des effets d'extraits de sainfoin sur différentes phases du cycle des parasites (e.g.



Brunet *et al.* 2007). Les résultats obtenus *in vivo* sont généralement moins nets mais des études rapportent une diminution de la fertilité ou de la survie des nématodes chez les ovins et les caprins ayant consommé du sainfoin (e.g. Heckendorn *et al.* 2006). Chez le cheval, d'autres essais sont nécessaires pour confirmer l'effet pressenti *in vivo* et préciser les conditions d'utilisation du sainfoin qui pourraient contribuer à réduire l'infestation des pâtures. Nos résultats ne valident pas l'hypothèse d'un effet bénéfique d'un excès protéique, au moins de courte durée, sur la régulation du parasitisme gastro-intestinal chez le poulain. Cette conclusion est peut être liée au fait que le niveau d'infestation des animaux par les strongles n'était pas suffisamment important pour placer les chevaux dans une situation limitante de disponibilité en protéines. Chez les ruminants, les effets positifs d'une complémentation protéique sur la résistance de l'hôte ont été observés chez des femelles en période *pérupartum* dont les besoins sont élevés et pour lesquelles il est classiquement observé une relaxation de l'expression immunitaire à cette période (e.g. Houdijk *et al.* 2000).

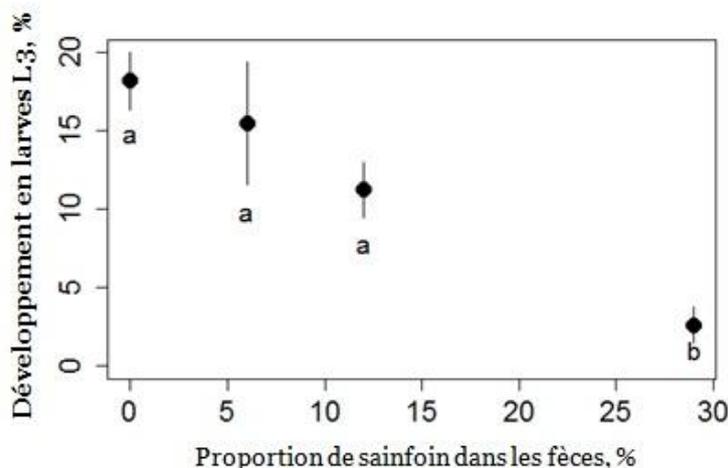


Figure II : Pourcentage d'œufs de strongles ayant produit des larves L3 *in vitro*, selon la proportion d'extraits de granulés de sainfoin mis en présence des fèces (moy±e.s.). Les moyennes avec des lettres différentes (a, b) sont significativement différentes à $P < 0,05$.

Figure II: Percentage of strongyle eggs developed in L3 larvae *in vitro*, according to the proportion of sainfoin in faeces (mean ± s.e.). Means with different letters (a, b) are significantly different at $P < 0.05$.

Remerciements

La thèse de C. Collas a été financée par l'Ifce et le département PHASE de l'INRA. Cette étude a été financée par l'IFCE et le méta-programme GISA de l'INRA. Nous remercions la société Multifolia et la firme en nutrition animale Mg2Mix de nous avoir fourni gracieusement les granulés de sainfoin. Nous sommes reconnaissants envers P. Dupuy, C. Dubois, J. Boulanger, C. Larry, J. Bellonie et P. Paucard de l'Ifce ; A. Le Morvan et A. Quereuil de l'INRA UMR1213 ; et la stagiaire H. Macé pour leur aide technique.

Références

- Brunet, S., Aufrère, J., El Babili, F., Fouraste, I., Hoste, H. 2007. The kinetics of exsheathment of infective larvae is disturbed in the presence of a tannin-rich plant extract (sainfoin) both *in vitro* and *in vivo*. *Parasitology* 134, 1253-1262.
- Coop, R.L., Kyriazakis, I., 1999. Nutrition-parasite interaction. *Veterinary Parasitology* 84, 187-204.
- Heckendorn, F., Häring, D.A., Maurer, V., Zinsstag, J., Langhans, W. 2006. Effect of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage and hay on established populations of *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei* in lambs. *Veterinary Parasitology* 142, 293-300.
- Houdijk, J.G., Kyriazakis, I., Jackson, F., Huntley, J.F., Coop, R.L., 2000. Can an increased metabolizable protein intake affect the periparturient relaxation of immunity against *Teladorsagia circumcincta* in sheep? *Veterinary Parasitology* 91, 43-62.
- Payne, S.E., Kotze, A.C., Durmic, Z., Vercoe, P.E., 2013. Australian plants show anthelmintic activity toward equine cyathostomins *in vitro*. *Veterinary Parasitology* 196, 153-160.

Alimentation à l'herbe de la jument de selle en lactation : quels effets d'une complémentation énergétique sur l'ingestion, les performances zootechniques et l'état parasitaire ?

