



HAL
open science

Efficienc e alimentaire en phase péripartum : une étude chez des brebis allaitantes parasitées issues de sélections divergentes sur l'efficienc e alimentaire ou la résistance au parasitisme gastro-intestinal

Willy Aurouze

► To cite this version:

Willy Aurouze. Efficienc e alimentaire en phase péripartum : une étude chez des brebis allaitantes parasitées issues de sélections divergentes sur l'efficienc e alimentaire ou la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04889263

HAL Id: dumas-04889263

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04889263v1>

Submitted on 15 Jan 2025

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  a la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publi es ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou priv es.

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 132

**EFFICIENCE ALIMENTAIRE EN PHASE PÉRIPARTUM : UNE ÉTUDE CHEZ DES
BREBIS ALLAITANTES PARASITÉES ISSUES DE SÉLECTIONS DIVERGENTES
SUR L'EFFICIENCE ALIMENTAIRE OU LA RÉSISTANCE AU PARASITISME
GASTRO-INTESTINAL**

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 11 décembre 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

AUROUZE Willy

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 132

**EFFICIENCE ALIMENTAIRE EN PHASE PÉRIPARTUM : UNE ÉTUDE CHEZ DES
BREBIS ALLAITANTES PARASITÉES ISSUES DE SÉLECTIONS DIVERGENTES
SUR L'EFFICIENCE ALIMENTAIRE OU LA RÉSISTANCE AU PARASITISME
GASTRO-INTESTINAL**

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 11 décembre 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

AUROUZE Willy

Liste des enseignants (29/08/2024)

Mme ABITBOL	Marie	Professeur
M. ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Mme ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Mme AYRAL	Florence	Maître de conférences
Mme BECKER	Claire	Professeur
Mme BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Mme BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
M. BENOIT	Etienne	Professeur
M. BERNY	Philippe	Professeur
Mme BLONDEL	Margaux	Maître de conférences
M. BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
Mme BRASSARD	Colline	Maître de conférences (stagiaire)
M. BRUTO	Maxime	Maître de conférences
M. BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
M. BUFF	Samuel	Professeur
M. BURONFOSSE	Thierry	Professeur
M. CACHON	Thibaut	Maître de conférences
M. CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Mme CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
Mme CANNON	Leah	Maître de conférences (stagiaire)
M. CHABANNE	Luc	Professeur
Mme CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
M. CHANOIT	Guillaume	Professeur
M. CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Mme DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
Mme DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Mme DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Mme ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
M. FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
M. GALIA	Wessam	Maître de conférences
M. GILLET	Benoit	Maître de conférences
Mme GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
M. GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Mme GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Mme HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Mme JEANNIN	Anne	Inspecteur en santé publique vétérinaire
Mme JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargée d'enseignement contractuelle
M. JUNOT	Stéphane	Professeur
M. KODJO	Angeli	Professeur
Mme KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Mme LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Mme LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Mme LE GRAND	Dominique	Professeur
Mme LEBLOND	Agnès	Professeur
Mme LEDOUX	Dorothee	Maître de conférences
M. LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Mme LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
M. LEGROS	Vincent	Maître de conférences
M. LEPAGE	Olivier	Professeur
Mme LOUZIER	Vanessa	Professeur
M. LURIER	Thibaut	Maître de conférences
M. MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
M. MARCHAL	Thierry	Professeur
Mme MOSCA	Marion	Maître de conférences
M. MOUNIER	Luc	Professeur
Mme PEROZ	Carole	Maître de conférences
M. PIN	Didier	Professeur
Mme PONCE	Frédérique	Professeur

Mme	PORTIER	Karine	Professeur
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
Mme	PROUILLAC	Caroline	Professeur
M.	RACHED	Antoine	Maitre de conférences
Mme	REMY	Denise	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
M.	ROGER	Thierry	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Michael	Professeur
Mme	SERGEANTET	Delphine	Professeur
Mme	STORCK	Fanny	Professeur
M.	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Mme	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
M.	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

À Monsieur le Professeur Jean-Luc Cadoré, VetAgro-Sup, campus vétérinaire de Marcy l'Etoile, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse, qu'il reçoive ici l'expression de ma reconnaissance profonde.

À Monsieur le Docteur Frédéric Douhard, Chargé de Recherche à l'INRAE, UMR GenPhyse, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse et pour m'avoir accompagné tout au long de ce travail. Ses précieux conseils, ainsi que sa disponibilité, ont été essentiels à l'accomplissement de ce projet. Qu'il reçoive ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

À Monsieur le Docteur Gilles Bourgoïn, Maître de Conférences, VetAgro-Sup, campus vétérinaire de Marcy l'Etoile, pour avoir accepté d'encadrer, d'examiner, et de corriger ce travail, qu'il reçoive ici l'expression de mes chaleureux remerciements.

À Monsieur le Docteur Thibaut Lurier, Maître de Conférences, VetAgro-Sup, campus vétérinaire de Marcy l'Etoile, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et de participer à ce jury de thèse. Je lui exprime ma gratitude sincère.

À Madame la Docteure Flavie Tortereau, Ingénieure de Recherche à l'INRAE, UMR GenPhyse, pour m'avoir encadré et guidé tout au long de ce travail, ainsi que pour sa disponibilité et sa réactivité, qu'elle reçoive ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Table des matières

Table des matières.....	7
Liste des annexes	13
Liste des figures.....	15
Liste des tableaux	17
Liste des abréviations	19
Introduction.....	21
Partie 1	23
Etude bibliographique	23
I. L'efficacité alimentaire.....	23
1. Qu'est-ce que l'efficacité alimentaire ?	23
2. Contexte actuel et enjeux de l'amélioration de l'efficacité alimentaire	23
a. Enjeu économique.....	23
b. Enjeu environnemental	25
3. Comment calculer l'efficacité alimentaire ?.....	26
a. Partition de l'énergie ingérée au sein de l'organisme.....	26
b. Les méthodes de calcul de l'efficacité alimentaire.....	28
i. Le taux de conversion alimentaire ou "Feed Conversion Ratio" (FCR).....	28
ii. La consommation moyenne résiduelle ou "Residual Feed Intake"(RFI).....	30
4. Facteurs de variation génétiques et non génétiques de l'efficacité alimentaire ...	32
a. Effets de l'environnement.....	32
i. Température	32
ii. L'alimentation	33
iii. Le parasitisme	34
b. Facteurs de variation individuels	35
i. Facteurs de variation à l'échelle de l'organisme	35
(1)Le stade physiologique.....	35
(2)Le comportement	36
ii. Facteurs de variation à l'échelle de l'organe	36
(1)La composition corporelle	36
(2)La taille des viscères	37
(3)La digestibilité et les émissions de méthane.....	37
(4)Le microbiote ruminal.....	38
iii. Facteurs de variation à l'échelle cellulaire et moléculaire	38
(1)L'énergie dédiée à la production	38

(2)Différences mitochondriales	39
(3)Le métabolisme protéique	40
(4)Le système hormonal	41
c. Héritabilité de l'efficience alimentaire.....	41
5. Synthèse des points essentiels	42
II. Le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins.....	43
1. Biologie des strongles gastro-intestinaux	44
a. Le cycle parasitaire.....	44
i. La phase exogène	45
ii. La phase endogène	45
b. Le phénomène d'hypobiose.....	46
2. Les principaux strongles gastro-intestinaux et signes cliniques associés.....	46
a. <i>Haemonchus contortus</i>	48
i. Généralités.....	48
ii. Signes cliniques.....	49
b. <i>Teladorsagia circumcincta</i>	50
c. <i>Trichostrongylus colubriformis</i>	50
3. La réponse de l'hôte	51
a. L'immunité innée	51
b. L'immunité adaptative	53
c. Efficacité de la réponse immunitaire	54
i. Efficacité de l'immunisation.....	54
ii. Impact du relâchement immunitaire autour de la mise bas	55
4. Épidémiologie des strongyloses digestives	55
i. Facteurs environnementaux	55
ii. Facteurs génétiques	56
(1)La résistance naturelle.....	56
(2)Héritabilité de la résistance	57
(3)Les gènes de résistances confèrent une résistance croisée.....	57
iii. Autres facteurs	58
5. L'impact des strongles gastro-intestinaux.....	58
a. Effet sur la prise alimentaire	58
b. Effets sur la digestibilité de la ration.....	59
c. Effets sur la production	59
d. Effet sur le bien-être animal.....	60
e. Effet sur la reproduction	60

6.	Critères de suspicion et méthodes de mesure du parasitisme	60
a.	Critères de suspicion du parasitisme	61
b.	Méthodes de mesure du parasitisme <i>in vivo</i>	61
i.	Analyses des fèces	61
(1)	La coproscopie	61
(2)	La coproculture	62
ii.	Analyses de sang de l'animal	63
(1)	L'hématocrite	63
(2)	Le dosage du pepsinogène	63
iii.	Analyse de l'état clinique de l'animal	64
(1)	La méthode FAMACHA	64
(2)	Autres méthodes d'évaluation clinique	65
c.	Méthodes de mesure post mortem	66
7.	Gestion du parasitisme gastro-intestinal	67
a.	Les traitements médicamenteux, résistances et impact écologique associés ..	67
i.	Les molécules disponibles en France	67
(1)	Les benzimidazoles	67
(2)	Les imidazothiazoles	69
(3)	Les tetrahydropyrimidines	69
(4)	Les lactones macrocycliques	69
(5)	Les dérivés d'amino-acétonitrile	71
(6)	Les salycilanilidés	71
ii.	La résistance aux antiparasitaires et mécanismes de résistance connus.....	72
iii.	L'impact écologique associé à l'utilisation des antiparasitaires.....	74
b.	Stratégies agronomiques et thérapeutiques dans le but de limiter le parasitisme et l'apparitions de résistances	74
i.	Le traitement ciblé/sélectif	74
ii.	Proscrire les mauvaises pratiques.....	76
c.	La vaccination	76
d.	Gestion d'élevage.....	76
i.	La ration.....	76
ii.	La gestion des pâtures	77
8.	Synthèse des points essentiels	78
III.	La sélection génétique comme source d'amélioration des performances	79
1.	Protocoles de sélection divergente chez les ovins	80

a.	La sélection divergente	80
b.	La sélection génétique pour l'amélioration de l'efficacité alimentaire	80
c.	La sélection génétique pour la résistance au parasitisme gastro-intestinal.....	81
2.	Le compromis génétique.....	82
a.	Les corrélations génétiques entre production/santé.....	82
b.	Les théories du compromis génétique	83
c.	Le compromis génétique entre efficacité et résistance au parasitisme gastro-intestinal	84
3.	Synthèse des points essentiels	85
Partie 2	87
Étude expérimentale	87
I.	Introduction	87
II.	Matériel et méthodes.....	88
1.	Ethique	88
2.	Présentation générale.....	89
3.	Alimentation.....	90
4.	Collecte des données.....	91
a.	Données enregistrées quotidiennement.....	91
b.	Données enregistrées de manière hebdomadaire.....	92
c.	Données enregistrées de manière bimensuelle.....	92
d.	Autres données enregistrées.....	92
5.	Analyses statistiques.....	93
a.	Description des données brutes	93
b.	Principe général d'élaboration des modèles linéaires.....	94
i.	Le modèle linéaire.....	94
ii.	Le modèle linéaire mixte.....	94
iii.	Validation des modèles linéaires	95
(1)	La normalité de la variance des résidus	95
(2)	L'indépendance des résidus	95
(3)	Homogénéité de la variance des résidus	96
iv.	Sélection de modèle.....	96
v.	Détermination de la significativité des variables explicatives du modèle.....	97
c.	Modèles appliqués à notre étude.....	97
i.	Modèles d'analyse caractère par caractère	98
ii.	Modèles de détermination du RFI simplifié (RFI _s).....	101
iii.	Modèles d'analyse du RFI simplifié (RFI _s).....	102

iv.	Modèles de détermination du RFI par jour d'échographie (RFI _e)	103
v.	Modèles d'analyse du RFI par jour d'échographie (RFI _e)	106
III.	Résultats.....	106
1.	Statistiques descriptives des données brutes	106
a.	Nombre de brebis par lignée au début de l'expérimentation.....	107
b.	Évolution du statut physiologique des brebis au cours de l'expérimentation..	107
c.	Dates de mise-bas	108
d.	Taille et poids de portées	109
e.	Données brutes mesurées avant la mise-bas	110
f.	Données brutes mesurées après la mise-bas	112
2.	Modélisation	113
a.	Analyse des données caractère par caractère	113
i.	Analyse de l'ingestion de fourrage	115
(1)	Avant mise-bas.....	115
(2)	Après mise-bas.....	115
ii.	Analyse de l'ingestion de concentré.....	117
(1)	Avant mise bas	117
(2)	Après mise bas	117
iii.	Analyse de l'ingestion totale de MS	118
(1)	Avant mise bas	118
(2)	Après mise bas.....	119
iv.	Analyse du PV.....	120
(1)	Avant mise-bas.....	120
(2)	Après mise-bas.....	121
v.	Analyse de l'épaisseur de gras dorsal.....	122
(1)	Avant mise-bas.....	122
(2)	Après mise-bas.....	123
vi.	Analyse de l'épaisseur de muscle dorsal	123
(1)	Avant mise-bas.....	124
(2)	Après mise-bas.....	124
vii.	Analyse des OPG.....	125
(1)	Avant mise-bas.....	125
(2)	Après mise-bas.....	126
viii.	Analyse de l'hématocrite	127
(1)	Avant mise-bas.....	127

(2)Après mise-bas.....	127
b. Analyse de l'efficience alimentaire simplifiée	128
i. Analyse avant mise-bas.....	128
(1)Détermination du RFIs (RFI simplifié)	128
(2)Analyse du RFIs.....	129
ii. Analyse après mise-bas	129
(1)Détermination du RFIs (RFI simplifié)	129
(2)Analyse du RFIs.....	130
c. Analyse de l'efficience alimentaire par jour d'échographie	130
i. Analyse avant mise-bas.....	130
(1)Détermination du RFLe (par jour d'échographie)	130
(2)Analyse du RFLe	131
ii. Analyse après mise-bas	132
(1)Détermination du RFLe (RFI par jour d'échographie).....	132
(2)Analyse du RFLe.....	133
Partie 3	135
Discussion.....	135
I. Rappels des objectifs et protocole mis en place :	135
1. Objectif de l'étude	135
2. Analyse des caractères liés au parasitisme, de composition corporelle et d'ingestion	135
3. Étude de l'efficience alimentaire	135
II. Discussions de l'évolution des caractères étudiés chez les lignées SGI.....	137
1. Les différences de résistance au parasitisme	137
2. Les différences de conditions corporelles	139
3. Les différences d'efficience alimentaire	140
III. Discussions de l'évolution des caractères étudiés chez les lignées RFI	141
1. Les différences de conditions corporelles	141
2. Les différences de résistance au parasitisme	142
3. Les différences d'efficience alimentaire	142
IV. Bilan général et perspectives de travail :.....	144
Conclusion	147
Bibliographie	149
Annexes	171

Liste des annexes

Annexe 1: Valeurs alimentaires théoriques des aliments distribués	171
Annexe 2: Poster de présentation du DAC.....	172
Annexe 3: Poster de présentation du DAO (ou DH2O).....	173
Annexe 4: Poster de présentation du DAF	174
Annexe 5: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de fourrage avant la mise-bas.....	175
Annexe 6: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de fourrage après la mise-bas.....	177
Annexe 7: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de concentré avant la mise-bas.....	179
Annexe 8: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de concentré après la mise-bas.....	181
Annexe 9: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de MS totale avant la mise-bas.....	183
Annexe 10: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de MS totale après la mise-bas.....	185
Annexe 11: Examen des résidus et résultats du modèle de PV avant la mise-bas	187
Annexe 12: Examen des résidus et résultats du modèle de PV après la mise-bas	189
Annexe 13: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de gras dorsal avant la mise-bas.....	191
Annexe 14: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de gras dorsal après la mise-bas.....	193
Annexe 15: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de muscle dorsal avant la mise-bas.....	195
Annexe 16: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de muscle dorsal après la mise-bas.....	197
Annexe 17: Examen des résidus et résultats du modèle d'OPG avant la mise-bas	199
Annexe 18: Examen des résidus et résultats du modèle d'OPG après la mise-bas.....	201
Annexe 19: Examen des résidus et résultats du modèle d'hématocrite avant la mise-bas.....	202
Annexe 20: Examen des résidus et résultats du modèle d'hématocrite après la mise-bas.....	203
Annexe 21: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFI (RFI simplifié) avant la mise-bas	204
Annexe 22: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI simplifié) après la mise-bas.....	205
Annexe 23: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFI (RFI simplifié) après la mise-bas	206
Annexe 24: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI simplifié) après la mise-bas.....	207
Annexe 25: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFI (RFI par jour d'échographie) avant la mise-bas.....	208
Annexe 26: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI par jour d'échographie) avant la mise-bas	209
Annexe 27: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFI (RFI par jour d'échographie) après la mise-bas	210
Annexe 28: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI par jour d'échographie) après la mise-bas	211

Liste des figures

Figure 1: Répartition des coûts de production en euros d'un kg de carcasse d'agneau français (avérée en 2020 et estimée pour 2021). Figure extraite de Rubin et al. (2022).	24
Figure 2: Évolution de l'indice IPAMPA (Indice des Prix d'Achat des Moyens de Production Agricole) pour les aliments pour bétail entre 2006 et 2024. Figure extraite de IPAMPA - Idele.fr (2024).	25
Figure 3: Évolution de l'indice IPAMPA pour les carburants et les engrais pour bétail entre 2006 et 2024. Figure extraite de IPAMPA - Idele.fr (2024).	25
Figure 4: Répartition de l'énergie au sein de l'animal. Figure adaptée de Zuidhof (2019) et Ferrell, Oltjen (2008).	28
Figure 5: Cycle parasitaire des strongles gastro-intestinaux. Figure extraite de Roeber, Jex, Gasser (2013).	44
Figure 6: Différenciation des lymphocytes T. Figure extraite de Vokaer, Charbonnier, Le Moine (2011).	53
Figure 7: Schéma récapitulatif de la réponse immunitaire au parasitisme. Figure extraite de McRae et al. (2015).	54
Figure 8: Évolution de l'excrétion d'œufs par gramme de fèces (OPG) en fonction du mois de l'année. Figure extraite de Bélanger et al. (2007)	56
Figure 9 : Carte de score FAMACHA. Issue de Zajac, Petersson (2016).	64
Figure 10 : Grille de notation de l'état corporel des brebis. Extrait de Karim (2013).	66
Figure 11: Protocole expérimental (Partie A : Population des brebis intégrées dans l'étude, Partie B : Résumé des mesures effectuées sur les brebis pendant l'expérimentation, Partie C : Frise chronologique du protocole expérimental)	93
Figure 12 : Nombre de brebis avec des données d'ingestion disponibles par jour post-infestation, réparti par lignée.....	108
Figure 13: Nombre de mises-bas par jour post infestation par lignée.....	109
Figure 14: Diagrammes circulaires des tailles de portées par lignée au cours de l'expérimentation	109
Figure 15: Évolution des moyennes ajustées de consommation de fourrage (Kg de MS) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.	116
Figure 16: Évolution des moyennes ajustées de consommation de concentré (en Kg de MS) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.	118
Figure 17: Évolution des moyennes ajustées de la consommation journalière de MS totale (KgMS/j) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0. .	120
Figure 18: Évolution des moyennes ajustées de PV (en kg) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.	122
Figure 19: Évolution des moyennes ajustées de l'épaisseur de gras dorsal (en mm) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.....	123
Figure 20: Évolution des moyennes ajustées d'épaisseur de muscle dorsal (en mm) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.....	125
Figure 21: Évolution des moyennes ajustées du nombre d'OPG (exprimé en racine carré) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.	126
Figure 22: Évolution des moyennes ajustées d'hématocrite (en %) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.	128

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des principaux nématodes parasites gastro-intestinaux du mouton. Tableau extrait de Roeber, Jex, Gasser (2013).	47
Tableau 2: Guide d'interprétation des résultats de coproscopie. Tableau extrait de Abbott, Taylor, Stubbings (2012).	62
Tableau 3: Tableau de correspondance points / nombre de vers. D'après Abbott, Taylor, Stubbings (2012).	67
Tableau 4: Molécules antiparasitaires de la famille des benzimidazoles disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau issu de Bordes et al. (2020).	68
Tableau 5: Molécules antiparasitaires de la famille des Imidazothiazoles disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020).	69
Tableau 6: Molécules antiparasitaires de la famille des lactones macrocycliques disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020).	70
Tableau 7: Molécules antiparasitaires de la famille Salicylanilidés disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020).	72
Tableau 8: Tableau des répartitions des brebis par lignée et par lot (sgiS : lignée sensible au parasitisme gastro-intestinal, sgiR: lignée résistante au parasitisme gastro-intestinal, rfi+ : lignée peu efficace, rfi- : lignée efficace).	90
Tableau 9: Tableau des rations d'aliment concentré autorisées au cours de l'étude.	91
Tableau 10 : Variables explicatives utilisées dans les modèles d'analyse caractère par caractère	98
Tableau 11: Structures de variance testées pour les modèles d'analyse caractère par caractère	99
Tableau 12 : Variables explicatives utilisées dans les modèles de calcul du RFI _s .	101
Tableau 13: Variables explicatives utilisées dans l'analyse du RFI _s .	103
Tableau 14: Nouvelles variables créées à partir des données moyennées par jours d'échographies	103
Tableau 15: Variables explicatives utilisées dans les modèles de calcul du RFI _e .	104
Tableau 16: Variables explicatives utilisées dans l'analyse du RFI _e .	106
Tableau 17: Effectifs par lignée au 1er jour de l'expérimentation.	107
Tableau 18: Poids moyens des agneaux à la naissance et taille de portée par lignée	110
Tableau 19: Description des variables mesurées par lignées avant la mise-bas	111
Tableau 20: Description des variables mesurées par lignées après la mise-bas.	112
Tableau 21: Modèles utilisés dans l'analyse caractère par caractère	114
Tableau 22: Effets des différentes variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS avant mise-bas permettant le calcul du RFI _s (significativité $P > 0,1 = \text{NS}$; $P < 0,1 = \dagger$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$).	128
Tableau 23 : Effets des différentes variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI _s (significativité $P > 0,1 = \text{NS}$; $P < 0,1 = \dagger$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$).	129
Tableau 24 : Effet des variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI _e ($P > 0,1 = \text{non significatif (NS)}$; $P < 0,1 = \dagger$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$).	131
Tableau 25: Résultats du modèle de l'analyse du RFI _e avant la mise-bas ($P > 0,1 = \text{non significatif (NS)}$; $P < 0,1 = \dagger$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$).	132
Tableau 26 : Effet des variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI _e ($P > 0,1 = \text{non significatif (NS)}$; $P < 0,1 = \dagger$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$).	132

Tableau 27: Résultats du modèle de l'analyse du RFIe après la mise-bas ($P > 0,1$ = non significatif (NS) ; $P < 0,1$ = † ; $P < 0,05$ = * ; $P < 0,01$ = ** ; $P < 0,001$ = ***) 133

Liste des abréviations

ACF : “Autocorrelation function” ou fonction d’autocorrélation.
AIC : Critère d’Information d’Akaike.
ATP : Adénosine TriPhosphate.
CC : Composition Corporelle.
CAC : Distributeurs Automatiques de Concentré.
DAF : Distributeurs Automatiques de Fourrage.
DAO : Distributeurs Automatiques d’Eau.
DAMP : “Damage Associated Molecular Pattern” ou motifs moléculaires associés aux dégâts.
FCR : “Feed Conversion Ratio” ou ratio de conversion alimentaire.
GF : “Green Feed”.
GMQ : Gain Moyen Quotidien.
ICC : Indice de Corrélation Intra-classe.
IPAMPA : Indice des Prix d’Achat des Moyens de Production Agricole.
INRAE : Institut National de la Recherche Agronomique et de L’Environnement.
MSI : Matière Sèche Ingérée.
MS : Matière Sèche.
NEC : Note d’État Corporel.
OPG : Œufs Par Gramme de fèces.
PAMP : “Pathogen Associated Molecular Patterns” ou motifs moléculaires associés aux pathogènes.
PM : Poids Métabolique.
PV : Poids Vif
PRR : “Pattern Recognition Receptor” ou récepteurs de reconnaissance de motifs moléculaires.
 R^2_m : Coefficient de détermination marginal.
 R^2_m : Coefficient de détermination conditionnel.
RFI : “Residual Feed Intake” ou consommation moyenne résiduelle.
RFIs : RFI simplifié.
RFIe : RFI par jour d’échographie.
SMARTER : “Small RuminanTs breeding for Efficiency and Resilience”.
TC : Traitement Ciblé.
TCS : Traitement Ciblé / Sélectif.
TLR : “Toll-Like Receptor Récepteurs” ou récepteurs de type Toll.
UFL : Unités Fourragères Lait.
VEE : Valeur d’Elevage Estimée.

INTRODUCTION

À la sortie de la Seconde Guerre Mondiale, l'Europe désire assurer son autonomie alimentaire. Cette volonté est à l'origine du changement de notre modèle agricole. Le mode d'agriculture vivrière, présent à ce moment en Europe, est alors repensé pour devenir un modèle productiviste. À titre d'illustration, la production française a augmenté de 70% entre 1960 et 1980. Ces changements ont été responsables de modifications importantes dans la filière agroalimentaire avec notamment la mécanisation importante de l'agriculture et l'apparition des hypermarchés (Bellemain et al. 2017).

Le modèle productiviste est pensé pour optimiser le rendement de la production agricole. Pour ce faire, l'objectif est de limiter au maximum l'effet des facteurs réduisant la production (sécheresse, parasitisme...) et l'hétérogénéité du milieu naturel. Cela est permis par le développement de la mécanisation et l'utilisation importante d'engrais et de produits phytosanitaires (Duru, Fares, Therond 2014). Aujourd'hui, après plusieurs décennies d'intensification, les effets délétères de ce mode de production sont largement décrits dans la littérature (Foley et al. 2011 ; Tilman et al. 2002). Actuellement plus de 50 % du territoire français est destiné à l'agriculture. Après une prise de conscience des impacts de l'agriculture actuelle sur notre environnement, il devient évident qu'une transition agroécologique est nécessaire. Le gouvernement français a annoncé, en 2023, le plan d'investissement « France 2030 ». Avec ce plan, le gouvernement prévoit un investissement de 2 milliards d'euros pour la transition agroécologique. Dans ce contexte, l'amélioration des systèmes d'élevage est indispensable pour les rendre moins dépendants des intrants. Notre étude est axée sur la filière ovine. Au cours de ce travail, nous nous intéresserons à deux leviers d'amélioration des systèmes d'élevage ovin : la diminution des besoins alimentaires et la diminution de l'impact du parasitisme gastro-intestinal.

La diminution des besoins alimentaires de nos productions ovines est essentielle pour deux raisons. Tout d'abord, l'élevage ovin dépend fortement des rations riches en concentrés, dont la production a une empreinte carbone significative. De plus, les aliments concentrés destinés aux animaux d'élevage peuvent entrer en concurrence avec l'alimentation humaine. Pour atténuer cette compétition tout en réduisant l'empreinte carbone, réduire la consommation d'aliments par les animaux

d'élevage et favoriser l'élevage à l'herbe des ruminants sont des leviers intéressants. En optimisant l'utilisation des prairies et des ressources herbagées, il est possible de diminuer la dépendance aux aliments concentrés tout en réduisant l'empreinte carbone de l'élevage.

Cependant, un des principaux obstacles au développement des systèmes herbagés est le parasitisme gastro-intestinal. Ce dernier entraîne une baisse de la productivité des élevages ovins et nécessite la mise en place de mesures de gestion dont les coûts écologiques et économiques peuvent être considérables. Il est donc crucial de développer des stratégies visant à atténuer l'impact du parasitisme sur la productivité des élevages.

La sélection génétique peut constituer un moyen intéressant pour l'amélioration de ces caractères. En effet, il a déjà été montré que l'efficacité alimentaire des ovins peut être améliorée grâce à la sélection génétique (Tortereau et al., 2020). Il a également été montré que le taux d'infestation et l'impact du parasitisme gastro-intestinal peuvent être limités par la sélection génétique (Aguerre et al., 2018). Cependant, les liens génétiques entre ces paramètres d'efficacité alimentaire et de résistance au parasitisme sont encore flous et peu étudiés.

Le travail présenté dans cette étude vise à apporter des connaissances nouvelles sur un éventuel compromis génétique entre l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Entre 2021 et 2022, l'INRAE a mis en place une expérimentation de 105 jours sur des brebis allaitantes parasitées en période péri-partum. Ces brebis étaient issues de sélections génétiques divergentes sur l'efficacité alimentaire ou la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Dans ce travail, nous analysons les données de production, d'ingestion et de santé collectées au cours de cette expérimentation. Ces données sont également utilisées pour calculer l'efficacité alimentaire de ces brebis en période péri-partum.

Dans une première partie, nous présenterons l'efficacité alimentaire des ovins, ainsi que le parasitisme gastro-intestinal en abordant les principaux agents responsables, leurs impacts et les moyens de lutte disponibles. Ensuite, nous parlerons de la sélection génétique en vue de l'amélioration de ces deux caractères, ainsi que des éventuels compromis à prendre en compte pour leur amélioration. Dans une seconde partie, nous présenterons le contexte de l'étude ainsi que les résultats associés. Ces résultats seront discutés dans une troisième partie.

PARTIE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. L'efficacité alimentaire

1. Qu'est-ce que l'efficacité alimentaire ?

L'efficacité alimentaire d'un animal se détermine par l'évaluation de la quantité d'aliments consommés par cet animal pour produire une unité de produit valorisable (Cantalapiedra-Hijar et al. 2022). Ce produit peut être, par exemple, de la viande dans le cas de brebis allaitantes, ou du lait dans le cas de brebis laitières. L'amélioration de l'efficacité alimentaire vise à optimiser la quantité de ressources alimentaires consommée par l'animal par rapport au nombre d'unités de produits animaux produites. Elle n'est cependant pas pensée pour améliorer la quantité de production. L'efficacité alimentaire peut être calculée à l'échelle de l'élevage ou à l'échelle de l'animal. Dans ce travail, nous nous intéresserons principalement à l'efficacité alimentaire à l'échelle de l'animal.

2. Contexte actuel et enjeux de l'amélioration de l'efficacité alimentaire

L'amélioration de l'efficacité alimentaire de nos animaux de production est un sujet d'actualité qui présente deux enjeux majeurs : l'enjeu économique et l'enjeu environnemental, présentés ci-dessous.

a. Enjeu économique

L'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux d'élevage est un moyen de diminuer les coûts de production pour les producteurs. En effet, produire du bétail plus efficace permet de produire la même quantité de produits valorisables tout en diminuant la consommation alimentaire des animaux. Cela permet donc une diminution des coûts d'exploitation dédiés à l'alimentation.

Pour bien comprendre l'enjeu économique, nous nous intéressons à la répartition des coûts de production par kilogramme de carcasse d'agneau en France en fonction des types d'élevages ovins allaitants (Figure 1). Les achats d'aliments (catégorie "Approvisionnement des animaux") représentent une part non négligeable du coût de production par kilogramme de carcasse d'agneau, pouvant osciller entre 9 et 17 % selon le type de production. De plus, si l'on considère les dépenses relatives à l'approvisionnement des surfaces (engrais, semences...) (4 à 7 %) et à la mécanisation (18 à 23 %), qui sont indirectement liées à la production d'aliments, la proportion totale du coût de production liée à l'alimentation de manière directe ou indirecte est d'environ 40 %.

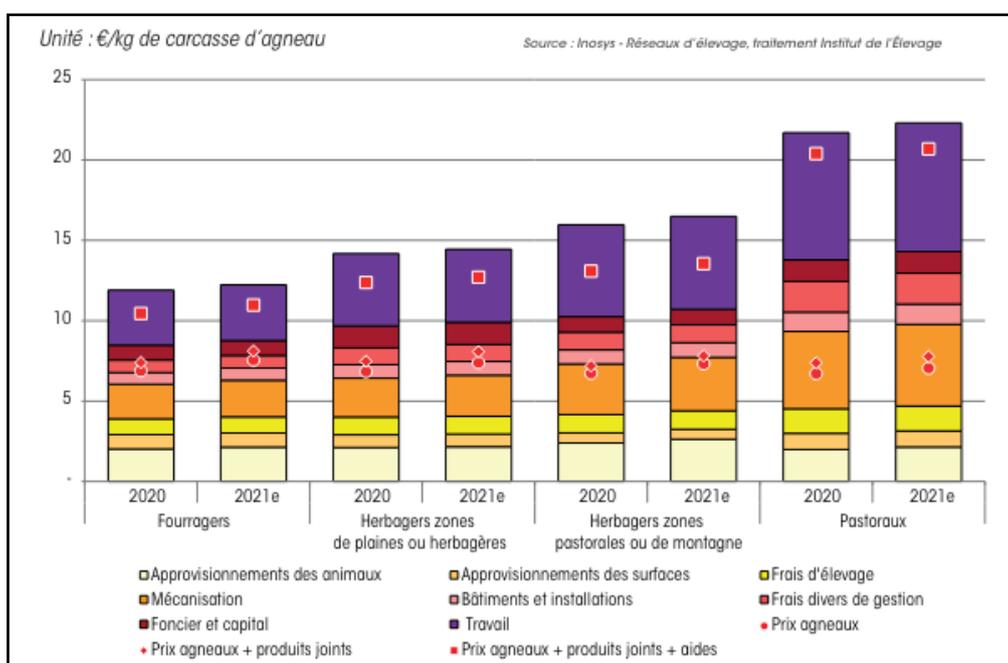


Figure 1: Répartition des coûts de production en euros d'un kg de carcasse d'agneau français (avérée en 2020 et estimée pour 2021). Figure extraite de Rubin et al. (2022).

Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux d'élevage peut permettre de limiter les dépendances des élevages aux marchés de l'alimentation et du carburant. Ces marchés présentent des fluctuations de prix très importantes avec une tendance globale à l'augmentation (Figure 2 et Figure 3 pour les aliments pour bétail et pour les carburants et engrais, respectivement).



Figure 2: Évolution de l'indice IPAMPA (Indice des Prix d'Achat des Moyens de Production Agricole) pour les aliments pour bétail entre 2006 et 2024. Figure extraite de IPAMPA - Idele.fr (2024).



Figure 3: Évolution de l'indice IPAMPA pour les carburants et les engrais pour bétail entre 2006 et 2024. Figure extraite de IPAMPA - Idele.fr (2024).

b. Enjeu environnemental

L'amélioration de l'efficacité alimentaire permet également de limiter l'impact environnemental des productions animales. L'agriculture est responsable d'un impact environnemental important. Selon le rapport de 2022 du centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique, l'agriculture française est responsable de 21 % des émissions de gaz à effet de serre en France (Robert 2022). Ce pourcentage global peut être décomposé avec les émissions suivantes :

- L'élevage est responsable de 46 % des émissions de méthane. Cela est principalement expliqué par la fermentation entérique des animaux et la gestion des effluents d'élevage.
- La fertilisation des cultures qui est responsable de 40 % des émissions de protoxyde d'azote.
- La consommation d'énergie qui est responsable de 13 % des émissions de gaz à effet de serre agricoles. La consommation d'énergie comprend les engins agricoles, les bâtiments agricoles, les équipements tels que les tanks à lait, etc.

L'importance de l'impact environnemental de l'agriculture justifie la mise en place de mesures pour limiter cet impact. L'amélioration de l'efficacité pourrait être une de ces mesures. L'objectif de l'amélioration de l'efficacité est d'élever des animaux pour qui l'ingestion est plus faible que l'ingestion théorique pour une production donnée. Cela permet donc de produire moins d'aliments d'élevage et ainsi de limiter la fertilisation des cultures et l'utilisation des engins agricoles. De plus, un des enjeux serait d'améliorer l'efficacité alimentaire sous des rations avec des proportions de fourrages plus importantes. Cela permettrait ainsi de mieux valoriser les prairies et de diminuer la compétition entre l'alimentation destinée aux humains et celles destinée aux animaux d'élevage tout en limitant l'impact écologique.

3. Comment calculer l'efficacité alimentaire ?

Pour comprendre les méthodes de calculs de l'efficacité alimentaire, nous présenterons tout d'abord la partition de l'énergie ingérée au sein de l'animal. Cette présentation nous permettra ensuite de comprendre les deux méthodes principales de mesure de l'efficacité alimentaire : le calcul par ratio et le calcul par régression linéaire multiple.

a. Partition de l'énergie ingérée au sein de l'organisme

On distingue les animaux efficaces des animaux peu efficaces par la proportion d'énergie brute de la ration ingérée qui est dédiée à la production de produits valorisables. Nous allons expliquer comment l'énergie ingérée est partitionnée au sein de l'animal de manière à faciliter la compréhension des mécanismes biologiques de l'efficacité alimentaire.

Lors de la prise alimentaire, une quantité d'énergie brute est ingérée par l'animal (Figure 4). Cette énergie brute correspond à la quantité totale d'énergie contenue dans l'aliment. L'intégralité de l'énergie brute ne va pas entrer dans le processus de digestion, une partie de cette énergie va être perdue dans les fèces. L'énergie digestible par l'animal correspond donc à l'énergie brute moins les pertes énergétiques dans les fèces. L'énergie digestible rentre ensuite dans le processus de digestion. Elle ne va pas être utilisable en totalité par l'animal, une partie de l'énergie digestible va être perdue sous forme de gaz (méthane), d'urine et de chaleur. Si l'on soustrait ces pertes à l'énergie digestible, on obtient l'énergie métabolisable, c'est-à-dire utilisable par les cellules de l'individu. Une partie de l'énergie métabolisable, l'énergie nette, est répartie entre le métabolisme basal et l'énergie nette de production. Le reste de l'énergie métabolisable est également consacré à l'activité volontaire, à la régulation thermique et à la fonction immunitaire. De plus, une partie de l'énergie métabolisable est perdue sous forme de chaleur (Zuidhof 2019 ; Ferrell, Oltjen 2008).

L'amélioration de l'efficacité alimentaire est complexe. On distingue généralement 2 types d'améliorations, l'amélioration de l'efficacité digestive et l'amélioration de l'efficacité métabolique. L'efficacité digestive correspond à la capacité d'un animal à extraire l'énergie métabolisable d'une ration et l'efficacité métabolique correspond à la part d'énergie métabolisable dédiée à la production. Par exemple l'amélioration de l'efficacité métabolique peut être en partie obtenue par la diminution de la part d'énergie dédiée à l'entretien (qui correspond à l'énergie dédiée au métabolisme basal) et par l'augmentation concomitante de la quantité d'énergie dédiée à la production (Bach, Terré, Vidal 2020). Elle peut également impliquer de diminuer les dépenses énergétiques autres, telles que l'activité volontaire, afin d'augmenter la part d'énergie nette. Par exemple, Gregorini et al. (2015) ont montré des liens phénotypiques entre l'activité des vaches laitières au pâturage et l'efficacité alimentaire. Les individus efficaces faisaient moins de pas que les animaux peu efficaces mais avec une proportion de pas dédiés à la prise alimentaire plus importante. Néanmoins, la répartition de l'énergie au sein d'un animal est complexe et l'amélioration de l'efficacité alimentaire également car un nombre important de paramètres peuvent être à l'origine d'une perte ou d'un gain d'efficacité. De plus l'amélioration ne doit pas perturber l'équilibre énergétique de l'animal, en modifiant les

répartitions d'énergie au sein de celui-ci. La modification de cet équilibre peut entraîner des compromis que nous discuterons dans la partie III.

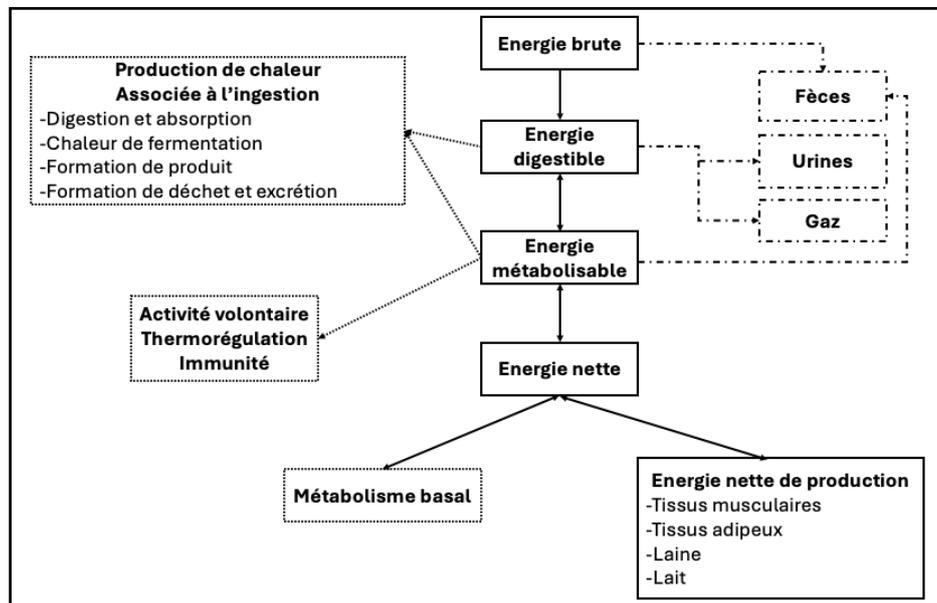


Figure 4: Répartition de l'énergie au sein de l'animal. Figure adaptée de Zuidhof (2019) et Ferrell, Oltjen (2008).

b. Les méthodes de calcul de l'efficacité alimentaire

Les mesures de l'efficacité peuvent être utiles pour la sélection génétique dont nous discuterons dans la partie III, ainsi que pour le conseil technique. La sélection génétique sur l'efficacité alimentaire nécessite d'avoir des indicateurs adaptés. Nous présentons dans cette partie les méthodes de calcul des deux principaux indicateurs de l'efficacité alimentaire ainsi que leurs avantages et inconvénients.

i. Le taux de conversion alimentaire ou "Feed Conversion Ratio" (FCR)

Le premier indicateur de l'efficacité est le taux de conversion alimentaire ou FCR ("Feed Conversion Ratio" en anglais). Il s'agit d'une mesure de l'efficacité alimentaire qui rapporte la quantité de matière sèche ingérée (MSI) à une unité de produit. Chez les animaux en croissance, le FCR se calcule selon la formule suivante :

$$FCR = \frac{MSI}{GMQ}$$

MSI = matière sèche ingérée en Kg sur une période P

GMQ = gain moyen quotidien en Kg sur la même période P

Les estimations de MSI et de GMQ sont habituellement effectuées sur une période P de 6 semaines. Il a néanmoins été montré que chez les ovins allaitant, une période de 5 semaines serait suffisante (Amarilho-Silveira et al. 2022). Chez les animaux producteurs de lait, le GMQ est remplacé par la quantité de lait produite sur la période P. Dans cette méthode de calcul de l'efficacité sous forme de ratio, plus un animal possède un FCR faible, plus la conversion de l'énergie brute en produit valorisable est importante et donc plus l'animal est efficace.