Par :

- C. Collas^{1,2}, G. Fleurance^{1,2}, W. Martin-Rosset¹, J. Cabaret³, L. Wimmel², et B. Dumont¹
- ¹INRA UMR1213 Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champagnelle, France
²IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Terrefort, BP207, 49411 Saumur, France
³INRA et Université François Rabelais Tours UMR1282 Infectiologie et Santé Publique, 37380 Nouzilly, France

Résumé

Les élevages équins sont confrontés à de lourdes charges d'alimentation et envisagent des conduites basées sur une meilleure valorisation de l'herbe pâturée. Peu d'études ont permis d'évaluer les niveaux d'ingestion de chevaux à forts besoins au pâturage ainsi que l'intérêt de les compléter. Seize juments de selle suitées, dont 8 ont reçu quotidiennement de l'orge couvrant 60% des besoins énergétiques de lactation, ont été conduites en pâturage tournant sur des prairies permanentes pendant 4 mois. L'apport énergétique n'a pas influencé l'évolution du poids des juments, leur note d'état corporel, la croissance des poulains et le niveau d'excrétion parasitaire des juments qui avaient été infestées expérimentalement. L'ingestion d'herbe des juments complémentees est restée stable au cours du temps (22,6gMS/kgPV.j⁻¹) alors que les juments non complémentees ont accru leur ingestion d'herbe de 22,5 à 27,9gMS/kgPV.j⁻¹ entre juin et septembre. Ceci a permis d'assurer une bonne croissance des poulains tout en préservant les réserves corporelles des juments. En absence de complémentation dans nos conditions de pâturage, les juments de selle en lactation ont été capables de moduler leur ingestion pour maintenir leurs performances zootechniques malgré des besoins élevés.

Mots clés : pâturage, orge, réserves corporelles, croissance du poulain, parasitisme gastro-intestinal

Summary

While horse farming systems have to cope with high feeding costs, a major challenge is reducing the inputs required for production, e.g. by feeding horses on grazed forages. Few studies have so far investigated daily intake of lactating saddle mares at pasture, and the need to providing them supplements. Sixteen lactating saddle mares, eight receiving a daily supplement of barley (60% of energy requirements for lactation) and the remaining eight animals no concentrate feeds, were rotationally-grazed on permanent pastures during four months. Results did not exhibit any effect of energetic supplementation on the evolution of mare liveweight and body condition, foal growth, and the level of parasitic excretion after mares were experimentally infested with nematode larvae. Grass daily intake of supplemented mares was stable around 22.6gDM/kgLW.d. Non-supplemented mares increased grass daily intake from 22.5 to 27.9gDM/kgLW.d between June and September, which allowed them ensuring a good foal growth while maintaining their body reserves.

Key-words: grazing, barley supplementation, body reserves, foal growth, gastrointestinal parasitism

Introduction

L'important développement de la filière équine, notamment en raison du succès des activités de loisirs, conduit à un accroissement du nombre d'équins en France (effectifs estimés à 1 million fin 2010 soit une hausse de 25 000/an depuis 2008). Toutefois, les revenus dégagés par les élevages équins restent modestes, en moyenne inférieurs à 15 000 euros d'excédent brut d'exploitation/unité de main d'œuvre (Morhain 2011). Selon les systèmes, l'alimentation représente 20 à 50% des charges opérationnelles. Ces charges pourraient être réduites par une meilleure valorisation de l'herbe pâturée qui est une ressource peu onéreuse (Martin-Rosset et Morhain 2012). Cependant, les références techniques permettant de nourrir les chevaux à l'herbe sont peu nombreuses malgré les travaux récents qui ont établi les lois de réponse de l'ingestion et des préférences alimentaires chez le cheval en croissance selon la hauteur et la qualité du couvert végétal (Edouard *et al.* 2009, 2010). En particulier, il reste à déterminer la capacité de différents types de chevaux à couvrir leurs besoins nutritionnels au pâturage et, selon les types d'animaux, à préciser la période, la nature et le niveau de complémentation.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'intérêt d'une complémentation énergétique (classiquement utilisée en élevage) chez la jument de selle en lactation au pâturage dont les besoins sont élevés. Des mesures ont été réalisées sur leur niveau d'ingestion, leur poids et leur note d'état corporel, ainsi que sur la croissance de leurs poulains. Notre étude cherche également à évaluer les conséquences d'une complémentation énergétique sur l'infestation parasitaire des juments. L'utilisation actuelle massive et répétée des anthelminthiques engendre des phénomènes de résistance des nématodes à ces molécules ainsi que des rejets toxiques dans l'environnement. La complémentation des animaux pourrait limiter leur infestation du fait d'une moindre ingestion d'herbe et augmenter leur résistance, comme cela a été observé chez les petits ruminants (e.g. Kahn *et al.* 2003 ; Houdijk *et al.* 2006).