Le FCR est une méthode d'évaluation de l'efficacité plus accessible que d'autres moyens de mesures, car son calcul est simple et elle permet de calculer l'efficacité sur un unique individu, indépendamment de ses contemporains. Aussi, elle est adaptée aux mesures d'efficacité sur des groupes pour lesquels on ne possède pas de données d'ingestion et de GMQ par individu, mais simplement par lot. Le FCR est ainsi beaucoup utilisé en aquaculture et en élevage de volaille.

Cependant, le FCR présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la méthode de mesure reposant sur un ratio implique qu'une diminution du FCR peut être due à une augmentation du GMQ, ou à une baisse de l'ingestion, ou alors à l'évolution conjointe des deux facteurs. La sélection génétique sur le FCR peut donc entraîner des réponses phénotypiques très variables, voire indésirables sur la descendance. Aussi, plusieurs études ont permis de mettre en évidence une corrélation négative entre le poids de l'animal adulte et le FCR. Ainsi, des animaux sélectionnés génétiquement pour un FCR faible sont des animaux plus lourds et potentiellement avec des besoins d'entretien plus importants au stade adulte. Cela irait à l'encontre de l'amélioration de l'efficacité alimentaire (Shike 2013). Le FCR permet donc d'accéder facilement à une mesure d'efficacité, il est utile pour suivre l'évolution des animaux en croissance, mais n'est pas intéressant pour la sélection génétique.

ii. La consommation moyenne résiduelle ou “Residual Feed Intake”(RFI)

La consommation moyenne résiduelle, aussi appelée RFI (“*Residual Feed Intake*” en anglais) est le second indicateur de l’efficacité alimentaire d’un animal. La méthode de calcul de cet indicateur a été introduite pour la première fois en 1963 par Koch et al. (1963). Les auteurs définissent le RFI comme la différence entre la valeur d’ingestion réelle de l’animal et la valeur de l’ingestion théorique de l’animal à niveau de production donné. Il s’agit de la méthode de choix pour la sélection génétique sur l’efficacité alimentaire, la mesure de l’ingestion réelle doit se faire avec une alimentation à volonté (Herd et al. 2004).

Pour accéder à la valeur du RFI, deux méthodes sont envisageables :

- La première méthode consiste à estimer l’ingestion théorique des animaux à partir de modèles théoriques et d’ensuite accéder au RFI par soustraction de l’ingestion réelle et de l’ingestion théorique. Divers modèles sont décrits dans la littérature pour calculer l’ingestion théorique. Ils diffèrent par les caractères pris en compte pour la prédiction. Ces divergences entraînent des variations dans les ingestions théoriques des animaux et donc dans la valeur calculée du RFI. De plus, les équations d’ingestion théorique sont calculées à partir de données d’animaux élevés dans des conditions qui peuvent fortement différer des conditions d’élevage des animaux dont on cherche à déterminer l’efficacité (Pulina et al. 2013). Pour ces raisons, cette méthode demeure moins fiable que la seconde méthode.

- La seconde méthode permet de déterminer le RFI grâce à un modèle de régression linéaire. Cette méthode est la méthode originelle présentée dans l’étude de Koch et al. (1963). Le principe de ce calcul est l’établissement d’une relation linéaire entre la consommation de MS et les différentes sources de dépense d’énergie de l’animal. Comme dans Le Graverand et al. (2023), elle se calcule classiquement de la manière suivante pour des animaux en croissance:

$$MSI = \beta_0 + \beta_1 PV^{0,75} + \beta_2 GMQ + \beta_3 CC + RFI$$

MSI = matière sèche ingérée en Kg sur une période P

PV = poids vif moyen de l'animal sur la période P

GMQ = gain moyen quotidien en Kg sur la même période P

CC = composition corporelle de l'animal (souvent déterminée par les épaisseurs de muscles et de gras)

RFI= résidus du modèle

Comme présenté précédemment, la durée minimale de la période P est de 5 à 6 semaines. Les résidus du modèle linéaire correspondent à la part de l'ingestion individuelle qui n'est pas expliquée par le modèle (c'est-à-dire ses performances) : ils constituent le RFI. Autrement dit, le RFI correspond à la différence entre les valeurs d'ingestion observées et les valeurs d'ingestion prévues par le modèle en fonction des performances de l'animal. Ainsi, un animal présentant un RFI élevé est un animal qui consomme une quantité de MSI plus importante que la quantité théoriquement expliquée par ses performances. Il s'agit donc d'un animal peu efficient. À l'inverse, un animal avec un RFI faible est un animal efficient. On note que les sources de dépense d'énergie varient selon le stade physiologique de l'animal et le type de production de celui-ci. Le modèle de calcul du RFI doit donc prendre en compte ces facteurs de variation selon le stade physiologique de l'animal étudié (Basarab et al. 2003 ; Vandehaar et al. 2016). Par exemple, pour le calcul de RFI des vaches laitières, on intègre le niveau de production laitière dans le modèle (Vandehaar et al. 2016).

Cette méthode de calcul du RFI présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, le RFI est déterminé avec les résidus du modèle linéaire. Ces résidus se décomposent en deux types (Fischer et al. 2018) :

- Les résidus liés à l'imprécision des mesures et du modèle.
- Les résidus propres de l'animal (le marqueur de l'efficience à proprement parler).

Il est donc nécessaire de définir un modèle bien adapté. Aussi, lors du calcul de la consommation résiduelle journalière classique, l'évolution en fonction du temps n'est pas prise en compte. Or, les coefficients du modèle (β) sont susceptibles d'évoluer au cours du temps, il n'est donc pas rigoureux de les considérer comme fixes. Certaines

études parues sur les vaches laitières ont permis de calculer des RFI par jour (Martin et al. 2021 ; Seymour et al. 2020). De plus, la valeur du RFI d'un individu peut varier en fonction des autres animaux utilisés pour le calcul de régression. Ainsi, cette valeur de RFI n'est valable que pour le groupe d'animaux inclus dans le calcul. Aussi, pour déterminer le RFI, il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant d'animaux pour que la régression linéaire soit la plus précise possible, ce qui n'est pas le cas du FCR, qui peut être calculé pour un unique individu. Les animaux inclus dans le calcul du RFI par régression linéaire doivent être élevés dans des conditions homogènes, avec des âges et des conditions d'alimentation similaires. Enfin, sur le terrain, le RFI est un indicateur plus complexe à expliquer que le FCR.

À la différence du FCR, le RFI est un indicateur de l'efficacité alimentaire indépendant phénotypiquement des caractères utilisés dans le modèle, comme la croissance et le poids. Cette indépendance phénotypique entre le RFI et les caractères de production a été montrée chez les ovins de race Romane (Tortereau et al., 2020). Le bon niveau d'héritabilité (0,45 en race Romane) et l'absence de corrélations phénotypiques avec les caractères de production font du RFI un indicateur privilégié pour la sélection génétique de l'efficacité alimentaire.

4. Facteurs de variation génétiques et non génétiques de l'efficacité alimentaire

Le niveau d'efficacité alimentaire peut être très variable d'un individu à l'autre. Ces différences entre individus peuvent être expliquées et influencées par des facteurs environnementaux et des facteurs biologiques. De manière simplifiée, les facteurs qui vont impacter l'efficacité alimentaire sont l'ensemble des facteurs qui vont engendrer une diminution de l'énergie nette allouée à la production.

a. Effets de l'environnement

i. Température

La température est un paramètre qui peut fortement impacter l'efficacité alimentaire des animaux domestiques. Comme nous l'avons montré précédemment (Figure 5), la thermorégulation entraîne une dépense d'énergie. Nous pouvons alors imaginer que l'élevage des ovins à de faibles températures pourrait entraîner une

baisse d'efficacité alimentaire. Li et al. (2000) ont montré que l'élevage d'agneaux à une température de 0°C entraîne une baisse d'efficacité alimentaire par rapport à un élevage dans un climat tempéré (20°C). Néanmoins le nombre d'étude à ce sujet est faible. Il est donc difficile de conclure sur l'impact de températures faibles sur l'efficacité alimentaire.

Dans le cas de températures élevées, la thermorégulation entraîne une dissipation de la chaleur. Cette dissipation de la chaleur se fait par évaporation de l'eau par les voies respiratoires et la peau. Or, ce phénomène est bien moins efficace chez le mouton en raison de la quantité de laine qui compromet la sudation (Marai et al. 2007). Ainsi, lors de l'augmentation des températures environnementales, la sudation ne permet pas de limiter l'augmentation de la température corporelle des moutons. L'augmentation de la température corporelle va être à l'origine d'une modification des fonctions biologiques de l'animal qui va entraîner une baisse d'efficacité alimentaire (Marai et al. 2007). Dans ce sens, Ponnampalam et al. (2022) ont montré dans une étude de plusieurs semaines que l'efficacité alimentaire (mesurée par FCR) chez des agneaux en croissance était impactée par la température. Ils ont observé une diminution significative de l'efficacité alimentaire (-25% à -75%) pendant les semaines où la proportion d'heures diurnes avec des températures dépassant 28°C était plus élevée (50% contre 21%) et où la proportion d'heures nocturnes où la température dépassait les 22°C était plus importante (15% contre 9%).

ii. L'alimentation

Au cours de la prise alimentaire, l'animal ingère une quantité d'énergie brute dont une partie est éliminée via les fèces sans que l'animal n'ait métabolisé cette énergie. La digestibilité d'une ration nous renseigne sur la proportion d'énergie digérée par l'animal ainsi que la proportion d'énergie excrétée par celui-ci. Les fourrages présentent de grandes variabilités de digestibilité et leur qualité peut impacter significativement l'efficacité alimentaire (Casper 2008). Plus une ration est digestible, plus l'animal assimile une grande proportion de l'énergie brute ingérée. De La Torre et al. (2019) ont ainsi montré que la forte digestibilité d'une ration entraîne une augmentation d'efficacité alimentaire chez des vaches laitières. Ils ont également montré que les animaux efficaces présentent une meilleure digestibilité de leur ration.

La densité énergétique de la ration possède également un effet sur l'efficacité alimentaire. Selon l'étude de Ilian et al. (1988), si l'on rajoute un concentré lipidique à la ration d'agneaux en croissance, leur efficacité alimentaire est améliorée. L'intensité de cette amélioration est plus marquée dans un environnement avec des températures élevées (Ilian et al. 1988). Cela est confirmé dans une étude de 2022 réalisée sur 112 agneaux (Ponnampalam et al. 2022). Cette étude a montré que l'ajout de foin avec 15% de *Camelina sativa*, une plante avec une forte concentration lipidique, dans la ration des agneaux permettait de limiter la baisse d'efficacité alimentaire (calculée avec le FCR) lors de l'augmentation des températures au cours de la période estivale (chez les agneaux de race Merinos, perte de 75% d'efficacité sans *Camelina sativa* contre une perte de 26% d'efficacité avec l'ajout de *Camelina sativa*). Cette diminution de la perte d'efficacité dans des environnements thermiques défavorables avec de fortes chaleurs, s'explique par le fait que la chaleur produite pour la digestion des graisses est moins importante que pour la digestion des glucides et des protéines (Ponnampalam et al. 2022).

Par ailleurs, plusieurs études ont permis de montrer que l'ajout de certains aliments et compléments dans la ration peut permettre d'améliorer l'efficacité alimentaire. Chez des vaches laitières en lactation, Moallem et al. (2009) ont montré que l'ajout de levures vivantes (*Saccharomyces cerevisiae*) dans la ration, à la dose de 1g pour 4kg de MSI, permet d'améliorer l'efficacité alimentaire (calculée avec le FCR) de 3,7%. Cette amélioration serait permise par une stimulation de la digestion générée par les levures. Il a également été montré que l'ajout de 20% d'*Azolla pinnata*, une algue riche en protéines, en minéraux et en probiotiques, dans la ration d'agneaux en croissance permet d'améliorer leur efficacité alimentaire, calculée avec le FCR, entraînant une diminution d'environ 20 % de ce dernier (Vahedi et al. 2021). L'ajout de monensine (un antibiotique) dans la ration alimentaire est également connu pour améliorer l'efficacité alimentaire. D'après la méta-analyse de Duffield, Merrill, Bagg (2012), l'augmentation d'efficacité alimentaire due à l'ajout de monensine dans la ration est en moyenne de 6,4 %, mais seulement de 2,5 % à 3,5 % ces dernières années.

iii. Le parasitisme

Comme nous le verrons en détail dans la partie II, le parasitisme gastro-intestinal est à l'origine d'une perte de digestibilité et d'une perte d'ingestion. À cela, peut s'ajouter le détournement de l'énergie vers l'immunité. Le parasitisme peut donc entraîner une baisse d'efficacité alimentaire comme cela a été mis en évidence dans plusieurs publications (Houdijk et al. 2017 ; Arsenopoulos et al. 2022).

b. Facteurs de variation individuels

Plusieurs facteurs biologiques sont supposés être impliqués dans les variations d'efficacité alimentaire. Une revue de la littérature de 2018 a permis de faire le point sur ces différents mécanismes (Cantalapiedra-Hijar et al. 2018). Les résultats de cette revue sont présentés succinctement ci-dessous.

i. Facteurs de variation à l'échelle de l'organisme

(1) Le stade physiologique

Les besoins énergétiques des animaux d'élevage évoluent en fonction de leur stade physiologique ainsi que du type de production et de son niveau (Nozière, Sauvant, Delaby 2018). Très peu d'études se sont intéressées à l'évolution de l'efficacité alimentaire entre différents stades physiologiques. Néanmoins, nous pouvons supposer que l'évolution des besoins énergétiques puisse modifier l'efficacité des animaux. Paganoni et al. (2017) ont étudié les corrélations génétiques et phénotypiques de l'efficacité alimentaire (déterminée par le RFI) à différents âges chez des ovins de race mérinos. Les ovins étaient étudiés au stade post sevrage, à un an et à l'âge adulte. L'étude a montré des corrélations génétiques et phénotypiques proches de 0 entre le RFI au stade post-sevrage et le RFI au stade adulte. Les corrélations génétiques et phénotypiques entre les autres âges étaient comprises entre 0,15 et 0,75. Ces résultats encouragent l'idée d'une variation de l'efficacité en fonction de l'âge. Par ailleurs, le modèle de calcul de l'efficacité alimentaire ne prend pas en compte les mêmes variables selon le stade physiologique. Par exemple, chez un animal en croissance, le calcul du RFI inclut le GMQ alors que chez la vache laitière adulte (dont la croissance est terminée), le RFI inclut la production laitière. Les deux paramètres inclus dans le modèle de l'efficacité ne sont pas nécessairement corrélés. La formule du modèle de calcul de l'efficacité peut donc également induire des différences d'efficacité alimentaire en fonction du stade physiologique.

(2) Le comportement

La prise alimentaire chez les ruminants est un processus qui est coûteux en énergie, car l'animal doit se déplacer et se tenir debout. Plusieurs études se sont intéressées au comportement alimentaire des animaux plus ou moins efficaces avec l'hypothèse que des variations dans le comportement alimentaire pouvaient être à l'origine de divergences d'efficacité alimentaire. Marie-Etancelin et al. (2019) ont montré qu'à l'échelle d'une journée, des agneaux de race Romane, avec un RFI élevé (peu efficaces) ingèrent plus d'aliments, passent plus de temps à manger et viennent plus souvent au distributeur de concentré que des agneaux avec un RFI faible (très efficaces). En revanche, les animaux peu efficaces ingèrent moins d'aliments par visite au distributeur d'aliment (Marie-Etancelin et al. 2019). Une méta-analyse réalisée en 2018 sur les bovins montre que les bovins peu efficaces, passent en moyenne 10,3 minutes de plus à s'alimenter par jour (pour une durée journalière totale moyenne d'alimentation de 93 minutes), que les bovins avec une efficacité forte (Kenny et al. 2018). Il semblerait donc que les animaux efficaces diminuent la durée de station debout associée à la prise alimentaire. Ces résultats sont malgré tout à nuancer par le fait que la plupart de ces résultats ont été obtenus avec des expérimentations en milieu confiné, et avec des distributeurs d'aliment individuels. L'évaluation du comportement alimentaire pourrait être différente avec les animaux en pâture (Kenny et al. 2018), voire en auge collective.

ii. Facteurs de variation à l'échelle de l'organe

(1) La composition corporelle

La littérature n'est pas unanime sur l'impact de la composition corporelle sur l'efficacité alimentaire. Taussat et al. (2019) ont montré qu'il existait une corrélation négative entre l'efficacité alimentaire et la graisse corporelle mesurée sur la carcasse après abattage chez des bœufs charolais. Les animaux efficaces présentaient un pourcentage de graisse corporelle inférieur de 0,62% par rapport aux animaux peu efficaces. Dans cette étude l'efficacité alimentaire était calculée par le RFI, néanmoins le modèle de calcul n'incluait pas les facteurs de composition corporelle. À l'inverse, dans une méta-analyse de 2018, Kenny et al. (2018) n'ont pas réussi à montrer de corrélation entre l'efficacité alimentaire et la composition corporelle. L'efficacité alimentaire était calculée par le RFI, mais le modèle de calcul n'incluait pas les facteurs

de composition corporelle. Ces différences de résultats pourraient s'expliquer par les variations de conditions expérimentales entre les études et par les différentes équations utilisées pour calculer le RFI.

(2) La taille des viscères

Par ailleurs, la taille des organes viscéraux pourrait être corrélée à l'efficacité alimentaire. Plusieurs études ont montré une corrélation phénotypique entre l'efficacité alimentaire et la taille des organes viscéraux. Taussat et al. (2019) ont montré chez des taureaux sélectionnés sur l'efficacité alimentaire, une corrélation positive entre le RFI, la taille des intestins, la taille du foie et des reins. Les animaux efficaces présentaient donc des tailles d'intestins, de foie et de reins plus faibles que les animaux peu efficaces. Aussi, Fitzsimons, Kenny, McGee (2014) ont identifié chez des taureaux efficaces un poids à vide du réticulo-rumen 8% plus faible que chez les animaux peu efficaces. Chez des agneaux en croissance de la race Hu, Zhang et al. (2017) ont montré que les animaux efficaces présentaient une taille (mesurée en poids) de duodénum (+1g environ) plus importante associée à une taille de rumen plus petite (-40g environ) que les animaux peu efficaces. Ils ont également montré un poids du foie (-60g environ), de poumons (-30g environ) et des reins (-5g environ) plus faible que chez les animaux efficaces par rapport aux animaux peu efficaces. À l'exception des observations sur la taille de l'intestin, les résultats de ces études sont cohérents. L'hypothèse pour expliquer les différences de taille de poumons, foie et reins sont une consommation énergétique moins importante associée à un métabolisme basal moins important chez les animaux efficaces. Aussi, l'hypothèse pour expliquer la petite taille du rumen, est une consommation alimentaire plus faible associée à une capacité d'absorption plus importante chez les animaux efficaces par rapport aux animaux moins efficaces.

(3) La digestibilité et les émissions de méthane

Plusieurs études ont montré un lien entre la digestibilité et l'efficacité alimentaire. À ration équivalente, De La Torre et al. (2019) ont montré chez des vaches allaitantes, que les individus plus efficaces présentent une meilleure digestibilité que les individus moins efficaces. Si la digestibilité est moins bonne, alors l'énergie nette associée à la ration est moins importante et donc par extension, l'énergie dédiée à la production est moins importante également.

Par ailleurs, il pourrait y avoir un lien entre efficacité alimentaire et émissions de méthane. La production de méthane par les ruminants est un déchet de la fermentation des glucides par les micro-organismes du rumen (Vermorel 1995). La production de méthane est corrélée positivement avec l'ingestion alimentaire. Les animaux efficaces, qui ingèrent moins d'aliments, devraient théoriquement émettre moins de méthane. Pourtant, plusieurs études trouvent des résultats inverses (Paganoni et al. 2017 ; Sepulveda et al. 2022). Selon Cantalapiedra-Hijar et al. (2018), la production de méthane plus importante chez les animaux efficaces pourrait être dû en partie au fait que l'augmentation de la digestibilité chez les animaux efficaces est induite par un temps de séjour dans le rumen plus long associé une proportion plus importante de substrat disponible pour la formation de méthane.

(4) Le microbiote ruminal

Des différences de microbiote ruminal ont été identifiées entre les animaux efficaces et les animaux peu efficaces. Certaines bactéries ont été identifiées en plus grandes proportions dans les rumens des animaux efficaces, notamment *Succinivibrio* sp. qui pourrait avoir un effet limitant sur la méthanogenèse par consommation de l'hydrogène (Hernandez-Sanabria et al. 2012). En revanche, les diversités globales de populations microbiennes dans le rumen des animaux efficaces semblent être plus limitées que chez les animaux peu efficaces, avec une proportion de bactéries méthanogènes moins importante. Ces informations sont à nuancer, car on ignore encore si ces modifications de populations microbiennes sont secondaires à la faible ingestion des animaux efficaces ou si elles confèrent le caractère efficace à l'animal (Cantalapiedra-Hijar et al. 2018). Toutefois, chez des agneaux de race Romane, aucune différence de microbiote ruminal n'a été observée entre des agneaux sélectionnés pour une meilleure ou une moindre efficacité alimentaire (Le Graverand et al., 2023).

iii. Facteurs de variation à l'échelle cellulaire et moléculaire

(1) L'énergie dédiée à la production

La variation d'efficacité alimentaire pourrait également s'expliquer par la modification de la répartition de l'énergie au sein de l'organisme pour favoriser l'énergie nette de production (Herd, Arthur 2009) (Figure 5). Malgré un nombre faible

d'études, il a été montré que les animaux efficaces présentent des besoins d'entretien plus faibles. Lawrence et al. (2012) ont montré que des génisses avec un faible RFI (donc efficaces) avaient des besoins énergétiques d'entretien 0,18 fois plus faibles que ceux des génisses à fort RFI. L'énergie destinée à l'entretien était estimée dans une période où la composition corporelle entre les génisses était similaire. Cette énergie d'entretien était calculée par la régression linéaire du GMQ (g/kg de poids métabolique) en fonction de l'énergie nette ingérée (Unité Fourragère Lait (UFL)/Kg de poids métabolique). Dans cette étude, il était considéré, qu'un animal qui ne change pas de poids est en entretien, l'énergie destinée à l'entretien correspondait à la valeur de l'énergie nette (abscisse) quand le GMQ (l'ordonnée) prenait la valeur 0. Néanmoins dans ce calcul, l'efficacité digestive était considérée comme similaire chez toutes les génisses et les dépenses liées à la thermorégulation, le mouvement volontaire et l'immunité étaient négligés. On peut néanmoins dire que, dans cette étude, les génisses efficaces allouaient moins d'énergie à des dépenses autres que pour la production comparativement aux génisses peu efficaces.

(2) Différences mitochondriales

Des modifications à l'échelle cellulaire ont également été identifiées selon les niveaux d'efficacité des animaux. La première divergence se trouve au niveau mitochondrial. Pour rappel, les mitochondries assurent la production d'énergie sous forme d'Adenosine Triphosphate (ATP) par le biais de la phosphorylation oxydative. Cette phosphorylation oxydative se produit au sein des chaînes de transport d'électrons présentes dans la membrane interne de la mitochondrie. La phosphorylation oxydative peut être perturbée par deux éléments :

- La protéine UCPC1 présente dans les tissus adipeux qui va bloquer la phosphorylation oxydative.
- La formation d'un ion superoxyde qui va perturber la production d'ATP. Ce phénomène peut se produire en cas d'une perméabilité trop importante de la membrane mitochondriale.

Tout d'abord, il a été identifié que la perméabilité de la membrane mitochondriale est moins importante dans les cellules musculaires et du foie chez les bovins efficaces, ce qui limite la formation d'ions superoxydes et donc permet de produire plus d'ATP (Clemson et al. 2011 ; Lancaster et al. 2014). Des résultats

similaires ont été obtenus chez les ovins (Sharifabadi et al. 2012). Il a également été identifié, chez les agneaux efficients, que les protéines de la chaîne de transport d'électrons présentent une activité plus importante (Cantalapiedra-Hijar et al. 2018). Aussi, La transcription de gènes impliqués dans la favorisation de la phosphorylation oxydative est plus importante chez les animaux efficients (Kong et al., 2016). Enfin, chez des agneaux de race Romane, l'étude par résonance magnétique nucléaire du plasma a montré des différences de teneurs en citrate et malate entre des agneaux efficients et peu efficients, ce qui indiquerait que la production d'énergie par les mitochondries pourrait expliquer en partie des différences d'efficience alimentaire (Touitou et al., 2022).

(3) Le métabolisme protéique

Un autre facteur de variation de l'efficience alimentaire pourrait être le métabolisme protéique. Le métabolisme protéique est un équilibre entre la quantité de protéines produites par l'organisme et la quantité de protéines dégradées. Le renouvellement des protéines est un processus coûteux en énergie pour l'animal, mais fondamental pour le bon fonctionnement de l'organisme. Il permet notamment d'assurer la disponibilité des acides aminés et d'assurer la réparation cellulaire. Il a été montré que jusqu'à 94% de la synthèse protéique chez les bovins en croissance serait dédiée à contrebalancer la dégradation des protéines (Lobley 2003). La synthèse des protéines étant un processus coûteux énergétiquement pour l'animal, on en déduit que si l'on parvient à augmenter la proportion de protéines produites par rapport à la quantité de protéines dégradées, alors on améliore l'efficience alimentaire.

Selon la littérature, il semblerait que les animaux efficients aient un ratio synthèse protéique sur dégradation des protéines supérieur aux animaux peu efficients, et que cela soit principalement dû à une baisse de la dégradation des protéines. En effet, chez des agneaux de race Romane avec des niveaux d'efficience alimentaire variables, l'étude du plasma par résonance magnétique nucléaire a permis de mettre en évidence des différences de teneurs en acides aminés dans le plasma selon le niveau d'efficience des animaux. Cela qui indique que le renouvellement protéique pourrait expliquer en partie des différences d'efficience alimentaire (Touitou et al. 2022). Néanmoins, ces résultats sont à nuancer, car le nombre d'études est limité (Cantalapiedra-Hijar et al. 2018).

(4) *Le système hormonal*

Le métabolisme étant sous la dépendance du système hormonal, l'influence des hormones sur l'efficacité alimentaire paraît évidente. Dans ce sens, plusieurs travaux ont concerné l'influence des hormones de l'axe somatotrope sur l'efficacité alimentaire (Brown 2006 ; Moore et al. 2005). L'axe somatotrope est un axe hormonal qui permet, par l'intermédiaire de différentes hormones (IGF-1, hormone de croissance), de réguler le métabolisme et de stimuler la croissance des individus. Certaines études ont également étudié l'influence de la leptine et du cortisol qui régulent le métabolisme (Richardson et al. 2004 ; Montanholi et al. 2010). Pour le moment, les résultats de ces travaux n'ont pas permis d'établir de lien clair entre l'influence des différentes hormones et l'efficacité alimentaire. Les résultats de ces expériences demeurent inconsistants. Cela pourrait s'expliquer par les interactions entre le système hormonal des individus et les diverses conditions expérimentales comme l'alimentation ou le stade physiologique (Cantalapiedra-Hijar et al. 2018).

c. Héritabilité de l'efficacité alimentaire

Dans les paragraphes précédents, nous avons mis en évidence les différents mécanismes biologiques permettant d'expliquer les variations inter-individuelles d'efficacité alimentaire. Ces mécanismes sont au moins partiellement déterminés génétiquement. L'héritabilité est un coefficient compris entre 0 et 1 qui permet d'estimer la proportion de variation phénotypique d'un caractère qui est expliquée par la part génétique. Tortereau et al. (2020), dans une expérimentation se déroulant de 2008 à 2016, ont montré que l'héritabilité de l'efficacité alimentaire (RFI) était de $0,45 \pm 0,08$ chez des agneaux de race Romane avec une alimentation 100% concentré. Cela signifie que 45% de la variabilité du RFI était déterminée par la génétique. Cette assez forte héritabilité permet de conduire des schémas de sélection efficaces. Nous discuterons ces schémas de sélection dans la partie III. Tortereau et al. (2020) montrent également que la sélection de béliers efficaces sur le RFI octroie une efficacité alimentaire supérieure à leur descendance. Pour les mêmes caractères de croissance, les agneaux issus de ces béliers efficaces consomment 3 % d'aliments en moins par jour. Aussi, l'héritabilité de l'efficacité alimentaire dépend de la méthode de mesure de l'efficacité alimentaire choisie, en effet le FCR présente une héritabilité de $0,30 \pm 0,08$ chez la race romane (Tortereau et al. 2020).

5. Synthèse des points essentiels

L'efficacité alimentaire des animaux d'élevage est un caractère clé qui peut être amélioré pour optimiser l'utilisation des ressources alimentaires en permettant de réduire les coûts et l'impact environnemental. Économiquement, elle permet de diminuer les coûts de production en réduisant la quantité de nourriture nécessaire, ce qui est particulièrement pertinent dans un contexte de fluctuations des prix des aliments et du carburant. Écologiquement, elle contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le taux de conversion alimentaire (FCR) et la consommation moyenne résiduelle (RFI), sont deux critères permettant d'évaluer cette efficacité alimentaire. Le FCR, bien que simple à utiliser, n'est pas conseillé en sélection génétique. Le RFI, en revanche, est un indicateur plus courant en sélection génétique, principalement du fait des faibles corrélations génétiques avec les caractères de production.

Plusieurs facteurs influencent l'efficacité alimentaire, notamment les conditions environnementales (température), la composition et la qualité de l'alimentation, ainsi que le parasitisme gastro-intestinal. Des mécanismes biologiques, comme le stade physiologique et le comportement alimentaire, jouent également un rôle crucial. La variabilité génétique permet également d'expliquer la variabilité d'efficacité alimentaire au sein d'une population.

En conclusion, l'amélioration de l'efficacité alimentaire est essentielle pour garantir la durabilité économique et écologique des productions animales. La compréhension approfondie des facteurs influençant cette efficacité et la sélection génétique dont nous discuterons en partie III permettront dans les années à venir d'obtenir une production animale plus responsable et plus rentable. Actuellement, dans la filière ovine, l'efficacité alimentaire est principalement étudiée chez les agneaux en croissance. Un des intérêts de ce travail est d'élargir cette étude à l'efficacité alimentaire chez les brebis allaitantes en production, afin de mieux comprendre et optimiser leur performance alimentaire dans un contexte de production réelle.

II. Le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins

Le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins est une affection avec une forte prévalence et un impact économique très important. Les agents responsables sont multiples, les différentes espèces parasitaires impliquées peuvent être divisées en différents embranchements.

Le premier embranchement d'intérêt est celui des Nématelminthes. Les Nématelminthes sont des vers ronds non segmentés. Au sein de cet embranchement, on retrouve l'ordre des Strongylida. C'est au sein de cet ordre que l'on retrouve la famille des Trichonstrongylidae. Il s'agit de la famille de parasites gastro-intestinaux avec le plus fort impact sur les productions. Les parasites de cette famille sont communément appelés "strongles gastro-intestinaux". Les trichostrongyloses sont des maladies parasitaires non contagieuses, mais transmissibles par voie oro-fécale par ingestion de larves de stade 3 (L3 ; Roeber, Jex, Gasser 2013).

Le deuxième embranchement est celui des Plathelminthes dans lequel on retrouve des vers "plats". Au sein de cet embranchement, on retrouve deux classes de parasites impliquées dans le parasitisme gastro-intestinal :

- Les Trématodes sont des vers plats non segmentés. On retrouve des trématodes hépatiques (*Fasciola hepatica* et *Dicrocoelium lanceolatum*) et un trématode localisé au stade adulte dans le rumen et le réseau : *Calicophoron* spp.
- Les Cestodes. Au sein de cette classe, on retrouve les vers plats segmentés, particulièrement *Moniezia* spp qui affecte de manière clinique principalement les agneaux.

Le troisième embranchement est celui des protozoaires. Les espèces principales sont les coccidies du genre *Eimeria*. Il en existe de nombreuses espèces. Les coccidies sont très prévalentes. On estime que 80 à 90% des élevages français présentent des infestations par les coccidies.

Il existe donc une multitude de parasites gastro-intestinaux chez le mouton. Dans ce travail, nous nous intéresserons uniquement aux strongles gastro-intestinaux qui ont une prévalence et des conséquences économiques et cliniques importantes.

1. Biologie des strongles gastro-intestinaux

a. Le cycle parasitaire

Les strongles digestifs sont des parasites à l'origine de maladies souvent saisonnières, généralement contractés à l'extérieur pendant la saison de pâturage. Ces infestations parasitaires sont particulièrement problématiques chez les jeunes animaux en première saison de pâture, car leur immunité n'est pas encore développée. Les animaux adultes sont moins sensibles.

Les strongles gastro-intestinaux possèdent un cycle de vie direct. C'est-à-dire qu'ils ne parasitent qu'un seul hôte au cours de leur cycle de vie. Ce cycle de vie se divise donc en deux phases, une phase dite libre qui correspond à la phase de développement du parasite dans le milieu extérieur, et une phase endogène qui correspond à la phase de développement et de reproduction du parasite à l'intérieur de son hôte. Le cycle de développement du parasite, présenté en Figure 5, commence par le stade œuf, suivi par cinq stades larvaires qui aboutissent ensuite au stade adulte.

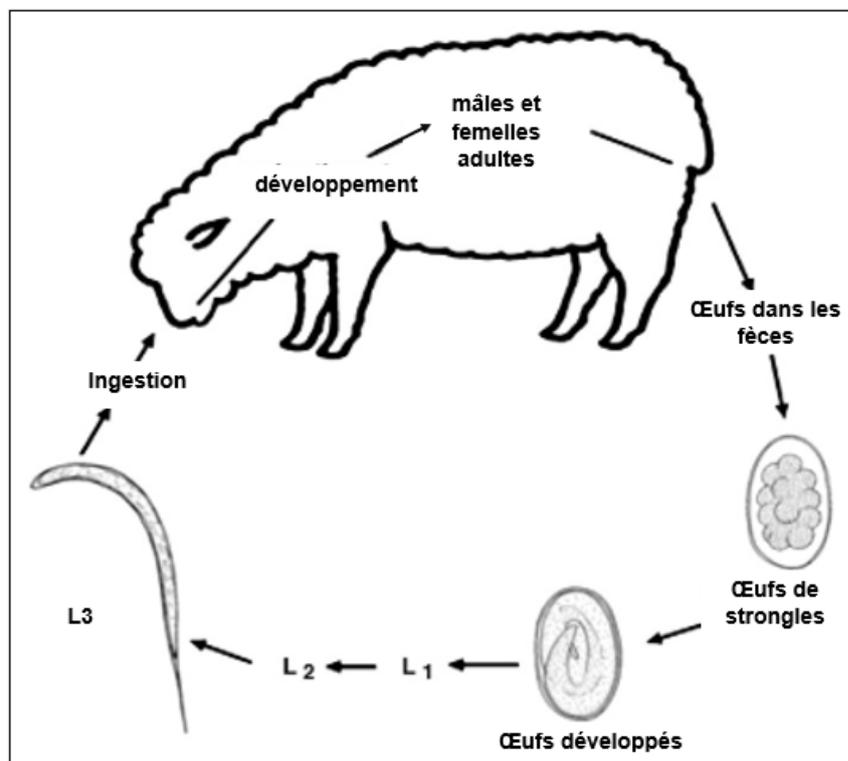


Figure 5: Cycle parasitaire des strongles gastro-intestinaux. Figure extraite de Roeber, Jex, Gasser (2013).

i. La phase exogène

Lorsqu'un animal est parasité par des strongles gastro-intestinaux, les parasites adultes se reproduisent au sein de son tube digestif. Cette reproduction aboutit à la libération d'œufs dans le milieu extérieur via les fèces. C'est le début de la phase libre du parasite. Cette phase se déroule en grande partie au sein des fèces.

Une larve de premier stade (L1) va se développer dans l'œuf puis éclore un à deux jours après l'expulsion de l'œuf dans les fèces (Roeber, Jex, Gasser 2013). Après éclosion, le développement des formes libres parasitaires se poursuit avec la formation d'une larve de deuxième stade suivi d'une larve de troisième stade (L3), qui est la forme infestante. Le genre *Nematodirus* constitue une exception, car les stades larvaires de ces parasites évoluent au sein de l'œuf qui n'écloie qu'après formation de la larve L3 (Zajac 2006).

Le développement jusqu'au stade infestant des strongles gastro-intestinaux est permis à des températures comprises entre 10 et 36°C, mais cela est variable selon les espèces (Zajac 2006). En effet, les stades précédant le stade L3 sont assez sensibles au froid et à la dessiccation. En revanche, le stade infestant (L3) est plus résistant au froid, mais pas au gel. Des persistances de plusieurs mois dans des eaux à 3°C sont décrites pour le stade L3 (Morgan, van Dijk 2012). Une fois le stade L3 atteint, la larve doit être ingérée par l'hôte pour poursuivre son développement. À la faveur d'une période de pluie, les larves L3 migrent hors des excréments. Elles peuvent migrer latéralement et verticalement de manière plus ou moins importante. Par exemple, les larves L3 d'*Haemonchus contortus* peuvent migrer jusqu'à 90 cm de leur position de départ bien qu'elles restent généralement à environ 10 cm de cette position. Ce phénomène implique de ne pas faire surpâturer pour éviter des infestations importantes (Zajac, Garza 2020).

ii. La phase endogène

À la faveur d'une prise alimentaire, la larve infestante est ingérée par l'hôte définitif. C'est le début de la phase endogène. La larve L3 infestante va ensuite migrer dans la muqueuse digestive (caillette ou intestin grêle), dans laquelle elle évolue en larve L4. Après 1 à 2 mues (selon les espèces), la larve sort de la muqueuse digestive puis évolue jusqu'au stade adulte dans la lumière du tube digestif de l'hôte (Taylor, Coop, Wall 2015). Après la reproduction sexuée, la femelle parasite adulte peut

excréter des œufs. Le délai entre l'ingestion de la larve infestante par l'animal parasité et l'excrétion des œufs de parasites dans les fèces de ce même animal est appelé la période pré-patente. Cette période est de 15 à 21 jours pour la plupart des espèces de strongles (Vlassoff, Leathwick, Heath 2001).

b. Le phénomène d'hypobiose

Le phénomène d'hypobiose est un phénomène que l'on observe chez la majorité des espèces de strongles gastro-intestinaux. Chez les ovins, ce phénomène est bien décrit pour *Haemonchus contortus*, et surtout pour *Teladorsagia circumcincta* qui peut provoquer des maladies cliniques chez les agneaux notamment (Taylor, Coop, Wall 2015). L'hypobiose correspond à l'interruption du développement du parasite au sein de son hôte lorsque les conditions de ce développement ne sont plus favorables. L'hypobiose intervient généralement au début du stade L4, mais peut également se produire au stade L3 (Eysker 1978). Ce phénomène intervient lorsque les conditions climatiques sont défavorables, notamment durant les périodes hivernales en France (Tariq 2015). Après une période d'hypobiose, le parasite reprend son cycle de développement classique (fin d'hiver-début de printemps classiquement en France), pour se développer en parasite adulte, lorsque les conditions environnementales deviennent plus favorables pour assurer la pérennité des formes larvaires libres (Tariq 2015).

2. Les principaux strongles gastro-intestinaux et signes cliniques associés

Plusieurs espèces de strongles gastro-intestinaux ont été identifiées chez le mouton (Tableau 1) et les animaux sont généralement infestés par plusieurs espèces en même temps. Nous présenterons les trois espèces avec la plus forte prévalence et l'impact clinique le plus important en nous focalisant principalement sur *Haemonchus contortus* (Taylor, Coop, Wall 2016).

Tableau 1: Tableau récapitulatif des principaux nématodes parasites gastro-intestinaux du mouton.
Tableau extrait de Roeber, Jex, Gasser (2013).

Famille	Espèce	Longueur (mm)	Caractéristiques morphologiques	Période pré-patente (jours)	Localisation dans l'hôte
Trichostrongylidae	<i>Haemonchus contortus</i>	♂ 10-20 ♀ 18-30	Liquide pseudo-coelomique rouge et blanc, utérus enroulé donnant l'apparence d'un "mât de barbier". Présence d'un repli vulvaire chez les femelles variable selon les souches.	18-21	Abomasum
	<i>Teladorsagia circumcincta</i>	♂ 7-8 ♀ 10-12	Petite tête et cavité buccale. Chez les femelles, un repli vulvaire peut être présent.	15-21	Abomasum ou partie antérieure de l'intestin grêle
	<i>Trichostrongylus axei</i>	♂ 2-6 ♀ 3-8	Spicules différents, de longueurs inégales.	15-23	Partie antérieure de l'intestin grêle
	<i>T. colubriformis</i>	♂ 4-8 ♀ 5-9	Spicules de même longueur, avec une extrémité triangulaire.	15-23	Partie antérieure de l'intestin grêle
	<i>T. vitrinus</i>	♂ 4-7 ♀ 5-8	Spicules de même longueur, avec une extrémité pointue.	15-23	Partie antérieure de l'intestin grêle
	<i>T. rugatus</i>	♂ 4-7 ♀ 6-7	Spicules différents, avec une apparence en forme de pied.	15-23	Partie antérieure de l'intestin grêle
	<i>Cooperia curticei</i>	♂ 4-5 ♀ 5-6	Cuticule présentant des stries transversales chez toutes les espèces. Posture corporelle caractéristique en "ressort de montre" et présence d'une petite vésicule céphalique.	14-15	Partie antérieure de l'intestin grêle
Molineidae	<i>Nematodirus spathiger</i>	♂ 10-19 ♀ 15-29	Petite vésicule céphalique distincte. Très longs spicules se terminant par une pièce en forme de cuillère.	18	Intestin grêle
	<i>N. filicollis</i>	♂ 10-15 ♀ 15-20	Petite vésicule céphalique distincte. Spicules longs et minces, avec une ampoule céphalique séparable.	18	Intestin grêle
Ancylostomatidae	<i>Bunostomum trigonocephalum</i>	♂ 12-17 ♀ 19-26	Extrémité antérieure incurvée dorsalement. Capsule buccale avec deux lames coupantes.	40-70	Intestin grêle
Chabertiidae	<i>Oesophagostomum columbianum</i>	♂ 12-16 ♀ 14-18	Possède deux couronnes de lames et une capsule buccale peu profonde. Position des papilles cervicales utilisée pour la différenciation des espèces.	40-45	Gros intestin

Famille	Espèce	Longueur (mm)	Caractéristiques morphologiques	Période pré-patente (jours)	Localisation dans l'hôte
	<i>O. venulosum</i>	♂ 11-16 ♀ 13-24	Les papilles cervicales sont situées postérieurement à l'œsophage.	40-45	
	<i>Chabertia ovina</i>	♂ 13-14 ♀ 17-20	Bouche dirigée antéro-ventralement. Capsule buccale subglobuleuse, sans dents.	42-50	

a. *Haemonchus contortus*

i. Généralités

Chez les ovins, l'espèce la plus prévalente est *Haemonchus contortus* (Santos et al. 2014). C'est un parasite localisé au stade adulte dans la caillette de la majorité des ruminants et des camélidés (Taylor, Coop, Wall 2015). À l'origine, ce parasite était présent dans des zones de climats chauds et tropicaux. Les conditions optimales de développement des stades libres sont une température ambiante de 22 à 26°C, avec un seuil minimal de développement à 8°C, et une humidité proche de 100% (O'Connor, Walkden-Brown, Kahn 2006). Ces dernières décennies, cette espèce a vu son aire de répartition considérablement augmenter, probablement en raison du réchauffement climatique et des déplacements des animaux (Skuce, Innocent, Bartley 2014). Aujourd'hui, ce parasite possède une forte prévalence en Europe (Rose et al. 2016). En 2012, une enquête a montré que ce parasite était présent dans 50% des exploitations ovines du Royaume-Uni (Burgess et al. 2012).