1. Matériel et méthodes

L'expérimentation a été réalisée à la station expérimentale de l'IFCE de Chamberet (Corrèze) du 06/06 au 02/10/12. Le dispositif comprenait 16 juments de selle suitées (Selle Français et Anglo-Arabe), conduites à l'identique au cours de l'hiver précédent et réparties en 2 traitements : n=8 juments non-complémentées (NC) et n=8 juments complémentées avec de l'orge (C). Les 2 lots ont été équilibrés sur la base de la capacité d'ingestion des juments (établie en mars 2012 à partir d'un essai d'ingestion volontaire de fourrage distribué *ad libitum*), de leur date de poulinage (19/04 au 27/05/12), de leur niveau de sensibilité au parasitisme (évalué à partir de résultats antérieurs d'excrétion d'œufs de nématodes), de leur note d'état à la mise bas (méthode Inra-HN-IE 1997) et de leur poids vif vide. Les 16 juments ont été infestées expérimentalement le 01/06/12 avec 5000 larves infestantes de cyathostomes/animal. Les juments des 2 lots ont été conduites ensemble en pâturage tournant sur des prairies permanentes au cours de 3 cycles: 06/06 au 05/07 (3,15 UGB/ha), 06/07 au 19/08 (1,51 UGB/ha) et 20/08 au 02/10 (1,51 UGB/ha) (grille UGB Inra: Martin-Rosset et Morhain 2012). Les quantités journalières d'orge aplatie distribuées aux juments C au box ont été ajustées individuellement en fonction du stade de lactation et du poids vif des juments pour couvrir 60% des besoins énergétiques de lactation (i.e. 2,6kgMS pour une jument de 550kg pendant les 2 premiers mois de lactation) (Inra 2012). Les 8 juments NC ont reçu quotidiennement 0,26kgMS d'orge afin de distribuer aux 16 juments 100g de billes plastiques colorées dans leur ration nécessaires à l'identification de leurs fèces lors de leur récolte au pâturage.

Le couvert végétal a été caractérisé par sa hauteur à chaque entrée et sortie de parcelle, sa biomasse et sa qualité deux fois par cycle. Les poulains ont été pesés une fois par semaine en juin/juillet, lorsque leur alimentation était principalement lactée, puis tous les 15j. Les juments ont été pesées tous les 15j en début d'exploitation de parcelle et leurs notes d'état ont été évaluées tous les mois. Les quantités d'herbe ingérées par les juments ont été mesurées à chaque cycle pendant 4j consécutifs par la récolte totale des fèces et l'estimation de la digestibilité de l'herbe à partir de la teneur en matières azotées totales (MAT) des fèces (Mésoschina *et al.* 1998). La production fécale provenant de l'herbe ingérée a été calculée en soustrayant de la production totale la matière sèche indigestible de l'orge. La quantité de MAT fécales attribuable à l'herbe a été calculée en soustrayant de la quantité de MAT fécales totales la quantité de MAT fécales attribuable à l'orge. Une fois par cycle, l'activité alimentaire des juments et des poulains a été observée toutes les 10min au cours des 22h de présence dans les parcelles afin d'estimer les temps de pâturage. La charge parasitaire des juments et des poulains a été évaluée par des coproscopies tous les 15j. Les données ont été analysées avec la procédure mixte de SAS pour mesures répétées testant l'effet du lot, du cycle de pâturage (ou de la date) et de l'interaction. Pour les pesées, le poids initial a été pris en covariable. L'individu a été considéré comme variable aléatoire.

2. Résultats et Discussion

2.1. Effet de la complémentation sur l'ingestion d'herbe

Contrairement aux juments C pour lesquelles les quantités d'herbe ingérées sont restées stables, les juments NC ont augmenté leur ingestion d'herbe de 24% au cours de la saison (Tableau 1). Au 3^{ème} cycle, l'ingestion des juments NC tend à dépasser l'ingestion totale (herbe+orge) des juments C de 12%. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus à l'auge par Doreau *et al.* (1992) qui comparent les niveaux d'ingestion de juments recevant une ration riche en fourrage (95% de foin et 5% de concentrés) à ceux de juments recevant une ration riche en concentrés (50% de foin et 50% de concentrés).

Tableau 1 : Influence de la complémentation énergétique au pâturage sur l'ingestion des juments de selle en lactation (NC : lot non complétementé ; C : lot complétementé) (moyenne \pm e.s.)