Haemonchus contortus est un parasite hématophage de grande taille. À l'état adulte, la femelle mesure 18 à 30 mm et le mâle 10 à 20 mm (Roeber, Jex, Gasser 2013). Les formes larvaires L3 et L4, ainsi que les adultes, se développent dans la caillette des ovins. Ce sont uniquement les formes adultes et les formes larvaires de stade L4 qui sont hématophages (Zajac 2006). Elles peuvent provoquer des anémies marquées. Par exemple, les vers adultes les plus gros sont capables d'ingérer jusqu'à 30 µL de sang par jour (Emery, Hunt, Le Jambre 2016). Sa période pré-patente de 17 à 21 jours et sa durée de survie au stade adulte au sein de son hôte est de quelques mois, mais cela peut être plus dans certaines circonstances (Zajac, Garza 2020). Ce sont des parasites très prolifiques, une femelle peut pondre environ 5000 à 15000

œufs par jour (Emery, Hunt, Le Jambre 2016). Ces caractères de prolificité importante et de pathogénicité en font un bon modèle pour l'étude du parasitisme gastro-intestinal chez le mouton. C'est pour ces raisons que nous utiliserons ce parasite pour notre étude.

ii. Signes cliniques

Les signes cliniques observés lors d'haemonchose sont principalement dus à l'hématophagie et à la destruction de la muqueuse gastrique associée. Les signes cliniques peuvent apparaître 10 à 12 jours après une infestation importante (Arsenopoulos et al. 2021). L'hématophagie est à l'origine d'une perte de sang et de protéines pour l'animal. Cela peut entraîner de la léthargie, un manque d'appétit, une augmentation de la prise de boisson, une tachycardie, une augmentation de la fréquence respiratoire. On peut également observer une diminution de la consistance des selles et une pâleur des muqueuses due à l'anémie (Iliev et al. 2017).

L'haemonchose peut prendre différentes formes cliniques selon le nombre de parasites, l'âge, la taille et le statut immunitaire de l'hôte. On distingue trois formes cliniques de la maladie. La forme hyper-aigüe, aigüe ou chronique :

La forme hyper-aigüe entraîne la mort très rapide de l'animal. C'est une forme rare. Elle est secondaire à une présence larvaire très importante (environ 30 000). Ces larves vont prélever une quantité de sang très importante (0,2 à 0,6 L par jour). Il est supposé que la mort soit secondaire à un choc hypovolémique. Cette forme est plus souvent observée chez les jeunes animaux non immunisés (Flay, Hill, Muguiro 2022).

La forme aigüe se retrouve chez des animaux moins parasités (2000 à 20 000 parasites). Elle est à l'origine d'une anémie plus progressive que dans la forme hyper-aigüe. Cette progressivité permet la mise en place d'une érythropoïèse compensatoire, la mort est donc moins brutale mais inéluctable en l'absence de traitement. Les signes cliniques sont les signes associés à l'anémie (muqueuses pâles, abattement, tachycardie). Les pertes de sang sont à l'origine d'une perte de fer. La perte de fer, si elle est trop importante, peut mener à l'apparition d'une anémie ferriprive. La forme aigüe de l'haemonchose est également associée à une perte de protéines. Cette perte s'explique par la destruction de la muqueuse gastrique, mais également par la perte de sang (Flay, Hill, Muguiro 2022). Cette hypoprotéïnémie peut être à l'origine d'un

œdème sous-cutané généralisé. On peut également parfois observer le “signe de la bouteille” (“*bottle jaw*”) qui est un œdème sous-glossien (Arsenopoulos et al. 2021).

La forme chronique de l'haemonchose est plus discrète. Cette forme se manifeste par des pertes de productions (baisse de croissance, de production laitière), un mauvais état corporel, une perte de poids (Flay, Hill, Muguiro 2022). L'haemonchose chronique peut devenir clinique à la faveur d'une immunodépression.

b. Teladorsagia circumcincta

Teladorsagia circumcincta est un parasite de la caillette des petits ruminants. Ce strongle possède une forte prévalence en Europe, car il est mieux adapté aux températures plus douces qu'*Haemonchus contortus* (O'Connor, Walkden-Brown, Kahn 2006). Ce parasite se développe dans les glandes de la caillette. Il induit une distension de ces glandes associée à un épaissement de la muqueuse. Les cellules glandulaires lésées sont renouvelées avec des cellules non différenciées ce qui entraîne des perturbations de la digestion de l'hôte (Taylor, Coop, Wall 2015).

La pathogénie de *Teladorsagia circumcincta* est à relier avec la carence en protéines que ce parasite occasionne chez son hôte. Cette carence possède quatre origines (Stear et al. 2003) : une perte d'appétit, une moins bonne digestion des protéines, une perte de protéines secondaire aux lésions engendrées par le parasite, une augmentation des besoins en protéines de l'hôte en raison de l'infection.

On distingue deux formes cliniques de la teladorsagiose :

La teladorsagiose de type 1 est une forme de la maladie qui apparaît en cours de saison de pâturage, lorsque le niveau d'infestation est important. L'animal présente une diarrhée profuse, de l'anorexie, une perte de poids, de la déshydratation (Jackson, Coop 2007).

La teladorsagiose de type 2 est une forme aiguë à subaiguë associée à la sortie d'hypobiose d'un nombre important de larves ; classiquement en fin d'hiver-début de printemps en France. Les animaux infestés présentent des diarrhées par intermittence et des diminutions de score corporel (Jackson, Coop 2007).

c. Trichostrongylus colubriformis

Trichostrongylus colubriformis est un ver parasite qui se développe dans l'intestin grêle des ruminants. Comme *Teladorsagia circumcincta*, c'est un parasite qui est mieux adapté aux climats tempérés qu'*Haemonchus contortus*. Il possède une forte prévalence dans les pays de l'hémisphère nord (O'Connor, Walkden-Brown, Kahn 2006). Il existe d'autres espèces du genre *Trichostrongylus* affectant le mouton mais nous présentons ici, uniquement l'espèce avec la plus forte prévalence.

Les larves de *Trichostrongylus colubriformis* se développent au sein de la muqueuse intestinale. Ce développement est à l'origine de lésions de l'épithélium intestinal. Cela entraîne des pertes de sang et de protéines. L'infestation peut occasionner une perte de poids, de la diarrhée noirâtre (présence de sang) et également des pertes de production (Taylor, Coop, Wall 2015).

3. La réponse de l'hôte

Lorsque l'hôte est infesté, une immunité se met en place pour tenter d'éliminer le parasite et de limiter son impact. Le développement de cette immunité dépend de trois facteurs : la génétique de l'animal, le type de parasite et l'intensité de l'infestation (McRae et al. 2015). Nous présentons ici la réponse immunitaire de l'hôte en distinguant les réponses qui dépendent de l'immunité innée et adaptative.

a. L'immunité innée

L'immunité innée est la réponse immunitaire présente chez l'intégralité des individus, et qui ne nécessite pas d'immunisation préalable. La première barrière pour lutter contre le parasitisme est le mucus gastro-intestinal. Le mucus est une substance visqueuse que l'on retrouve au niveau des épithéliums muqueux des mammifères. Au sein du tube digestif, ce mucus est produit par les cellules à mucus dans l'estomac et par les cellules caliciformes dans l'intestin (Scott et al. 2017). On attribue trois rôles principaux au mucus digestif : la lutte contre les agents physiques et chimiques, la lubrification de la muqueuse pour faciliter l'absorption intestinale, et l'élimination des parasites (Miller 1987). Le mucus est composé de glycoprotéines, notamment les mucines qui lui confèrent sa consistance visqueuse. Lors d'une infestation, le parasite doit traverser le mucus pour atteindre la paroi du tube digestif.

Par ailleurs, l'immunité innée est assurée par un système de reconnaissance du soi et du non-soi. Il s'agit des "*Pattern Recognition Receptor*" (PRR), présents à la

surface ou à l'intérieur des cellules de l'immunité innée. Parmi ces cellules de l'immunité innée, on retrouve les cellules d'origine hématopoïétique (les macrophages, les neutrophiles, les basophiles, les éosinophiles, les mastocytes, les cellules dendritiques, les cellules NK, les cellules NK T) et les cellules non hématopoïétiques (cellules épithéliales) (Turvey, Broide 2010). Ces PRR sont capables de reconnaître différents marqueurs moléculaires et d'initier une réponse inflammatoire dans le cas d'une attaque parasitaire. On a identifié des types de PRR nommés les "*Toll-Like Receptor*" (TLR) et les "*C-type Lectin-like Receptors*" (CLR), qui pourraient être impliqués dans la reconnaissance des parasites gastro-intestinaux. Il a été identifié que les gènes codant pour l'expression de TLR étaient exprimés de manière plus importante dans les cellules de la muqueuse intestinale chez les moutons sélectionnés pour la résistance au parasitisme gastro-intestinal (McRae et al. 2015).

Il existe différents types de marqueurs reconnaissables par les PRR. Les plus importants dans le cas du parasitisme gastro-intestinal sont les "*Pathogen-Associated Molecular Pattern*" (PAMP). Ce sont des motifs moléculaires conservés chez un grand nombre d'agents pathogènes (les parasites par exemple). Les seconds marqueurs sont les "*Damage-Associated Molecular Pattern*" (DAMP). Ce sont des motifs moléculaires exprimés par les cellules du soi endommagées. Enfin, les PRR sont également capables de détecter l'absence d'expression des motifs moléculaires normalement exprimés par les cellules du soi (Turvey, Broide 2010).

Lors de l'infestation parasitaire, le parasite va causer une brèche dans la muqueuse digestive. Les antigènes parasitaires (PAMP) vont être reconnus par les cellules immunitaires innées par le biais des PRR. Ces cellules immunitaires innées vont libérer des cytokines et des médiateurs de l'inflammation, sur le site de la brèche digestive. Cela va permettre le recrutement des mastocytes. Les mastocytes sont des cellules de l'immunité innée impliquées dans l'hypersensibilité de type 1 (souvent communément appelée "allergie"). Le recrutement des mastocytes entraîne leur dégranulation, qui entraîne elle-même une hypersensibilité de type 1. L'hypersensibilité de type 1 va entraîner une augmentation de la sécrétion de mucus intestinal, une augmentation de la contractilité des fibres musculaires lisses, ainsi qu'une augmentation de la perméabilité vasculaire au site de la brèche (McRae et al. 2015).

Les mastocytes produisent également des cytokines TH2 qui vont favoriser le recrutement des cellules immunitaires innées et notamment les éosinophiles (McRae et al. 2015). Les éosinophiles sont impliqués dans l'immobilisation des larves de parasites et leur destruction (Rainbird, Macmillan, Meeusen 1998). Un lien entre la résistance au parasitisme et la quantité d'éosinophiles tissulaires est fortement suspecté (McRae et al. 2015).

b. L'immunité adaptative

L'immunité adaptative se déroule de manière conjointe avec l'immunité innée. Lors de la pénétration du parasite dans la muqueuse digestive, les cellules présentatrices d'antigènes migrent vers les ganglions lymphatiques locorégionaux. Au sein du ganglion lymphatique, les lymphocytes T naïfs vont être activés par les cellules présentatrices d'antigène. Cette activation va permettre la différenciation des lymphocytes T (Figure 6). Il existe trois types de lymphocytes T avec des fonctions différentes : les lymphocytes TCD8+, les lymphocytes T CD4+ régulateurs (Treg), et les lymphocytes TCD4+ auxiliaires. Les lymphocytes TCD4+ auxiliaires se différencient en lymphocytes Th1, Th2 ou Th17 selon les cytokines qu'ils produisent (McRae et al. 2015).

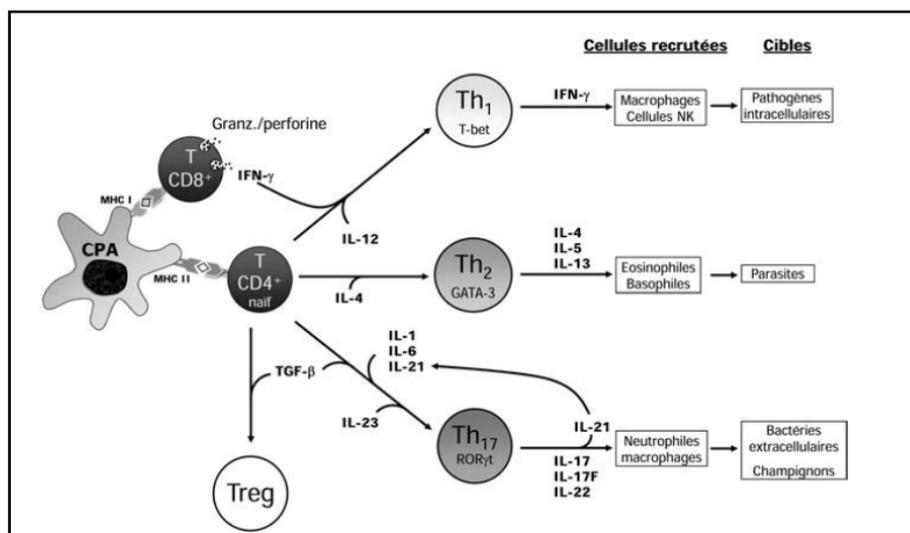


Figure 6: Différenciation des lymphocytes T. Figure extraite de Vokaer, Charbonnier, Le Moine (2011).

Les infestations parasitaires sont à l'origine d'une réponse immunitaire de type Th2. Les cellules Th2 produisent des cytokines qui vont moduler la réponse immunitaire et entraîner l'infiltration des tissus par les basophiles, les éosinophiles et les mastocytes. Parmi ces cytokines, l'IL-4 va stimuler la production d'anticorps par les

lymphocytes B qui sont préalablement activés par contact avec l'antigène. Les lymphocytes B produisent notamment des IgE. Ces anticorps vont stimuler la dégranulation des mastocytes (McRae et al. 2015). La réaction immunitaire s'entretient jusqu'à l'élimination du parasite. Un schéma récapitulatif est présenté à la Figure 7.

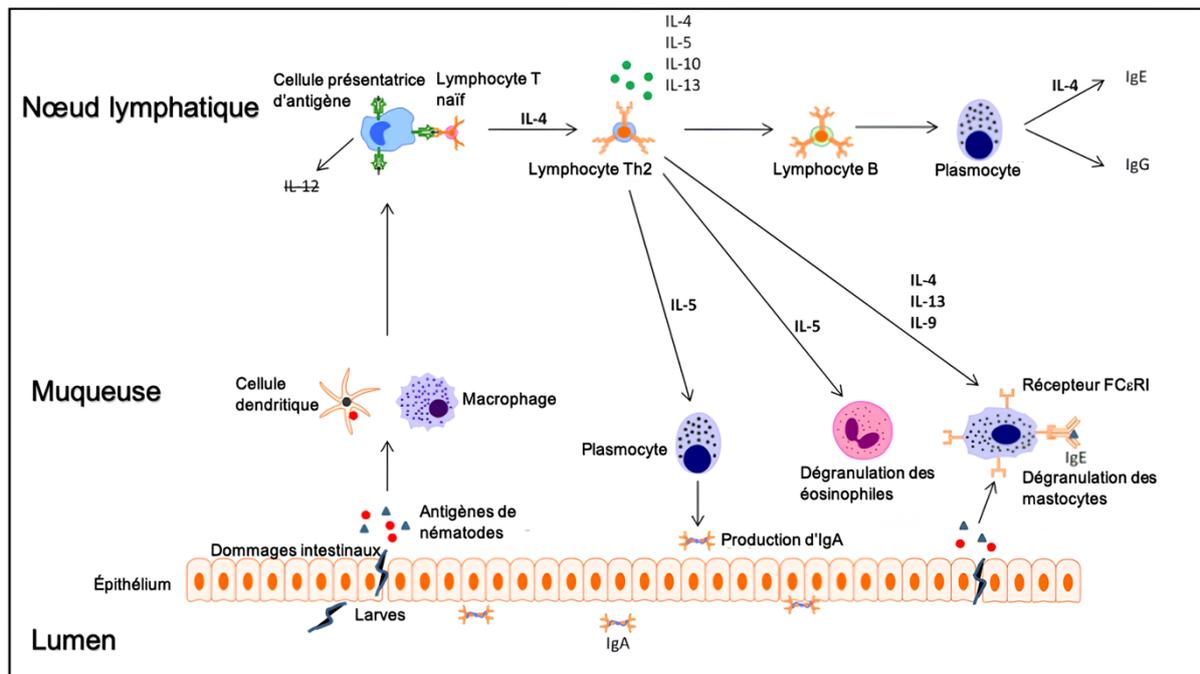


Figure 7: Schéma récapitulatif de la réponse immunitaire au parasitisme. Figure extraite de McRae et al. (2015).

c. Efficacité de la réponse immunitaire

Lors d'une affection parasitaire, la réaction immunitaire, telle que décrite précédemment se met en place. Dans cette partie, nous examinons l'efficacité de cette réponse.

i. Efficacité de l'immunisation

L'immunité conférée par une immunisation préalable est influencée par une multitude de facteurs tels que l'espèce parasitaire impliquée, les conditions environnementales, le statut immunitaire, etc. Il est donc difficile de déterminer si la réponse immunitaire au parasitisme gastro-intestinal est efficace (Palkumbura et al. 2024). Néanmoins certaines études ont montré des modifications d'activité des cellules de l'immunité chez des moutons entre la première et la seconde infestation parasitaire. Huntley et al. (1998) ont montré, lors d'une infection secondaire par *Teladorsagia circumcincta* chez des agneaux une augmentation significative du

nombre d'anticorps IgE ciblés contre les formes L3 du parasite comparativement à une infestation primaire. Stevenson et al. (1994) ont montré, lors d'une infestation secondaire par *Teladorsagia circumcincta* chez 28 agneaux, une augmentation plus rapide et marquée du nombre d'éosinophiles dans le sang, la moelle osseuse, la muqueuse gastrique et les ganglions lymphatiques locaux régionaux comparativement à une infestation primaire. Cette réponse immunitaire était associée à une charge parasitaire significativement moins importante lors de la deuxième infestation par rapport à la première infestation. Ces résultats témoignent d'une réponse immunitaire plus marquée et efficace lors d'une infection secondaire comparativement à une infection primaire.

ii. Impact du relâchement immunitaire autour de la mise bas

Autour de la mise-bas, il est très fréquent de voir une augmentation de l'excrétion des œufs de strongles chez les brebis parasitées. Ce phénomène se nomme le "*periparturient rise*". Il débute généralement deux semaines avant la mise bas et peut perdurer plusieurs semaines après celle-ci. Ce phénomène est responsable, de manière couplée avec la levée de l'hypobiose, de la contamination importante des pâtures au printemps. L'augmentation de l'excrétion fécale des œufs de parasite apparaît de manière concomitante avec la dépression du système immunitaire autour de la mise bas, qui pourrait être dû à l'augmentation de la prolactine autour de la mise bas (Fthenakis et al. 2015). D'autres publications proposent une explication liée à l'allocation des ressources, selon laquelle l'immunité est une priorité secondaire à la reproduction (Coop, Kyriazakis 1999).

4. Épidémiologie des strongyloses digestives

L'épidémiologie des strongyloses digestives est dépendante de facteurs épidémiologiques liés à l'environnement, à la génétique, à l'état physiologique de l'animal.

i. Facteurs environnementaux

Le nombre de parasites présents sur la parcelle évolue en fonction de la période de l'année. A la sortie de l'hiver, la reprise du développement des larves en hypobiose aboutit à la formation de nombreux adultes, et donc à une très forte excrétion d'œufs

de parasites. Cette forte excrétion est à l'origine d'une contamination importante des pâtures au printemps (Figure 8). De plus les agnelages ayant lieu, pour la plupart au printemps, la levée d'hypobiose apparait de manière simultanée avec le "*periparturient rise*", ce qui accentue encore la contamination des pâtures. Cette concentration parasitaire élevée pose un problème pour les agneaux dont le système immunitaire est encore immature. Par conséquent, le printemps représente une période à risque important.

Après s'être infestés au printemps, les agneaux, n'ayant pas encore développé d'immunité, amplifient la contamination des pâturages par des infestations répétées. Pendant ce temps, les œufs pondus à la sortie de l'hiver, ayant mis du temps à se développer, atteignent le stade larvaire infestant L3 et s'accumulent sur la pâture, pouvant conduire à des charges estivales en L3 des pâtures élevées. Cette forte pression parasitaire augmente la charge parasitaire des animaux à la fin de l'été et en automne, constituant ainsi la seconde période à haut risque de parasitisme (Abbott, Taylor, Stubbings 2012).

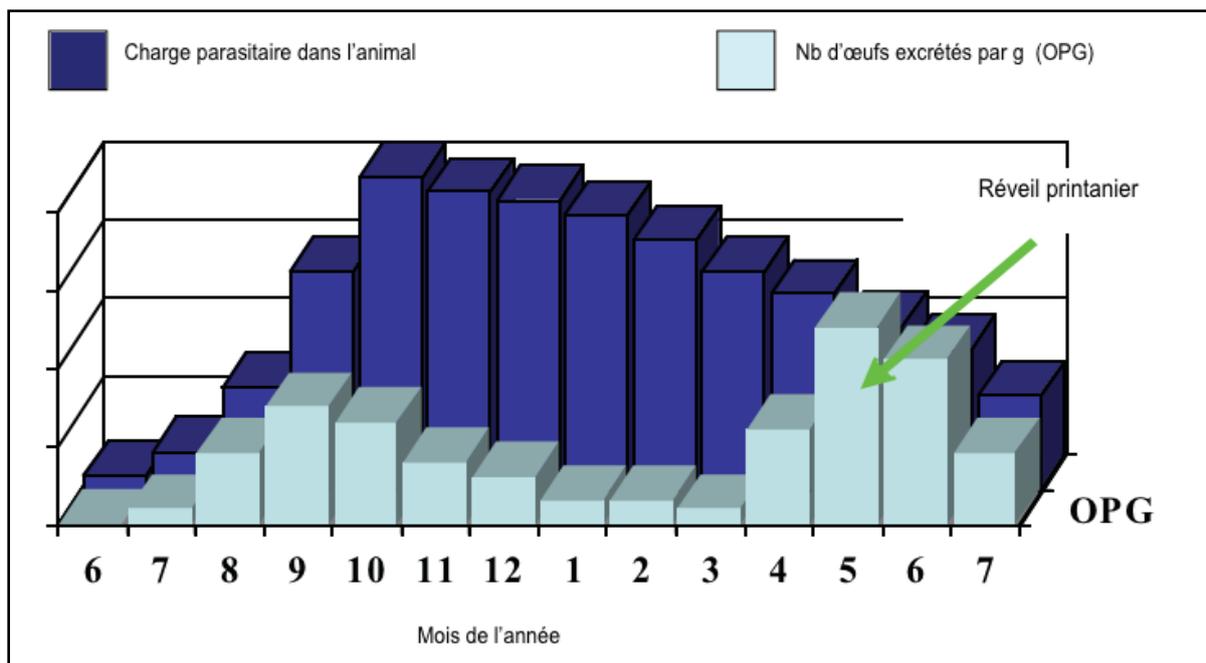


Figure 8: Évolution de l'excrétion d'œufs par gramme de fèces (OPG) en fonction du mois de l'année. Figure extraite de Bélanger et al. (2007)

ii. Facteurs génétiques

(1) La résistance naturelle

Plusieurs études ont permis de comparer la résistance au parasitisme de différentes races de moutons non sélectionnées génétiquement sur la résistance au parasitisme. Good et al. (2006) ont montré que les moutons de la race Texel étaient plus résistants au parasitisme gastro-intestinal (par réduction significative du nombre d'OPG) que les moutons de la race Suffolk. Mugambi et al. (1997) ont montré que les moutons de la race Red Maasai étaient plus résistants à une infestation par *Haemonchus contortus* que les moutons de la race Somali (par nombre de parasites significativement plus faible (275 contre 676) et un hématoците supérieur). Ces résultats impliquent l'existence de facteurs génétiques déterminant la sensibilité de l'individu au parasitisme.

(2) Héritabilité de la résistance

Les informations présentées dans la partie précédente suggèrent que la résistance au parasitisme est un caractère déterminé génétiquement. Dans une méta-analyse, Hayward (2022) a identifié une héritabilité moyenne de 0,25 quel que soit la méthode de mesure du parasitisme employée. Cela implique que 25% de la variabilité de résistance au parasitisme est déterminée génétiquement.

(3) Les gènes de résistances confèrent une résistance croisée

Les schémas de sélection incluant des critères de résistance au parasitisme gastro-intestinal peuvent, après plusieurs générations de sélection, conduire à une bonne résistance. Aguerre et al. (2019) rapportent une excrétion 10 fois inférieure pour les brebis issues de béliers résistants à *Haemonchus contortus* par rapport à des brebis issues de béliers sensibles. En revanche, nous pouvons nous demander si cette résistance est spécifique du parasite utilisé dans le schéma de sélection ou si elle octroie une résistance à l'ensemble des espèces de strongles gastro-intestinaux. Il a été montré qu'il existe une forte corrélation génétique entre la résistance à *Haemonchus contortus* et la résistance à *Trichostrongylus colubriformis* (Gruner, Bouix, Brunel 2004). Gray (1997), lors d'une étude réalisée à l'INRAE, a également montré que les brebis sélectionnées sur la résistance à *Trichostrongylus colubriformis* et *Teladorsagia circumcincta* présentent une résistance accrue à *Haemonchus contortus*. Cela implique l'existence très probable de mécanismes immunitaires communs. Il a également été montré, chez des agneaux au pâturage infestés par plusieurs espèces de strongles, que les proportions des différentes espèces sont

positivement corrélées entre elles au sein d'un individu. Autrement dit, quand une espèce de parasite est présente en grand nombre, les autres espèces le sont également, et inversement. Cela suggère des mécanismes de résistance croisés qui limitent l'infestation de toutes les espèces de strongles (Barger 1984). On peut donc supposer que la sélection génétique sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal confère une immunité efficace contre l'ensemble des espèces de strongles gastro-intestinaux.

iii. Autres facteurs

Comme nous l'avons présenté précédemment, le statut physiologique de l'animal est un facteur de variation du parasitisme. La période autour de la mise bas est une période à risque pour les brebis en raison du relâchement immunitaire. Le jeune âge des animaux est également un facteur de risque en raison de l'absence d'immunité.

5. L'impact des strongles gastro-intestinaux

Le parasitisme gastro-intestinal est à l'origine de différents impacts négatifs sur les productions ovines. Ces impacts entraînent des pertes financières pour les éleveurs ovins. Les principaux impacts sont présentés ci-dessous.

a. Effet sur la prise alimentaire

Un des effets régulièrement observé lors d'affections parasitaires est une diminution de l'ingestion alimentaire des animaux parasités. L'intensité de ce symptôme varie en fonction de la sévérité de l'affection parasitaire. Selon la méta-analyse de Ceï et al. (2018), on peut observer un écart de 25 % de l'ingestion de matière organique entre les animaux faiblement et fortement infestés. Dans le cas d'infestations moins importantes, l'ingestion peut ne pas être impactée (Parkins, Holmes 1989). En 2000, une étude menée sur des agneaux a permis de montrer que la baisse d'ingestion associée au parasitisme est secondaire à une réduction de la durée des périodes de broutage (Hutchings et al. 2000). Une autre étude a également montré que la réduction significative de la prise alimentaire lors d'une infestation à *Trichostrongylus colubriformis* est observée uniquement chez les agneaux naïfs et non chez les brebis préalablement immunisées (Greer et al. 2005). Chez des veaux au

pâturage, Forbes et al. (2000) ont montré que les veaux non traités contre les nématodes gastro-intestinaux avaient une consommation alimentaire inférieure de 0,78 kg/MS par jour par rapport aux veaux traités. Le mécanisme biologique exact responsable de la réduction de l'appétit n'est pas encore complètement élucidé, une des hypothèses est la suivante : les infections par les parasites *Ostertagia ostertagi* chez les bovins et *Teladorsagia circumcincta* chez les ovins endommagent la muqueuse de l'estomac, ce qui augmente le pH gastrique. Cette augmentation du pH est liée à une élévation des niveaux de gastrine dans le sang, une hormone qui contribue à la diminution de l'appétit. La gastrine inhibe également la sécrétion de ghréline, un peptide qui stimule l'appétit. La gastrine pourrait également entraîner l'augmentation du niveau de leptine sanguin, une hormone qui régule la satiété (Forbes et al. 2009).

b. Effets sur la digestibilité de la ration

Le parasitisme gastro-intestinal pourrait également entraîner une baisse de digestibilité. Cela est cohérent avec les lésions des muqueuses générées par les strongles qui peuvent entraîner une perturbation de la digestion. Dans leur méta-analyse, Ceï et al. (2018) ont mis en évidence la diminution de la digestibilité chez les animaux parasités. Ils ont quantifié cette perte de digestibilité : une augmentation d'une unité de log d'OPG entraîne une perte de digestibilité de la matière organique de 1,2%. Xiang et al. (2022) ont montré qu'une infestation à *Haemonchus contortus* chez des agneaux entraîne spécifiquement une diminution de la digestibilité des protéines. Une hypothèse pour expliquer ces variations de digestibilité est une augmentation de la motilité intestinale secondaire à une augmentation du pH gastrique (Bueno, Dakkak, Fioramonti 1982). Néanmoins le mécanisme n'est pas entièrement élucidé et peu étudié.

c. Effets sur la production

Le parasitisme gastro-intestinal est à l'origine de baisse des niveaux de production des animaux d'élevage. Cela peut être expliqué par la diminution de l'ingestion et de la digestibilité, par le coût énergétique des réparations des dégâts liés à l'infestation (inflammation, dégradation des muqueuse, fuite de protéines, etc) ou encore par le coût nutritionnel qu'implique l'immunité. Certaines études ont permis de

mettre en évidence ces différences de niveaux de production entre des animaux parasités et non parasités. Mavrot, Hertzberg, Torgerson (2015) ont montré que le parasitisme gastro-intestinal est associé à une baisse de GMQ dans 85% des cas, à une baisse de production lainière dans 90% des cas et à une baisse de production laitière dans 78 % des cas. Ils ont également montré que ces variations de production sont corrélées avec l'intensité de l'infestation. Dans une méta analyse réalisée sur 101 études, Ceï et al. (2018) ont montré qu'à niveau énergétique et protéique similaires dans la ration, la croissance des moutons diminue avec le niveau de parasitisme. Pour chaque augmentation d'une unité de log d'OPG (œufs par gramme de fèces), la croissance journalière diminue de 1,55 g/kg de poids métabolique.

d. Effet sur le bien-être animal

Le parasitisme gastro-intestinal pourrait également entraîner des modifications comportementales. Bien que le sujet ne soit pas beaucoup documenté, certaines études montrent des résultats intéressants. Grant et al. (2020) ont montré que des variations comportementales existent selon les niveaux de parasitisme chez les brebis. Le comportement était évalué avec la méthode du QBA (évaluation qualitative du comportement). Cette expérience avait montré que les animaux fortement parasités marchaient moins vite que les animaux peu parasités. Il a également été montré chez des agneaux, que les individus parasités présentaient une activité plus faible associée à une probabilité d'afficher un comportement alimentaire plus faible également (Reeves et al. 2024).

e. Effet sur la reproduction

L'effet du parasitisme gastro-intestinal sur la reproduction des animaux d'élevage est peu documenté. Cependant, en 2011, une étude portant sur 45 agnelles prépubères infestées naturellement a montré que l'administration d'un antiparasitaire longue durée a permis de diminuer l'âge médian de premier accouplement de 1,5 mois (Mavrogianni et al. 2011). Ce résultat nécessite d'être complété par de nouvelles études.

6. Critères de suspicion et méthodes de mesure du parasitisme

Comme nous l'avons vu précédemment, l'impact du parasitisme est déterminé par l'intensité de l'infestation. Pour pouvoir gérer le parasitisme, il est donc nécessaire d'avoir des méthodes fiables pour identifier l'ampleur des infestations. Nous allons présenter dans cette partie les différents outils de terrain permettant de mesurer le parasitisme. Dans un premier temps, nous parlerons des méthodes utilisables sur des animaux vivants et dans un second temps de la méthode utilisable sur les animaux morts.

a. Critères de suspicion du parasitisme

La suspicion du parasitisme repose sur la synthèse des symptômes observés et des facteurs épidémiologiques. Comme nous l'avons évoqué précédemment, le parasitisme gastro-intestinal est responsable de signes cliniques tels que la léthargie, les chutes de production, l'anémie ou encore la diarrhée parfois. Néanmoins, ces signes cliniques sont non spécifiques des affections parasitaires. Leur observation est donc à combiner avec l'existence des facteurs épidémiologiques présentés précédemment. L'existence de facteurs de risques liés à l'individu ou à son environnement permet de suspecter, avec plus ou moins de probabilité, une affection parasitaire. Pour confirmer ou infirmer cette suspicion, des méthodes de mesure du parasitisme existent et sont présentées dans les parties suivantes.

b. Méthodes de mesure du parasitisme *in vivo*

i. Analyses des fèces

(1) La coproscopie

La coproscopie est l'outil le plus utilisé pour l'estimation de l'intensité de l'infestation parasitaire d'un animal. C'est un examen microscopique qui est rapide, non invasif, et peu coûteux. La coproscopie consiste en l'étude des matières fécales de l'animal dans le but de la mise en évidence d'œufs, d'oocystes ou de larves de parasites. C'est un examen essentiel pour le vétérinaire, il permet de confirmer une suspicion clinique, d'identifier les espèces parasitaires en présence pour effectuer des traitements ciblés, et d'évaluer l'efficacité d'un traitement (Sabatini et al. 2023).

Une coproscopie peut être quantitative ou qualitative. Avant l'observation microscopique, il est dans la très grande majorité des cas nécessaire, voire

indispensable, de concentrer les éléments parasitaires pour faciliter leur comptage. On distingue diverses méthodes de concentration en coproscopie (flottaison, sédimentation, biphasique...). Parmi ces méthodes, la méthode de concentration par flottaison est la méthode de référence. Son principe repose sur la flottaison des œufs de parasites dans une solution de densité élevée, cette densité étant choisie selon les parasites que l'on veut identifier (Bourdoiseau, Roy 2006). Une multitude de techniques coproscopiques par flottaison est décrite dans la littérature. Nous présentons ici en détail la méthode la plus utilisée chez les ruminants, la méthode de Mac Master (Hansen, Perry 1994): Il faut prélever 4 g de fèces que l'on met en solution avec 56 ml de solution saline saturée (d = 1,18-1,2). Le mélange est homogénéisé, puis tamisé et pressé. La solution obtenue après tamisage est homogénéisée. À l'aide d'une pipette pasteur, on prélève cette solution que l'on vient déposer dans chaque chambre d'une cellule de comptage de Mac Master. Il faut attendre quelques minutes pour que les œufs remontent à la surface de la solution. La lame est ensuite observée au microscope au grossissement x100. En multipliant le nombre d'œufs comptés dans les deux cellules par 50, nous obtenons le nombre d'OPG.

Les résultats coproscopiques sont à nuancer, car chaque espèce de strongle est plus ou moins prolifique et plus ou moins pathogène. Par exemple, *Haemonchus contortus* est beaucoup plus prolifique que *Trichostrongylus* spp., et on peut donc tolérer des excréments fécaux plus importants. Abbott, Taylor, Stubbings (2012) proposent une table d'interprétation de la coproculture (Tableau 2).

Tableau 2: Guide d'interprétation des résultats de coproscopie. Tableau extrait de Abbott, Taylor, Stubbings (2012)

Espèces parasitaire	Nombre d'OPG		
	Faible	Moyen	Haut
Infestation mixte (Sans <i>H. contortus</i>)	<250	250-750	>750
Infestation mixte (Avec <i>H. contortus</i>)	<500	500-1500	>1500
<i>Haemonchus contortus</i>	<500	1000-5000	>5000
<i>Trichostrongylus</i> spp.	100-500	500-1500	>1500
<i>Nematodirus battus</i>	50-150	150-300	>300

(2) La coproculture

La coproculture est un examen complémentaire moins utilisé en pratique que la coproscopie. Cet examen permet de mettre en évidence des larves de stade L3 après incubation des fèces (Sabatini et al. 2023). Cette technique est surtout employée pour l'identification des différentes espèces de strongles présentes et de leur proportion à partir des larves L3. Pour cela, on compte 100 larves et on détermine les pourcentages de chaque espèce de strongle au sein de cette population (Sabatini et al. 2023).

ii. Analyses de sang de l'animal

(1) L'hématocrite

La mesure de l'hématocrite peut être un examen complémentaire intéressant pour le diagnostic d'*Haemonchus contortus*. Le parasite est hématophage et entraîne des anémies. En revanche, ce n'est pas un examen spécifique de l'haemonchose. Le diagnostic parasitaire ne peut donc pas reposer uniquement sur cet examen (Arsenopoulos et al. 2021). En l'absence d'anémie, l'hématocrite des ovins est compris entre 27 et 45%.

(2) Le dosage du pepsinogène

Le dosage du pepsinogène sérique est un outil qui permet d'identifier la présence de lésions gastriques. Il est principalement utilisé chez les bovins pour le diagnostic de l'ostertagiose bovine. Le pepsinogène est une proenzyme de la pepsine, une enzyme gastrique impliquée dans la digestion. La transformation du pepsinogène en pepsine se produit dans l'abomasum à pH acide. Or, certains parasites comme *Ostertagia ostertagi* et *Teladorsagia circumcincta* vont se développer dans les cryptes gastriques et engendrer des destructions de la paroi gastrique. Cette destruction est à l'origine d'une diminution de la production d'acide chlorhydrique par les glandes et donc une augmentation du pH gastrique. Cette augmentation entraîne une accumulation du pepsinogène dans l'estomac, car il ne peut plus être transformé en pepsine. De plus, les lésions de la muqueuse gastrique entraînent un passage du pepsinogène dans le système sanguin. Le dosage du pepsinogène sanguin permet ainsi d'identifier les lésions de la muqueuse gastrique. Il doit être réalisé sur des groupes d'animaux à la fin de la saison de pâture (Sabatini et al. 2023). En revanche, cette méthode n'est pas spécifique de l'infestation par *Ostertagia ostertagi* / *Teladorsagia circumcincta* et l'augmentation du pepsinogène sanguin peut être

secondaire à d'autres affections (Roerber, Jex, Gasser 2013). De plus il n'existe pas de méthode standardisée de mesure du pepsinogène, il est donc délicat d'établir des seuils d'interprétations généraux et la comparaison entre les résultats de différents laboratoires est difficile (Sabatini et al. 2023). Enfin, cette méthode est surtout utilisée chez les bovins mais peu chez les ovins.

iii. Analyse de l'état clinique de l'animal

(1) La méthode FAMACHA

La méthode FAMACHA est une méthode de mesure de l'impact clinique d'*Haemonchus contortus*. Cette méthode, développée en Afrique du Sud, permet d'identifier les animaux fortement anémiés pour mieux cibler les traitements antiparasitaires (Vatta et al. 2001). La méthode repose sur l'évaluation de la couleur des muqueuses oculaires de l'animal utilisée comme outil diagnostique de l'intensité et de la sévérité de l'infestation. La couleur de la muqueuse des 2 yeux de l'animal est comparée avec une grille de nuance de 5 couleurs de muqueuse (Figure 9). Plus la muqueuse est pâle, plus l'anémie associée est forte et plus l'infestation est importante. Le traitement est indiqué ou non en fonction du niveau de l'infestation.



Figure 9 : Carte de score FAMACHA. Issue de Zajac, Petersson (2016)

Cette méthode présente quelques inconvénients. Tout d'abord, elle n'est utilisable que dans le cas d'infestation par des parasites hématophages. De plus, elle est assez chronophage et donc parfois difficile à mettre en œuvre dans les élevages

de grande taille. De plus, les avis dans la littérature sur l'efficacité de ce test FAMACHA sont nuancés. Certaines études ont montré une bonne sensibilité (Sotomaior et al. 2012). D'autres études ont conclu que le test n'est pas assez sensible pour constituer le seul moyen de contrôle de l'haemonchose chez les ovins (Cintra, Ollhoff, Sotomaior 2018 ; Di Loria et al. 2009). Par ailleurs, certaines études ont montré que la couleur des muqueuses est dépendante de la race, ce qui peut donc influencer les résultats du test (Moors, Gauly 2009).

(2) Autres méthodes d'évaluation clinique

Il existe d'autres méthodes permettant d'estimer le niveau de parasitisme grâce à des observations cliniques. Ce sont des méthodes qui, à l'image de la méthode FAMACHA, sont des méthodes simples et qui sont utilisées comme des indicateurs pour les éleveurs ovins.

On peut citer tout d'abord le *dag score* qui permet de réaliser une mesure indirecte de consistance des fèces de l'animal. Celui-ci se mesure grâce à l'observation de l'état de propreté des parties postérieures des animaux. Différentes études ont montré que le parasitisme gastro-intestinal peut être concomitant avec l'apparition de diarrhées (Williams, Palmer 2012). Cependant, plusieurs études ont révélé que le nombre d'OPG était très faiblement corrélé avec le *dag score* (Sajovitz et al. 2023). Il constitue donc un outil peu qualitatif et peu adapté.

On peut également citer la note d'état corporel (NEC). Elle se détermine par palpation de la zone lombaire de l'animal. Elle est comprise entre 1 et 5, un score de 1 correspond à un animal cachectique et un score de 5 correspond un animal obèse (Thompson, Meyer 1994). Les critères de notation sont présentés en (Figure 10). L'usage de ce score comme estimation du parasitisme repose sur le fait que plusieurs études ont montré une forte corrélation phénotypique négative entre le nombre d'OPG et le score de composition corporelle (Tamponi et al. 2022 ; Soto-Barrientos et al. 2018).

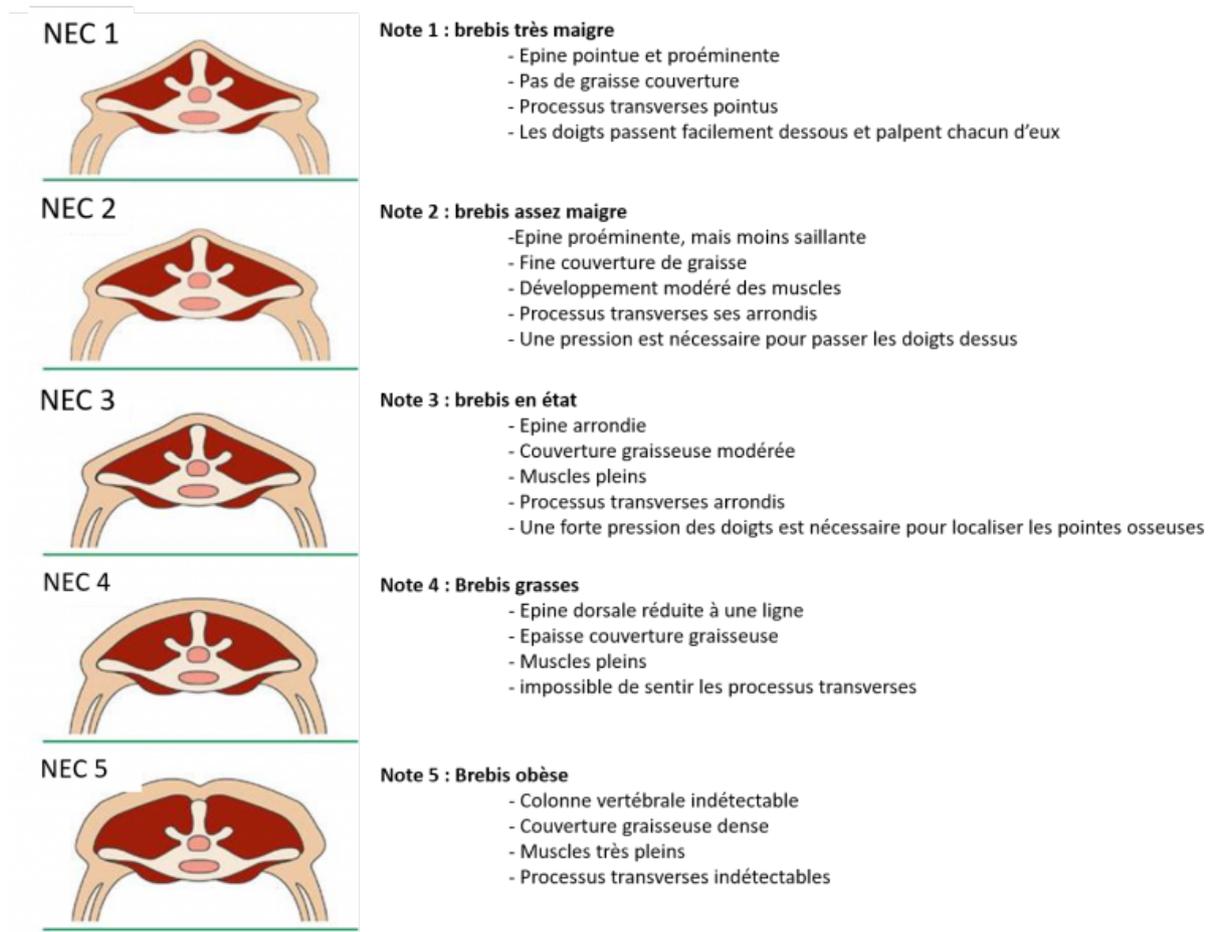


Figure 10 : Grille de notation de l'état corporel des brebis. Extrait de Karim (2013)

c. Méthodes de mesure post mortem

En cas de suspicion de mort secondaire à une infestation trop importante, une autopsie peut être réalisée afin d'identifier si la cause de la mort est parasitaire ou non. L'observation et le dénombrement direct des parasites sont longs et compliqués. *Haemonchus contortus* fait exception : c'est un parasite qui se distingue facilement à l'œil nu à l'autopsie, car il est plus gros que la majorité des autres strongles, qui, eux, nécessitent l'examen du contenu digestif au microscope (Zajac, Garza 2020).

Après le dénombrement parasitaire, une méthode est décrite dans l'étude (Abbott, Taylor, Stubbings 2012) pour déterminer si l'infestation parasitaire est la cause de la mort. Cette méthode repose sur un score attribué à l'animal en fonction du nombre de vers dénombrés (voir le Tableau 3). Pour un agneau, un score de 2 points est susceptible d'entraîner des signes cliniques et des pertes de production. Cependant, il est peu probable que l'infestation parasitaire soit à l'origine de sa mort. En revanche, lorsque le score dépasse 3 points chez un agneau, l'origine parasitaire

de la mort est plus probable. Chez les animaux adultes, on peut tolérer des seuils plus élevés.

Tableau 3: Tableau de correspondance points / nombre de vers. D'après Abbott, Taylor, Stubbings (2012).

Espèces de vers	Nombre de vers = 1 point
<i>Teladorsagia</i> spp	3000 vers
<i>Trichostrongylus</i> spp	4000 vers
<i>Haemonchus contortus</i>	500 vers
<i>Nematodirus</i> spp	4000 vers
Vers immatures	4000 vers

7. Gestion du parasitisme gastro-intestinal

La gestion du parasitisme gastro-intestinal en élevage ovin est complexe. Pendant des années, cette gestion s'est faite par le biais d'un usage régulier de molécules antihelminthiques. Aujourd'hui, du fait du développement de souches de parasites résistantes aux antiparasitaires et des enjeux écologiques, l'utilisation des antiparasitaires en élevage ovin tend à se raisonner. Pour cela, des stratégies de contrôle non médicamenteuses sont développées. Dans cette partie, nous allons présenter, de manière non-exhaustive, différents outils disponibles pour gérer le parasitisme.

a. Les traitements médicamenteux, résistances et impact écologique associés

Les molécules antiparasitaires sont fondamentales dans la gestion du parasitisme, nous allons présenter les différentes classes d'antiparasitaires.

i. Les molécules disponibles en France

(1) Les benzimidazoles

La classe des benzimidazoles est une classe d'antiparasitaires systémiques dont l'usage antihelminthique a été découvert en 1961. La première molécule découverte est le thiabendazole. Aujourd'hui, une multitude de molécules avec des

spectres plus larges que le thiabendazole (actives contre les vers pulmonaires et stade larvaires inhibés d'*Ostertagia ostertagi*) ont été développées et font partie de la pharmacopée vétérinaire. On peut citer par exemple le fenbendazole, l'oxfendazole, et l'albendazole (McKellar, Scott 1990). À l'exception du triclabendazole, les benzimidazoles ont une action sur les nématodes et également sur les trématodes et les cestodes selon les doses et les molécules utilisées (Vercruysse, Claerebout 2014).

Les benzimidazoles agissent principalement sur le cytosquelette des cellules du parasite en se fixant sur la tubuline. Cette fixation est à l'origine de la mort du parasite en raison d'une perte de capacité de polymérisation des microtubules à l'origine d'un défaut d'absorption du glucose et d'un défaut d'excrétion des protéines par le parasite (Lacey 1990 ; Taylor, Coop, Wall 2015). Sur les nématodes, ces molécules possèdent un effet adulticide, larvicide et également ovicide (Vercruysse, Claerebout 2014).

Les benzimidazoles sont des composés hydrophobes, leur administration se limite à la voie orale et à une formulation en usage topique. L'absorption intestinale de ces molécules est très faible, ce qui est un caractère intéressant pour un antiparasitaire administré par voie orale (Lanusse, Prichard 1993). Dans l'ensemble, ce sont des molécules avec une très faible toxicité et une grande marge thérapeutique (Taylor, Coop, Wall 2015). On retrouve de nombreuses formules pharmaceutiques dans la pharmacopée vétérinaire. Néanmoins, du fait de leur utilisation importante, de nombreuses résistances sont décrites aujourd'hui, leur emploi est donc à raisonner. Une liste de formes commerciales disponibles en France est présentée dans le Tableau 4.

Tableau 4: Molécules antiparasitaires de la famille des benzimidazoles disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau issu de Bordes et al. (2020).

Famille de molécule	Molécule active	Noms commerciaux	Spectre d'activité	Délais d'attente et conditions d'utilisation
Benzimidazoles	Albendazole	Valbazen®	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus filaria</i> <i>Moniezia spp</i> <i>Fasciola hepatica</i> <i>Dicrocoelium lanceolatum</i>	10j Viandes et abats 6j Lait Interdit dans le 1er tiers de la gestation
	Fenbendazole	Panacur®	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus filaria</i> <i>Moniezia spp</i>	16j Viandes et abats 8.5j Lait
	Oxfendazole	Oxfenil®	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus filaria</i> , <i>Moniezia spp</i>	14j (ovins) / 28j (caprins) Viandes et Abats 8j (ovins) / 14j (caprins) Lait

(2) Les imidazothiazoles

Les imidazothiazoles sont une famille antiparasitaire avec deux représentants : le tétramisole et le lévamisole. Le tétramisole est un mélange racémique dont le lévamisole est la forme lévogyre. Il a été montré que le lévamisole possède une action antiparasitaire plus forte que la forme dextrogyre (Thienpont et al. 1969). Par conséquent, seul le lévamisole est employé aujourd'hui (Abongwa, Martin, Robertson 2017).

Le lévamisole possède une action cholinomimétique. Il vient se fixer sur les récepteurs à l'acétylcholine et engendre ainsi une dépolarisation des canaux ioniques à l'origine d'une paralysie spasmodique généralisée du parasite (Martin, Robertson 2007). L'action du lévamisole est dirigée contre les formes adultes et larvaires des nématodes gastro-intestinaux et pulmonaires, sans activité ovicide. Le lévamisole existe sous différentes présentations thérapeutiques : en voie orale, en injection (intramusculaires ou sous-cutanées) (RCP: LEVISOLE injectable 2019). Il faut être vigilant lors de son emploi, car c'est une molécule avec un risque de surdosage important, l'index thérapeutique est faible (McKellar, Jackson 2004). Une liste de formes commerciales disponibles en France est présentée dans le Tableau 5.

Tableau 5: Molécules antiparasitaires de la famille des Imidazothiazoles disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020).

Famille de molécule	Molécule active	Noms commerciaux indicatifs	Spectre d'activité	Délais d'attente et conditions d'utilisation
Imidazothiazoles	Levamisole	Lévamisole® Biaminthic® Lévisole® Némisol® ...	Nématodes gastro-intestinaux et strongles pulmonaires	3j Viandes et Abats Interdit en lactation, au tarissement et deux mois avant la 1ère mise bas

(3) Les tetrahydropyrimidines

La famille des tetrahydropyrimidines est une famille d'antiparasitaires nématocides, avec comme principal représentant le pyrantel. Cette molécule ne possède pas d'AMM en France pour les ruminants domestiques. Le pyrantel possède le même mode d'action que les imidazothiazoles. Il s'agit d'un agoniste cholinergique. Il possède une activité sur les stades larvaires et adultes. Ce mode d'action commun entre ces deux familles de molécules est à l'origine de résistances croisées.

(4) Les lactones macrocycliques

La famille des lactones macrocyclique est une famille d'antiparasitaires au sein de laquelle on retrouve deux sous-groupes : les milbémycines et les avermectines. Ce sont des molécules antiparasitaires actives contre les vers ronds gastro-intestinaux et pulmonaires. Elles possèdent un spectre d'action très large (Taylor, Coop, Wall 2015). Ces molécules sont des agonistes des canaux ioniques ligand dépendant. Il a été démontré que les lactones macrocycliques sont capables d'agir sur plusieurs types de canaux ioniques. Principalement sur les canaux ioniques activés par le glutamate que l'on retrouve dans les cellules musculaires pharyngées et dans les neurones des nématodes. L'action du glutamate sur ces canaux provoque une ouverture brève de ces canaux ainsi qu'une désensibilisation, alors que les lactones macrocycliques en se fixant sur les récepteurs au glutamate entraînent une ouverture lente accompagnée d'une dépolarisation ou d'une hyperpolarisation très longue. Cela entraîne une paralysie flasque chez le parasite et donc sa mort (Wolstenholme, Rogers 2005). Les lactones macrocycliques agissent également en renforçant l'effet du GABA (acide gamma amino butyrique) sur ses récepteurs. Cela entraîne l'ouverture des canaux aux ions chlorure et donc une paralysie flasque (El-Saber Batiha et al. 2020).

Les lactones macrocycliques sont des molécules liposolubles que l'on peut administrer par voie orale, sous-cutanée ou transdermique. Du fait de leur lipophilie, les avermectines ont une forte affinité pour les graisses corporelles. Elles sont stockées au sein du tissu adipeux et libérées lentement (Taylor, Coop, Wall 2015). Une liste de formes commerciales disponibles en France est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6: Molécules antiparasitaires de la famille des lactones macrocycliques disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020)

Famille de molécule	Molécule active	Noms commerciaux indicatifs	Spectre d'activité	Délais d'attente et conditions d'utilisation
Lactones Macrocycliques	Doramectine	Dectomax®	Nématodes gastro-intestinaux Strongles pulmonaires <i>Oestrus ovis</i> <i>Psoroptes ovis</i>	70j Viandes et Abats Interdit en lactation, au tarissement et 70j avant la 1ère mise bas
	Eprinomectine	Eprinex Multi®	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus filaria</i>	2j (ovins) / 1j (caprins) Viandes et Abats, 0j Lait
	Ivermectine	Oramec®	Nématodes gastro-intestinaux Nématodes pulmonaires <i>Oestrus ovis</i> <i>Acaris de la gale</i> Poux (Ivermectine)	6j (ovins) Viandes et Abats Interdit en lactation, au tarissement et 21/28j avant la 1ère mise bas selon le mode d'administration

Famille de molécule	Molécule active	Noms commerciaux indicatifs	Spectre d'activité	Délais d'attente et conditions d'utilisation
	Moxidectine	Cydectin® (orale ou injectable)	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus filaria</i> <i>Oestrus ovis</i> <i>Psoroptes ovis</i> (injectable)	104j (injectable) / 14j (orale) Viandes et Abats, 5j Lait (orale ou interdit en production laitière) (injectable)

(5) Les dérivés d'amino-acétonitrile

Les dérivées d'amino-acétonitrile sont une classe d'antiparasitaire nématocide avec comme principal représentant le monépantel. Le monépantel est une molécule commercialisée depuis 2009 (RCP: ZOLVIX 25mg/mL buvable 2009). Le monépantel agit principalement sur un récepteur nicotinique à l'acétylcholine spécifique des nématodes. Par cette action, il provoque la paralysie et la mort du parasite. Son site d'action spécifique des nématodes en fait un antiparasitaire avec un index thérapeutique important. De plus, ce mode d'action unique est probablement à l'origine de son efficacité sur les nématodes multirésistants (Kaminsky et al. 2008). Attention cependant, car de nombreuses résistances ont été identifiées depuis (Mederos, Ramos, Banchemo 2014 ; Ramos et al. 2018).

Le monépantel est une molécule peu toxique et bien tolérée par les ruminants (Kaminsky et al. 2008). Il existe une forme pharmaceutique disponible en France actuellement : Zolvix®, utilisable uniquement chez les brebis allaitantes. Les délais d'attentes sont de 7 jours pour la viande et les abats.

(6) Les salycilanilidés

Les salycilanilidés sont une famille d'antiparasitaires nématocides, trématocides et cestocides, ayant beaucoup de formes commerciales disponibles dans la pharmacopée vétérinaire française. Ces molécules étaient utilisées à l'origine pour leurs propriétés antifongiques et antibactériennes (Swan 1999). Ces molécules agissent comme des découpleurs de la phosphorylation oxydative. Autrement dit, elles vont empêcher le bon déroulement de la respiration cellulaire du parasite et donc empêcher la formation d'ATP. Cela va entraîner la mort du parasite (Martin 1997). Ce sont des molécules avec une marge thérapeutique faible. En cas de surdosage, les signes peuvent être de la cécité, de la parésie, voire la mort. D'ailleurs, des effets secondaires ont déjà été identifiés chez des agneaux à des doses de traitement

classique (Swan 1999). Une liste de formes commerciales disponibles en France est présentée dans le Tableau 7.

Tableau 7: Molécules antiparasitaires de la famille Salicylanilidés disponibles en France (liste non exhaustive). Tableau extrait de Bordes et al. (2020)

Famille de molécule	Molécule active	Noms commerciaux indicatifs	Spectre d'activité	Délais d'attente et conditions d'utilisation
Salicylanilides	Closantel	Flukiver®, Seponver®	Nématodes gastro-intestinaux hématophages <i>Fasciola hepatica</i> <i>Oestrus ovis</i>	107 j (Flukiver®)/55 j (Seponver®) Viandes et Abats Interdit en lactation, au tarissement et un an avant la 1ère mise bas (Flukiver®) / 34j après mise bas si la période sèche est > 90j sinon 4 mois après le traitement si la période sèche est < 90j (Seponver®)
		Duotech® (+oxfendazole) Supaverm (+mébendazole)	Nématodes gastro-intestinaux <i>Dictyocaulus spp</i> <i>Moniezia sp</i> <i>Fasciola hepatica</i> <i>Oestrus ovis</i>	42j (Duotech®)/ 65j (Suparverm®) Viandes et Abats Interdite en lactation, au tarissement et un an avant la 1ère mise bas

ii. La résistance aux antiparasitaires et mécanismes de résistance connus

Depuis de nombreuses années, le recours aux molécules antihelminthiques constituait la méthode principale de maîtrise du parasitisme. Cet usage répété a généré l'apparition de résistances aux antihelminthiques qui représentent aujourd'hui un enjeu important pour l'élevage ovin. A ce jour, des résistances ont été identifiées dans le monde entier. Une revue de 197 études sur la résistance aux antiparasitaires en Europe a permis de montrer, que les prévalences des résistances aux benzimidazoles, à la moxidectine, au lévamisole et aux lactones macrocycliques (sans la moxidectine) dans les élevages ovins européens en 2010 étaient respectivement de 86%,21%,48% et 52% (Rose Vineer et al. 2020).

Plus spécifiquement en France, la résistance aux antiparasitaires est un phénomène connu et étudié depuis plusieurs dizaines d'années. Une étude de 1998 menée sur des élevages ovins du sud-ouest de la France présentait les résultats suivants : 83 % des élevages inclus dans l'étude présentaient une résistance aux benzimidazoles et 50 % présentaient une résistance au lévamisole (Chartier et al. 1998). La première classe pharmacologique impliquée a été les benzimidazoles. Cela s'explique car il s'agit de la classe d'antiparasitaire la plus ancienne et la plus

employée. En 2016, une étude menée sur un troupeau d'ovins viandes de la Loire et de l'Allier décrit la première multirésistance au parasitisme dans un élevage ovin Français (Paraud et al. 2016). Cette multirésistance concernait l'ivermectine et la moxidectine. En 2018, un cas de multirésistance aux benzimidazoles et à l'ivermectine est mis en évidence dans les Pyrénées. L'espèce parasitaire multirésistante était *Haemonchus contortus* tandis que *Teladorsagia circumcincta* était uniquement résistante aux benzimidazoles (Cazajous et al. 2018). En 2018-2019, une triple résistance au fenbendazole, au lévamisole et à la moxidectine est mise en évidence dans un élevage ovin du Nord-est de la nouvelle aquitaine (Sagot 2019).

Les résistances aux molécules antiparasitaires sont conférées par les mécanismes suivants : la capacité du parasite à limiter le nombre de récepteurs cibles de l'antiparasitaire ou à les modifier, et la capacité à limiter la concentration cellulaire en antiparasitaire en augmentant le métabolisme et en favorisant l'efflux. Ces capacités de résistance sont présentes naturellement dans la population parasitaire de manière aléatoire. C'est la pression de sélection exercée par l'usage répétée des antiparasitaires qui favorise la sélection des parasites résistants par rapport aux parasites sensibles.

En ce qui concerne la résistance aux benzimidazoles, elle est conférée par une mutation ponctuelle sur le gène codant pour la synthèse de l'isotype 1 β -tubuline. Cette mutation est à l'origine d'une perte d'affinité des benzimidazoles pour la β -tubuline. Des mutations au niveau de trois codons de ce gène ont été identifiées comme conférant une résistance aux benzimidazoles (Whittaker et al. 2017).

La résistance aux lactones macrocycliques serait conférée par plusieurs phénomènes. Tout d'abord une modification des récepteurs au glutamate qui entraînent un défaut de fixation des lactones macrocycliques. On a également identifié des cas de résistances associés avec l'expression de mécanismes d'efflux qui permettent l'excrétion des molécules antiparasitaire à l'extérieur de la cellule (Whittaker et al. 2017).

Les tetrahydropyrimidines et les imidazothiazoles possèdent le même site d'action. Des résistances croisées sont donc observées pour les molécules de ces 2 familles d'antiparasitaires. Les mécanismes identifiés sont les suivants : modification de l'intensité de l'expression de certaines sous-unités des récepteurs à l'acétylcholine,

et modification du site de fixation des récepteurs à l'acétylcholine qui entraîne un défaut de fixation de ces molécules antiparasitaires (Fissiha, Kinde 2021).

La résistance au monépanel serait conférée par des malformations des récepteurs à l'acétylcholine secondaires à des mutations sur des gènes codant pour ces protéines (Turnbull et al. 2019). On a également identifié une surexpression des gènes codants pour les enzymes impliquées dans le métabolisme du monépanel (Fissiha, Kinde 2021).

iii. L'impact écologique associé à l'utilisation des antiparasitaires

L'utilisation exagérée des antiparasitaires, en plus d'être à l'origine du développement de résistances, est également un enjeu environnemental important. Malgré, plusieurs études dans le monde, l'impact des molécules antiparasitaires, sur la faune et la flore reste peu étudié. Les données présentes dans la littérature concernent principalement la famille des lactones macrocycliques. Dans une revue de 2022, de Souza et Guimarães (2022) ont montré que les avermectines entraînent une diminution du nombre de bousiers (des insectes coprophages), en affectant la survie, des adultes, la reproduction et le développement des larves. Les avermectines pourraient également avoir un effet délétère sur les collamboles, les vers de terre. Comme montré par de Souza et Guimarães (2022), de récentes recherches ont montré que les avermectines pourraient avoir un effet délétère sur la croissance racinaire des végétaux. De plus il a été montré pour l'ivermectine, que l'excrétion, et donc l'impact écologique, dépend de la voie d'administration. La forme pour-on est à éviter car elle présente un risque de léchage important qui peut entraîner une excrétion fécale d'ivermectine 7 fois supérieure à la dose excrétée en absence de léchage (Laffont et al. 2003).

b. Stratégies agronomiques et thérapeutiques dans le but de limiter le parasitisme et l'apparitions de résistances

i. Le traitement ciblé/sélectif

Pendant plusieurs années, les traitements antiparasitaires ont été réalisés de manière systématique sur l'intégralité des animaux. L'apparition des résistances aux antiparasitaires a permis de faire évoluer les pratiques. Le concept de population refuge est alors apparu. Une population refuge est une population parasitaire qui n'est

pas exposée à un antiparasitaire. Il est important de comprendre qu'un antiparasitaire exerce une pression de sélection sur les parasites. Cette pression sélectionne, au sein de la population de parasites exposés aux antiparasitaires, les parasites portants des allèles conférant des résistances aux antiparasitaires. La population refuge, n'étant pas exposée aux antiparasitaires, est une population parasitaire qui ne subit pas de pression de sélection par l'antiparasitaire et qui est donc plus susceptible de conserver ses allèles de sensibilité. L'objectif est donc de conserver une population refuge de manière à diluer les allèles de résistance (Greer et al. 2020).

Pour préserver la population refuge, tout en limitant l'impact du parasitisme gastro-intestinal, on distingue le traitement ciblé (TC) et le traitement ciblé/sélectif (TCS). Le TC consiste à traiter tous les animaux, en fonction de l'importance de l'infestation au sein du troupeau. Le traitement ciblé/sélectif consiste à traiter les animaux les plus à risques de manière individuelle. Charlier et al. (2014) ont fait une revue des connaissances à propos du TC et du TCS chez les petits ruminants. Nous présentons ces résultats dans la suite de ce paragraphe.

Lors de TC, pour estimer quand traiter, la coproscopie en mélange est un bon outil, néanmoins il est nécessaire de connaître le niveau basal d'excrétion d'œufs de parasites du troupeau. En effet l'intensité de l'excrétion parasitaire n'est pas nécessairement corrélée avec la pathogénicité de l'affection. Elle dépend également d'autres facteurs tels que la résilience ou l'espèce parasitaire impliquée. Si on souhaite limiter la contamination de la pâture, le traitement peut se faire quand le niveau de l'excrétion parasitaire dépasse le niveau basal, néanmoins si l'on souhaite uniquement limiter l'impact du parasitisme sur la production, les témoins de production à l'échelle de l'élevage (pesée automatisée par exemple) peuvent être pris en compte pour déterminer si la production est affectée et donc si un traitement est nécessaire. Néanmoins le TC ne permet pas de traiter les animaux les plus à risques de manière individuelle. Pour cela le TCS est plus adapté.

Pour le TCS, les traitements sont réalisés de manières individuelles, les critères de sélection des animaux à traiter sont des critères facilement mesurables sur chaque individu. La coproscopie n'est donc pas adaptée. Les critères mesurables sont : la croissance (mesurée par pesée automatisée), ou la production laitière (efficacité étudiée uniquement chez la chèvre), l'impact du parasitisme par le test FAMACHA (en cas d'infestation par *Haemonchus contortus*), la NEC ou encore le *dag score*. Des

études ont montré que la combinaison de différents critères était intéressante pour identifier les animaux à traiter.

ii. Proscrire les mauvaises pratiques

Pour limiter l'apparition de résistances, il est également nécessaire de limiter au maximum les mauvaises pratiques. Parmi ces mauvaises pratiques, on retrouve le sous-dosage des molécules et le traitement des individus avec des antiparasitaires à spectres d'action très larges (Bélanger et al. 2007).

c. La vaccination

La vaccination permet d'induire une réponse immunitaire chez l'hôte naïf en limitant l'impact économique. Actuellement, un unique vaccin contre le parasitisme gastro-intestinal est commercialisé dans le monde. C'est un vaccin immunisant contre *Haemonchus contortus* qui est commercialisé en Australie. Il s'agit du vaccin Barbervax (Kebeta et al. 2020). Ce vaccin immunise contre deux antigènes (H11 et H-gal-GP) provenant du système digestif du parasite (Liu et al. 2023). Ce vaccin présente une bonne efficacité et permet d'assurer la protection de 75 à 95 % des agneaux vaccinés (Kebeta et al. 2020). Néanmoins, le protocole est lourd, puisqu'il est nécessaire d'administrer entre 2 et 3 injections à 4 semaines d'intervalle pour la primovaccination. De plus, l'immunité conférée est de courte durée et les rappels doivent se faire toutes les 6 semaines (Broomfield et al. 2020).

Il s'agit d'un domaine où de nombreuses recherches sont en cours, y compris pour développer des vaccins actifs sur les autres espèces parasitaires. Les facteurs limitants à ces recherches sont la relative méconnaissance des interactions hôte-parasite, la difficulté dans la production des protéines recombinantes (antigènes) et le choix des adjuvants vaccinaux (Liu et al. 2023).

d. Gestion d'élevage

i. La ration

La quantité d'énergie présente dans la ration peut avoir un effet sur le parasitisme. En 2002, une étude a montré que des agnelles nourries à 100 % de leurs besoins et infestées par *Teladorsagia circumcincta* présentaient une meilleure réponse immunitaire au parasitisme (par augmentation du nombre d'éosinophiles circulants

associée à une baisse de fécondité des parasites) que des agnelles avec le même niveau d'infestation et nourries à 50 % de leurs besoins nutritionnels (Valderrábano, Delfa, Uriarte 2002). Cela implique qu'une ration insuffisante en énergie chez des agneaux en croissance est à l'origine d'un défaut d'immunité et donc une sensibilité accrue au parasitisme.

Par ailleurs, la composition de la ration est importante. Il a été montré que le niveau d'excrétion en œufs de parasites diminue avec la quantité de protéines brutes consommées (Ceï et al. 2018). De plus, la complémentation en protéines lors d'affection parasitaire est intéressante, car elle permet de favoriser la réponse immunitaire. Cet apport protéique peut permettre également de compenser la perte de protéines secondaire à l'impact du parasitisme (Ceï et al. 2018). Il est donc important pour limiter le parasitisme de favoriser la pousse de légumineuses sur la pâture qui permettront d'assurer un complément en protéines avec les effets bénéfiques associés.

Aussi, comme présenté dans la revue de Rodríguez-Hernández et al. (2023), plusieurs études ont montré qu'un régime avec une quantité importante de plantes riches en tanins (telles que *Onobrychis viciifolia* ou *Sericea Lespedeza*) pourrait avoir un effet antiparasitaire chez les ovins. Cet effet antiparasitaire a été identifié chez des brebis soumises à différents régimes riches en tanins (prairies, granulés) (Gaudin et al. 2016 ; Hoste et al. 2006). La consommation de tanins était généralement associée avec une diminution du nombre d'OPG et même une inhibition des formes L3. Le mécanisme d'action des tanins n'est néanmoins pas complètement élucidé. Cet effet pourrait s'expliquer par l'effet antiparasitaire direct des tanins sur le parasite ainsi que par l'amélioration de l'immunité de l'hôte grâce aux tanins.

ii. La gestion des pâtures

L'objectif de la gestion des pâtures est de limiter l'infestation parasitaire des animaux. Pour cela, il faut limiter le niveau de larves infestantes sur les pâtures et également limiter le contact des animaux avec ces formes infestantes. Nous présentons ici un résumé des différentes recommandations pour la gestion des pâtures, telles que présentées dans Bélanger et al. (2007) et Kumar et al. (2013) :

- Proscrire le pâturage sur des pâtures humides. Comme nous l'avons vu, l'infestation par les larves L3 est permise par l'humidité. Il faut donc éviter de faire pâturer lorsque le risque d'infestation est important.
- Limiter la contamination des pâtures et la réinfestation des animaux. Pour cela, l'objectif est de limiter la durée de pâture sur une même parcelle. Concrètement, si un animal s'infeste dès le premier jour de pâturage sur la parcelle 1, il faut changer cet animal de pâture avant la fin de la période pré patente. Il n'aura donc pas le temps d'excréter des œufs sur cette parcelle 1. Les œufs seront déposés sur la parcelle suivante (parcelle 2). Il faut ensuite changé l'animal de pâture avant que les œufs ne se transforme en larve infestantes pour limiter la réinfestation des animaux.
- Le repos des pâtures est également important, une parcelle très parasitée met environ 3 à 6 mois à retrouver un niveau parasitaire bas. Si possible, le retour sur une pâture déjà pâturée doit se faire minimum 3 mois après la dernière pâture. Les conditions météorologiques ont une influence forte sur l'assainissement de la pâture.
- Réduire la densité des lots qui pâturent, car plus il y a d'animaux plus la pression parasitaire est forte.
- Favoriser le pâturage par groupe d'âge et préserver les animaux naïfs des milieux avec de très fortes pressions parasitaires. Les animaux étant naïfs, ils n'ont pas encore développé leur immunité et donc sont très sensibles au parasitisme. Il est donc nécessaire de stimuler leur immunité, mais avec des concentrations parasitaires faibles.
- Alternier les périodes de pâturages avec deux espèces n'hébergeant pas les mêmes parasites, ce qui peut permettre de diluer la population parasitaire et donc de limiter le niveau d'infestation de la pâture.

8. Synthèse des points essentiels

Le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins représente une problématique majeure pour les éleveurs en raison de sa forte prévalence et de ses impacts économiques significatifs. Les parasites responsables appartiennent principalement aux embranchements des Nématelminthes, des Plathelminthes et des Protozoaires,

chaque groupe comprenant des espèces spécifiques qui affectent les ovins de différentes manières.

Les Nématelminthes, en particulier la famille des Trichostrongilidae, englobent des parasites tels que *Haemonchus contortus*, *Teladorsagia circumcincta* et *Trichostrongylus colubriformis*. Ces parasites provoquent des maladies secondairement à l'ingestion de larves infestantes (L3) et à leur développement, entraînant des symptômes variés tels que l'anémie, la diarrhée et des pertes de poids. Les infestations parasitaires affectent gravement la santé et la productivité des ovins. Elles diminuent la prise alimentaire et la digestibilité des nutriments, réduisent les taux de croissance et la production lainière et laitière. Les parasites peuvent également entraîner des modifications comportementales et affecter la reproduction, bien que ces derniers aspects soient moins documentés.

La réponse immunitaire des ovins au parasitisme joue un rôle clé dans la gestion des infestations. L'héritabilité assez bonne de ce caractère suggère que la sélection génétique est une voie prometteuse pour améliorer la résistance des ovins au parasitisme. Les méthodes *in vivo* de mesure de l'infestation parasitaire incluent l'évaluation clinique de l'animal, l'analyse des fèces (coproscopie et coproculture), ainsi que l'analyse sanguine. Des stratégies de gestion, telles que des pratiques de gestion des pâturages, des traitements médicamenteux, et la vaccination sont cruciales pour limiter l'infestation et retarder l'apparition de résistances aux antiparasitaires.

En conclusion, le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins nécessite une approche intégrée combinant des suivis de l'infestation, et des stratégies de traitement, de gestion des pâturages, et de sélection génétique pour atténuer ses impacts et améliorer la santé et la productivité des élevages ovins.

III. La sélection génétique comme source d'amélioration des performances

Nous avons présenté le parasitisme gastro-intestinal et la notion d'efficience alimentaire chez les ovins. Nous allons à présent discuter l'amélioration génétique des populations ovines sur ces critères et les compromis impliqués.

1. Protocoles de sélection divergente chez les ovins

a. La sélection divergente

La sélection divergente est un type de sélection qui favorise les phénotypes extrêmes, Ce type de sélection est employé uniquement dans un contexte expérimental. En favorisant les phénotypes extrêmes, la sélection divergente permet d'étudier des caractères plus rapidement que par des schémas de sélection classique, car les divergences entre lignées deviennent plus facilement identifiables. Le protocole de sélection divergente repose sur une phase de phénotypage des animaux, les animaux avec des valeurs génétiques extrêmes pour les caractères sélectionnés sont alors, identifiés et sélectionnés. Cette sélection peut être répétée sur plusieurs générations. Le résultat d'une sélection divergente est l'obtention de 2 lignées d'animaux avec une lignée au potentiel génétique élevé ou favorable pour le caractère et l'autre lignée au potentiel génétique faible ou défavorable pour le même caractère. L'INRAE, par le biais de sélections divergentes, sélectionne plusieurs caractères chez les ovins allaitants, comme le comportement (Hazard et al. 2019), l'efficacité alimentaire (Tortereau et al. 2019), et la résistance au parasitisme (Sallé et al. 2021). Les protocoles de sélection mis en place sont présentés ci-après.

b. La sélection génétique pour l'amélioration de l'efficacité alimentaire

Le protocole de sélection des lignées divergentes ovines sur l'efficacité alimentaire de l'INRAE a débuté en 2016. Entre 2009 et 2016, l'INRAE a phénotypé sur l'efficacité alimentaire en moyenne 119 agneaux de race Romane par an. Ce jeu de données a permis d'estimer l'héritabilité de l'efficacité alimentaire ainsi que les corrélations génétiques de l'efficacité alimentaire avec d'autres caractères. Ces agneaux étaient phénotypés sur une période de 8 semaines, ils étaient nourris avec un concentré de faible énergie, et les ingestions de concentré étaient enregistrées automatiquement grâce à l'utilisation de distributeurs automatiques de concentré (DAC), à chaque visite d'un animal. Les agneaux étaient pesés au début et à la fin des 8 semaines, le GMQ était calculé sur cette période de 8 semaines. Des mesures de composition corporelle étaient également réalisées à la fin des 8 semaines. Ces données permettaient de calculer le RFI pour chaque animal. 12 béliers phénotypés

entre 2013 et 2014 ont été sélectionnés pour initier la sélection divergente, 6 possédaient une valeur génétique favorable à un RFI important (rfi+ : peu efficaces) et 6 possédaient une valeur génétique favorable à un RFI faible (rfi- : efficaces). En 2015, 51 brebis ont été accouplées avec ces béliers rfi+ et 51 brebis ont été accouplées avec ces béliers rfi- (Tortereau et al. 2020). La génération G1, issus de cette reproduction a été phénotypée selon le même protocole ramené à 6 semaines. Les 10 mâles avec les valeur génétique les plus extrême ont été sélectionnés pour se reproduire avec des brebis appartenant à la même lignée et donner naissance à la génération 2 et ainsi de suite. Il s'agit d'une sélection par les mâles. Les accouplements étaient faits de façon à limiter l'accroissement de la consanguinité. Cette sélection est efficace chez les agneaux en croissance : après 4 générations de sélection, elle a conduit à une différence de RFI de 2 écart-types génétique entre les lignées rfi+ et rfi-. Cela représente une différence d'ingestion de 10% environ pour les mêmes caractères de croissance.

c. La sélection génétique pour la résistance au parasitisme gastro-intestinal

Le protocole de sélection des lignées divergentes sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal de l'INRAE a débuté en 2015. La 1^{ère} génération G0 (123 mâles et 120 femelles) a été génotypée et phénotypée. Le phénotypage s'est déroulé selon un protocole de 11 semaines. Le protocole comportait 2 infestations artificielles successives de larves L3 de *Haemonchus contortus*. La première infestation de 10000 L3 était réalisée au début du protocole, les animaux étaient déparasités au bout de 4 semaines et le nombre d'OPG analysé. A la 6^{ème} semaine, les animaux étaient à nouveau infestés avec 10000 L3 puis déparasités à la fin de la 11^{ème} semaine et le nombre d'OPG analysé. La combinaison des informations de phénotypage et de génotypage a permis de calculer des valeurs d'élevage estimées (VEE) pour chaque individu de la génération G0. Ces valeurs sont des indicateurs du potentiel génétique des animaux pour la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Les animaux (de la génération G0) avec les VEE les plus importantes (2% des mâles et 50% des femelles) ont été sélectionnés pour se reproduire et donner naissance à la génération G1 de la lignée résistante au parasitisme. Le même schéma a été mis en place pour les animaux de la génération G0 avec les VEE les plus faibles. Les animaux de la

génération G1 ont ensuite été génotypés et phénotypés selon le même protocole que la génération G0. Les 5% des mâles (de la génération G1) avec les VEE les plus importantes ont été sélectionnés pour se reproduire avec l'intégralité des femelles de la génération G1 avec les VEE le plus importantes et environ 30% des femelles de la génération G0 avec les VEE les plus importantes. La descendance issue de cette reproduction a formé la génération G2 de la lignée résistante au parasitisme gastro-intestinal. Le même schéma a été mis en place pour les animaux de la génération G1 avec les VEE les plus faibles. Les reproductions ont été planifiées pour limiter au maximum la consanguinité (Douhard et al. 2022 ; Sallé et al. 2021). Cette sélection génétique est efficace car la différence entre la lignées sensible et la lignée résistante de la G2 est de 3,8 écarts types génétiques (écart-type calculé à la génération G0).

D'autres lignées de sélections sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal existent dans le monde. La très grande majorité des protocoles de sélections intègrent actuellement les OPG et la sélection génomique comme critères de selection (Cunha et al. 2024).

2. Le compromis génétique

a. Les corrélations génétiques entre production/santé

Comme présenté précédemment, une des stratégies pour améliorer les performances des productions animales repose sur la sélection génétique. Depuis plusieurs décennies, les efforts de sélection génétique se sont concentrés sur l'amélioration des caractères de production ainsi que des caractères de santé. Néanmoins, de nombreuses études ont mis en évidence des corrélations génétiques défavorables entre ces caractères. Par exemple, Kadarmideen (2004) a montré une corrélation génétique défavorable (coefficient de corrélation entre 0,10 à 0,15) entre la production laitière et le comptage de cellules somatiques dans le lait chez des vaches laitières. Chez les brebis laitières parasitées de la race Manech tête rousse, Aguerre et al. (2022) ont montré que le nombre d'OPG était corrélé de manière défavorable (coefficient de corrélation de 0,28) avec la production laitière. Ces corrélations défavorables impliquent l'existence d'un éventuel compromis génétique entre les caractères de santé et de production. Les explications possibles à l'existence de ces compromis seront présentées dans la section suivante.

b. Les théories du compromis génétique

Le principe de sélection naturelle selon Darwin implique que les individus les mieux adaptés à leur environnement soient les individus qui se développent le mieux. L'évolution des caractères permettant aux individus de survivre et leur conférant une valeur adaptative est expliquée par la théorie de l'histoire de vie (Williams 2008). Cette théorie tente d'expliquer comment des êtres vivants évoluent dans leur environnement pour parvenir à se reproduire. Elle repose sur l'hypothèse que les êtres vivants évoluent dans un milieu avec des ressources finies et des contraintes et qu'en fonction de ces paramètres, les ressources doivent être investies par les individus dans l'entretien, la reproduction, la croissance, ou être stockées dans des proportions favorisant sa survie (Stearns 1992).