Table 1: Influence of energetic supplementation at pasture on voluntary intake by lactating saddle mares (NC : non-supplemented group ; C : supplemented group) (mean \pm s.e.)

| | Ingestion d'herbe (gMS/kgPV/j) | | p | Ingestion totale (gMS/kgPV/j) | | p |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------|-------|----------------------------------|------------------------------|-------|
| | Lot NC | Lot C | | Lot NC | Lot C | |
| Cycle 1 | 22,5 \pm 0,8 ^a | 23,5 \pm 0,9 ^a | 0,565 | 22,9 \pm 0,8 ^a | 27,5 \pm 0,9 ^b | 0,013 |
| Cycle 2 | 25,4 \pm 0,5 ^b | 22,7 \pm 0,7 ^a | 0,113 | 25,8 \pm 0,5 ^b | 26,8 \pm 0,7 ^{ab} | 0,582 |
| Cycle 3 | 27,9 \pm 0,8 ^c | 21,7 \pm 0,7 ^a | 0,001 | 28,3 \pm 0,8 ^c | 25,2 \pm 0,7 ^a | 0,065 |

Les valeurs de p correspondent aux comparaisons entre les 2 lots à chaque cycle. Les lettres correspondent aux comparaisons entre cycles intra-lot.

Au sein de chaque cycle, les juments des deux lots ont pâture pendant la même durée, en moyenne 15 heures sur les 22 heures de présence au pâturage. La plus forte ingestion d'herbe chez les juments NC au 3^{ème} cycle pourrait donc s'expliquer par une vitesse d'ingestion instantanée (masse de bouchée \times nombre de bouchée) supérieure. La durée journalière consacrée au pâturage chez les poulains, également identique pour les deux lots, a augmenté avec leur âge (en moyenne 6,1 \pm 0,4 h/j au cycle 1, 8,7 \pm 0,3 h/j au cycle 2 et 11,4 \pm 0,6 h/j au cycle 3) ($p < 0,0001$ entre chaque cycle).

2.2. Effet de la complémentation sur les performances zootechniques des animaux et l'infestation parasitaire des juments

Sur l'ensemble de l'expérimentation, les poulains des juments NC ont réalisé une croissance identique à celle des poulains des juments C et conforme à celle attendue pour des animaux de race de sport et de loisir conduits à l'herbe (Trillaud-Geyl *et al.* 1990) (1175g \pm 45g/j au cycle 1, 1020 \pm 10g/j au cycle 2 et 520 \pm 30g/j au cycle 3). Les juments des deux lots ont couvert leurs besoins énergétiques à chaque cycle, ce qui est cohérent avec leurs évolutions de poids et d'état corporel. Les notes d'état des juments sont en effet restées supérieures à 3 et identiques entre lots tout au long de l'expérimentation. Les juments ont maintenu leur poids vif stable et identique entre lots du début de l'expérimentation jusqu'au début du 3^{ème} cycle fin août (en moyenne 600,4 \pm 3,9kg). En fin d'expérimentation (entre le 03/09 et le 02/10), les 16 juments ont perdu du poids, de façon légèrement plus prononcée chez les juments C (-37,5 \pm 5,3kg) que chez les juments NC (-30,5 \pm 3,7kg) (lot*date : $p = 0,045$). Cette perte de poids des juments pourrait être en partie liée à une diminution de leur ingestion volontaire face à la diminution de l'accessibilité du couvert. Cependant, l'absence de mesures d'ingestion à cette période ne permet pas de vérifier cette hypothèse. En conditions de pâturage limitantes, les juments pourraient donc avoir privilégié la croissance de leur poulain au détriment de leur poids. Cette interprétation doit toutefois être nuancée par le fait que les poulains ont augmenté leur temps de pâturage, et donc leur ingestion d'herbe, au cours de la saison. La complémentation de vaches allaitantes Salers en conditions de pâturage limitantes avait également favorisé le maintien de la production laitière des animaux au détriment de leur condition corporelle (D'Hour *et al.* 1995). Farruggia *et al.* (2008) ont en revanche montré que des vaches Charolaises à plus faible potentiel laitier utilisaient l'apport supplémentaire de nutriments pour moins mobiliser leurs réserves. Ceci révèle des interactions entre les orientations métaboliques des animaux et les disponibilités alimentaires qu'il conviendrait de tester en pâturage équin. La forte charge parasitaire des juments en fin d'expérimentation pourrait également contribuer à expliquer leur perte de poids. L'apport d'orge aux juments C ne leur a pas permis de réduire leur infestation parasitaire comparativement aux juments NC (juin, lot C: 10 \pm 22 oeufs par g de fèces et lot NC: 433 \pm 375opg ; octobre, lot C: 2390 \pm 645opg et lot NC: 1538 \pm 758opg ; lot*date: $p = 0,07$). Nous avons calculé *a posteriori* que c'était principalement l'azote qui était limitant au 1^{er} cycle (en moyenne 81% des besoins azotés couverts pour le lot NC) puisque la qualité de l'herbe était moyenne (MAT=11%, NDF=45%) comparativement à ce qui est classiquement observé (Tables Inra 2012). Chez les petits ruminants, les

effets bénéfiques de la complémentation sur la résilience voire la résistance au parasitisme ont surtout été observés dans le cas d'une complémentation azotée lorsque l'azote était limitant dans le milieu (Kahn 2003 ; Houdijk *et al.* 2006). Ceci nous conduit à envisager de tester les éventuels bénéfices d'une complémentation azotée.

Conclusion et Perspectives

Dans nos conditions de pâturage, l'absence de complémentation n'a pas pénalisé la croissance des poulains et le maintien des réserves corporelles des juments par rapport à une complémentation énergétique effectuée à hauteur de 60% des besoins de lactation. La forte capacité d'ingestion de fourrages verts des juments explique ce résultat qui est cohérent avec les mesures effectuées à l'auge à l'Inra avec des fourrages conservés. L'absence de complémentation représenterait un double bénéfice économique et environnemental pour les élevages équin. Afin de tester les limites de préconisation d'une alimentation à base d'herbe, il est impératif de réaliser d'autres mesures dans des conditions de pâturage plus limitantes. Ainsi, en 2013, l'effet d'une complémentation énergétique sera analysé dans un carré latin, croisé avec trois niveaux de quantité d'herbe offerte. Au cours de la saison de pâturage, les animaux doivent s'adapter à une diminution de la qualité du couvert et au développement du parasitisme interne. Une seconde étude analysera les bénéfices d'un apport de sainfoin, légumineuse contenant des tannins condensés dont les effets anthelminthiques ont été mis en évidence chez les petits ruminants.

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation et l'Institut Carnot en Santé Animale. Les auteurs remercient l'équipe de la Station Expérimentale de l'IFCE et les stagiaires C. Ceglowski et M. Duclouet pour leur participation aux mesures. Les auteurs remercient également J. Agabriel et N. Rossignol pour leur expertise sur l'analyse des données.

Références

- D'Hour, P., Petit, M., Pradel, P., Garel, J.P. 1995. Evolution du poids et de la production laitière au pâturage de vaches allaitantes Salers et Limousines dans deux milieux. *3R* 2, 105-108.
- Doreau, M., Boulot, S., Bauchart, D., Barlet, J.P., Martin-Rosset, W. 1992. Voluntary Intake, Milk Production and Plasma Metabolites in Nursing Mares Fed Two Different Diets. *The Journal of Nutrition* 122(4), 992-999.
- Edouard, N., Fleurance, G., Dumont, B., Baumont, R., Duncan, P. 2009. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Applied Animal Behaviour Science* 119, 219-228.
- Edouard, N., Duncan, P., Dumont, B., Baumont, R., Fleurance, G. 2010. Foraging in a heterogeneous environment—An experimental study of a trade-off between intake rate and quality. *Applied Animal Behaviour Science* 126, 27-36.
- Farruggia, A., Dumont, B., D'Hour, P., Egal, D. 2008. How does protein supplementation affect the selectivity and performance of Charolais cows on extensively grazed pastures in late autumn? *Grass and Forage Science* 63, 314-322.
- Houdijk, J.G.M., Jackson, F., Coop, R.L., Kyriazakis, I. 2006. Rapid improvement of immunity to *Teladorsagia circumcincta* is achieved through a reduction in the demand for protein in lactating ewes. *International Journal of Parasitology* 36, 219-227.
- Inra. 2012. Nutrition et alimentation des chevaux. Ed. W. Martin-Rosset. Quae Editions, Versailles. pp620.
- Kahn, L.P. 2003. Regulation of the resistance and resilience of periparturient ewes to infection with gastrointestinal nematode parasites by dietary supplementation. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 43(12), 1477-1485.
- Martin-Rosset, W., Morhain, B. 2012. Les systèmes d'élevage, d'alimentation et fourragers. Chapitre 10: Pâturage. *In: Nutrition et alimentation des chevaux*. Ed. W. Martin-Rosset. Quae Editions, Versailles. p383-392.
- Mésochina, P., Martin-Rosset, W., Peyraud, J.L., Duncan, P., Micol, D., Boulot, S. 1998. Prediction of the digestibility of the diet of horses: evaluation of faecal indices. *Grass and Forage Science* 53, 189-196.
- Morhain, B. 2011. Systèmes fourragers et d'alimentation du cheval dans différentes régions françaises. *Fourrages* 207, 155-163.
- Trillaud-Geyl, C., Brohier, J., Baynast, L. de., Baudoin, N., Rossier, E., Lapierre, O. 1990. Bilan de productivité sur 10 ans d'un troupeau de juments de selle conduites en plein air intégral. Croissance des produits de 0 à 6 mois. *World Review of Animal Production* 25(3), 65-70.

Est-il utile de compléter en énergie une jument de selle en lactation au pâturage ?