Le caractère fini des ressources implique que certains des caractères précédemment mentionnés soient plus ou moins sélectionnés en fonction de la valeur adaptative qu'ils confèrent. C'est le principe de l'allocation des ressources. Ce principe implique l'existence de compromis entre les différents caractères (Cody 1966). Néanmoins, la théorie d'allocation des ressources, bien que très populaire, n'est pas toujours applicable aux animaux d'élevage. En effet, les animaux d'élevage étant dans des milieux nutritifs abondants, les compromis ne peuvent pas toujours se manifester. Par exemple, bien qu'une réduction de l'énergie dédiée à l'entretien ait été observée à la suite de la sélection génétique pour l'efficacité alimentaire, cette réduction ne semble pas entraîner de diminution de la longévité ou de la survie (Douhard et al. 2021). Selon Douhard et al. (2021), la théorie de l'allocation des ressources actuelle doit être envisagée dans un cadre plus large en intégrant des facteurs tels que les limites physiologiques et les mécanismes de régulation impliquée dans l'allocation des ressources. Par exemple, les limites physiologiques peuvent affecter la vitesse à laquelle les processus biologiques comme la croissance, la reproduction peuvent se réaliser, ce qui peut modifier les compromis entre ces fonctions ou l'expression de ces compromis au cours de la vie de l'animal.

D'autres phénomènes permettant d'expliquer les compromis sont également évoqués dans la littérature (Garland, Downs, Ives 2022). Par exemple, les modifications fonctionnelles secondaires à l'amélioration d'un caractère peuvent être source de compromis en impactant d'autres caractères. D'autres modifications

touchant les molécules impliquées dans les mécanismes biochimiques et physiologiques, telles que les hormones et les neurotransmetteurs, peuvent également engendrer des compromis en raison de leur action globale sur l'ensemble de l'organisme (Garland, Downs, Ives 2022).

La compréhension et la gestion des compromis est complexe et constitue un des enjeux majeurs de la sélection génétique pour éviter la détérioration de caractères essentiels. Dans la partie suivante, nous présentons l'état des connaissances actuelles sur le compromis entre efficacité alimentaire et parasitisme gastro-intestinal.

c. Le compromis génétique entre efficacité et résistance au parasitisme gastro-intestinal

Chez les ovins, un nombre limité d'études s'est intéressé aux compromis éventuels entre efficacité alimentaire et résistance au parasitisme. Ferreira et al. (2021) ont étudié l'impact de la résistance au parasitisme sur l'efficacité alimentaire chez 67 agneaux issus de sélections divergentes sur la résistance au parasitisme. Ils ont conclu que la sélection génétique pour la résistance au parasitisme n'exerce aucune influence sur l'efficacité alimentaire. Ces résultats ont été appuyés par Navajas et al. (2022), dans une étude réalisée chez 217 agnelles, dans laquelle ils n'ont pas mis en évidence de corrélation phénotypique entre le nombre d'OPG (choisis comme critère de résistance au parasitisme) et le RFI. Ces résultats ne permettent ainsi pas de démontrer l'existence d'un compromis entre efficacité alimentaire et résistance au parasitisme

Pour compléter ces résultats qui semblent ne pas mettre en évidence de compromis entre le parasitisme et les caractères de production, Mucha et al. (2022), dans une revue de 166 études portant sur l'étude des corrélations entre les caractères d'efficacité et de parasitisme, ont identifié, sur la base de 24 estimations issues de 5 études, que la corrélation génétique estimée entre la croissance et les OPG est de $-0,28 \pm 0,11$. Cela tend à indiquer l'absence de compromis entre croissance et excrétion d'œufs. Ces résultats sont tout de même à nuancer en raison de la forte variabilité des corrélations estimées entre les études.

Néanmoins, Douhard et al. (2023) ont mis en évidence l'existence d'un coût énergétique de l'immunité (représentant au maximum 15% de l'énergie ingérée

pendant quelques jours au cours d'une infestation par *H contortus*). Les animaux sélectionnés pour leur résistance au parasitisme gastro-intestinal allouaient 3 fois plus d'énergie à la lutte contre le parasitisme que les agneaux peu résistants. Douhard et al. (2024) ont également montré que la sélection génétique d'agneaux résistant au parasitisme gastro-intestinal est associée à une diminution de la proportion de gras corporel chez ces agneaux. Ces résultats montrent la nécessité d'étudier l'impact de ces sélections génétiques plus en détail.

3. Synthèse des points essentiels

La sélection génétique offre une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal chez les ovins. Cependant, ces processus de sélection impliquent des compromis qu'il est essentiel de comprendre pour éviter des effets défavorables sur d'autres caractères comme la production ou la santé. Les études récentes n'ont pas révélé de compromis majeur entre l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme. Cependant, certains coûts énergétiques liés à l'immunité contre le parasitisme ont été identifiés. Cela souligne l'importance de continuer à explorer ces compromis et d'affiner les stratégies de sélection afin de gérer simultanément la sélection des différents caractères.

PARTIE 2

ÉTUDE EXPERIMENTALE

I. Introduction

Pour répondre aux enjeux posés par la transition agroécologique, l'amélioration des systèmes d'élevage est devenue une priorité. Cependant, cette amélioration génère des défis spécifiques à chaque type d'élevage. Dans le cas de l'élevage ovin, les enjeux incluent la dépendance aux aliments concentrés et la gestion du parasitisme gastro-intestinal. Dans ce contexte, la sélection génétique apparaît comme une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité alimentaire tout en renforçant la résistance des troupeaux face aux parasitisme gastro-intestinal.

L'étude présentée dans ce travail a été menée dans le cadre du projet SMARTER («Small RuminanTs breeding for Efficiency and Resilience»). Le projet SMARTER est un projet européen, mené de 2018 à 2023, avec pour objectif, l'amélioration de la résilience et de l'efficacité alimentaire des petits ruminants par le biais de la sélection génétique. Comme nous l'avons présenté précédemment, l'amélioration de l'efficacité alimentaire et de la résistance au parasitisme sont des enjeux d'avenir pour la filière ovine. L'existence d'un éventuel compromis entre ces deux caractères serait une limite à leur amélioration conjointe. L'intérêt de cette étude, mise en place par l'INRAE entre 2020 et 2021, était de fournir des éléments de réponse sur le coût génétique en évaluant l'effet de la sélection génétique, sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal et l'efficacité alimentaire, sur les caractères de condition corporelle (PV, épaisseur de muscle et de gras dorsal), de parasitisme (Hématocrite, et OPG) et d'efficacité alimentaire pendant la période péri-partum. Les lignées RFI n'avaient jamais été étudiées pendant cette période. Les lignées SGI avaient déjà été étudiées, mais les caractères étudiés étaient uniquement la résistance au parasitisme et la condition corporelle.

L'objectif d'étudier l'impact biologique de ces sélections génétique a fait apparaître plusieurs questions de recherches :

1. Comment calculer l'efficacité alimentaire chez les brebis allaitantes en phase péri-partum ?

2. Comment évoluent le parasitisme, l'ingestion et la composition corporelle chez les brebis de ces différentes lignées autour de la mise bas ?

3. La sélection génétique sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal affecte-t-elle l'efficacité alimentaire en période péri-partum ?

4. La sélection génétique sur l'efficacité alimentaire affecte-t-elle la résistance au parasitisme gastro-intestinal en période péri-partum ?

Nous pouvons émettre plusieurs hypothèses à propos des questions de recherche 2, 3 et 4.

Question 2. :

- 1^{ère} hypothèse : Les lignées SGI et RFI sont sélectionnées dans le jeune âge avec des rations riches en concentré, la modification des conditions environnementales associée au changement de stade physiologique pourrait engendrer des changements dans les réponses aux caractères sélectionnés.

- 2^{ème} hypothèse : Des effets secondaires, respectivement de la résistance au parasitisme (baisse de l'épaisseur de gras dorsal) et de l'efficacité alimentaire (augmentation de l'épaisseur de muscle dorsal) ont été suspectés chez les animaux en croissance sélectionnés sur ces critères. Nous pouvons émettre l'hypothèse que ces effets secondaires pourraient être identifiés de manière plus marquée dans une période de stress comme la mise-bas.

Question 3 et 4. :

- 3^{ème} hypothèse : Les sélections génétiques sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal et l'efficacité alimentaire pourraient être à l'origine d'un coût génétique entraînant un compromis ; néanmoins, ce compromis n'a jamais été identifié clairement. Nous pouvons donc imaginer qu'une période de stress telle que la mise-bas pourrait nous permettre de mettre en évidence des éléments supplémentaires pouvant suggérer un compromis génétique.

II. Matériel et méthodes

1. Ethique

Ce projet a bénéficié d'une autorisation par le ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation français. (Autorisation APAFIS#23681-2020081909587718 v1).

2. Présentation générale

L'expérimentation s'est déroulée entre 2021 et 2022 sur le site expérimental INRAE de la Sapinière, à OSMOY (18390) et a duré 105 jours. Cent-quatre brebis gestantes, de race Romane, âgées de 18 à 24 mois issues de sélections divergentes étaient intégrées à ce protocole.

Ces brebis étaient issues de 2 lignées de sélection divergente respectivement sur le parasitisme gastro-intestinal et sur l'efficacité alimentaire :

- Les lignées SGI (pour " Strongles Gastro-Intestinaux ") : 54 brebis, dont 27 étaient sensibles au parasitisme (lignée sgiS) et 27 étaient résistantes au parasitisme (lignée sgiR). Ces brebis étaient nées entre le 5 et le 14 mars 2021.
- Les lignées RFI (pour " Residual Feed Intake ") : 50 brebis, dont 25 étaient efficaces (lignée rfi-) et 25 peu efficaces (lignée rfi+). Ces brebis étaient nées entre le 24 novembre 2020 et le 6 janvier 2021.

Ces brebis étaient gestantes d'au moins 2 agneaux. Le nombre d'agneaux était déterminé par échographie après 2 mois de gestation et avant le début de l'expérimentation. Les chaleurs, des brebis intégrées à l'étude, avaient été groupées et la lutte planifiée pour avoir des mises-bas les plus groupées possible environ à la moitié de l'expérimentation (autour du jour 60). Bien qu'il y ait un écart d'âge d'environ trois mois entre les deux lignées, cet aspect était jugé peu susceptible d'affecter les résultats, puisque la lutte a eu lieu après 17 mois, autour du 15 août 2022. Après la mise bas, la taille de la portée était limitée à 2 agneaux pendant l'allaitement.

Au 1^{er} jour de l'expérimentation (15/11/21), les 104 brebis ont été soumises à un challenge parasitaire. Elles ont été infestées avec 10 000 larves infestantes d'*Haemonchus contortus* de la souche sensible « Weybridge ». Ces brebis avaient déjà été intégrées à un autre protocole expérimental en 2021 au cours duquel la moitié d'entre elles avaient été infestées par 10 000 larves d'*Haemonchus contortus* à l'âge de 5 mois. Une "remise à niveau immunitaire" de toutes les brebis a été mise en place avant notre expérimentation pour limiter ce biais. Pour cette remise à niveau,

l'intégralité des brebis gestantes a été infestées le 6/09/2022 par 10 000 larves d'*Haemonchus Contortus* (stade L3) pour une période de 5 semaines au terme de laquelle elles ont été déparasitées.

Pendant l'expérimentation, les brebis étaient allotées en 2 lots (le lot 79 et le lot 80). Chaque lot était de même surface et comportait 2 distributeur automatique de concentré (DAC), 1 Greenfeed (GF), 6 distributeur automatique de fourrage (DAF), 2 Distributeurs Automatiques d'eau (DAO). La répartition des brebis dans les lots a été déterminée par le poids mesuré avant le début de l'expérimentation, tout en veillant à équilibrer les effectifs de chaque lignée au sein des deux lots. La répartition des brebis par lot et par lignée est présentée dans le Tableau 8. Chaque lot a été paillé une fois au début de l'expérimentation, le paillage a ensuite été complété par une litière à base de copeaux de bois pour éviter de fausser les ingestions de fourrage.

Tableau 8: Tableau des répartitions des brebis par lignée et par lot (sgiS : lignée sensible au parasitisme gastro-intestinal, sgiR: lignée résistante au parasitisme gastro-intestinal, rfi+ : lignée peu efficiente, rfi- : lignée efficiente)

Lignée	Lot	
	79	80
sgiS	14	13
sgiR	13	14
rfi+	12	13
rfi-	13	12

3. Alimentation

Au cours de l'expérimentation, les brebis ont été alimentées avec des aliments concentrés et des fourrages. Les fourrages étaient distribués à volonté pendant l'intégralité de l'expérimentation alors que les aliments concentrés étaient rationnés. Les besoins théoriques des brebis ont été calculés pour 5 périodes et la ration en concentré autorisée ajustée en conséquence (Tableau 9). Deux aliments concentrés commerciaux ont été distribués, un aliment "entretien" pendant la phase de gestation et un aliment "lactation" après la mise-bas. Les valeurs alimentaires théoriques de ces aliments sont présentées dans l'annexe 1. La distribution des aliments a été réalisée grâce à différents distributeurs automatiques. Parmi ces dispositifs, le DAC et le GF permettaient de distribuer les concentrés de façon individualisée grâce à un système de radio-identification. Le GF était intégré au protocole expérimental pour les besoins

d'une autre étude et devait être programmé pour délivrer 360 g de concentré "lactation" par jour et par brebis en 6 fois. Malheureusement, un problème de programmation du GF a entraîné une différence de distribution de concentré entre les lignées RFI et SGI. En effet, les lignées RFI ont bien reçu 360g de concentré par le GF par jour alors que les lignées SGI ont reçu uniquement 240 g/j. Les lignées SGI ont donc reçu moins d'aliments concentré que prévu dans la ration théorique et donc moins d'aliment que les lignées RFI. Ce biais expérimental sera pris en compte dans l'analyse des résultats. Le fourrage était distribué de façon *ad libitum* par les DAF.

Tableau 9: Tableau des rations d'aliment concentré autorisées au cours de l'étude

Semaines autour mise bas	Ration d'aliment concentré (Kg/jour)		
	DAC	GF	
		RFI	SGI
Semaines -8 à -5	0,12	0,36	0,24
Semaines -4 à -3	0,36	0,36	0,24
Semaines -2 à jour mise-bas	0,60	0,36	0,24
Jour mise-bas à semaine +3	0,90	0,36	0,24
Semaine +4 à Semaine +6	0,45	0,36	0,24

Légende :

- Aliment "Entretien"
- Aliment "Lactation"

4. Collecte des données

Différentes données ont été mesurées sur les brebis au cours de l'étude. Les données mesurées, les méthodes de mesure, ainsi que la fréquence de mesure sont présentées ci-dessous.

a. Données enregistrées quotidiennement

Les données d'ingestion, d'abreuvement et de poids vif (PV) ont été enregistrées de manière quotidienne pour toutes les brebis avec les distributeurs automatiques. Ce sont des distributeurs automatiques d'aliment et d'abreuvement développés par l'INRAE (excepté le GF). Le fonctionnement de DAC, DAO et DAF sont respectivement présentés dans les annexes 2, 3 et 4. Les concentrés étaient délivrés par le DAC et le GF, le fourrage était distribué par le DAF et l'eau était distribuée par le (DAO). Le DAO est équipé d'un plateau de pesée, à l'occasion de la prise de boisson, le poids de l'animal était également enregistré. Ces distributeurs automatiques ont donc permis d'accéder à une valeur de PV ainsi qu'aux valeurs d'ingestion de fourrage, de concentré et d'eau par jour et par brebis.

Néanmoins, l'utilisation de ces distributeurs automatiques a nécessité une période d'adaptation pour les brebis. Cette période a été mise en place du 2/11 au 20/11 (5 jours après le début de l'expérimentation). Les brebis des lignées RFI étaient déjà adaptées aux DAC, DAF et DAO avant le début de l'expérience car elles avaient déjà été intégrées à une expérience avec les distributeurs automatiques. Elles ont, malgré cela, quand même été intégrées à la période d'adaptation comme les brebis SGI.

b. Données enregistrées de manière hebdomadaire

Des prélèvements sanguins et de fèces ont été réalisés de manière hebdomadaire. Ces prélèvements ont ensuite été analysés, par micro-hématocrite et par coproscopie. Grâce à ces analyses, nous avons enregistré une donnée d'hématocrite et une donnée d'OPG par individu et par jour à différents stades de l'infestation parasitaire. Les prélèvements de fèces ont débuté à partir de J21, c'est-à-dire après la période pré-patente pendant laquelle il n'y a normalement pas d'excrétion d'œufs chez *H. contortus*.

c. Données enregistrées de manière bimensuelle

Des échographies en région lombaire droite et gauche ont été réalisées de manière bimensuelle sur toutes les brebis. Ces données échographiques droites et gauches ont été moyennées et ont permis de déterminer les mesures d'épaisseur moyenne de muscle et de gras par brebis et par jour d'échographie.

d. Autres données enregistrées

Aussi, des données de poids de portée ont été enregistrées après la mise-bas. Chaque agneau était pesé individuellement et les poids additionnés pour obtenir un poids de portée totale par brebis. Le poids de la portée a été relevé une fois au jour de mise-bas, une fois au jour 92 et une fois le dernier jour de l'étude (jour 105).

Les différentes informations à propos du protocole expérimental, présentées dans cette partie sont résumées dans la Figure 11.

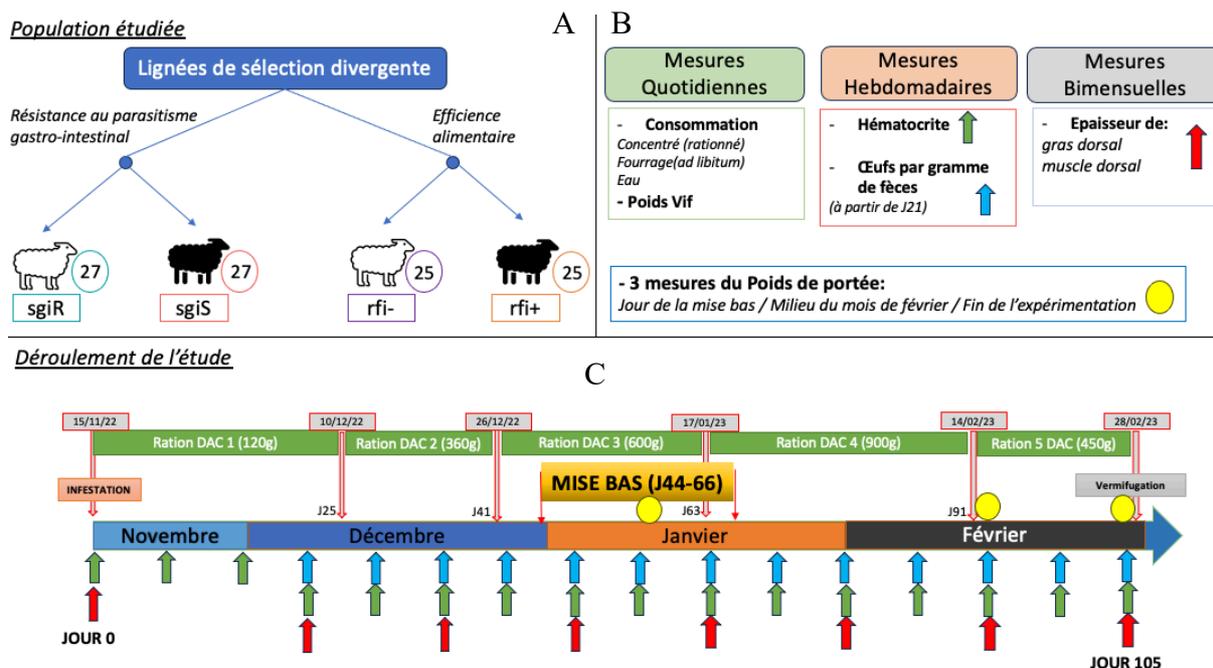


Figure 11: Protocole expérimental (Partie A : Population des brebis intégrées dans l'étude, Partie B : Résumé des mesures effectuées sur les brebis pendant l'expérimentation, Partie C : Frise chronologique du protocole expérimental)

5. Analyses statistiques

L'analyse des données recueillies au cours de cette expérimentation a été réalisée en différentes étapes présentées ci-dessous. Dans un premier temps, les différents caractères mesurés ont été analysés un par un de manière à décrire leur évolution et comprendre les facteurs influençant leurs variations. Nous avons ensuite déterminé une méthode de calcul de l'efficacité alimentaire sur des brebis, gestantes et allaitantes. Cette méthode de calcul a ensuite été utilisée dans l'objectif de calculer l'efficacité alimentaire par jour. Nous avons ensuite déterminé les facteurs de variation de l'efficacité alimentaire. Dans une première partie, nous présenterons la méthode générale utilisée dans notre étude pour élaborer les modèles linéaires puis nous détaillerons de manière spécifique les analyses menées dans chaque partie. Les analyses statistiques présentées ci-dessous ont été menées avec le logiciel R version 4.3.1. (R Core Team 2024)

a. Description des données brutes

Dans un premier temps, nous avons vérifié l'évolution des effectifs au cours de l'étude selon le stade physiologique des brebis (en gestation ou en lactation) ainsi que l'évolution du nombre d'agneaux nés puis allaités par brebis. Les données brutes ont

également été décrites. Pour chaque lignée et chaque période (avant et après mise bas), les moyennes, écart types et les valeurs minimales et maximales des différentes variables mesurées au cours de l'études ont été présentés.

b. Principe général d'élaboration des modèles linéaires

Nous avons utilisé deux types de modèles linéaires pour analyser nos données, le modèle linéaire simple et le modèle linéaire mixte (prenant en compte la dépendance des mesures répétées effectuées sur une même brebis). Le modèle linéaire simple a été utilisé pour l'élaboration d'un modèle simplifié de calcul de l'efficacité alimentaire (données moyennées avant la mise-bas et après la mise-bas) et le modèle linéaire mixte a été utilisée pour la modélisation des données longitudinales (analyse des données caractère par caractère et calcul de l'efficacité alimentaire jour par jour). La méthode d'analyse que nous avons suivie est détaillée dans Zuur et al. (2009).

i. Le modèle linéaire

L'équation du modèle linéaire est la suivante :

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xi} + \varepsilon_i$$

Avec $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Avec Y_i la valeur de la variable Y à expliquer pour l'individu i , β_0 l'intercept du modèle linéaire, β_x les coefficients de chaque variable explicative X_x (n variables), X_{xi} la valeur de la variable X_x pour l'individu i et ε_i les résidus du modèle qui correspondent à la partie non expliquée. La distribution de ces résidus doit suivre une loi normale, avoir une moyenne de 0 et une variance homogène σ^2 .

ii. Le modèle linéaire mixte

Le modèle linéaire mixte diffère du modèle linéaire, car il permet d'intégrer au modèle un effet aléatoire. Dans nos analyses des données longitudinales, cet effet aléatoire était toujours l'individu. Ce modèle permettait de prendre en compte l'effet

aléatoire de chaque individu (plusieurs mesures non-indépendantes réalisées sur le même individu) sur la variable à expliquer.

L'équation du modèle linéaire mixte est la suivante :

$$Y_{ij} = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xij} + \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ et $\mu_i \sim N(0, \sigma_{\text{ind}}^2)$

Avec Y_{ij} la valeur de la variable Y à expliquer pour l'individu i au jour j , β_0 l'intercept du modèle linéaire, β_x les coefficients de chaque variable explicative X_x (n variables), X_{xij} la valeur de la variable X_x pour l'individu i au jour j , μ_i l'effet aléatoire associé à chaque individu i et ε_{ij} les résidus du modèle qui correspondent à la partie non expliquée par l'équation du modèle. La distribution de ces résidus doit suivre une loi normale, avoir une moyenne de 0 et une variance homogène σ^2 .

iii. Validation des modèles linéaires

La validation d'un modèle linéaire ou linéaire mixte implique différentes hypothèses qui sont la normalité de la distribution des résidus du modèle, l'indépendance de ces résidus et l'homogénéité de la variance de ces résidus. Dans nos analyses, ces conditions étaient validées par examen visuel des résidus du modèle après leur calcul.

(1) La normalité de la variance des résidus

La première condition est la normalité des résidus du modèle. La normalité s'examine en réalisant un histogramme de l'intégralité des résidus du modèle. La distribution, de ces résidus doit alors être gaussienne.

(2) L'indépendance des résidus

L'indépendance des résidus est une autre condition d'application d'un modèle linéaire. Elle signifie que la proportion d'une observation, inexpliquée par le modèle, est indépendante d'une observation à l'autre. L'indépendance des résidus peut être violée si le modèle linéaire n'est pas adapté à la relation entre la variable expliquée et les variables explicatives. Elle peut également être violée selon la nature des données. Par exemple, des données chronologiques sont souvent corrélées entre elles. C'est ce qu'on appelle l'autocorrélation.

L'indépendance des résidus peut être vérifiée en traçant le graphique des résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle. Ce graphique ne doit pas montrer de motif graphique dans les résidus. Aussi, l'autocorrélation des données chronologiques est vérifiée par le tracé de la fonction d'autocorrélation (ACF) qui permet de représenter la corrélation des données en fonction de leur proximité dans le temps.

Si jamais l'indépendance des résidus de notre modèle n'est pas respectée, ce qui peut être observé dans le cas des données longitudinales que nous analysons dans cette étude, il est possible d'ajouter une structure de corrélation qui permet de prendre en compte l'autocorrélation des résidus entre eux. Pour chaque modèle élaboré, nous avons testé si l'ajout d'une structure d'autocorrélation avec "corAR1" du package "nlme" (Pinheiro et al. 2024) améliorerait le modèle. Dans le cas de l'ajout d'une structure de corrélation, le coefficient de corrélation Phi renseigne la corrélation des résidus du modèle. Plus le coefficient est proche de un, plus la corrélation entre les données est importante. Dans nos analyses, la structure d'autocorrélation testée était de la forme "corrélation = corAR1 (0.5, form = ~ Joursnum)", il s'agit d'une autocorrélation auto régressive, qui permet de prendre en compte la corrélation des résidus entre les jours.

(3) Homogénéité de la variance des résidus

Une condition supplémentaire à la validation du modèle linéaire est l'homogénéité de la variance des résidus. Cette homogénéité est testée en traçant le graphique des résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle. Les résidus doivent être centrés sur 0 et répartis de manière homogène de part et d'autre de la ligne d'équation $y = 0$.

En cas de violation de l'homogénéité de la variance, il est possible de rajouter une structure de variance au modèle. Cette structure de variance permet au modèle d'ajuster ses prédictions en prenant en compte la différence de variance des résidus entre différents groupes.

iv. Sélection de modèle

Dans l'élaboration des modèles mixtes, nous avons testé différentes structures de variance et d'autocorrélation (présentées ci-après). Les modèles mixtes ont été

ajustés avec la méthode “REML” (maximum de vraisemblance restreinte) pour sélectionner la structure de variance et d'autocorrélation la plus adaptée. Les structures de variance et d'autocorrélation du modèle étaient ensuite évaluées en comparant le critère d'Akaike (AIC) des différentes versions du modèle. L'AIC permet de choisir parmi plusieurs modèles en équilibrant la qualité de l'ajustement et la complexité du modèle.

Le pourcentage de variance, de la variable dépendante, expliqué par le modèle a été étudié. Dans le cas de modèles linéaires simples, nous avons étudié le coefficient de détermination. Dans le cas de modèle linéaire mixte, nous avons étudié le coefficient de détermination marginal (R^2_m) et le coefficient de détermination conditionnel (R^2_c) (Nakagawa, Schielzeth 2013). Le R^2_m correspond au pourcentage de variance de la variable étudiée expliqué par les effets fixes du modèle. Le R^2_c correspond au pourcentage de variance de la variable étudiée expliqué par les effets fixes et les effets aléatoires du modèle. Plus ces coefficients sont proches de 1, plus l'ajustement du modèle aux données est élevé. Dans le cas des modèles mixtes, nous avons également déterminé la répétabilité du modèle avec l'indice de corrélation intra classe (ICC). Un ICC proche de 1 indique une forte répétabilité, dans notre cas, cela signifie que la majorité de la variance est due aux différences entre individus, et que les mesures répétées sur un même individu sont très similaires, donc fiables.

v. Détermination de la significativité des variables explicatives du modèle

Une fois la structure de variance et d'autocorrélation du modèle déterminée, la significativité des variables explicatives a été testée. Dans le cas des modèles linéaires, la significativité des variables a été testée avec la fonction “Anova” du package R *car* (Fox, Weisberg 2018).

Dans le cas des modèles linéaires mixtes, un test du rapport de vraisemblance a été réalisé entre le modèle complet calculé avec la méthode “ML” (maximum de vraisemblance) et le même modèle sans la variable dont on veut déterminer la significativité.

c. Modèles appliqués à notre étude

Les analyses des données avant et après la mise-bas ont été réalisées séparément pour la modélisation. Pour la période avant la mise-bas, les données incluent les mesures effectuées sur les brebis gestantes jusqu'au 62^{ème} jour inclus. Pour la période après la mise-bas, seules les données des brebis allaitantes à partir du 58^{ème} jour inclus ont été retenues. Étant donné que le nombre de brebis gestantes diminuait progressivement au cours de l'étude, tandis que celui des brebis allaitantes augmentait, ces périodes ont été choisies pour garantir un nombre suffisant de données à analyser quotidiennement par lignée. Le jour 62 a été sélectionné comme le dernier jour où au moins 20 % des brebis n'avaient pas encore mis bas, tandis que le jour 58 a été choisi comme le premier jour où au moins 20 % des brebis avaient déjà mis bas.

i. Modèles d'analyse caractère par caractère

Au cours de cette étape, les caractères qui ont été analysés avant et après mise-bas sont le PV, les épaisseurs de gras et de muscle dorsal, le nombre d'OPG, l'hématocrite, les ingestions de fourrage, de concentré et l'ingestion totale.

Pour l'élaboration de ces modèles, nous avons suivi la démarche suivante :

Étape 1 : i) choix des variables explicatives du modèle (Tableau 10), ii) écriture de la formule du modèle avec effet aléatoire de l'individu et iii) calcul du modèle par la méthode "REML" avec la fonction *gls* du package "nlme". Le tableau ci-dessous présente les différentes variables incluses dans les modèles d'analyse, caractère par caractère selon la période étudiée.

Tableau 10 : Variables explicatives utilisées dans les modèles d'analyse caractère par caractère

Variables explicatives utilisées dans les modèles	Description de la variable	Période étudiée	
		Modèle avant mise-bas	Modèle après mise-bas
Taille de la portée	Variable catégorielle à 2 modalités : "2" (portée égale à 2) ou "sup2" (portée supérieure à 2).	*	
Jour de mise bas	Variable continue qui renseigne le nombre de jours entre la mise-bas et la date de la mesure. Cette variable prend la valeur 0 au jour de mise-bas de la brebis, des valeurs négatives avant et des valeurs positives après la mise-bas.	*	*

Variables explicatives utilisées dans les modèles	Description de la variable	Période étudiée	
		Modèle avant mise-bas	Modèle après mise-bas
Taille de la portée × Jour de mise bas	L'interaction permet de vérifier si l'effet de la taille de portée sur le caractère étudié est constant ou non selon le jour de mise-bas et inversement.	*	
Lot	Variable catégorielle à 2 modalités : "79" (lot 79) ou "80" (lot 80).	*	*
Lignée	Variable catégorielle à 4 modalités : "rfi+" (lignée rfi+), "rfi-" (lignée rfi-), "sgiS" (lignée sgiS), "sgiR" (lignée sgiR).	*	*
Jour	Variable catégorielle à 106 modalités, qui renseigne le nombre de jours depuis le début de l'expérience. Cette variable prend la valeur 0 au jour d'infestation des brebis.	*	*
Lignée × Jour	L'interaction permet de vérifier si l'effet de la lignée sur le caractère étudié est constant ou non selon le jour d'expérience et inversement.	*	*
Nombre d'agneaux allaités	Variable catégorielle à 2 modalités : "1" (1 agneau allaité) ou "2" (2 agneaux allaités). Le nombre d'agneaux allaités peut varier au cours de l'étude en fonction des décès éventuels d'agneaux. La valeur de cette variable correspond au nombre d'agneaux allaités le jour où la mesure est effectuée.		*
Nombre d'agneaux allaités × Jour de mise bas	L'interaction permet de vérifier si l'effet du nombre d'agneaux allaités sur le caractère étudié est constant ou non selon le jour de mise-bas et inversement.		*

Étape 2 : ajout de différentes structures de variance aux modèles et test du modèle le plus adapté à chaque variable étudiée grâce à l'AIC. Les structures de variance testées sont présentées dans le Tableau 11.

Tableau 11: Structures de variance testées pour les modèles d'analyse caractère par caractère

Structures de variance testées	Forme de la variable
Variance par jour (Non testée pour le PV et les mesures d'ingestion)	Jour : variable catégorielle à 106 modalités ("0" à "105")

Structures de variance testées	Forme de la variable
Variance par jour de mise bas (en facteur)	FJMB : variable catégorielle à 12 modalités, chaque modalité correspondant à une période de 10 jours
Variance par lignée	Lignée : variable catégorielle à 4 modalités : “rfi+” (lignée rfi+), “rfi-” (lignée rfi-), “sgiS” (lignée sgiS), “sgiR” (lignée sgiR).
Variance par ration	Ration : variable catégorielle à 5 modalités correspondant aux périodes de ration.
Variance par portée	Portée : variable catégorielle à 2 modalités : “2” (portée égale à 2) ou “sup2” (portée supérieure à 2).
Variance par lot	Lot : variable catégorielle à 2 modalités : “79” (lot 79) ou “80” (lot 80).

Étape 3 : ajout d’une structure de corrélation au modèle sélectionné à l’étape 2, la structure de corrélation était une autocorrélation de la forme suivante : corAR1 (0.5, form = ~ Joursnum) avec “Joursnum”, une variable continue renseignant le nombre de jours écoulés depuis le début de l’expérience. Ce nouveau modèle et celui sélectionné à l’étape précédente sont comparés et sélectionnés selon l’AIC.

Étape 4 : une fois le modèle sélectionné, les résidus du modèle sont examinés. S’ils satisfont les critères de validation alors le modèle est validé.

Étape 5 : la significativité des effets fixes est alors testée par test du rapport de vraisemblance (modèle ajusté avec la méthode “ML”) et les moyennes corrigées estimées avec la fonction *predict* (modèle ajusté avec la méthode “REML”), pour chaque niveau de la variable “Jour” et pour la moyenne de variable “Jour de mise bas” à ce niveau-là.

Étape 6 : Pour cette étape le modèle était ajusté avec la méthode “REML”. Lorsque l’interaction entre la lignée et le jour était significative, les différences entre les moyennes ajustées par jour pour chaque lignée étaient analysées. Si cette interaction n’était pas significative, mais que l’effet de la lignée l’était, les différences entre les moyennes ajustées par période (avant ou après la mise-bas) entre les lignées étaient alors examinées. Pour les autres variables significatives du modèle, seuls les coefficients significatifs et pertinents pour l’interprétation étaient étudiés.

ii. Modèles de détermination du RFI simplifié (RFI_s)

Après avoir analysé les données, caractère par caractère, nous avons élaboré un premier modèle linéaire de calcul du RFI. Comme évoqué précédemment les données avant mise-bas et après mise-bas ont été étudiées séparément. Ces modèles ont été réalisés de manière très simplifiée avec des données moyennées par période (avant mise bas et après mise bas).

Les modèles simplifiés pour le calcul du RFI_s étaient de la forme suivante :

$$MSI_i = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xi} + RFI_{s i}$$

Avec MSI_i la moyenne journalière de la quantité de matière sèche ingérée (tout aliments confondus) par l'individu i sur la période étudiée (avant ou après mise bas), β_0 l'intercept du modèle, β_x les coefficients associés à chacune des n variables explicatives X_x , et $RFI_{s i}$ le résidu du modèle pour l'individu i . Le Tableau 12 présente les variables explicatives testées dans les modèles simplifiés de calcul du RFI.

Tableau 12 : Variables explicatives utilisées dans les modèles de calcul du RFI_s

Variables explicatives utilisées dans les modèles (X _x)	Après Mise bas	Après Mise bas
	Données récoltées sur les brebis gestantes avant le jour 62	Données récoltées sur les brebis allaitantes après le jour 58
EXPE : variable catégorielle à 2 modalités "SGI" et "RFI"	*	*
Poids métabolique (PM) (=PV ^{0,75}) moyen de chaque brebis sur la période étudiée en Kg (une donnée par brebis et par période)	*	*
Épaisseur de gras dorsal moyenne de chaque brebis sur la période étudiée en mm (une donnée par brebis et par période)	*	*
Épaisseur de muscle dorsal moyenne de chaque brebis sur la période étudiée en mm (une donnée par brebis et par période)	*	*

Variables explicatives utilisées dans les modèles (X_x)	Après Mise bas	Après Mise bas
	Données récoltées sur les brebis gestantes avant le jour 62	Données récoltées sur les brebis allaitantes après le jour 58
Gain moyen quotidien de chaque brebis sur la période étudiée en Kg/jour. Cette variable correspond au coefficient directeur de la régression linéaire du PV en fonction du temps sur la période	*	
Taille de la portée par brebis : variable catégorielle à 2 modalités : "2" (portée de 2 agneaux), "sup 2" (portée supérieure à 2 agneaux)	*	
Nombre d'agneaux allaités par brebis sur la période étudiée : variable catégorielle à 3 modalités : "2"(2 agneaux allaités), "1-2" (entre un et deux agneaux allaités : brebis allaitant initialement deux agneaux, dont un est décédé), "1" (1 agneau allaité)		*
Poids moyen de la portée de chaque brebis sur la période étudiée : variable continue en Kg		*

Ce modèle a été ajusté sans ajout de structure de variance ou d'autocorrélation. Les résidus du modèle ont ensuite été examinés graphiquement de manière à valider le modèle. Ces résidus (RFI_s) ont ensuite été analysés, comme les autres phénotypes étudiés.

iii. Modèles d'analyse du RFI simplifié (RFI_s)

L'analyse du RFI_s a été effectuée par un modèle linéaire multiple selon l'équation suivante :

$$RFI_{s\ i} = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xi} + \varepsilon_i$$

Avec $RFI_{s\ i}$, la consommation résiduelle de l'individu i calculée par le modèle précédent, β_0 l'intercept du modèle, et β_x les coefficients associés aux n variables X_x . Les variables X_x testées dans les modèles d'analyse du RFI sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Variables explicatives utilisées dans l'analyse du RFI_s

Variables explicatives utilisées dans les modèles d'analyse du RFI (X _x)	Modèle avant Mise-bas	Modèle après Mise-bas
Lot : Variable catégorielle à 2 modalités : "79" (lot 79) ou "80" (lot 80).	*	*
Lignée : variable catégorielle à 4 modalités : "rfi+" (lignée rfi+), "rfi-" (lignée rfi-), "sgiS" (lignée sgiS), "sgiR" (lignée sgiR).	*	*

Les résidus de ce modèle ont été inspectés pour valider le modèle. Les effets fixes sont alors testés par analyse de variance.

iv. Modèles de détermination du RFI par jour d'échographie (RFI_e)

Après avoir analysé le RFI_s, nous avons élaboré un modèle linéaire mixte pour déterminer le RFI calculé par jour d'échographie (RFI_e). Comme présenté précédemment, les périodes avant mise-bas et après mise-bas ont été étudiées séparément. Pour ajuster ces nouveaux modèles, les données de certaines variables intégrées dans les modèles ont été moyennées autour des dates d'échographie (qui sont les données limitantes) pour diminuer l'impact de possibles erreurs de mesures. Les variables moyennées sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14: Nouvelles variables créées à partir des données moyennées par jours d'échographies

Jour de l'expérimentation correspondant aux dates d'échographie	MSI Écho (Kg de MS) : Moyenne de la MS totale ingérée	PV Écho (Kg) : Moyenne du PV	GMQbrebis Écho : Coefficient directeur de la régression linéaire du PV en fonction du temps sur la période
0	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 0 et Jour=4		GMQ entre le jour 0 et le jour 21
21	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 18 et Jour=24		GMQ entre le jour 0 et le jour 21
35	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 32 Jour=38		GMQ entre le jour 22 et le jour 35
49	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 46 Jour=52		GMQ entre le jour 35 et le jour 49
63	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 60 Jour= 66		GMQ entre le jour 50 et le jour 63
77	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 74 Jour=80		GMQ entre le jour 64 et le jour 77
91	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 88 Jour=95		GMQ entre le jour 78 et le jour 91
105	Moyenne des valeurs mesurées entre Jour= 102 Jour=105		GMQ entre le jour 92 et le jour 105

Les modèles pour le calcul du RFI_e étaient de la forme suivante :

$$MSI Echo_{ij} = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xij} + \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec $MSI Echo_{ij}$ la moyenne journalière de la quantité de matière sèche ingérée par l'individu i au jour j sur la période étudiée (avant ou après mise-bas), β_0 l'intercept du modèle, β_x les coefficients associés aux n variable X_x , μ_i l'effet aléatoire associé à chaque individu i , ε_{ij} le résidu du modèle pour l'individu i au jour j . Les différentes variables testées dans les modèles de calcul de RFI_e (par jour d'échographie) sont présentées dans le Tableau 15.

Tableau 15: Variables explicatives utilisées dans les modèles de calcul du RFI_e

Variables explicatives testées	Modèle avant mise-bas	Modèle après mise-bas
	Données récoltées sur les brebis gestantes avant le jour 62	Données récoltées sur les brebis allaitantes après le jour 58
EXPE : variable catégorielle à 2 modalités "SGI" et "RFI"	*	*
(PV écho)^{0,75} en Kg : variable continue présentée dans le tableau 14 à l'exposant 0,75.	*	*
Épaisseur de gras dorsal en mm	*	*
Épaisseur de muscle dorsal en mm	*	*
GMQbrebis echo en kg/jours . Variable continue présentée dans le tableau 14. Cette variable correspond au coefficient directeur de la régression linéaire du PV en fonction du temps sur la période	*	
Taille de la portée par brebis : variable catégorielle à 2 modalités : "2" (portée de 2 agneaux), "sup 2" (portée supérieure à 2 agneaux)	*	
Nombre d'agneaux allaités par brebis sur la période étudiée : variable catégorielle à 2 modalités : "2" (2 agneaux allaités), "1" (1 agneau allaité)		*
GMQ de la portée en Kg/j : variable continue calculée comme la régression linéaire du poids de la portée en fonction du temps.		*
Poids Quotidien de la portée : variable continue calculée comme cela : Poids de la portée au jour 0 + GMQ de la portée x nombre de jours depuis la naissance		*

Toutes ces variables explicatives étaient incluses dans le modèle de MSI (permettant de déterminer le RFI_e) avec une interaction pour la variable Jour d'expérimentation de manière à prendre en compte la possible variation de certains effets en fonction du jour. Ce modèle a été ajusté sans ajout de structure de variance ou d'autocorrélation mais avec un effet aléatoire de l'individu. Les résidus du modèle ont ensuite été examinés graphiquement de manière à valider le modèle. La significativité des variables explicatives du modèle a été testée par test de vraisemblance.