Auteur : **Claire Collas**^{1,2}, **Géraldine Fleurance**^{1,2}, **Jacques Cabaret**³, **William Martin - Rosset**², **Laurence Wimel**¹, **Jacques Cortet**³, **Bertrand Dumont**²

1 : IFCE, Direction des Connaissances et de l'Innovation, Terrefort, BP207, 49411 Saumur, France

2 : INRA, UMR1213 Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

3 : INRA et Université François Rabelais Tours, UMR1282 Infectiologie et Santé Publique, 37380 Nouzilly, France

L'alimentation constitue l'un des trois principaux postes de dépense des élevages équins (i.e. 20 à 50% des charges opérationnelles). L'herbe pâturée, aliment le moins coûteux au kg de matière sèche (MS) distribué à l'animal, représente seulement 30% de l'alimentation des chevaux athlètes (course et sport de haut niveau), pour lesquels les objectifs de production sont atteints par une forte complémentation en concentrés toute l'année. La part de l'herbe dans l'alimentation des chevaux de sport et de loisir est supérieure, mais les animaux à forts besoins (juments en lactation et chevaux en croissance) reçoivent couramment des concentrés au pâturage, y compris lorsque la quantité et la qualité de l'herbe ne sont pas limitantes (Miraglia et al. 2006). Dans ce contexte, l'objectif de notre étude conduite sur la jument de selle en lactation était de tester si la complémentation énergétique pouvait être omise en conditions de pâturage favorables sans affecter les performances animales. Simultanément, nous avons testé l'hypothèse selon laquelle les juments complémenteées pourraient réduire plus efficacement leur niveau d'infestation par les strongles gastro-intestinaux via un renforcement de leur immunité.



© ifce

Déroulement de l'étude

L'expérimentation a été réalisée à la Station Expérimentale de l'IFCE à Chamberet (Corrèze, alt. 440m) du 06/06/12 au 02/10/12. Le dispositif comprenait 16 juments de selle suitées de races Selle Français et Anglo-Arabe, conduites à l'identique au cours de l'hiver précédent dans l'objectif

Est-il utile de compléter en énergie une jument de selle en lactation au pâturage ? ■

d'atteindre une note d'état corporel de 3 (méthode Inra-HN-IE 1997) à la mise bas. Les juments ont été réparties de manière équilibrée entre les traitements « non complémentées (NC) » (n=8 juments) et « complémentées en orge (C) » (n=8 juments) selon : leur capacité d'ingestion, leur date de poulinage (19/04 au 27/05/12), leur niveau de sensibilité au parasitisme, leur note d'état à la mise bas et leur poids vif vide. Afin d'évaluer l'impact d'une complémentation énergétique au pâturage sur le renforcement de l'immunité des juments vis à vis des strongles gastro-intestinaux, les 16 juments ont été infestées expérimentalement avec 5000 larves infestantes de cyathostomes le 01/06/12. Les juments suitées des 2 lots ont été conduites ensemble en pâturage tournant sur des prairies permanentes fertiles au cours de 3 cycles (tableau 1). Les quantités journalières d'orge distribuées aux juments C ont été ajustées individuellement en fonction du stade de lactation et du poids vif des juments pour couvrir 60% des besoins énergétiques de lactation durant toute l'expérimentation (en moyenne 2.5kgMS/al/j) (Inra 2012).



© ifce

| | 1er cycle (06/06-05/07/12) | 2ème cycle (06/07-19/08/12) | 3ème cycle (20/08-02/10/12) |
|---|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| UGB/ha | 3.1 | 1.5 | 1.5 |
| Hauteur ¹ (cm) | | | |
| • Entrée | 52±8 ^a | 27±5 ^b | 12±1 ^c |
| • sortie | 13±2 ^a | 8±1 ^b | 5±1 ^c |
| Quantité d'herbe offerte ² (kgMS/al/j) | 50±2 ^a | 78±4 ^b | 75±7 ^b |
| Qualité de l'herbe ² | | | |
| • MAT (%MS) | 12.5±0.5 ^a | 11.2±0.6 ^{a,b} | 10.1±0.6 ^b |
| • NDF (%MS) | 45.3±2.4 ^a | 43.8±1.4 ^a | 47.0±3.5 ^a |

Tableau1/ Conduite du pâturage et caractéristiques de la végétation aux 3 cycles

¹ Hauteur d'herbe mesurée au stick (prise de mesure dès qu'un contact est établi entre le curseur de l'outil et le couvert végétal).

² La quantité et la qualité de l'herbe offerte ont été non limitantes aux 3 cycles de végétation.