Le RFI_e a ensuite été déterminé à partir des résidus ε_{ij} , de l'effet aléatoire μ_i et les effets fixes de la variable Jour incluse dans le modèle précédent. Les effets fixes de la variable jour ont été réintégrés pour pouvoir analyser notre RFI_e pour chaque jour dans les étapes suivantes. Le RFI_e a été déterminé selon les équations suivantes :

Avant mise bas :

$$RFI_{e\ ij} = \begin{cases} \beta_{j21} & \text{si } j=21 \\ \beta_{j35} & \text{si } j=35 \\ \beta_{j49} & \text{si } j=49 \end{cases} + \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec $RFI_{e\ ij}$, la consommation résiduelle de l'individu i au jour j , β_{j21} le coefficient de la variable Jour dans le précédent modèle quand $j = 21$, β_{j35} le coefficient de la variable Jour dans le précédent modèle quand $j = 35$, β_{j49} le coefficient de la variable Jour dans le précédent modèle quand $j = 49$, μ_i l'effet aléatoire de l'individu i calculé dans le modèle précédent, ε_{ij} le résidu du modèle précédent pour l'individu i au jour j .

Après mise bas :

$$RFI_{e\ ij} = \begin{cases} \beta_{j77} & \text{si } j=77 \\ \beta_{j91} & \text{si } j=91 \\ \beta_{j105} & \text{si } j=105 \end{cases} + \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec $RFI_{e\ ij}$, la consommation résiduelle de l'individu i au jour j , β_{j77} le coefficient de la variable Jour dans le précédent modèle quand $j = 77$, β_{j91} le coefficient de la variable Jour dans le précédent modèle quand $j = 91$, β_{j105} le coefficient de la variable Jour dans

le précédent modèle quand $j = 105$, μ_i l'effet aléatoire de l'individu i calculé dans le modèle précédent, ε_{ij} le résidu du modèle précédent pour l'individu i au jour j .

v. Modèles d'analyse du RFI par jour d'échographie (RFI_e)

Les résidus ont ensuite été analysés par un modèle linéaire mixte de manière à identifier les facteurs de variation du RFI_e. La formule du modèle d'analyse du RFI_e est la suivante :

$$RFI_{e\ ij} = \beta_0 + \sum_{x=1}^n \beta_x X_{xij} + \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec RFI_{e ij}, le RFI_e de l'individu i au jour d'échographie j . β_0 l'intercept du modèle, β_x le coefficient associé à la variable X_x , μ_i l'effet aléatoire de l'individu i , ε_{ij} le résidu du modèle pour l'individu i au jour j . Les résidus du modèle ont été inspectés pour valider le modèle.

Les différentes variables testées dans le modèle d'analyse du RFI_e sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16: Variables explicatives utilisées dans l'analyse du RFI_e

Variables explicatives utilisées dans les modèles d'analyse du RFI (X_x)	Modèle avant Mise bas	Modèle après Mise bas
Lot : variable catégorielle à 2 modalités : "79" (lot 79) ou "80" (lot 80).	*	*
Lignée : variable catégorielle à 4 modalités : "rfi+" (lignée RFI+), "rfi-" (lignée RFI-), "sgiS" (lignée sgiS), "sgiR" (lignée sgiR).	*	*
Jour : variable catégorielle à 8 modalités : "0", "21", "35", "49", "63", "77", "91", "105".	*	*
Interaction Jour × Lignée	*	*

Les étapes 2 à 6 de la partie "a) Modèles d'analyse caractère par caractère" ont ensuite été suivies pour l'analyse du RFI_e (calculé par jour d'échographie).

III. Résultats

1. Statistiques descriptives des données brutes

a. Nombre de brebis par lignée au début de l'expérimentation

L'intégralité des données des 104 brebis incluses dans l'étude n'a pas été conservée dans nos analyses. En effet, les données de certaines brebis ont été exclues en totalité en cours d'expérimentation lorsqu'elles ont mis bas moins de deux agneaux. Le nombre de brebis par lignée réellement intégrées dans l'étude est présenté dans Tableau 17.

Tableau 17: Effectifs par lignée au 1er jour de l'expérimentation

Lignée	Nombre de brebis
RFI -	24
RFI +	24
SGIR	25
SGIS	27
TOTAL	100

b. Évolution du statut physiologique des brebis au cours de l'expérimentation

Certaines brebis ont été sorties de l'expérimentation en cours d'étude selon les conditions suivantes :

- Les brebis présentant des portées inférieures à 2 agneaux ont été complètement exclues de l'étude sans conservation des données relevées sur ces dernières.
- Les brebis ayant avorté ont été exclues de l'étude le jour de l'avortement avec conservation des données relevées avant l'avortement.
- Les brebis n'ayant plus d'agneaux à allaiter (agneaux décédés) pendant la lactation ont été exclues avec conservation des données relevées avant le décès de leur dernier agneau.
- Les brebis présentant des niveaux d'hématocrite inférieurs à 12 accompagnés de signes cliniques d'haemochose aïgue (ex : anémie, œdème de l'auge, perte d'appétit) ont été exclues avec conservation des données antérieures à l'exclusion. Pour ces raisons, le nombre total de brebis a donc évolué au cours de l'étude. La Figure 12 présente l'évolution du nombre de brebis avec des données d'ingestion disponibles par jour. Nous pouvons voir sur cette figure que le nombre de brebis avec

des données d'ingestion disponibles diminue au cours de l'étude en raison des brebis exclues de l'étude. Nous pouvons également constater que certains jours, de manière ponctuelle, moins de brebis sont mesurées, par exemple au jours 5 et 6. Cela est dû au fait que certaines brebis ont été exclues périodiquement pour l'adaptation aux DAC au début de l'étude ou encore le jour de leur mise-bas.

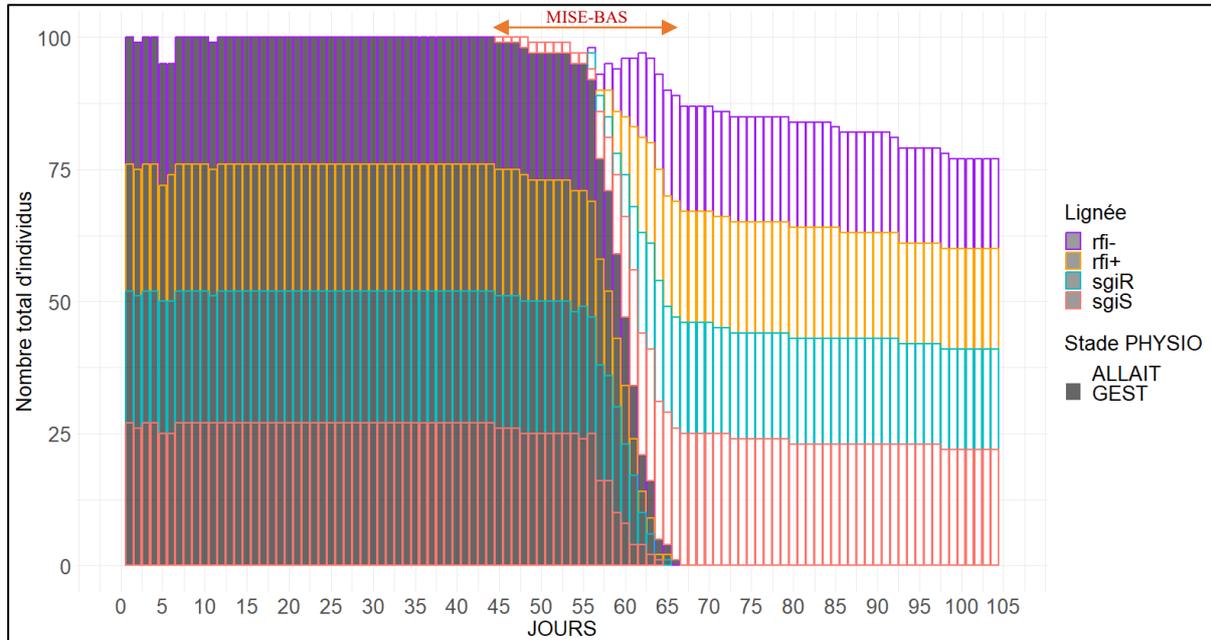


Figure 12 : Nombre de brebis avec des données d'ingestion disponibles par jour post-infestation, réparti par lignée

La hauteur des rectangles de contours colorés présente le nombre de brebis par lignée et par jour. La couleur du contenu des barres correspond au statut physiologique de la brebis : allaitante (« ALLAIT ») ou Gestante (« GEST »).

c. Dates de mise-bas

Malgré la synchronisation des chaleurs, toutes les brebis n'ont pas mis bas le même jour. La Figure 13 présente le nombre de mise-bas par jour et par lignée par jour d'expérimentation. Quatre-vingt-dix-huit pour cent des mise-bas ont eu lieu entre le jour 55 et le jour 65 et la répartition par lignée est homogène.

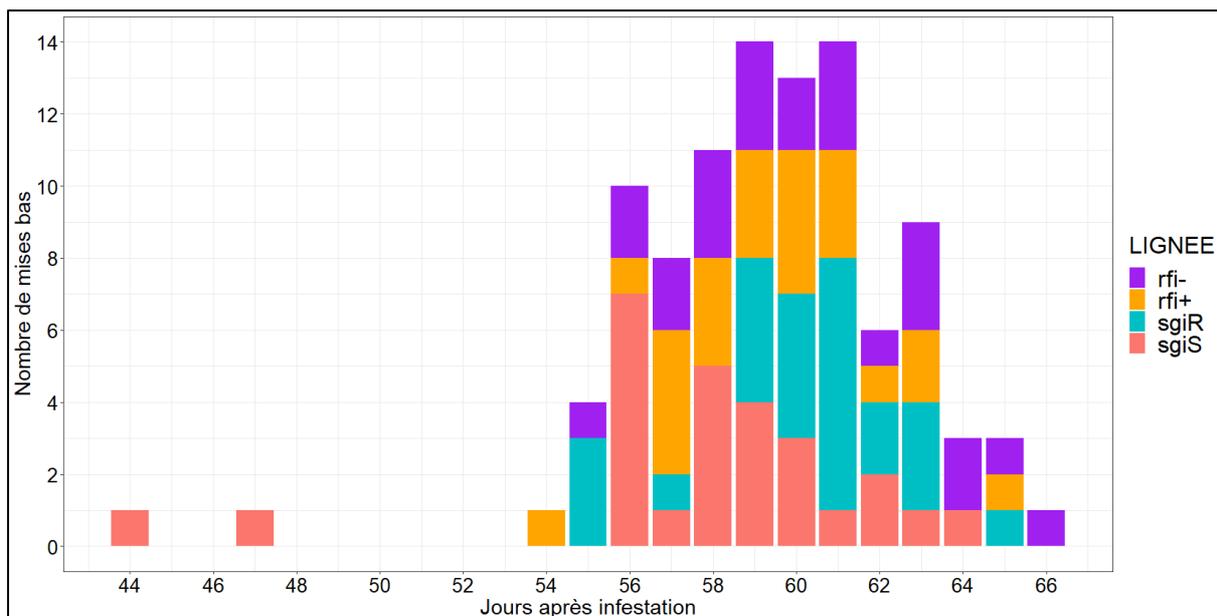


Figure 13: Nombre de mises-bas par jour post infestation par lignée

d. Taille et poids de portées

Chaque brebis a mis bas au cours de l'étude, les diagrammes circulaires présentés dans la Figure 14 montrent les proportions des différentes tailles de portées par lignée. Les proportions de portées de 2 agneaux sont sensiblement proches entre les lignées (54 % à 67 %). Ce paramètre est important pour la comparaison entre les lignées dans la suite de l'étude.

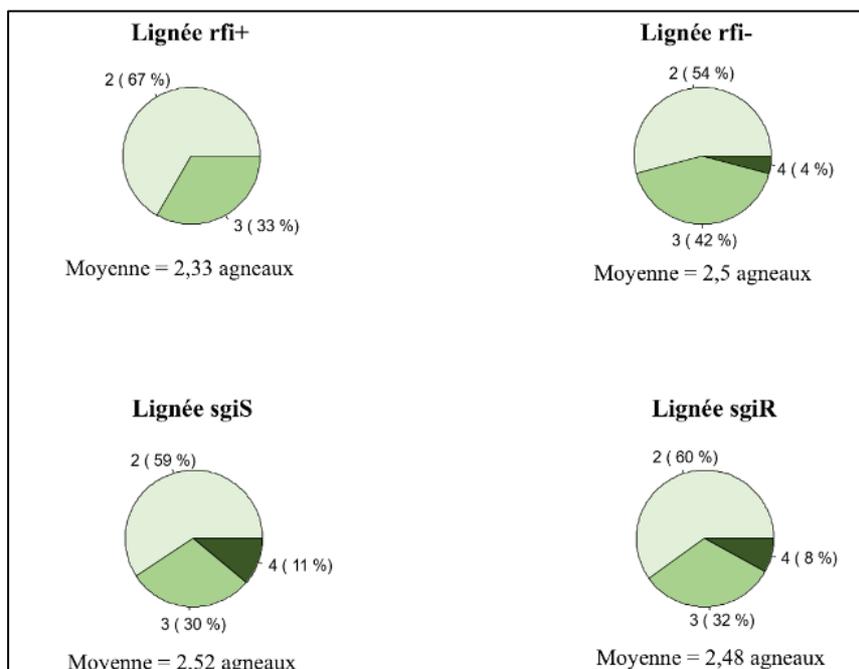


Figure 14: Diagrammes circulaires des tailles de portées par lignée au cours de l'expérimentation

Le Tableau 18 présente les poids moyens des agneaux à la naissance par lignées ainsi que le nombre moyen d'agneaux allaités par brebis au jour de la mise-bas et en moyenne sur la période d'allaitement. Nous pouvons voir que les poids moyens des agneaux entre les lignées sont sensiblement égaux. En revanche, concernant le nombre moyen d'agneaux allaités, la lignée sgiR allaite en moyenne environ 0,25 agneaux de moins que les autres lignées. De plus, pour les lignées rfi-, sgiS, et sgiR, le nombre d'agneaux allaités moyen augmente au cours de la période post-mise-bas par rapport au nombre d'agneaux allaités le jour de la mise-bas. Cette augmentation s'explique par l'évolution des effectifs de brebis au cours de l'étude, certaines brebis étant exclues au cours de l'étude quand elles ne respectaient plus les conditions décrites précédemment (100 brebis au jour 0 contre 77 brebis au jour 105).

Tableau 18: Poids moyens des agneaux à la naissance et taille de portée par lignée

Lignée	Poids moyen des agneaux à la naissance (Kg) (\pm écart-type)	Nombre moyen d'agneaux allaités le Jour de mise-bas	Nombre moyen d'agneaux allaités sur la période post mise-bas
rfi-	3,78 (\pm 0,656)	1,48 (\pm 0,483)	1,51 (\pm 0,500)
rfi+	3,83 (\pm 0,581)	1,67 (\pm 0,511)	1,50 (\pm 0,500)
sgiR	3,61 (\pm 0,965)	1,26 (\pm 0,449)	1,27 (\pm 0,444)
sgiS	3,47 (\pm 0,63)	1,54 (\pm 0,508)	1,55 (\pm 0,498)

e. Données brutes mesurées avant la mise-bas

Le Tableau 19 présente les statistiques descriptives des données avant la mise-bas. Les nombres de données par lignée sur la période avant mise-bas sont similaires. Premièrement, nous observons des différences dans les moyennes de MSI totale, de concentré et de fourrage entre les lignées SGI et RFI. Ces écarts, notamment pour les ingestions de concentré et de MS totale, sont cohérents avec la différence de concentré autorisé entre les deux lignées. La différence d'ingestion pourrait également être liée à l'adaptation aux systèmes de distribution, les brebis RFI étant déjà mieux adaptées. De plus, des différences de PV sont observées entre les lignées : les brebis SGI présentent des moyennes de PV inférieures à celles des RFI. Ces différences de PV pourraient être secondaires au déficit d'ingestion mais également influencer les quantités de fourrage ingérées par les brebis. Ces différences de PV sont donc cohérentes avec les différences d'ingestion observées. De plus, le déficit de PV des lignées SGI par rapport aux RFI s'accompagne d'une épaisseur de muscle moins importante, ce qui pourrait également être lié au déficit d'ingestion. Ces observations

sont donc logiques et explicables par notre schéma expérimental. Enfin, la lignée sgiR présentent des moyennes d'OPG et d'épaisseur de gras plus faibles que les autres lignées, ainsi qu'un hémocrite plus élevé. Cependant, l'écart-type associé à ces moyennes est important, et la significativité de ces différences devra être confirmée par la modélisation statistique.

Tableau 19: Description des variables mesurées par lignées avant la mise-bas

Variable mesurée	Lignée	Nombre de données	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Écart-type
PV (kg)	rfi-	1137	54,7	97,9	74	7,69
	rfi +	1065	52,1	98,8	73,8	7,85
	sgiR	1179	50,9	84,6	69,2	6,06
	sgiS	1202	52,0	89,1	67,8	6,68
Épaisseur de gras dorsal (mm)	rfi-	96	3,45	11,0	5,52	1,29
	rfi +	91	3,05	8,4	5,58	1,16
	sgiR	99	3,15	7,7	4,54	0,83
	sgiS	106	3,00	7,7	5,31	0,96
Épaisseur de muscle dorsal (mm)	rfi-	96	20,4	30,8	25,9	2,3
	rfi +	91	18,4	30,7	25,3	2,7
	sgiR	99	19,8	29,8	24,0	2,2
	sgiS	106	19,0	30,6	23,7	2,1
OPG (Nombre d'œufs/g de fèces)	rfi-	141	0	42800	6250	6832
	rfi +	135	0	16500	5897	4313
	sgiR	147	0	37800	3909	5099
	sgiS	151	0	27800	7401	6368
$\sqrt{\text{OPG}}$ (Racine carré du nombre d'œufs/g de fèces)	rfi-	141	0	207	66,1	43,6
	rfi +	135	0	128	69,0	33,8
	sgiR	147	0	194	50,6	36,8
	sgiS	151	0	167	75,5	41,3
Hématocrite (%)	rfi-	213	14	46	30,0	6,85
	rfi +	204	14	44	29,3	6,55
	sgiR	222	15	48	30,8	6,94
	sgiS	232	11	55	29,7	7,72
Quantité de Concentré ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	1391	0,102	0,928	0,475	0,196
	rfi +	1302	0,096	1,44	0,476	0,198
	sgiR	1470	0,113	0,868	0,432	0,187
	sgiS	1506	0,091	0,799	0,421	0,185
Quantité de fourrage ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	1391	0,066	2,16	1,23	0,311
	rfi +	1302	0,048	2,3	1,27	0,300
	sgiR	1470	0,004	1,98	1,05	0,290
	sgiS	1506	0,026	1,95	0,995	0,277

Variable mesurée	Lignée	Nombre de données	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Écart-type
Quantité de MS totale ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	1391	0,375	2,79	1,70	0,353
	rfi +	1302	0,300	2,78	1,75	0,328
	sgiR	1470	0,261	2,46	1,48	0,361
	sgiS	1506	0,305	2,40	1,42	0,324

f. Données brutes mesurées après la mise-bas

Le Tableau 20 présente les statistiques descriptives des données après la mise-bas. Les nombres de données par lignée sur la période avant mise-bas sont similaires. Premièrement, les mêmes différences d'ingestion et de PV que celles observées pendant la période pré-mise-bas sont constatées. Ces écarts semblent être, comme pour la période pré-mise-bas, dus aux conditions expérimentales. Aussi, des différences similaires à la période avant mise-bas sont également observées dans les moyennes, d'OPG, d'épaisseur de gras dorsal et d'hématocrite, de la lignée sgiR. La significativité de ces différences sera étudiée en détail lors de la modélisation.

Tableau 20: Description des variables mesurées par lignées après la mise-bas

Variable mesurée	Lignée	Nombre de données	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Écart-type
PV (en Kg)	rfi-	838	41,7	86,2	63,7	6,36
	rfi +	911	46,5	75,9	62,2	6,20
	sgiR	864	47,9	66,5	59,0	3,96
	sgiS	1085	46,3	73,9	57,4	5,41
Épaisseur de gras dorsal (mm)	rfi-	70	2,75	6,9	3,99	0,817
	rfi +	78	2,25	5,6	3,85	0,656
	sgiR	74	2,45	4,9	3,54	0,679
	sgiS	92	2,2	6,0	4,17	0,691
Épaisseur de muscle dorsal (mm)	rfi-	70	18,4	27,6	23,4	2,13
	rfi +	78	15,9	26,5	22,1	2,04
	sgiR	74	14,8	27,4	22,0	2,67
	sgiS	92	15,4	28,2	21,5	2,22
OPG (Nombre d'œufs/g de fèces)	rfi-	127	0	15700	4647	4185
	rfi +	140	0	18200	3830	3575
	sgiR	133	0	29050	2795	4278
	sgiS	163	0	22500	4425	4263

Variable mesurée	Lignée	Nombre de données	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Écart-type
\sqrt{OPG} (Racine carré du nombre d'œufs/g de fèces)	rfi-	127	0	125	58,9	34,5
	rfi +	140	0	135	54,8	28,8
	sgiR	133	0	170	40,7	34,6
	sgiS	163	0	150	56,4	35,7
Hématocrite (%)	rfi-	127	14	37	24,1	6,23
	rfi +	140	11	45	25,1	5,71
	sgiR	133	13	41	26,0	5,68
	sgiS	163	11	39	24,5	6,42
Quantité de Concentré ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	846	0,170	1,17	0,862	0,201
	rfi +	925	0,211	1,16	0,867	0,191
	sgiR	868	0,350	1,13	0,813	0,190
	sgiS	1084	0,171	1,10	0,809	0,191
Quantité de fourrage ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	846	0,057	2,74	1,59	0,443
	rfi +	925	0,018	2,91	1,57	0,418
	sgiR	868	0,118	2,61	1,40	0,415
	sgiS	1084	0,026	2,61	1,31	0,366
Quantité de matière sèche totale ingérée (exprimée en Kg de MS)	rfi-	846	0,337	3,64	2,45	0,490
	rfi +	925	0,459	3,75	2,44	0,421
	sgiR	868	0,579	3,57	2,21	0,414
	sgiS	1084	0,274	3,27	2,11	0,383

2. Modélisation

Après avoir décrit les données brutes des différentes variables mesurées, nous avons modélisé ces différentes variables de manière à identifier leurs facteurs de variations.

a. Analyse des données caractère par caractère

Comme présenté dans la partie matériel et méthode, des modèles linéaires ont été utilisés pour décrire les variables, le tableau ci-dessous présente le bilan de tous les modèles réalisés dans cette partie de l'étude.

Tableau 21: Modèles utilisés dans l'analyse caractère par caractère

Variables expliquées	Variables explicatives	Portée (1)	Interaction 1-2	Jour de mise-bas (2)	Agneaux allaités (3)	Interaction 2-3	Lot	Lignée (4)	Jour (5)	interraction 4-5	Structure de variance	Structure de corrélation	Phi	Répétabilité (ICC)	Qualité d'ajustement		
															R2m	R2c	
Poids Vif	Avant Mise-bas	NS	NS	*			***	***	***	***	Ration	Jour	0,9	0,9	R2m	0,55	
	Après Mise-bas			NS	NS	*	***	***	***	***	Ration	Jour	0,97	0,42	R2m	0,36	
Épaisseur de gras	Avant Mise-bas	*	NS	NS			†	***	NS	*	Jour			0,61	R2m	0,23	
	Après Mise-bas			NS	NS	NS	NS	**	***	*	Jour	Jour	0,97	0,11	R2m	0,13	
Épaisseur de muscle	Avant Mise-bas	NS	***	NS			NS	†	NS	NS		Jour		0,95	0,61	R2m	0,25
	Après Mise-bas			NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	Ration			0,61	R2m	0,09	
OPG	Avant Mise-bas	NS	NS	***			NS	†	***	NS	Jour	Jour	0,83	0,58	R2m	0,36	
	Après Mise-bas			NS	*	NS	NS	NS	***	NS	Ration	Jour	0,87	0,6	R2m	0,38	
Hématocrite	Avant Mise-bas	NS	**	***			*	NS	***	NS	Jour	Jour	0,9	0,42	R2m	0,69	
	Après Mise-bas			†	NS	NS	NS	NS	***	NS	Jour	Jour	0,8	0,64	R2m	0,09	
Foin en Kg de MS	Avant Mise-bas	NS	*	*			**	***	***	***	Ration	Jour	0,23	0,46	R2m	0,32	
	Après Mise-bas			NS	***	***	†	*	***	*	FJMB	Jour	0,3	0,56	R2m	0,29	
Concentré en Kg de MS	Avant Mise-bas	NS	NS	NS			*	***	***	***	Ration	Jour	0,42	0,05	R2m	0,91	
	Après Mise-bas			NS	NS	NS	***	***	***	NS	FJMB	Jour	0,59	0,08	R2m	0,8	
Matière sèche totale	Avant Mise-bas	NS	*	†			**	***	***	***	Ration	Jour	0,22	0,47	R2m	0,45	
	Après Mise-bas			NS	***	***	*	*	***	*	FJMB	Jour	0,36	0,56	R2m	0,25	

P > 0,1 = NS; P < 0,1 = † ; P < 0,05 = * ; P < 0,01 = ** ; P < 0,001 = *** ; L'encadré bleu correspond aux structures de variance et d'autocorrélation sélectionnées pour chaque modèle, ainsi qu'aux coefficients d'autocorrélation, de répétabilité et de détermination associés à ces modèles.

i. Analyse de l'ingestion de fourrage

La Figure 15 montre l'évolution des moyennes ajustées de la consommation de fourrage par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 5 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par jour et par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 6 fournit les mêmes éléments pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise-bas, à l'exception du facteur "taille de portée", tous les facteurs testés ont un effet significatif (Tableau 21). Nous pouvons observer que l'évolution de la consommation de fourrage est stable et suit la même tendance pour les quatre lignées sur cette période (Figure 15). Nous pouvons également identifier des grosses chutes de l'ingestion sur certains jours pour toutes les lignées (par exemple les jours 14, 23 et 30). Ces chutes d'ingestion s'expliquent par des défauts d'approvisionnement des DAF.

D'après l'analyse des moyennes ajustées du modèle (annexe 5), nous pouvons voir que les lignées RFI (rfi+ et rfi-) ont mangé la même quantité de fourrage par jour sur les différents jours de l'étude à l'exception du jour 61. Nous pouvons faire le même constat pour les lignées SGI (sgiS et sgiR) qui ont mangé la même quantité de fourrage à l'exception des jours 55 - 58. En revanche, les différences d'ingestion de fourrage entre les lignées SGI et RFI sont significatives sur la plupart des jours avant mise-bas.

Selon les coefficients du modèle, les brebis du lot 80 ingèrent en moyenne 105 g de fourrage supplémentaire par rapport aux brebis du lot 79 sur la période avant mise-bas. Cette observation est cohérente avec la consommation attendue plus importante pour les brebis du lot 80 qui sont plus lourdes. Les brebis gestantes de plus de 2 agneaux mangent en moyenne plus de fourrage que les brebis gestantes de 2 agneaux au même stade de gestation. Cette différence de consommation est de 66 g de MS de fourrage 66 jours avant la mise bas, elle diminue de 1g pour chaque jour de gestation supplémentaire, jusqu'à devenir nulle au moment de la mise-bas.

(2) Après mise-bas

Après la mise-bas, à l'exception du facteur "Jour de mise bas", l'ensemble des variables testées possède un effet significatif sur l'ingestion de fourrage (Tableau 21). Nous pouvons observer que la consommation de fourrage augmente de manière similaire pour les quatre lignées sur cette période (Figure 15). Comme pour la période avant mise-bas, nous pouvons également identifier de grosses chutes de l'ingestion sur certains jours pour toutes les lignées (par exemple les jours 77 et 91). Cela est également dû à des défauts de remplissage des DAF.

A l'analyse des moyennes ajustées du modèle (annexe 6), nous pouvons voir que la consommation de fourrage n'est pas significativement différente entre les lignées SGI pendant la période post mise-bas. Elle ne l'est pas non plus entre les lignées RFI. Aussi, entre les lignées RFI et SGI, des différences significatives sont en moyenne identifiables sur moins de 10% des jours.

Selon les coefficients du modèle, les brebis allaitant 2 agneaux consomment plus de fourrage par rapport aux brebis allaitant 1 agneau. Cette consommation supplémentaire est de 215 g au jour de la mise bas. En revanche l'importance de cette consommation supplémentaire pour les brebis allaitants 2 agneaux diminue d'environ 4 g par jour au cours de la lactation. Par ailleurs, les brebis du lot 80 ingèrent en moyenne 104 g de plus que les brebis du lot 79. Cette observation est cohérente avec la consommation attendue plus importante pour les brebis du lot 80 qui sont plus lourdes.

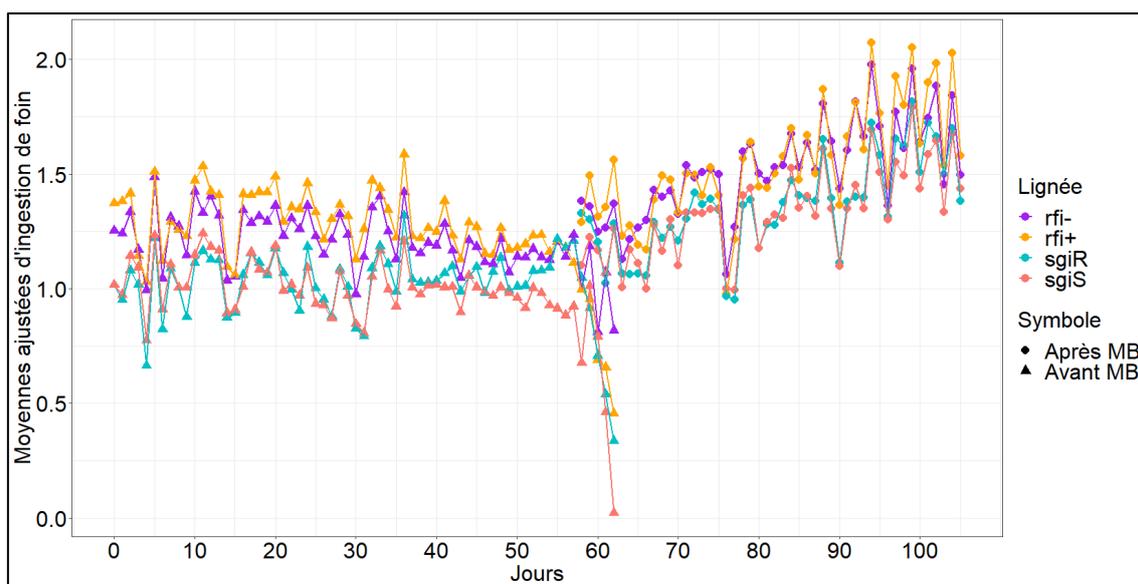


Figure 15: Évolution des moyennes ajustées de consommation de fourrage (Kg de MS) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

ii. Analyse de l'ingestion de concentré

La Figure 16 montre l'évolution des moyennes ajustées de la consommation de concentré rationné par jour avant et après la mise-bas. Ce graphique permet de distinguer les cinq rations de concentré distribuées au cours de l'étude. L'annexe 7 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par jour et par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 8 fournit les mêmes éléments pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise bas

Avant la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'ingestion de concentré sont le "lot", la "lignée", le "jour" et l'interaction "lignée × jour". Les variables sans effet significatif sont la "taille de portée", le "jour de mise-bas" et l'interaction "taille de portée × jour de mise-bas" (Tableau 21). Sur la Figure 16, nous pouvons observer un pic d'ingestion de concentré au jour 3 pour la lignée rfi+. Les DAC ont été réglés en mode apprentissage à cette date, les brebis des lignées RFI, déjà adaptées ont donc consommé des quantités supérieures par rapport aux brebis des lignées SGI sur ce jour. Aussi, les 2 chutes de consommation de concentré aux jours 50 et 55 sont dues à un problème technique, les stocks de concentré dans les distributeurs automatiques étaient vides. Enfin la chute d'ingestion à la fin de la période avant mise bas (jours 62-63) observé chez les lignées rfi+, sgiS et sgiR est dû à la baisse d'effectif et à la baisse d'ingestion habituellement observée quelques jours avant la mise-bas.

Au cours de la période avant mise-bas, les brebis des 2 lignées RFI ont mangé les mêmes quantités de concentré (excepté les jours 2-3 et 61-62), de même pour les 2 lignées SGI (excepté les jours 55 et 58) (Annexe 7). En revanche les différences d'ingestion de concentré sont, en moyenne, significativement différentes entre les lignées SGI et RFI sur 38% des jours. Ce phénomène est secondaire à l'erreur de paramétrage du GF. Aussi, nous avons détecté un effet du lot : en moyenne les brebis du lot 80 ingèrent 8 g de moins de concentré par jour que les brebis du lot 79.

(2) Après mise bas

Après la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'ingestion de concentré sont le "lot", la "lignée" et le "jour". Les variables sans effet sont la "taille de portée", le "jour de mise bas", l'interaction "taille de portée x jour de mise-bas" et l'interaction "lignée x jour" (Tableau 21).

Il n'y a pas de différence significative d'ingestion de concentré entre les 2 lignées RFI et entre les 2 lignées SGI sur la période post mise-bas (annexe 8). En revanche la différence d'ingestion est significative entre les lignées SGI et RFI sur la période post-mise-bas. Aussi, en moyenne, les brebis appartenant au lot 80 ingèrent 49 g de concentré de plus que les brebis du lot 79.

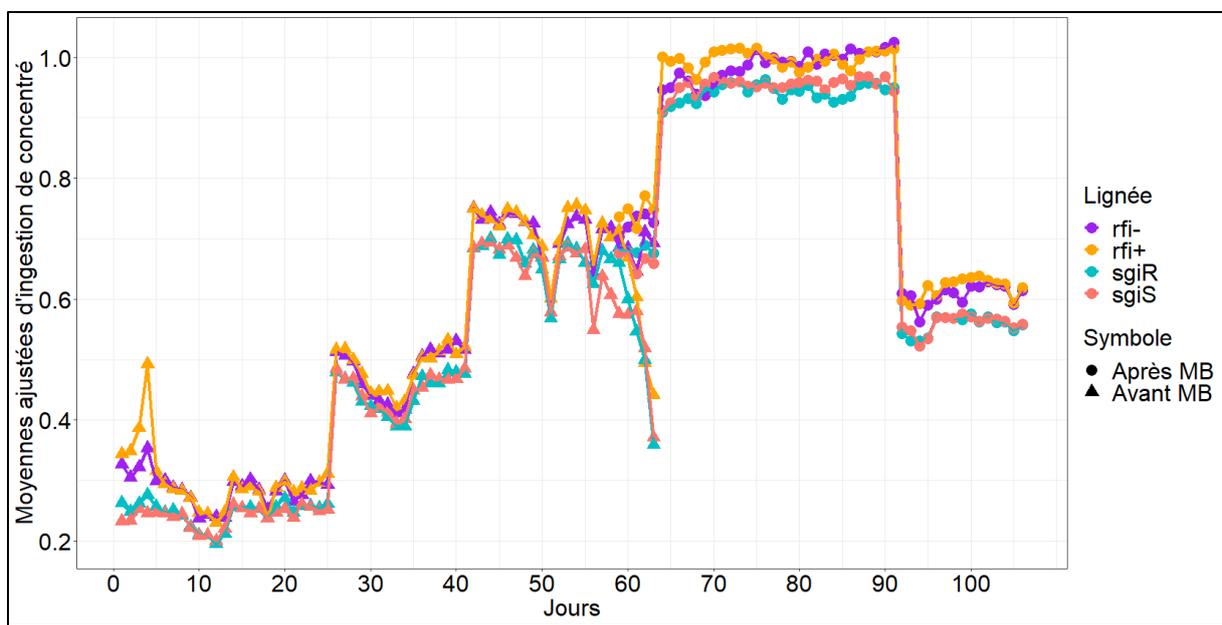


Figure 16: Évolution des moyennes ajustées de consommation de concentré (en Kg de MS) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

iii. Analyse de l'ingestion totale de MS

La Figure 17 montre l'évolution des moyennes ajustées de la consommation de MS par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 9 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par jour et par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 10 fournit les mêmes éléments pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise bas

Avant la mise-bas, l'ensemble des variables testées a un effet significatif sur l'ingestion totale de MS à l'exception de la variable "Taille de portée" (Tableau 21). Sur la Figure 17, nous pouvons observer les mêmes chutes d'ingestion ponctuelles

dues aux DAC, DAF et à la mise-bas que celle présentées pour les ingestions de concentré et de fourrage.

Au cours de la période avant mise-bas, les brebis des lignées RFI ont ingéré les mêmes quantités de MS (excepté les jours 61-62), de même pour les lignées SGI (excepté les jours 55-58) (Annexe 9). En revanche, les différences d'ingestion de MS sont en moyenne significatives entre les lignées SGI et RFI sur 68% des jours. Ces différences sont cohérentes avec les différences attendues.

En moyenne les brebis du lot 80 ingère 97 g de MS de plus que les brebis du lot 79. Les brebis gestantes de plus de 2 agneaux ingèrent en moyenne plus de MS que les brebis gestantes de 2 agneaux au même stade de gestation. La différence de consommation est de 66 g de MS totale 66 jours avant la mise bas. Cette différence diminue de 1g pour chaque jour de gestation supplémentaire, jusqu'à devenir nulle au moment de la mise-bas.

(2) Après mise bas

Après la mise-bas, l'intégralité des variables testées a un effet significatif à l'exception de la variable "jour de mise bas". Nous pouvons observer les mêmes chutes d'ingestion ponctuelles (dues aux DAF) que celles présentées dans l'analyse de l'ingestion de fourrage (Figure 17).

L'examen des moyennes ajustées par jour et par lignée nous permet de montrer que les deux lignées RFI ont mangé les mêmes quantités de MS pendant l'étude. Il en est de même pour les lignées SGI. Aussi, les différences d'ingestion sont significatives entre les lignées SGI et RFI sur en moyenne uniquement 6% des jours. L'effet du lot est également significatif, les brebis du lot 80 mangent en moyenne 155 g de plus que les brebis du lot 79.

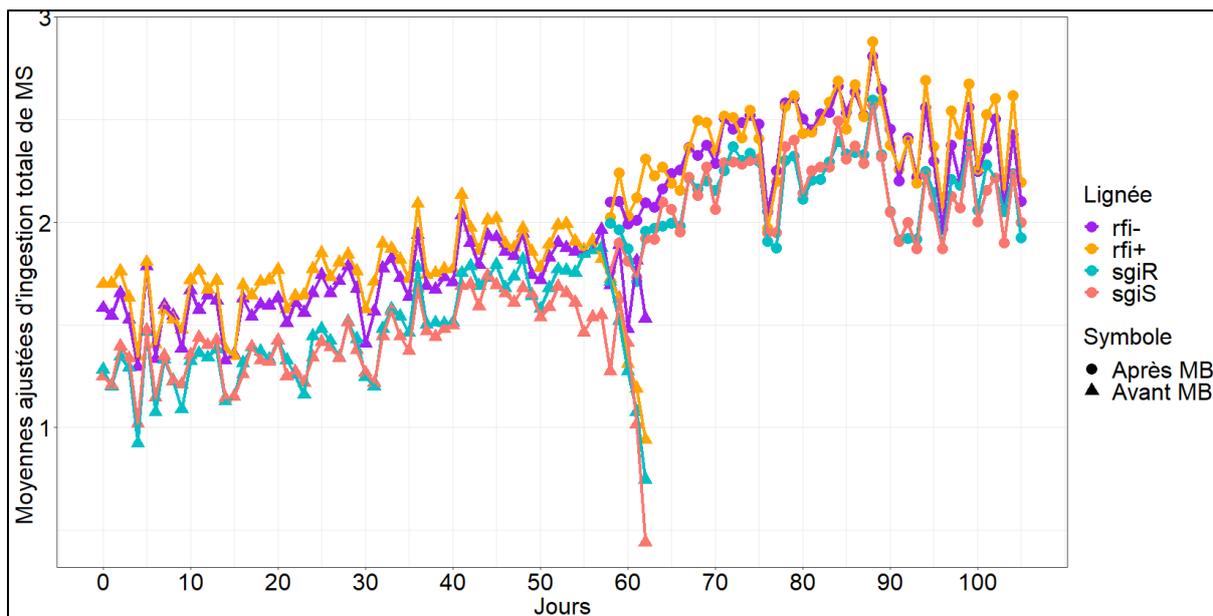


Figure 17: Évolution des moyennes ajustées de la consommation journalière de MS totale (KgMS/j) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

iv. Analyse du PV

La Figure 18 montre l'évolution des moyennes ajustées du PV par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 11 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par jour et par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 12 fournit les mêmes éléments pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise bas, les variables avec un effet significatif sur le PV sont les variables "jour de mise-bas", "lot", la "lignée", "jour" (nombre de jours post-infestation) et l'interaction "lignée x jour" (Tableau 21). La variable "taille de portée" et l'interaction "taille de portée x jours de mise bas" ne sont pas significatives avant la mise-bas. Les évolutions de PV par lignée suivent les mêmes profils avant la mise bas. Le PV augmente de manière linéaire jusqu'à la mise-bas.

Le PV des lignées sgiS et sgiR n'est pas significativement différent tout au long de la période pré-mise-bas (excepté aux jours 55-58). Il en est de même pour les lignées rfi+ et rfi- sur la période précédant la mise-bas (excepté aux jours 61 et 62). En revanche, le PV moyens des lignées RFI est significativement plus élevé que celui des lignées SGI sur 90 % des jours de la période avant mise-bas. Cette observation est probablement secondaire à la différence d'adaptation aux systèmes de distribution

alimentaire et à la différence de ration des lignées SGI et RFI. Aussi selon les coefficients du modèle, les brebis du lot 80 sont 8 kg plus lourdes que les brebis du lot 79. Cela est expliqué par l'allotement des brebis au poids.

(2) Après mise-bas

Après la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur le PV sont les interactions "nombre d'agneaux allaités x jour de mise-bas" et "lignée x jour" et les variables "lot", "lignée", "jour" (Tableau 21). Les variables "jour de mise bas" et "nombre d'agneaux allaités" ne sont pas significatives.