^{a,b,c} Les lettres différentes indiquent une différence significative au sein d'une ligne au seuil $p < 0.05$

MAT : Matières azotées totales, NDF : Neutral Detergent Fiber

Les poulains ont été pesés une fois par semaine en juin/juillet lorsque leur alimentation était principalement lactée, puis tous les 15j. Leur hauteur au garrot et largeur de canon ont été mesurés à l'âge de 11 mois. Les juments ont été pesées tous les 15j en début d'exploitation de parcelle et leurs notes d'état ont été évaluées tous les mois. Les quantités d'herbe ingérées par les juments ont été mesurées à chaque cycle pendant 4j consécutifs par la récolte totale des fèces et l'estimation de la digestibilité



© C. Collas, INRA - ifce

Pesée d'une jument dans la bascule

Est-il utile de compléter en énergie un jument de selle en lactation au pâturage ? ■

de l'herbe à partir de la teneur en matières azotées totales (MAT) des fèces. Afin d'individualiser les fèces des 16 juments au pâturage, des billes plastiques colorées (100g/al/j) ont été mélangées à la ration d'orge des juments C et dans une petite quantité d'orge (0.26kgMS/al/j) pour les juments NC. La production fécale provenant de l'herbe ingérée a été calculée en soustrayant de la production totale la matière sèche indigestible de l'orge. La quantité de MAT fécales attribuable à l'herbe a été calculée en soustrayant de la quantité de MAT fécales totales la quantité de MAT fécales attribuable à l'orge. La charge parasitaire des juments a été évaluée par des coproscopies tous les 15j.



crottin marqué en fonction de la couleur des billes plastiques pour faciliter sa récupération

Mesure des hauteurs d'herbe à l'herbomètre stick

© C. Collas, INRA - ifce

Résultats

Contrairement aux juments C pour lesquelles les quantités d'herbe ingérées sont restées stables (en moyenne 2.3%PV soit 13.5kgMS/al/j), les juments NC ont augmenté leur ingestion d'herbe de 24% au cours de la saison (13.5 à 17.2kgMS/al/j ; Tableau 2). Au 3ème cycle, l'ingestion d'herbe des juments NC a dépassé celle des juments C de 27%. En conséquence, l'ingestion totale exprimée en MS digestible a été équivalente entre lots aux cycles 2 et 3.

| | Ingestion herbe (MS) (%PV/j) | | | Ingestion totale (MS digestible) (%PV/j) | | |
|---------|---------------------------------|----------------------|----|--|-----------------------|----|
| | Juments NC | Juments C | P | Juments NC | Juments C | P |
| Cycle 1 | 2.3±0.1 ^a | 2.4±0.2 ^a | ns | 1.3±0.1 ^a | 1.7±0.1 ^{ab} | * |
| Cycle 2 | 2.5±0.1 ^b | 2.3±0.1 ^a | ns | 1.5±0.04 ^b | 1.7±0.1 ^a | ns |
| Cycle 3 | 2.8±0.1 ^b | 2.2±0.1 ^a | ** | 1.6±0.1 ^b | 1.5±0.04 ^b | ns |

Tableau2/ Ingestion d'herbe (MS) et ingestion totale (en MS digestible) des juments non complémentées (NC) et complémentées (C)

^{a,b,c} Les lettres différentes indiquent une différence significative au sein d'une colonne au seuil $p < 0.05$

Est-il utile de compléter en énergie une jument de selle en lactation au pâturage ? ■

A chaque cycle, les différences entre lots sont notées : ns : non significatif, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. Les poulains ont présenté une croissance identique quelle que soit la conduite de leur mère, et leurs gains moyens quotidiens ($1293 \pm 114 \text{g/j}$ au cycle 1, $1029 \pm 58 \text{g/j}$ au cycle 2 et $559 \pm 148 \text{g/j}$ au cycle 3) étaient conformes aux recommandations pour ce type de chevaux (Trillaud-Geyl et al. 1990, Miraglia et al. 2006). Les valeurs de hauteur au garrot (HG) et de largeur de canon (LC) atteintes à l'âge de 11 mois étaient tout à fait satisfaisantes (Donabédian et al. 2006) et identiques entre traitements (en moyenne pour les 2 lots : $\text{HG} = 137.3 \pm 0.9 \text{cm}$, $\text{LC} = 3.6 \pm 0.1 \text{cm}$). Les 16 juments ont couvert leurs besoins énergétiques à chaque cycle, ce qui est cohérent avec leurs notes d'état corporel élevées (> 3) et le maintien de leur poids vif identique entre lots (en moyenne $600 \pm 4 \text{kg}$). L'excrétion d'œufs de nématodes par les juments a augmenté de manière similaire dans les 2 lots (de 150 à 2011 œufs par gramme de fèces en moyenne) au cours de l'expérimentation.

A retenir

En conditions de pâturage non limitantes, les juments de selle en lactation non complémentées ont montré leur capacité à accroître leur ingestion d'herbe pour satisfaire leurs besoins comparativement à des juments complémentées en orge. La complémentation énergétique s'est avérée inutile puisque les juments non complémentées ont maintenu leurs performances et ont produit des poulains caractérisés par une bonne croissance et une bonne conformation. Par ailleurs, les juments complémentées n'ont pas mieux régulé leur charge parasitaire. La complémentation énergétique ne doit donc pas être systématique et des recherches sont en cours pour déterminer le seuil de disponibilité en herbe en dessous duquel elle se justifie.

Remerciements

Nous remercions l'IFCE, le département PHASE de l'INRA et l'Institut Carnot en Santé Animale pour leur soutien financier. Nous sommes reconnaissants envers l'équipe de la Station Expérimentale de l'IFCE, en particulier Patrice Dupuy, Joseph Bellonie, Jean-Louis Larry, Cédric Dubois ; envers les étudiantes Charlotte Ceglowski et Marina Duclouet pour leur aide aux mesures ; et envers Rémy Delagarde, Jacques Agabriel et Nicolas Rossignol pour leurs conseils méthodologiques et statistiques.

Références

Donabédian et al. 2006. *Animal Research* 55, 471-486.
INRA 2012. *Nutrition et alimentation des chevaux* (ed. W Martin-Rosset), Editions Quae, Versailles, France.

Miraglia et al. 2006. *EAAP publications No 120*, pp. 279-298. Wageningen Academic publishers, Wageningen, The Netherlands.

Trillaud-Geyl et al. 1990. *World Review of Animal Production* 25, 65-70.

Résumé / Abstract

Résumé

Un des enjeux relatifs à la durabilité des élevages équin est d'accroître la part de l'herbe dans l'alimentation sans compromettre les performances animales. Les chevaux à forts besoins, comme la jument en lactation, sont en effet couramment complémentés au pâturage alors même que l'impact de la complémentation sur leur ingestion et leurs performances n'est pas connu. Un second enjeu est d'identifier des solutions alternatives aux anthelminthiques pour gérer leurs parasites gastro-intestinaux en évitant le développement de résistances et le rejet de molécules toxiques dans l'environnement. Notre première expérimentation a montré qu'en conditions de pâturage non limitantes, la complémentation énergétique n'était pas indispensable. Les juments en lactation non complémentées ont accru leurs quantités ingérées journalières jusqu'à 28 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, un niveau d'ingestion permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques. La croissance des poulains et leur conformation n'ont donc pas été affectées par l'absence de complémentation énergétique, celle-ci n'ayant par ailleurs pas permis aux juments de mieux réguler leur charge parasitaire. La deuxième expérimentation, a permis de préciser le seuil en deçà duquel la complémentation énergétique devient nécessaire pour couvrir les besoins de la jument en lactation. Pour un pâturage au fil de repousses végétatives celui-ci a été estimé à 66 g MS.kg PV⁻¹.j⁻¹, ce qui correspond à une hauteur de sortie de parcelle à 5,4 cm au stick, soit 4,5 cm à l'herbomètre à plateau. Enfin, la troisième expérimentation en box a permis de mettre en évidence l'efficacité d'une distribution de courte durée de sainfoin, une légumineuse riche en tanins condensés, pour réduire le développement des œufs de nématodes en larves infestantes ; une complémentation azotée « simple » s'est en revanche révélée inefficace. L'ensemble de ces résultats ouvre des perspectives pour optimiser la conduite alimentaire de la jument en lactation au pâturage.

Mots-clés : cheval, herbe, ingestion, performances, nématodes gastro-intestinaux, conduite au pâturage

Abstract

Sustainable horse breeding requires increasing the proportion of herbage in horse diet without affecting animal performance. Horses with high requirements such as lactating mares are commonly supplemented at pasture, while the consequences of energy supplementation on intake and performance remain unknown. Another priority is to identify alternatives to chemical anthelmintic for gastro-intestinal parasite management in order to limit the spread of antibiotic resistance and the dumping of pharmaceutical residues into the environment. A first experiment showed that supplementing lactating mares at pasture should not be systematic because, under non-limiting conditions, their adaptive capacities enabled them to increase herbage intake up to 28 g DM.kg LW⁻¹.d⁻¹ and ensure foal growth. In addition, energy supplementation did not allow mares to better regulate their parasite burden. A second experiment allowed us to precise the herbage allowance threshold below which energy supplementation is required. Under strip-grazing conditions it was estimated at 66 g DM.kg LW⁻¹.d⁻¹, which corresponds to a post-grazing height of 5.4 cm using sward stick. A third experiment has revealed the potential of secondary metabolites of sainfoin to reduce the nematode larval development, while no effect was observed with a short-term protein supplementation. These original results have practical implications for a better management of lactating saddle mares at pasture.

Keywords: horse, pasture, intake, animal performance, gastrointestinal nematodes, grazing management