La comparaison des moyennes ajustées montre que les lignées sgiS et sgiR ne sont pas significativement différentes entre elles après la mise-bas et que les lignées rfi+ et rfi- ne sont pas non plus significativement différentes entre elles après la mise-bas. En revanche la lignée rfi- est significativement plus lourde que les lignées sgiS et sgiR au seuil de 95% sur 81% des jours post-mise-bas. La lignée rfi+ est significativement plus lourde que les lignées sgiS et sgiR sur en moyenne 64 % des jours post-mise-bas (au seuil de 90%) et sur en moyenne 32 % des jours post-mise-bas (au seuil de 95%). Comme pour la période pré-mise-bas, ces observations sont cohérentes avec la différence de ration et d'adaptation aux systèmes de distribution.

Selon les coefficients du modèle, les brebis du lot 80 sont 5,8 kg plus lourdes que les brebis du lot 79. Cela s'explique par l'allotement des brebis en fonction de leur poids. Les brebis allaitants 2 agneaux perdent plus de poids que les brebis allaitant un agneau sur la période post mise-bas (perte de 48 g par jour).

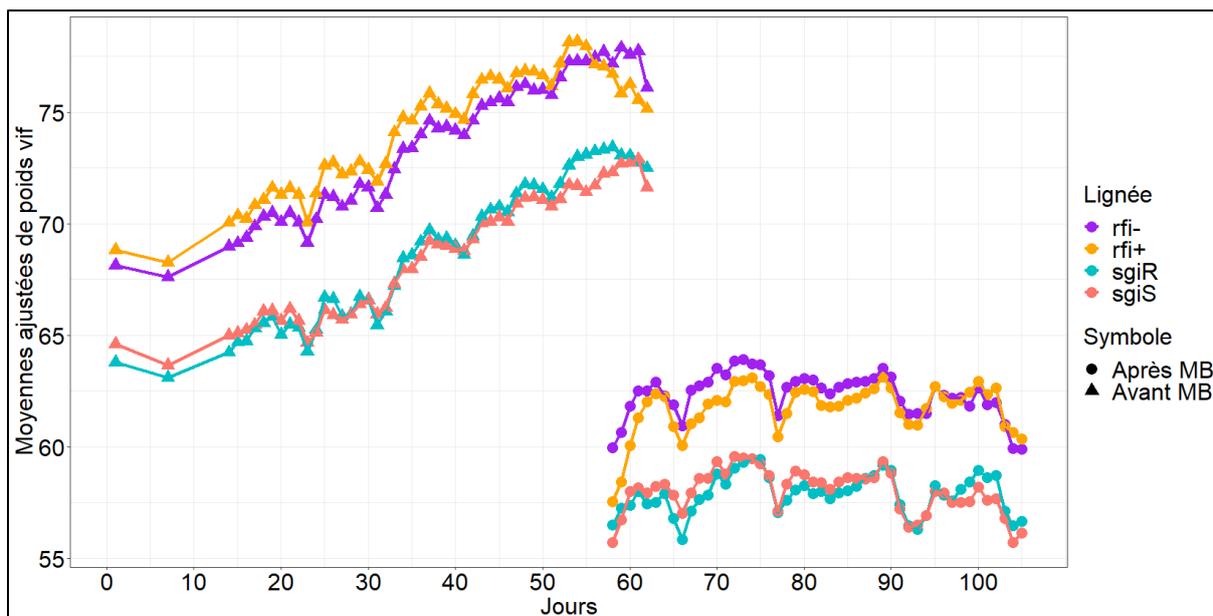


Figure 18: Évolution des moyennes ajustées de PV (en kg) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

v. Analyse de l'épaisseur de gras dorsal

La Figure 19 montre l'évolution des moyennes ajustées de l'épaisseur de gras par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 13 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par jour et par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 14 fournit les mêmes éléments pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'épaisseur de gras dorsal sont les variables "taille de portée", "lot", "lignée" et l'interaction "lignée x jour" (Tableau 21). Les variables "jour de mise-bas", "jour" et l'interaction "taille de portée x jour de mise-bas" ne sont pas significatives (Tableau 21). Sur la Figure 19, nous pouvons voir que l'épaisseur de gras diminue de manière similaire pour toutes les lignées sur la période avant mise bas.

La comparaison des moyennes ajustées par jour montre que les épaisseurs de gras dorsal des lignées sgiS, rfi+ et rfi- ne sont pas significativement différentes (annexe 13). En revanche la lignée sgiR est significativement moins grasse que les trois autres lignées.

L'examen des coefficients du modèle montre que les brebis du lot 80 présentent une épaisseur de gras supérieure de 0,3 mm en moyenne par rapport aux brebis du

lot 79. Cette observation est cohérente avec l'allotement au poids. Les brebis avec des portées supérieures à 2 agneaux ont des épaisseurs de gras inférieures de 0,6 mm par rapport aux brebis avec des portées de 2 agneaux.

(2) Après mise-bas

Après la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'épaisseur de gras dorsal sont les variables "lignée" et "jour" et l'interaction "lignée x jour". Les variables "lot", "jour de mise-bas", "nombre d'agneaux allaités" et l'interaction "nombre d'agneaux allaités x jour de mise-bas" ne sont pas significatives (Tableau 21).

La comparaison des moyennes ajustées par jour montre que les épaisseurs de gras des lignées rfi+ et rfi- ne sont pas significativement différentes après la mise-bas (annexe 14). En revanche, la lignée sgiR possède une épaisseur de gras dorsal significativement inférieure à la lignée sgiS sur toute la période après la mise-bas.

La comparaison des lignées SGI et RFI révèle que lignée sgiR présente une épaisseur de gras significativement inférieure à la lignée rfi- et rfi+ au jour 63 et inférieure à la lignée rfi- au jour 77. La lignée sgiS présente une épaisseur de gras significativement supérieure à la lignée rfi+ au jour 91 jour 105.

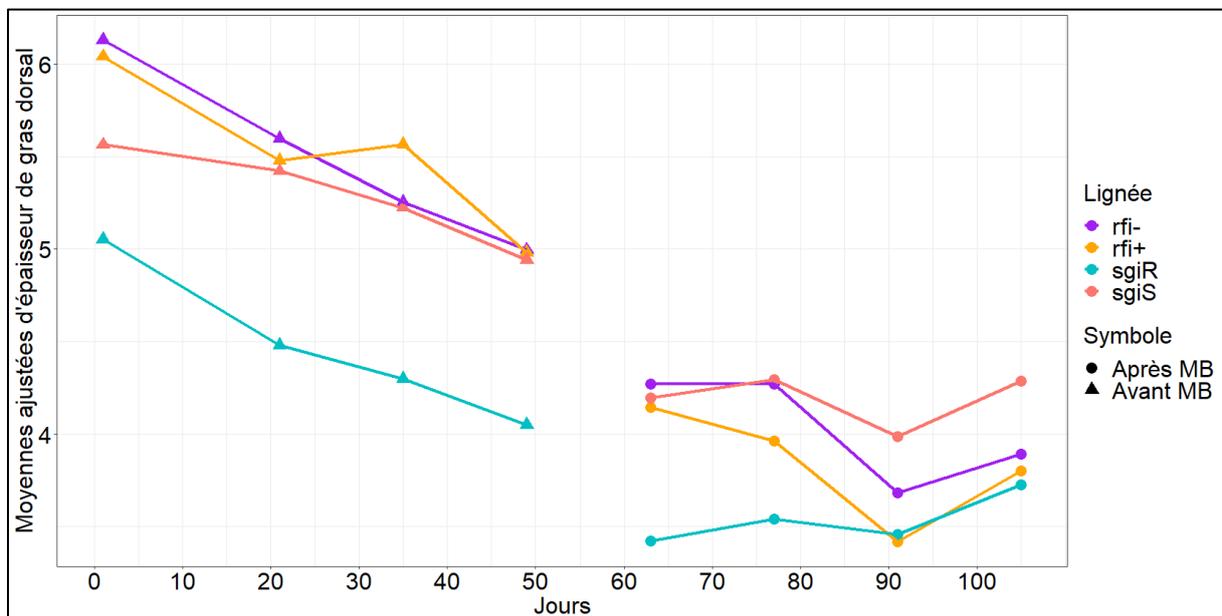


Figure 19: Évolution des moyennes ajustées de l'épaisseur de gras dorsal (en mm) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0

vi. Analyse de l'épaisseur de muscle dorsal

La Figure 20 montre l'évolution des moyennes ajustées de l'épaisseur de muscle par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 15 fournit les résidus, les

coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 16 fournit les résidus, les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par lignée pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'épaisseur de muscle dorsal sont la "lignée" et l'interaction "taille de portée x jour de mise-bas" (Tableau 21). Les autres variables testées ne sont pas significatives. Sur la Figure 20, nous pouvons voir que l'épaisseur de muscle dorsal diminue de manière similaire pour toutes les lignées sur la période avant mise-bas.

Les moyennes ajustées des épaisseurs de muscle dorsal des lignées rfi+ et rfi- ne sont pas significativement différentes sur la période. Il en est de même pour les épaisseurs de muscle dorsal des lignées sgiS et sgiR (annexe 16). En revanche, la lignée rfi- possède une épaisseur de muscle dorsal, significativement supérieure à celle des lignées sgiS et sgiR au seuil de 95%. La lignée rfi+ possède une épaisseur de muscle dorsal, significativement supérieure à celle de la lignées sgiS au seuil de 95% et significativement supérieure à celle de la lignée sgiR au seuil 90 %. Cette différence est probablement liée à la différence de PV entre les lignées SGI et RFI.

A l'examen des coefficients du modèle, nous pouvons voir que les brebis gestantes de plus 2 agneaux présentent des épaisseurs de muscle supérieures aux brebis gestante de 2 agneaux au même stade de gestation. La différence d'épaisseur de muscle dorsal est de 2 mm, 66 jours avant la mise bas. Cette différence diminue de 0,3 mm chaque jour de gestation supplémentaire jusqu'à devenir nulle au moment de la mise-bas.

(2) Après mise-bas

Après la mise bas, la seule variable avec un effet significatif sur l'épaisseur de muscle dorsal est la "lignée" (Tableau 21). Sur la Figure 20, nous pouvons voir que l'épaisseur de muscle dorsal semble se stabiliser pour toutes les lignées sur la période post-mise-bas.

La comparaison des moyennes ajustées par jour montre que les épaisseurs de muscle dorsal des lignées SGI ne sont pas significativement différentes sur cette

période (annexe 16). Il en est de même pour les lignées RFI. En revanche, la lignée rfi- présente une épaisseur de muscle dorsal significativement supérieure à celle des lignées sgiS et sgiR au seuil de 95%. La lignée rfi+ présente une épaisseur de muscle dorsal significativement supérieure à celle des lignées sgiS au seuil de 95% et significativement supérieure à celle des lignées sgiR au seuil de 90%.

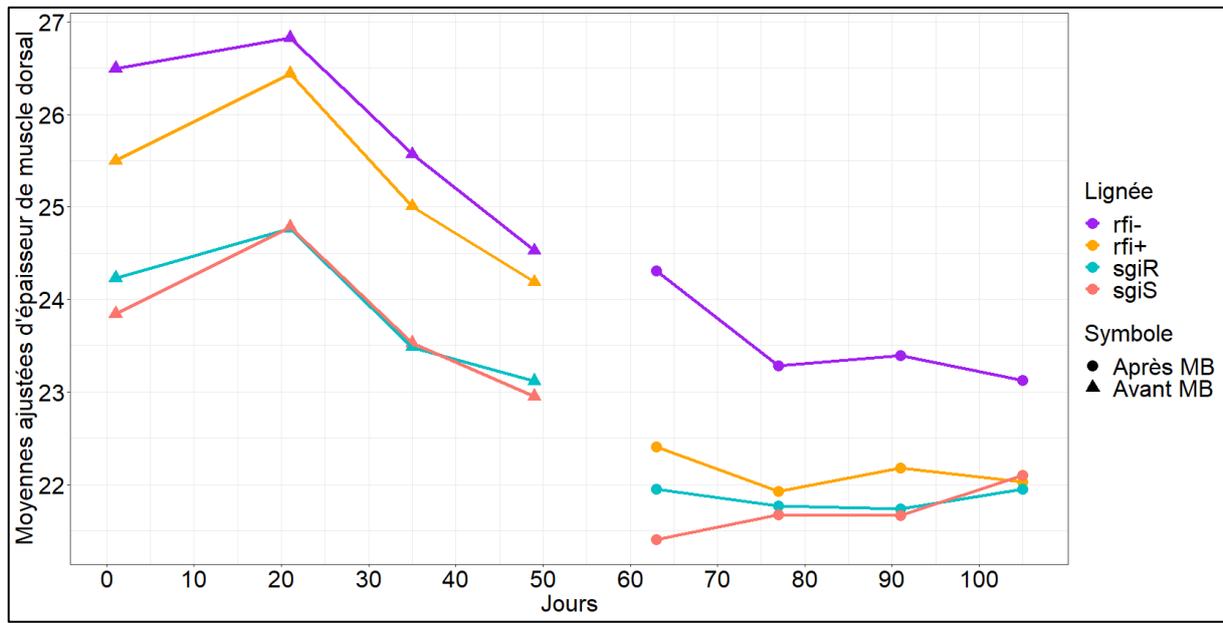


Figure 20: Évolution des moyennes ajustées d'épaisseur de muscle dorsal (en mm) par lignée au cours de l'expérience. Les brebis ont été infestées au jour 0

vii. Analyse des OPG

La variable OPG, n'ayant pas une distribution normale, a été transformée en \sqrt{OPG} pour s'en rapprocher (condition indispensable à l'application du modèle linéaire). La Figure 21 montre l'évolution des moyennes ajustées de la racine carré des OPG par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 17 fournit les résidus, les coefficients significatifs du modèle et les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par lignée pour la période avant la mise-bas. L'annexe 18 fournit les résidus, les informations sur la significativité des différences de moyennes ajustées par lignée pour la période après la mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur les OPG sont, les variables "jour" et "jour de mise-bas". Une tendance a aussi été détectée pour la variable "lignée" (p-value = 0,077) (Tableau 21). Sur la Figure 21, nous pouvons voir que la quantité d'OPG augmente de manière importante pour toutes les lignées (pic

plus marqué pour la lignée *sgiS* et beaucoup moins marqué pour la lignée *sgiR*) au début de l'étude, puis diminue de manière similaire pour toutes les lignées.

Graphiquement, la lignée *sgiR* semble excréter moins de d'OPG que les autres lignées sur la période avant mise-bas. Néanmoins, d'après les moyennes ajustées, les excrétions d'OPG ne sont pas significativement différentes entre les lignées hormis entre les lignées SGI (*sgiR* excrétaut moins d'OPG que *sgiS*) au seuil de 90% (annexe 17).

(2) Après mise-bas

Après la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur la quantité d'OPG sont les variables "nombre d'agneaux allaités" et "jour". Le reste des variables testées n'a pas d'effet significatif sur la quantité d'OPG (Tableau 21). Sur la Figure 21, nous pouvons observer que la quantité d'OPGs diminue pour les 4 lignées après la mise-bas. Cette diminution est néanmoins accompagnée d'augmentation d'OPG pour toutes les lignées aux jours 77 et 98.

La lignée *sgiR* semble excréter moins d'OPG que les trois autres lignées. Néanmoins, cette différence n'est pas significative. Si l'on s'intéresse aux coefficients du modèle, nous pouvons voir les animaux allaitant 1 agneau excrètent en moyenne 39 OPG de moins que les brebis allaitant 2 agneaux.

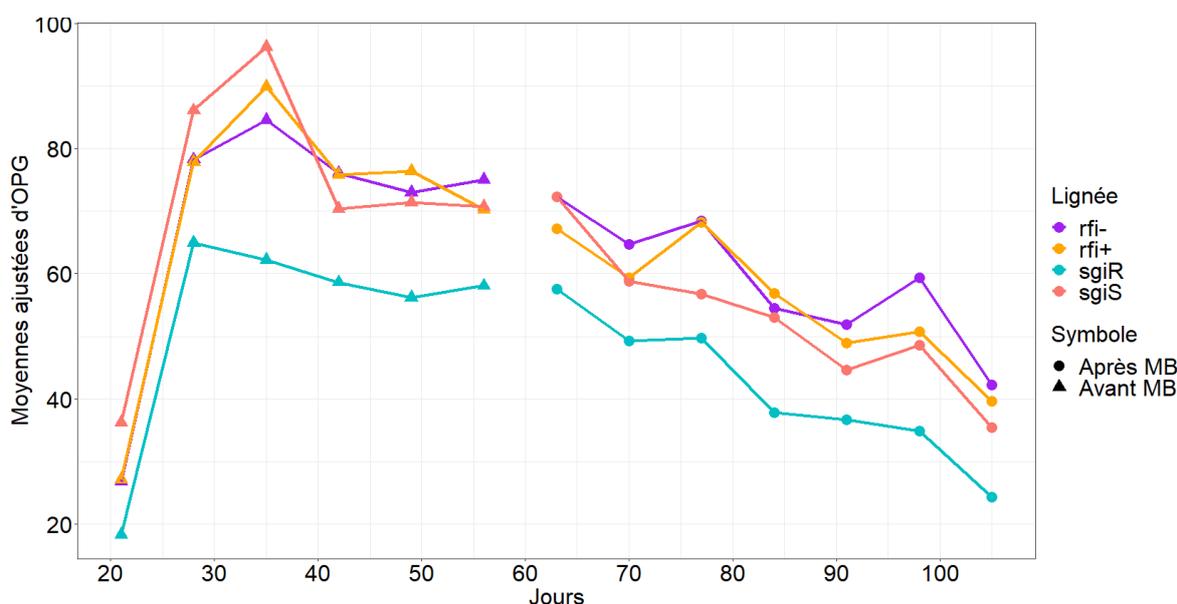


Figure 21: Évolution des moyennes ajustées du nombre d'OPG (exprimé en racine carré) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

viii. Analyse de l'hématocrite

La Figure 22 montre l'évolution des moyennes ajustées de l'hématocrite par jour avant et après la mise-bas. L'annexe 19 fournit les résidus et les coefficients significatifs du modèle pour la période avant la mise-bas. L'annexe 20 fournit les mêmes éléments pour la période post-mise-bas.

(1) Avant mise-bas

Avant la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'hématocrite sont les variables "jour de mise bas", "lot", et "jour" et l'interaction "taille de portée x jour de mise-bas" (Tableau 21). Sur la Figure 22, nous pouvons observer que l'hématocrite chute de manière continue pendant la première partie de l'expérience pour les 4 lignées. Aussi, on peut observer un pic au jour 21 plus marqué pour la lignée sgiR (mais non significativement différent). L'hématocrite semble remonter avant la mise-bas pour les 4 lignées.

A l'examen des coefficients du modèle, nous pouvons voir que les brebis gestantes de plus de 2 agneaux ont un hématocrite plus faible que les brebis gestantes de 2 agneaux à jour de gestation égale. La différence d'hématocrite est de 3,3 %, 66 jours avant la mise bas. Cette différence diminue de 0,05% chaque jour de gestation supplémentaire jusqu'à devenir nulle au moment de la mise-bas. Aussi, les brebis du lot 80 ont un hématocrite plus élevé que les brebis du lot 70 (+ 1.20%).

(2) Après mise-bas

Après la mise-bas, les variables avec un effet significatif sur l'hématocrite sont les variables "jour de mise bas" et "jour". Les autres variables testées n'ont pas d'effet (Tableau 21). Cela montre notamment qu'il n'y a pas de variation d'hématocrite entre les lignées après mise-bas et que le nombre d'agneaux allaités n'a pas d'impact sur ce caractère-là. Sur la Figure 22, nous pouvons voir que l'évolution de l'hématocrite semble réaugmenter légèrement pour toutes les lignées sur la période post-mise-bas. On peut également observer des diminutions d'hématocrite marquées aux jours 77 pour toutes les lignées et en moindre mesure au jour 98 (surtout pour lignées rfi+ et rfi-).

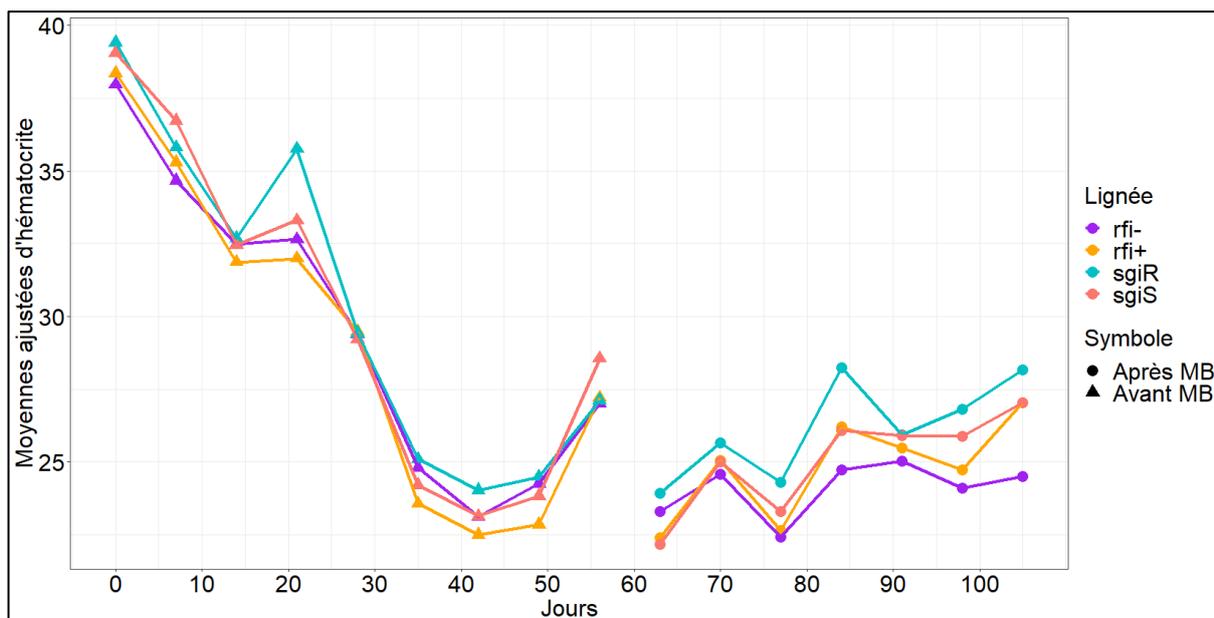


Figure 22: Évolution des moyennes ajustées d'hématocrite (en %) par lignée au cours de l'expérimentation. Les brebis ont été infestées au jour 0.

b. Analyse de l'efficience alimentaire simplifiée

i. Analyse avant mise-bas

(1) Détermination du RFI (RFI simplifié)

Pour calculer le RFI, nous avons utilisé un modèle linéaire de l'ingestion totale de MS dont la méthode est décrite dans la partie matériel et méthode. Le Tableau 22 présente la significativité des différentes variables testées dans le modèle. Le coefficient de détermination r^2 du modèle est de 0,76.

Tableau 22: Effets des différentes variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS avant mise-bas permettant le calcul du RFI (significativité $P > 0,1 = NS$; $P < 0,1 = †$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***$)

Variable incluse	Significativité	Coefficients estimés (en kg de MS)
EXPE	***	-0,16 (Pour EXPE=SGI)
Gain moyen quotidien de la brebis sur la période	***	1,50
Taille de la portée	**	-0,09(Pour Portée>2)
Épaisseur de gras dorsal moyenne sur la période	**	-0,04
Épaisseur de muscle dorsal moyenne sur la période	NS	0,003
Poids métabolique de la brebis moyen sur la période	***	0,085

Les variables ayant un effet significatif sur l'ingestion totale de MS des brebis avant la mise-bas sont : le GMQ, la taille de la portée, l'épaisseur de gras dorsal et le poids métabolique de l'animal (Tableau 22). L'ingestion de MS évolue positivement avec le GMQ et le PV. En revanche, une taille de portée supérieure à 2 entraîne une baisse de l'ingestion de MS.

(2) Analyse du RFI

Le RFI calculé à partir du modèle précédent est ensuite analysé par un modèle linéaire. Le coefficient r^2 associé au modèle est de 0,05. Les p-value associées aux variables lignée et lot sont respectivement de 0,22 et 0,39. Il n'y a donc pas de différence significative d'efficacité entre les brebis sgiS et sgiR, et pas de différence significative d'efficacité entre les brebis rfi+ et rfi- pendant la période avant mise-bas.

ii. Analyse après mise-bas

(1) Détermination du RFI (RFI simplifié)

Nous avons également réalisé un calcul de l'efficacité alimentaire après mise-bas. Le Tableau 23 présente les différentes variables prises en compte dans le calcul du RFI après mise-bas. L'examen des résidus du modèle permettant la validation du modèle sont présentés dans l'annexe 23.

Tableau 23 : Effets des différentes variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI (significativité $P > 0,1 = NS$; $P < 0,1 = †$; $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; $P < 0,001 = ***)$

Variable	Significativité	Coefficient associé
EXPE	*	-0.120 si EXPE=SGI
Nombre d'agneaux allaités moyen sur la période	NS	0.044 si N=2 et -0.085 si N=12
Épaisseur de gras dorsal moyenne sur la période	**	-0.119
Épaisseur de muscle dorsal moyenne sur la période	NS	0.020
PM de la brebis moyen sur la période	***	0.130
GMQ de la portée sur la période	NS	-1.002
PV moyen de la portée sur la période	NS	0.061

Le coefficient de détermination r^2 du modèle est de 0,63. L'ingestion de MS dépend de l'épaisseur de gras dorsal de l'animal et du PM de l'animal. Le PM de l'animal est associé positivement avec l'ingestion de MS ; plus un animal est lourd plus son ingestion est élevée. A l'inverse, plus un animal présente une épaisseur de gras dorsal importante, plus l'ingestion de ce même animal est faible.

(2) Analyse du RFI_s

Le RFI_s calculé à partir du modèle précédent est modélisé en fonction des variables lignée et lot. Le coefficient r^2 associé au modèle est de 0,05. Les p-value associées à la variable lignée et lot sont respectivement de 0,73 et 0,098. Il n'y a donc pas de différence significative d'efficacité entre les brebis sgiS et sgiR et pas de différence significative d'efficacité entre les brebis rfi+ et rfi- pendant la période après mise-bas. La variable lot est donc significative au seuil de 90% mais pas au seuil de 95%. Les brebis du lot 80 présentent une tendance à être légèrement plus efficaces que les brebis du lot 79 (coefficient = -0,075)

c. Analyse de l'efficacité alimentaire par jour d'échographie

i. Analyse avant mise-bas

(1) Détermination du RFI_e (par jour d'échographie)

Nous avons élaboré un modèle d'ingestion totale de la MS, la significativité des variables testées dans le modèle est présentée dans le Tableau 24. L'examen des résidus du modèle permettant la validation du modèle sont présentés dans l'annexe 25.

Tableau 24 : Effet des variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI_e ($P > 0,1$ = non significatif (NS) ; $P < 0,1$ = † ; $P < 0,05$ = * ; $P < 0,01$ = ** ; $P < 0,001$ = ***)

Variable	Significativité	Coefficients
EXPE	***	Pour SGI -0.182
Taille de portée	**	Pour portée supérieure à 2: -0.124
Taille de portée x Jour	NS	
Épaisseur de gras dorsal	NS	
Épaisseur de gras dorsal x jour	NS	
Épaisseur de muscle dorsal	NS	
Épaisseur de muscle dorsal x jour	NS	
Gain moyen quotidien (GMQBrebis echo)	***	-0.161 (NS)
Gain moyen quotidien x Jour	NS	
Poids métabolique (PM): (Poids Vif écho) ^{0.75}	***	0.116
Poids métabolique (PM) x Jour	*	Jour49 x PM : -0,040 Jour35 x PM : -0,023 Jour21 x PM : -0,024
Jour	***	Jour21 :0,553 Jour35 :0,626 Jour49 :1,149

Sur le Tableau 24, nous pouvons voir que l'ingestion de MS avant mise-bas est expliquée par la taille de la portée, le GMQ, le PM de l'animal, le nombre jours post-infestation ainsi que par le PM de l'animal en interaction avec le jour. Certaines valeurs des coefficients, associés aux variables significatives, sont non significatives, bien que la variable ait un effet global significatif. Dans ce cas, le coefficient ne peut pas être interprété, et la mention "NS" est indiquée à côté de celui-ci. Les valeurs des coefficients de détermination marginal et conditionnel du modèle sont respectivement de 0,65 et 0,84.

(2) Analyse du RFI_e

Le RFI_e avant mise-bas a ensuite été analysé avec un modèle linéaire dont les résultats sont présentés dans le Tableau 25. L'examen des résidus du modèle permettant la validation du modèle sont présentés dans l'annexe 26.

Tableau 25: Résultats du modèle de l'analyse du RFI_e avant la mise-bas ($P > 0,1$ = non significatif (NS) ; $P < 0,1$ = † ; $P < 0,05$ = * ; $P < 0,01$ = ** ; $P < 0,001$ = ***)

Variable	Significativité	Coefficient
Lignée	NS	
Jours	***	Jour 21 = 0,56 Jour 35 = 0,60 Jour 49 = 1,11
Lignée x Jours	NS	
Lot	*	Lot 80 = - 0,056
Variance		Jours
Autocorrélation		Jours
PHI		0,97
ICC		0,16
Qualité d'ajustement	R2m	R2c
	0,68	0,73

Le lot 80 a un RFI_e en moyenne plus faible de 0,056 que le lot 79. Le reste des variables n'est pas significatif. Nous n'avons pas identifié de différence significative d'efficacité entre les lignées SGI et entre les lignées RFI.

i. Analyse après mise-bas

(1) Détermination du RFI_e (RFI par jour d'échographie)

Nous avons élaboré un modèle d'ingestion totale de la MS après mise-bas et la significativité des variables prises en compte dans le modèle est présentée dans le Tableau 26. L'examen des résidus du modèle permettant la validation du modèle sont présentés dans l'annexe 27.

Tableau 26 : Effet des variables incluses dans le modèle d'ingestion totale de MS après mise-bas permettant le calcul du RFI_e ($P > 0,1$ = non significatif (NS) ; $P < 0,1$ = † ; $P < 0,05$ = * ; $P < 0,01$ = ** ; $P < 0,001$ = ***)

Variable	Significativité	Coefficients
EXPE	NS	
Agneaux allaités	*	Si 2 agneaux allaités = 0,125
Agneaux allaités x Jour	NS	
Épaisseur de gras	**	-0,039 (NS)
Épaisseur de gras x Jour	NS	
Épaisseur de muscle	NS	
Épaisseur de muscle (EPM) x Jour	***	Jour 77 x EPM : -0,020(NS) Jour 91 x EPM : -0,017(NS) Jour 105 x EPM : -0,048
GMQ de la portée	NS	
GMQ de la portée x jour	NS	

Variable	Significativité	Coefficients
Poids métabolique (PM) : (Poids Vif écho) ^{0,75}	***	0,177
Poids métabolique (PM) x jour	NS	
Jour	***	Jour 77 : 0,987 Jour 91 : 0,609 (NS) Jour 105 : 1,060
Poids de la portée	NS	
Poids de la portée* Jour	NS	

Les variables significatives dans notre modèle de calcul sont le nombre d'agneaux allaités, l'épaisseur de gras dorsal, l'interaction entre l'épaisseur de muscle dorsal et le nombre de jours post-infestation, le PM et le nombre de jours post-infestation. Certaines valeurs des coefficients, associés aux variables significatives, sont non significatives, bien que la variable ait un effet global significatif. Dans ce cas, le coefficient ne peut pas être interprété, et la mention "NS" est indiquée à côté de celui-ci. L'ingestion de MS évolue positivement avec le PM de la brebis et le nombre d'agneaux allaités. Les valeurs des coefficients de détermination marginal et conditionnel sont respectivement de 0,64 et 0,89.

(1) Analyse du RFI_e

Le RFI_e après mise-bas a ensuite été analysé avec un modèle linéaire dont les résultats sont présentés dans le Tableau 27. L'examen des résidus du modèle permettant la validation du modèle sont présentés dans l'annexe 28.

Tableau 27: Résultats du modèle de l'analyse du RFI_e après la mise-bas ($P > 0,1$ = non significatif (NS) ; $P < 0,1$ = † ; $P < 0,05$ = * ; $P < 0,01$ = ** ; $P < 0,001$ = ***)

Variable	Significativité	Coefficient
Lignée	NS	
Jours	***	Jour 77 = 1,071 Jour 91 = 0,688 Jour 105 = 1,067
Lignée × Jours	NS	
Lot	***	Lot 80 = -0,168
Variance	Jours	
Autocorrélation	Jours	
PHI	0,89	
ICC	0,54	
Qualité d'ajustement	R2m	R2c
	0,71	0,87

Les variables significatives dans le modèle d'analyse du RFIe sont les variables Lot et Jours. La variable Lignée n'est pas significative. Les brebis du lot 80 ont un RFIe en moyenne plus faible (brebis plus efficaces) que les brebis du lot 79. Nous n'avons pas identifié de différence significative d'efficacité entre les lignées SGI et entre les lignées RFI.

PARTIE 3

DISCUSSION

I. Rappels des objectifs et protocole mis en place :

1. Objectif de l'étude

Les objectifs de cette étude étaient d'examiner l'évolution de divers caractères liés à la composition corporelle, à l'ingestion alimentaire, à la santé, ainsi qu'à l'efficacité alimentaire chez des brebis allaitantes autour de la mise-bas. Ces brebis provenaient de sélections divergentes axées sur l'efficacité alimentaire ou la résistance au parasitisme. La description de l'évolution de ces caractères pendant la période péripartum pourrait permettre de révéler un éventuel coût génétique associé à ces sélections au cours de cette période. Le protocole devait permettre de comparer les lignées SGI et RFI entre elles. Malheureusement, une erreur expérimentale a entraîné une différence de distribution de concentré entre les lignées SGI et RFI (les lignées RFI ont consommé en moyenne 120 g de concentré de plus par jour que les brebis SGI). Les lignées SGI et RFI n'ont donc pas pu être comparées.

2. Analyse des caractères liés au parasitisme, de composition corporelle et d'ingestion

Dans notre étude, l'évolution longitudinale des caractères de parasitisme et de composition corporelle a été analysée avec les méthodes présentées dans Zuur et al. (2009). Les modèles étudiés valident les conditions d'application des modèles linéaires. Les coefficients de détermination de modèles de ces différents caractères étaient supérieurs à 0,6, hormis pour le modèle de l'épaisseur de gras après mise bas ($r^2_c = 0,22$). Ces informations indiquent que les résultats de ces modèles peuvent être interprétés avec confiance. Néanmoins, nous n'avons pas trouvé d'explication au faible coefficient de corrélation pour l'analyse de l'épaisseur de gras après la mise-bas.

3. Étude de l'efficacité alimentaire

Notre étude s'est déroulée en deux phases : une avant la mise-bas et une après. La durée de ces périodes d'étude était d'au moins cinq semaines (environ neuf semaines pour la période avant mise-bas et environ six semaines pour la période après mise-bas). Cela correspond à la durée d'étude minimale nécessaire pour déterminer l'efficacité alimentaire (Amarilho-Silveira et al. 2022). L'efficacité alimentaire a été déterminée par régression linéaire simple dans un premier temps, comme décrit par Koch et al. (1963), puis de manière longitudinale ensuite. Les données de composition corporelle ont également été intégrées dans le modèle de calcul, conformément aux suggestions de Knott et al. (2008).

Pour la période avant mise-bas, la variable de la taille de la portée a été intégrée au modèle de calcul du RFI en supposant que la taille de la portée influençait la dépense énergétique de la brebis (Everts 1990). Pour la période après mise-bas, les données de production laitière, habituellement prises en compte dans les calculs d'efficacité alimentaire chez les brebis laitières durant cette période, n'étaient pas disponibles (Barrio et al. 2023 ; Machefert et al. 2023). Comme cela a été fait chez le porc dans l'étude de Gilbert et al. (2012), nous avons intégré les données de croissance de la portée comme approximation de la production laitière. De plus, étant donné que le poids des brebis est resté constant au cours de la période post-mise-bas, le GMQ des brebis n'a pas été pris en compte dans le modèle. Tous nos modèles ont été sélectionnés et validés selon la méthode présentée par Zuur et al. (2009).

Dans un souci de clarté, nous avons décidé de séparer les modèles d'analyse de la MSI, utilisés pour calculer le RFI, des modèles d'analyse du RFI. Les coefficients de détermination des modèles de détermination du RFI étaient compris entre 0,63 et 0,76, ce qui est cohérent avec les valeurs observées dans d'autres études (Tortereau et al., 2020 ; Knott et al., 2008 ; Redden et al., 2011). Cependant, les coefficients de détermination des modèles d'analyse du RFI étaient très faibles (0,05). Cela indique que ces modèles expliquent une très faible proportion de la variance du RFI (5 %). Ce résultat s'explique par 3 raisons : (1) l'approximation réalisée en ne prenant pas en compte le caractère longitudinal des données (données moyennées sur chaque période : avant et après la mise-bas), (2) l'absence d'identification d'un facteur spécifique parmi ceux intégrés au modèle d'analyse du RFI permettant d'expliquer les variations de RFI, et (3) le fait que la majorité des variations de la MSI sont expliquées par les différentes variables intégrées dans le modèle de calcul du RFI.

En conséquence, ces modèles d'analyse du RFIs sont difficilement exploitables. Néanmoins, les résultats obtenus pour les modèles d'analyse du RFIs sont confirmés par ceux des modèles d'analyse du RFle, qui présentent des coefficients de détermination plus élevés (coefficients de corrélation marginaux compris entre 0,73 et 0,89). La valeur de ces coefficients est également en accord avec les résultats d'autres recherches.

II. Discussions de l'évolution des caractères étudiés chez les lignées SGI

1. Les différences de résistance au parasitisme

Les lignées SGI ont été sélectionnées au stade agneau en croissance grâce à la combinaison du génotypage et du phénotypage de la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Ces sélections ont permis d'identifier chez ces animaux des différences significatives de réponse au parasitisme (nombre d'OPG et hématicrite différents) (Sallé et al. 2021). Dans notre expérimentation, nous n'avons pas réussi à identifier de différences claires entre les caractères de parasitisme autour de la mise-bas chez les brebis des lignées sgiS et sgiR. Cela pourrait suggérer, en accord avec notre 1^{ère} hypothèse, que les caractères génétiques permettant la mise en place de l'immunité contre le parasitisme gastro-intestinal sont dépendants de l'âge et/ou du stade physiologique. Cependant, ces caractères de réponse au parasitisme gastro-intestinal avaient déjà été étudiés chez ces lignées en phase péripartum par Douhard et al. (2022). Dans cette étude, l'infestation avait eu lieu environ 30 jours avant la mise bas (contre environ 60 jours dans notre étude) et selon 2 modes d'infestation : le même mode d'infestation que dans notre étude et également une infestation au goutte à goutte 1000–2000 L3/brebis/semaine. L'étude de Douhard et al. (2022) a révélé que le nombre d'OPG excrétés était significativement différent entre les lignées SGI pendant la période allant d'une semaine avant la mise bas (pour le même mode d'infestation que dans notre étude) à deux mois après la mise bas, à l'exception de la période péripartum (au jour de la mise bas et une semaine après). Ces résultats convergent donc avec les nôtres, car nous n'avons pas identifié de différence d'excrétion parasitaire entre les lignées SGI autour de la mise-bas. Cela suggère une baisse de l'immunité secondaire à la mise bas. Néanmoins, dans notre étude, à la

différence de celle de Douhard et al. (2022), nous n'avons pas réussi à identifier de différence d'excrétion parasitaire entre les lignées SGI pendant le reste de l'étude (deux mois avant jusqu'à plus d'un mois après la mise bas). Dans notre étude, une tendance a uniquement été relevée pour le nombre d'OPG pendant la période avant la mise-bas (la lignée sgiR excréant moins d'œufs de parasites que la lignée sgiS). Cela suggère que l'absence d'immunité apparente, observée dans notre étude, chez la lignée sgiR n'est pas uniquement ou pas du tout secondaire à la baisse d'immunité observée classiquement à la mise-bas..

Ces différences de résultats peuvent être expliquées par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le décalage graphique d'excrétion d'OPG entre les lignées SGI est important (Figure 21). Il est donc possible que les écarts d'OPG entre ces lignées n'aient pas été détectés en raison d'une puissance statistique insuffisante de notre modèle d'étude ou de l'impact sur nos analyses de la transformation des données d'OPG en racine carrée. Aussi, nous avons identifié une très grande variabilité dans les données d'excrétion parasitaire avant et après mise-bas pour la lignée sgiR (Tableau 19 et Tableau 20). Le coefficient de variation de la variable \sqrt{OPG} pour la lignée sgiR avant la mise-bas et après la mise-bas est respectivement de 72% et de 85%. Nous avons identifié un individu avec des excrétions parasitaires anormalement élevées dans la lignée sgiR. En retirant cet individu du calcul de la moyenne d'OPG pour la lignée sgiR, nous obtenons des coefficients de variation respectivement de 69 % et 80 % pour la période avant mise-bas et après mise-bas. Ces valeurs de coefficients de variation se rapprochent davantage des valeurs observées pour cette variable dans la lignée sgiS : 55 % et 63 % respectivement pour la période avant et après mise-bas. La présence d'un individu fortement excréteur a pu influencer sur nos résultats. Néanmoins, la faible modification du coefficient de variation après le retrait de cet individu nous encourage à penser à d'autres phénomènes pouvant expliquer nos résultats.

Nous pouvons également relever des différences d'alimentation entre les deux études. Dans l'étude de Douhard et al. (2022), les brebis étudiées sont nourries avec des concentrés et de la paille. Dans notre étude, les brebis sont nourries avec une ration à base de concentrés et de fourrage. La ration distribuée dans notre étude présente donc une densité énergétique moindre. De plus, l'erreur de paramétrage de distribution des concentrés dans notre étude a entraîné une baisse d'ingestion des

concentrés de la ration pour ces lignées SGI. Les lignées SGI ont donc consommé moins que leurs besoins théoriques. Nous pouvons donc nous interroger également si le déficit énergétique n'a pas été à l'origine d'un développement immunitaire moins efficace pour la lignée résistante. Cela a déjà été mis en évidence dans la littérature. Ceï et al. (2018), dans leur méta-analyse, ont montré que pour chaque augmentation d'une unité de matière organique digestible dans la ration, le log d'OPG diminuait de 0,02.

Aussi, nous n'avons pas mis en évidence de différence d'hématocrite entre les lignées SGI. Ce paramètre avait également été étudié pendant cette période par Douhard et al. (2022) (la variable étudiée était précisément la perte d'hématocrite par rapport au niveau basal de chaque individu). Cette expérimentation avait montré des différences significatives entre les lignées SGI sur l'intégralité de l'étude. Dans notre étude, nous pouvons supposer, en accord avec les résultats de l'analyse des OPG, que l'immunité conférée dans le groupe *sgiR* n'a pas été suffisamment efficace pour limiter la perte d'hématocrite secondaire à l'infection par rapport au groupe *sgiS*.

2. Les différences de conditions corporelles

Dans notre étude, nous avons observé des différences dans les conditions corporelles des animaux. La lignée *sgiR* présentait une épaisseur de gras dorsal significativement inférieure à celle de la lignée *sgiS* tout au long de l'expérience. Cette différence était déjà notable dès le premier jour et semblait s'accroître au fil du temps. Cette observation est en accord avec notre 2^{ème} hypothèse. Cette variation d'épaisseur de gras dorsal avait également été mise en évidence chez les brebis intégrées dans notre étude lorsqu'elles étaient au stade d'agneau, ainsi que chez d'autres agneaux en croissance issus des mêmes lignées (Douhard et al. 2022 ; Douhard et al. 2024). En revanche, contrairement à notre étude, cette différence d'épaisseur de gras n'avait pas été observée chez les brebis issues des mêmes lignées de sélection autour de la période de mise-bas (Douhard et al. 2022). Nous n'avons pas trouvé d'explication claire à ces divergences de résultats entre les deux études. Cependant, nous pouvons supposer que les différences de ration et de densité énergétique pourraient en être la cause. La diminution de l'épaisseur de gras dorsal pourrait indiquer un coût direct de l'infestation parasitaire, par une diminution de l'ingestion alimentaire, ou un coût indirect, par une allocation des ressources vers l'immunité au lieu du stockage.

Toutefois, nous n'avons pas observé de réduction de l'ingestion entre les lignées sgiS et sgiR, ce qui suggère plutôt une différence dans l'allocation des ressources. Avec une densité énergétique de la ration plus faible, l'allocation des ressources vers l'immunité serait d'autant plus importante, ce qui expliquerait la persistance des divergences d'épaisseur de gras.

3. Les différences d'efficacité alimentaire

Nous n'avons pas réussi à identifier de différence d'efficacité alimentaire entre les deux lignées SGI. Une étude, pas encore publiée à ce jour, a étudié les différences d'efficacité alimentaire chez les agneaux en croissance issues de la sélection divergente par l'INRAE sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Ces résultats préliminaires sont présentés dans Douhard, Rupp, Gilbert (2022). Ils ne permettent pas de montrer d'effet délétère de la sélection génétique sur le parasitisme gastro-intestinal sur l'efficacité alimentaire. Un effet synergique a même été montré avec des agneaux en sgiR plus efficaces que les agneaux sgiS. L'efficacité alimentaire de lignées sélectionnées pour leur résistance au parasitisme gastro-intestinal a également été analysée dans d'autres études, au cours de la phase de croissance (Ferreira et al. 2021 ; Navajas et al. 2022). Dans une étude chez 67 agneaux parasités par *Haemonchus contortus* issus de sélection divergente pour la résistance aux nématodes gastro-intestinaux, Ferreira et al. (2021) n'ont pas montré de différence de FCR ou de RFI entre les lignées. Ces résultats suggèrent que la sélection pour la résistance aux nématodes n'a pas d'impact négatif sur l'efficacité alimentaire. Navajas et al. ont montré chez 217 agnelles de race Corriedale, sélectionnées en partie pour leur résistance au parasitisme gastro-intestinal, que cette résistance n'était pas corrélée avec l'efficacité alimentaire (Navajas et al. 2022). À notre connaissance, aucune étude n'a démontré d'effet délétère de la sélection pour la résistance au parasitisme sur l'efficacité alimentaire. Nos résultats vont dans ce sens. Ces résultats, ne permettent donc pas de suggérer un effet délétère, de la sélection sur le parasitisme gastro-intestinal sur l'efficacité alimentaire. Ces éléments ne permettent pas de suggérer un compromis génétique, contrairement à ce qui est supposé dans notre 3^{ème} hypothèse.

III. Discussions de l'évolution des caractères étudiés chez les lignées RFI

1. Les différences de conditions corporelles

Notre étude n'a pas permis de mettre en évidence de différences significatives de PV et d'épaisseur de gras dorsal autour de la mise-bas entre ces lignées RFI. De manière contradictoire avec notre 2^{ème} hypothèse, nous n'avons pas non plus observé de différence significative d'épaisseur de muscle dorsal. Cependant, après la mise-bas, bien que la différence d'épaisseur de muscle dorsal entre les lignées rfi+ et rfi- ne soit pas statistiquement significative, l'observation graphique (Figure 20) montre une épaisseur de muscle dorsal plus importante pour la lignée rfi-. Cette différence serait cohérente avec les corrélations génétiques observées sur ces mêmes lignées au stade de croissance. Tortereau et al. (2020) avaient identifié une corrélation génétique négative ($-0,30 \pm 0,15$) entre le RFI et la profondeur de muscle dorsal. Cette différence pourrait être une réponse à la sélection pour l'efficacité alimentaire.

Nous supposons que nous n'avons pas réussi à mettre en évidence cette différence pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les corrélations génétiques mises en évidence par Tortereau et al. (2020) sont faibles, et elles ont été calculées sur des agneaux en croissance nourris uniquement avec des concentrés à volonté, ce qui représente des conditions très différentes de notre expérimentation. Étant donné les corrélations génétiques faibles, il serait également nécessaire d'attendre plusieurs générations de sélection pour que cet effet soit phénotypiquement identifiable. Aussi les effectifs intégrés dans notre étude sont faibles et il serait intéressant d'étudier ce caractère sur une plus grande population, puis de réestimer la corrélation génétique entre les deux caractères avec un plus grand nombre d'animaux afin de réduire l'erreur d'estimation.

Néanmoins cette différence d'épaisseur de muscle dorsal, n'est pas toujours mise en évidence dans les lignées sélectionnées pour l'efficacité alimentaire dans d'autres espèces. Arthur et al. (2001) n'ont montré aucune corrélation génétique entre l'épaisseur de muscle dorsal et l'efficacité alimentaire chez des génisses et des taureaux de race Angus.

2. Les différences de résistance au parasitisme

Notre étude ne nous a pas permis de mettre en évidence de différences de réponse au parasitisme entre les lignées RFI. Ces lignées, sélectionnées pour l'efficacité alimentaire par l'INRAE, n'avaient jamais été intégrées dans une expérimentation avec infestation parasitaire. Il n'existe pas non plus, à notre connaissance, d'étude sur la réponse au parasitisme des lignées sélectionnées pour l'efficacité alimentaire. Contrairement à notre 3^{ème} hypothèse, nos résultats suggèrent que la sélection sur l'efficacité alimentaire n'affecte pas la résistance au parasitisme gastro-intestinal autour de la mise bas. Néanmoins, le niveau parasitaire des lignées RFI était similaire à celui de la lignée sgiS, alors que cette dernière était sous-alimentée. La qualité de la réponse immunitaire peut être affectée par un déficit énergétique dans la ration (Valderrábano, Delfa, Uriarte, 2002). Cela pourrait impliquer un niveau parasitaire supérieur pour les lignées RFI en cas de ration équivalente à celle de la lignée sgiS. Ces résultats devraient donc être étayés par d'autres études similaires avec des rations identiques entre les lignées, ainsi que par des recherches sur de jeunes animaux en croissance.

3. Les différences d'efficacité alimentaire

En accord avec notre première hypothèse, nous n'avons pas identifié de différence d'efficacité entre les lignées RFI au cours de la période péripartum. Le phénotypage et la sélection de ces lignées sur l'efficacité se font sur des animaux jeunes, en croissance, nourris exclusivement avec une ration de concentrés (Tortereau et al. 2020). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer l'absence de différence de RFI entre ces lignées dans notre étude.

Tout d'abord, la différence de ration utilisée pour phénotyper les animaux (concentré ad libitum). Dans notre étude, la ration comprend une part importante de fourrage, alors que les animaux sont phénotypés en croissance sur des rations riches uniquement en concentrés. Dans la littérature, l'impact de la ration sur l'efficacité alimentaire n'est pas bien connu. Des études ont montré que la composition de la ration pouvait entraîner une variation du RFI. Durunna et al. (2011) ont observé chez des jeunes bœufs âgés de 5 à 7 mois que le changement de ration, passant d'une alimentation de croissance à une alimentation de finition, entraînait un changement

d'efficacité pour 58 % d'entre eux. Redden et al. (2011) ont montré que la corrélation phénotypique entre le RFI mesuré sous une ration de croissance composée uniquement de concentrés chez des agneaux en croissance n'était pas corrélée (coefficient de corrélation = 0,02) avec le RFI mesuré sous une ration d'entretien riche en fourrage. Enfin, sur les mêmes lignées de sélection que celles intégrées dans notre étude, Azizi et al. (2021) n'ont pas réussi à montrer de différence d'efficacité digestive entre les lignées rfi+ et rfi- lorsqu'elles étaient nourries avec une base de fourrage. Les lignées de sélection intégrées dans l'étude de Azizi et al. (2021) étaient des lignées avec moins de divergence génétique (1^{ère} génération de sélection) que les brebis intégrées dans cette étude. Aussi, Marie-Etancelin et al. (2023) ont montré que, chez des béliers issus de sélections divergentes sur l'efficacité alimentaire et sélectionnés sous une ration 100 % concentré, le changement de ration pour une ration de 2/3 de fourrage et 1/3 de concentré entraîne une diminution de la différence d'efficacité entre les lignées rfi- et rfi+ par rapport à celle observée sous une ration 100 % concentrée. Cependant, la différence entre les lignées rfi- et rfi+ reste quand même significative, même si elle diminue. Ces études nous encouragent à penser que le niveau d'efficacité alimentaire des lignées sélectionnées varie avec la composition de la ration lors de la sélection.

De plus, le stade physiologique pourrait être à l'origine d'une perte d'efficacité. Paganoni et al. (2017) ont montré que la corrélation phénotypique entre l'efficacité alimentaire mesurée à différents âges était comprise entre 0,04 et 0,30. Ces résultats sont en faveur d'un changement d'efficacité en fonction de l'âge.

Enfin, les brebis incluses dans notre étude étaient parasitées. Peu d'études se sont intéressées à l'impact du parasitisme sur l'efficacité alimentaire. Une étude réalisée sur des agneaux n'a pas montré de différences d'efficacité, qu'ils soient infestés ou non (Maierle 2022).

Ainsi, nous pouvons conclure que, bien que des différences d'efficacité alimentaire soient observées entre les lignées RFI chez les animaux en croissance (Tortereau et al. 2020), celles-ci disparaissent dans des conditions de régime alimentaire, d'âge et de statut physiologique différents. L'efficacité alimentaire étant un caractère complexe, influencé par de multiples voies biologiques, il est possible que les voies impliquées dans l'efficacité alimentaire au stade de croissance des agneaux soient moins déterminantes ou modifiées sous ces nouvelles conditions.

IV. Bilan général et perspectives de travail :

Cette étude a permis de montrer le coût associé à la résistance au parasitisme ; les brebis sgiR présentent des épaisseurs de gras moins importantes. Il semble aussi que la ration alimentaire ait eu un impact sur le nombre d'OPG et l'hématocrite mesuré chez la lignée sgiR. De plus, la sélection pour la résistance au parasitisme ne semble pas influencer l'efficacité alimentaire des brebis. Nous avons également constaté que la sélection sur l'efficacité alimentaire pendant la croissance ne garantit pas une efficacité au stade péri-partum. Nous pensons que cela peut être en partie dû aux différences d'alimentation et de statut physiologique entre ces deux phases. Nous n'avons pas détecté d'effet de la sélection génétique sur l'efficacité alimentaire, sur les compositions corporelles mais l'observation graphique (Figure 20) révèle une différence notable d'épaisseur de muscle dorsal entre les deux lignées. Enfin, la sélection pour l'efficacité alimentaire ne semble pas affecter la résistance au parasitisme. Cette étude ne nous permet pas de mettre en évidence un compromis entre l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal chez les brebis en phase peri-partum. Néanmoins le coût de la résistance au parasitisme mis en évidence sur l'épaisseur de gras dorsal (et l'effet secondaire de la sélection pour l'efficacité alimentaire sur le muscle dorsal) pourrait impliquer dans des conditions particulières un compromis avec l'efficacité alimentaire.

Notre analyse n'a pas permis de comparer les lignées en raison d'un problème dans la distribution des concentrés. Il serait pertinent de répéter le même protocole expérimental en utilisant des rations uniformes pour chaque lignée.

De plus, nous n'avons pas exploré en profondeur les compromis potentiels. Pour cela, il serait nécessaire d'examiner les variations de chaque caractère les uns par rapport aux autres. Douhard et al. (2022) ont mis en place une analyse multivariée pour étudier les différents caractères liés à la composition corporelle, à l'ingestion et à la santé. En utilisant cette méthode qui repose sur les corrélations des caractères au niveaux intra-individuel et interindividuels, nous pourrions mieux comprendre les compromis éventuels de la sélection sur l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal.

Pour la partie calcul de l'efficacité alimentaire, nous nous sommes arrêtés au calcul du RFI autour des dates échographies. Nous n'avons pas pu mettre en évidence

de différences d'efficacité entre les lignées. Le calcul d'un RFI par jour pourrait permettre d'analyser la dynamique de l'efficacité alimentaire et pourrait éventuellement nous permettre d'identifier des jours avec des variations significatives entre les lignées. Pour calculer un RFI quotidien sur l'intégralité de l'étude, le facteur limitant était le manque de données échographiques qui étaient réalisées tous les 15 jours. En raison du coup technique important associé à la mise en place de mesures échographiques quotidiennes, il est difficilement envisageable de mettre en place des mesures échographiques quotidiennes. En revanche, l'interpolation de données pourra être une possibilité pour pallier l'absence de données : l'interpolation de données manquantes sur la composition corporelle pour le calcul de l'efficacité est employée dans certaines études (David, Huynh Tran, Gilbert 2021 ; Tran, Gilbert, David 2017).

CONCLUSION

Au cours du 21^e siècle, l'élevage devra réduire son impact environnemental tout en maintenant des niveaux de production suffisants pour répondre aux besoins alimentaires croissants. Dans ce contexte, la sélection génétique représente un levier important. L'amélioration du potentiel génétique des animaux d'élevage peut permettre de diminuer leur dépendance aux intrants alimentaires et médicamenteux et d'accroître ainsi l'efficacité des productions. À ce titre, deux caractères d'intérêt sont particulièrement étudiés chez les ruminants : la résistance au parasitisme gastro-intestinal et l'efficacité alimentaire. Cependant, les relations génétiques entre ces caractères, y compris leurs potentiels antagonismes, demeurent peu explorés. De plus, la majorité des études se concentre sur des animaux en croissance.

Pour approfondir les connaissances sur les éventuels compromis génétiques liés à la sélection de ces deux caractères pendant la période péripartum, un protocole expérimental de 105 jours a été mis en place entre 2021 et 2022. Ce protocole a impliqué 104 brebis gestantes issues de sélections divergentes pour l'efficacité alimentaire ou la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Ces brebis ont été infestées artificiellement au début de l'expérimentation avec des larves d'*Haemonchus contortus*. Au cours de l'expérimentation, des données concernant la santé, la production, et l'ingestion de ces animaux ont été collectées. Dans ce travail de thèse, nous avons analysé les données recueillies au cours de cette expérimentation et les avons utilisées pour déterminer l'efficacité alimentaire chez des brebis parasitées en phase péripartum.

Lors de la phase péripartum, nous n'avons pas pu mettre en évidence les améliorations de l'efficacité alimentaire et de la résistance au parasitisme gastro-intestinal, comme rapportées dans d'autres études réalisées sur des animaux en croissance issus de sélections génétiques sur ces caractères. Cela pourrait s'expliquer par la modification de la ration distribuée dans notre étude par rapport à celle distribuée dans les études réalisées sur des animaux en croissance, ainsi que par les différences physiologiques importantes entre la période de croissance et la période péripartum.

Cependant, nos résultats ont confirmé l'existence d'effets secondaires associés à ces sélections, déjà identifiés chez des animaux en croissance. Nous avons ainsi identifié, chez des femelles en période péripartum, une réduction de l'épaisseur

de gras dorsal chez les animaux sélectionnés pour leur résistance au parasitisme gastro-intestinal, ainsi qu'une augmentation apparente (mais non significative) de l'épaisseur de muscle dorsal chez ceux sélectionnés pour leur efficacité alimentaire.

Notre expérience n'a pas permis d'étudier *stricto sensu* le compromis génétique entre l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Néanmoins, les effets secondaires associés à ces sélections génétiques pourraient indiquer l'existence d'un tel compromis. Pour approfondir l'étude de ces aspects, il serait nécessaire de développer des protocoles avec des rations homogènes entre les groupes, ce qui faciliterait la comparaison des lignées. De plus, l'analyse des corrélations génétiques entre l'efficacité alimentaire et la résistance au parasitisme gastro-intestinal pourrait aider à mettre en lumière de potentiels compromis.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOTT, K., TAYLOR, M. et STUBBINGS, L., 2012. SCOPS Sustainable Worm Control Strategies for Sheep, 4th Edition [en ligne]. 2012. 53p. Disponible à l'adresse : <https://www.scops.org.uk/workspace/pdfs/internal-parasites-technical-manual-4th-edition-do-not-use-as-updated-version-online.pdf>
- ABONGWA, M., MARTIN, R.J. et ROBERTSON, A.P., 2017. A Brief Review on the mode of action of antinematodal drugs. *Acta veterinaria*. 2017. Vol. 67, n° 2, pp. 137-152. DOI [10.1515/acve-2017-0013](https://doi.org/10.1515/acve-2017-0013).
- AGUERRE, S., ASTRUC, J.-M., LEGARRA, A., BORDES, L., PREVOT, F., GRISEZ, C., et al., 2022. Unfavorable genetic correlations between fecal egg count and milk production traits in the French blond-faced Manech dairy sheep breed. *Genetics Selection Evolution*. 2022. Vol. 54, 14. DOI [10.1186/s12711-022-00701-1](https://doi.org/10.1186/s12711-022-00701-1).
- AGUERRE, S., DOUHARD, F., GRIESEZ, C., PRÉVOT, F., MARCON, D., WEISBECKER, J.-L., et al., 2019. Poster: Highly effective selection for resistance to *Haemonchus contortus* experimental infections may lead to reduced fat deposition in growing sheep. In : 27th Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (WAAVP) [en ligne]. 2019. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02966832>
- AGUERRE, S., JACQUIET, P., BRODIER, H., BOURNAZEL, J.P., GRISEZ, C., PRÉVOT, F., et al., 2018. Resistance to gastrointestinal nematodes in dairy sheep: genetic variability and relevance of artificial infection of nucleus rams to select for resistant ewes on farms. *Veterinary Parasitology*. 2018. Vol. 256, pp. 16-23. DOI [10.1016/j.vetpar.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.04.004).
- AMARILHO-SILVEIRA, F., DE BARBIERI, I., COBUCI, J.A., BALCONI, C., DE FERREIRA, G.F. et CIAPPESONI, G., 2022. Residual feed intake for Australian merino sheep estimated in less than 42 days of trial. *Livestock Science*. 2022. Vol. 258, 104889. DOI [10.1016/j.livsci.2022.104889](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104889).
- ARSENOPOULOS, K.V., KATSAROU, E.I., MENDOZA ROLDAN, J.A., FTHENAKIS, G.C. et PAPADOPOULOS, E., 2022. *Haemonchus contortus* parasitism in Intensively managed cross-limousin beef calves: effects on feed conversion and carcass characteristics and potential associations with climatic conditions. *Pathogens (Basel, Switzerland)*. 2022. Vol. 11, n° 9, 955. DOI [10.3390/pathogens11090955](https://doi.org/10.3390/pathogens11090955).
- ARSENOPOULOS, K.V., FTHENAKIS, G.C., KATSAROU, E.I. et PAPADOPOULOS, E., 2021. Haemonchosis: A challenging parasitic infection of sheep and goats. *Animals*. 2021. Vol. 11, n° 2, 363. DOI [10.3390/ani11020363](https://doi.org/10.3390/ani11020363).

ARTHUR, P.F., ARCHER, J.A., JOHNSTON, D.J., HERD, R.M., RICHARDSON, E.C. et PARNELL, P.F., 2001. Genetic and phenotypic variance and covariance components for feed intake, feed efficiency, and other postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*. 2001. Vol. 79, n° 11, pp. 2805-2811. DOI [10.2527/2001.79112805x](https://doi.org/10.2527/2001.79112805x).

AZIZI, A., NASCIMENTO, H., TORTEREAU, F., HAZARD, D., DOULS, S., DURAND, C., et al., 2021. Intake and digestibility of meat ewes belonging to two contrasting feed efficiency genetic lines, during their two first production cycles. *Livestock Science*. 2021. Vol. 254, 104738. DOI [10.1016/j.livsci.2021.104738](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104738).

BARGER, I.A., 1984. Correlations between numbers of enteric nematode parasites in grazing lambs. *International Journal for Parasitology*. 1984. Vol. 14, n° 6, pp. 587-589. DOI [10.1016/0020-7519\(84\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0020-7519(84)90066-3).

BARRIO, E., HERVÁS, G., GINDRI, M., FRIGGENS, N.C., TORAL, P.G. et FRUTOS, P., 2023. Relationship between feed efficiency and resilience in dairy ewes subjected to acute underfeeding. *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106, n° 9, pp. 6028-6040. DOI [10.3168/jds.2022-23174](https://doi.org/10.3168/jds.2022-23174).

BASARAB, J.A., PRICE, M.A., AALHUS, J.L., OKINE, E.K, SNELLING, W.M. et LYLE, K.L., 2003. Residual feed intake and body composition in young growing cattle. *Canadian Journal of Animal Science*. 2003. Vol. 83, pp. 189-204. DOI [10.4141/A02-065](https://doi.org/10.4141/A02-065).

BÉLANGER, D., COCKBURN, A., LÉBOEUF, A. et VILLENEUVE, A., 2007. Gestion intégrée du parasitisme gastro-intestinal chez les moutons [en ligne]. 2007. 36p. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://cepoq.com/wp-content/uploads/2018/09/guide_parasitisme_projetfmv_cepoq-1.pdf

BELLEMAIN, V., BOQUET, K., GALICHET, T., GOUELLO, K., MARTIN, A., NAIRAUD, D., et al., 2017. Frise interactive. Conseil National de l'Alimentation [en ligne]. 2017. [Consulté le 3 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.cna-alimentation.fr/FriseCNA_30ans/P08.xhtml

BORDES, L., DESMOLIN, A., GREIL, S., RICHELME, A., EICHSTADT, M., FLUCK, A., et al., 2020. Multirésistances aux anthelminthiques chez les strongles digestifs des petits ruminants du sud de la France. *Le Nouveau Praticien Vétérinaire, élevages et santé*. 2020. Vol. 12, n° 46, pp. 7-18.

BOURDOISEAU, G. et ROY, L., 2006. Interprétation qualitative et quantitative de l'examen coproscopique. *Pratique Vétérinaire Equine* [en ligne]. 2006. n° 151. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse :

<https://www.lepointveterinaire.fr/publications/pratique-veterinaire-equine/article/n-151/interpretation-qualitative-et-quantitative-de-l-examen-coprosopique.html>

BROOMFIELD, M.A., DOYLE, E.K., KAHN, L.P., SMITH, W.D. et WALKDEN-BROWN, S.W., 2020. A simplified Barbervax® vaccination regimen in lambs to evoke immunological protection to *Haemonchus contortus*. *Veterinary Parasitology*. 2020. Vol. 287, 109243. DOI [10.1016/j.vetpar.2020.109243](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2020.109243).

BROWN, E.G., 2006. Sources of biological variation in residual feed intake in growing and finishing steers. Thèse de doctorat. Texas A&M University. 131p. [Consulté le 10 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hdl.handle.net/1969.1/3207>

BUENO, L., DAKKAK, A. et FIORAMONTI, J., 1982. Gastro-duodenal motor and transit disturbances associated with *Haemonchus contortus* infection in sheep. *Parasitology*. 1982. Vol. 84, n° 2, pp. 367-374. DOI [10.1017/s0031182000044905](https://doi.org/10.1017/s0031182000044905).

BURGESS, C.G.S., BARTLEY, Y., REDMAN, E., SKUCE, P.J., NATH, M., WHITELOW, F., et al., 2012. A survey of the trichostrongylid nematode species present on UK sheep farms and associated anthelmintic control practices. *Veterinary Parasitology*. 2012. Vol. 189, n° 2-4, pp. 299-307. DOI [10.1016/j.vetpar.2012.04.009](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.04.009).

CANTALAPIEDRA-HIJAR, G., ABO-ISMAIL, M., CARSTENS, G.E., GUAN, L.L., HEGARTY, R., KENNY, D.A., et al., 2018. Review: Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. *Animal*. 2018. Vol. 12, Suppl 2, pp. s321-s335. DOI [10.1017/S1751731118001489](https://doi.org/10.1017/S1751731118001489).

CANTALAPIEDRA-HIJAR, G., FAVERDIN, P., FRIGGENS, N.C. et MARTIN, P., 2020. Efficience alimentaire : comment mieux la comprendre et en faire un élément de durabilité de l'élevage. *INRAE Productions Animales*. 2020. Vol. 33, n° 4, pp. 235-248. DOI [10.20870/productions-animales.2020.33.4.4594](https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4594).

CASPER, D.P., 2008. Factors affecting feed efficiency of dairy cows. In : *The Proceeding of Tri-State Dairy Nutrition Conference*. 2008. pp. 133-144.

CAZAJOUS, T., PREVOT, F., KERBIRIOU, A., MILHES, M., GRISEZ, C., TROPEE, A., et al., 2018. Multiple-resistance to ivermectin and benzimidazole of a *Haemonchus contortus* population in a sheep flock from mainland France, first report. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*. 2018. Vol. 14, pp. 103-105. DOI [10.1016/j.vprsr.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2018.09.005).

CEÍ, W., SALAH, N., ALEXANDRE, G., BAMBOU, J.C. et ARCHIMÈDE, H., 2018. Impact of energy and protein on the gastro-intestinal parasitism of small ruminants: a

meta-analysis. *Livestock Science*. 2018. Vol. 212, pp. 34-44.
DOI [10.1016/j.livsci.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.03.015).

CHARLIER, J., MORGAN, E.R., RINALDI, L., VAN DIJK, J., DEMELER, J., HÖGLUND, J., et al., 2014. Practices to optimise gastrointestinal nematode control on sheep, goat and cattle farms in Europe using targeted (selective) treatments. *The Veterinary Record*. 2014. Vol. 175, n° 10, pp. 250-255. DOI [10.1136/vr.102512](https://doi.org/10.1136/vr.102512).

CHARTIER, C., PORS, I., HUBERT, J., ROCHETEAU, D., BENOIT, C. et BERNARD, N., 1998. Prevalence of anthelmintic resistant nematodes in sheep and goats in Western France. *Small Ruminant Research*. 1998. Vol. 29, n° 1, pp. 33-41. DOI [10.1016/S0921-4488\(97\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(97)00116-8).

CINTRA, M.C.R., OLLHOFF, R.D. et SOTOMAIOR, C.S., 2018. Sensitivity and specificity of the FAMACHA© system in growing lambs. *Veterinary Parasitology*. 2018. Vol. 251, pp. 106-111. DOI [10.1016/j.vetpar.2018.01.005](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.01.005).

CITEPA, 2022. Rapport Secten éd. 2022 : Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021 [en ligne]. [Consulté le 3 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.citepa.org/fr/2022_06_a11/

CLEMPSON, A.M., POLLOTT, G.E., BRICKELL, J.S., BOURNE, N.E., MUNCE, N. et WATHES, D.C., 2011. Polymorphisms in the autosomal genes for mitochondrial function TFAM and UCP2 are associated with performance and longevity in dairy cows. *Animal*. 2011. Vol. 5, n° 9, pp. 1335-1343. DOI [10.1017/S1751731111000346](https://doi.org/10.1017/S1751731111000346).

CODY, M.L., 1966. A general theory of clutch size. *Evolution*. 1966. Vol. 20, n° 2, pp. 174-184. DOI [10.2307/2406571](https://doi.org/10.2307/2406571).

COOP, R.L. et KYRIAZAKIS, I., 1999. Nutrition–parasite interaction. *Veterinary Parasitology*. 1999. Vol. 84, n° 3, pp. 187-204. DOI [10.1016/S0304-4017\(99\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(99)00070-9).

CUNHA, S.M.F., WILLOUGHBY, O., SCHENKEL, F. et CÁNOVAS, A., 2024. Genetic parameter estimation and selection for resistance to gastrointestinal nematode parasites in sheep - a review. *Animals*. 2024. Vol. 14, n° 4, 613. DOI [10.3390/ani14040613](https://doi.org/10.3390/ani14040613).

DAVID, I., HUYNH TRAN, V.-H. et GILBERT, H., 2021. New residual feed intake criterion for longitudinal data. *Genetics Selection Evolution*. 2021. Vol. 53, 53. DOI [10.1186/s12711-021-00641-2](https://doi.org/10.1186/s12711-021-00641-2).

DE LA TORRE, A., ANDUEZA, D., RENAND, G., BAUMONT, R., CANTALAPIEDRA-HIJAR, G. et NOZIÈRE, P., 2019. Digestibility contributes to between-animal variation in feed efficiency in beef cows. *Animal*. 2019. Vol. 13, n° 12, pp. 2821-2829. DOI [10.1017/S1751731119001137](https://doi.org/10.1017/S1751731119001137).

DE SOUZA, R.B. et GUIMARÃES, J.R., 2022. Effects of Avermectins on the Environment Based on Its Toxicity to Plants and Soil Invertebrates—a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2022. Vol. 233, n° 7, 259. DOI [10.1007/s11270-022-05744-0](https://doi.org/10.1007/s11270-022-05744-0).

DI LORIA, A., VENEZIANO, V., PIANTEDOSI, D., RINALDI, L., CORTESE, L., MEZZINO, L., et al., 2009. Evaluation of the FAMACHA system for detecting the severity of anaemia in sheep from southern Italy. *Veterinary Parasitology*. 2009. Vol. 161, n° 1, pp. 53-59. DOI [10.1016/j.vetpar.2008.12.002](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2008.12.002).

DOUHARD, F., DOESCHL-WILSON, A.B., CORBISHLEY, A., HAYWARD, A.D., MARCON, D., WEISBECKER, J.-L., et al., 2022. The cost of host genetic resistance on body condition: evidence from divergently selected sheep. *Evolutionary Applications*. 2022. Vol. 15, n° 9, pp. 1374-1389. DOI [10.1111/eva.13442](https://doi.org/10.1111/eva.13442).

DOUHARD, F., DOUHARD, M., GILBERT, H., MONGET, P., GAILLARD, J.-M. et LEMAÎTRE, J.-F., 2021. How much energetic trade-offs limit selection? Insights from livestock and related laboratory model species. *Evolutionary Applications*. 2021. Vol. 14, n° 12, pp. 2726-2749. DOI [10.1111/eva.13320](https://doi.org/10.1111/eva.13320).

DOUHARD, F., MATTHEY, X., MARCON, D., COFFRE-THOMAIN, C., ESTIVALET, L., SERREAU, D., et al., 2024. Evidence for a constitutive cost of host resistance on body fat growth in ewe lambs from lines selected for resistance or susceptibility to experimental infections with *Haemonchus contortus*. *International Journal for Parasitology* [en ligne]. 2024. S0020-7519(24)00172-3 [Consulté le 10 octobre 2024]. DOI [10.1016/j.ijpara.2024.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2024.09.004).

DOUHARD, F., SALLÉ, G., DOESCHL-WILSON, A.B., MARCON, D., WEISBECKER, J.-L., CORBISHLEY, A., et al., 2023. Poster: The cost of host genetic resistance to parasites in the domestic sheep: insights from a selection experiment. In : Conference Jacques Monod « A matter of scale: Within host and between host processes driving coevolution with parasites ». 2023. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-04614706>

DOUHARD, F., RUPP, R. et GILBERT, H., 2022. 54. Feed efficiency and resource allocation trade-offs: theory, evidence and prospects. In : 12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production [en ligne]. Wageningen Academic Publishers. 2022. pp. 264-267. [Consulté le 11 octobre 2024]. Disponible à

l'adresse : https://www.wageningenacademic.com/doi/10.3920/978-90-8686-940-4_54

DUFFIELD, T.F., MERRILL, J.K. et BAGG, R.N., 2012. Meta-analysis of the effects of monensin in beef cattle on feed efficiency, body weight gain, and dry matter intake. *Journal of Animal Science*. 2012. Vol. 90, n° 12, pp. 4583-4592. DOI [10.2527/jas.2011-5018](https://doi.org/10.2527/jas.2011-5018).

DURU, M., FARES, M. et THEROND, O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cahiers Agricultures*. 2014. Vol. 23, n° 2, pp. 84-89. DOI [10.1684/agr.2014.0691](https://doi.org/10.1684/agr.2014.0691).

DURUNNA, O.N., MUJIBI, F.D.N., GOONEWARDENE, L., OKINE, E.K., BASARAB, J.A., WANG, Z. et al., 2011. Feed efficiency differences and reranking in beef steers fed grower and finisher diets. *Journal of Animal Science*. 2011. Vol. 89, n° 1, pp. 158-167. DOI [10.2527/jas.2009-2514](https://doi.org/10.2527/jas.2009-2514).

EL-SABER BATIHA, G., ALQAHTANI, A., ILESANMI, O.B., SAATI, A.A., EL-MLEEH, A., HETTA, H.F. et MAGDY BESHBIHY, A., 2020. Avermectin derivatives, pharmacokinetics, therapeutic and toxic dosages, mechanism of action, and their biological effects. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*. 2020. Vol. 13, n° 8, 196. DOI [10.3390/ph13080196](https://doi.org/10.3390/ph13080196).

EMERY, D.L., HUNT, P.W. et LE JAMBRE, L.F., 2016. *Haemonchus contortus*: the then and now, and where to from here?. *International Journal for Parasitology*. 2016. Vol. 46, n° 12, pp. 755-769. DOI [10.1016/j.ijpara.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2016.07.001).

EVERTS, H., 1990. Feeding strategy during pregnancy for ewes with a large litter size. 2. Effect on blood parameters and energy status. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 1990. Vol. 38, n° 3B, pp. 541-554. DOI [10.18174/njas.v38i3B.16577](https://doi.org/10.18174/njas.v38i3B.16577).

EYSKER, M., 1978. Inhibition of the development of *Trichostrongylus* spp. as third stage larvae in sheep. *Veterinary Parasitology*. 1978. Vol. 4, n° 1, pp. 29-33. DOI [10.1016/0304-4017\(78\)90033-X](https://doi.org/10.1016/0304-4017(78)90033-X).

FERREIRA, G.F., CIAPPESONI, G., CASTELLS, D., AMARILHO-SILVEIRA, F., NAVAJAS, E.A., GIORELLO, D., et al., 2021. Feed conversion efficiency in sheep genetically selected for resistance to gastrointestinal nematodes. *Animal Production Science*. 2021. Vol. 61, n° 8, pp. 754-760. DOI [10.1071/AN20121](https://doi.org/10.1071/AN20121).

FERRELL, C. et OLTJEN, J., 2008. Centennial paper: net energy systems for beef cattle-Concepts, application, and future models. *Journal of Animal Science*. 2008. Vol. 86, n° 10, pp. 2779-2794. DOI [10.2527/jas.2008-0954](https://doi.org/10.2527/jas.2008-0954).

FISCHER, A., FRIGGENS, N.C., BERRY, D.P. et FAVERDIN, P., 2018. Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions. *Animal*. 2018. Vol. 12, n° 7, pp. 1396-1404. DOI [10.1017/S1751731117003214](https://doi.org/10.1017/S1751731117003214).

FISSIHA, W. et KINDE, M.Z., 2021. Anthelmintic resistance and its mechanism: a review. *Infection and Drug Resistance*. 2021. Vol. 14, pp. 5403-5410. DOI [10.2147/IDR.S332378](https://doi.org/10.2147/IDR.S332378).

FITZSIMONS, C., KENNY, D. A. et MCGEE, M., 2014. Visceral organ weights, digestion and carcass characteristics of beef bulls differing in residual feed intake offered a high concentrate diet. *Animal*. 2014. Vol. 8, n° 6, pp. 949-959. DOI [10.1017/S1751731114000652](https://doi.org/10.1017/S1751731114000652).

FLAY, K.J., HILL, F.I. et MUGUIRO, D.H., 2022. A review: *Haemonchus contortus* infection in pasture-based sheep production systems, with a focus on the pathogenesis of anaemia and changes in haematological parameters. *Animals*. 2022. Vol. 12, n° 10, 1238. DOI [10.3390/ani12101238](https://doi.org/10.3390/ani12101238).

FOLEY, J., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K., CASSIDY, E., GERBER, J., JOHNSTON, M., et al., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 2011. Vol. 478, pp. 337-342. DOI [10.1038/nature10452](https://doi.org/10.1038/nature10452).

FORBES, A.B., HUCKLE, C.A., GIBB, M.J., ROOK, A.J. et NUTHALL, R., 2000. Evaluation of the effects of nematode parasitism on grazing behaviour, herbage intake and growth in young grazing cattle. *Veterinary Parasitology*. 2000. Vol. 90, n° 1-2, pp. 111-118. DOI [10.1016/s0304-4017\(00\)00218-1](https://doi.org/10.1016/s0304-4017(00)00218-1).

FORBES, A.B., WARREN, M., UPJOHN, M., JACKSON, B., JONES, J., CHARLIER, J. et al., 2009. Associations between blood gastrin, ghrelin, leptin, pepsinogen and *Ostertagia ostertagi* antibody concentrations and voluntary feed intake in calves exposed to a trickle infection with *O. ostertagi*. *Veterinary Parasitology*. 2009. Vol. 162, n° 3, pp. 295-305. DOI [10.1016/j.vetpar.2009.03.010](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2009.03.010).

FOX, J. et WEISBERG, S., 2018. An R companion to applied regression. SAGE Publications. 607 p.

FTHENAKIS, G.C., MAVROGIANNI, V.S., GALLIDIS, E. et PAPADOPOULOS, E., 2015. Interactions between parasitic infections and reproductive efficiency in sheep.

Veterinary Parasitology. 2015. Vol. 208, n° 1, pp. 56-66.
DOI [10.1016/j.vetpar.2014.12.017](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2014.12.017).

GARLAND, T., DOWNS, C.J. et IVES, A.R., 2022. Trade-offs (and constraints) in organismal biology. *Physiological and Biochemical Zoology*. 2022. Vol. 95, n° 1, pp. 82-112. DOI [10.1086/717897](https://doi.org/10.1086/717897).

GAUDIN, E., SIMON, M., QUIJADA, J., SCHELCHER, F., SUTRA, J.-F., LESPINE, A. et al., 2016. Efficacy of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) pellets against multi resistant *Haemonchus contortus* and interaction with oral ivermectin: Implications for on-farm control. *Veterinary Parasitology*. 2016. Vol. 227, pp. 122-129.
DOI [10.1016/j.vetpar.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2016.08.002).

GILBERT, H., BIDANEL, J.-P., BILLON, Y., LAGANT, H., GUILLOUET, P., SELLIER, P., et al., 2012. Correlated responses in sow appetite, residual feed intake, body composition, and reproduction after divergent selection for residual feed intake in the growing pig1. *Journal of Animal Science*. 2012. Vol. 90, n° 4, pp. 1097-1108.
DOI [10.2527/jas.2011-4515](https://doi.org/10.2527/jas.2011-4515).

GOOD, B., HANRAHAN, J.P., CROWLEY, B.A. et MULCAHY, G., 2006. Texel sheep are more resistant to natural nematode challenge than Suffolk sheep based on faecal egg count and nematode burden. *Veterinary Parasitology*. 2006. Vol. 136, n° 3-4, pp. 317-327. DOI [10.1016/j.vetpar.2005.12.001](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2005.12.001).

GRANT, E.P., WICKHAM, S.L., ANDERSON, F., BARNES, A.L., FLEMING, P.A. et MILLER, D.W., 2020. Behavioural assessment of sheep is sensitive to level of gastrointestinal parasite infection. *Applied Animal Behaviour Science*. 2020. Vol. 223, 104920. DOI [10.1016/j.applanim.2019.104920](https://doi.org/10.1016/j.applanim.2019.104920).

GRAY, G.D., 1997. The use of genetically resistant sheep to control nematode parasitism. *Veterinary Parasitology*. 1997. Vol. 72, n° 3-4, pp. 345-357.
DOI [10.1016/s0304-4017\(97\)00105-2](https://doi.org/10.1016/s0304-4017(97)00105-2).

GREER, A., MIROSLAW, S., JAY, N., MCANULTY, R. et SYKES, A.R., 2005. The effect of concurrent corticosteroid-induced immuno-suppression and infection with the intestinal parasite *Trichostrongylus colubriformis* on feed intake and utilisation in both immunologically naïve and competent sheep. *Animal Science*. 2005. Vol. 80, pp. 89-99. DOI [10.1079/ASC41100089](https://doi.org/10.1079/ASC41100089).

GREER, A.W., VAN WYK, J.A., HAMIE, J.C., BYARUHANGA, C. et KENYON, F., 2020. Refugia-based strategies for parasite control in livestock. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2020. Vol. 36, n° 1, pp. 31-43.
DOI [10.1016/j.cvfa.2019.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.11.003).

GRUNER, L., BOUIX, J. et BRUNEL, J.C., 2004. High genetic correlation between resistance to *Haemonchus contortus* and to *Trichostrongylus colubriformis* in INRA 401 sheep. *Veterinary Parasitology*. 2004. Vol. 119, n° 1, pp. 51-58.
DOI [10.1016/j.vetpar.2003.10.014](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2003.10.014).

HANSEN, J. et PERRY, B.D., 1994. *The Epidemiology, Diagnosis, and Control of Helminth Parasites of Ruminants: A Handbook*. International Laboratory for Research on Animal Diseases. 176p.

HAYWARD, A.D., 2022. Genetic parameters for resistance to gastrointestinal nematodes in sheep: a meta-analysis. *International Journal for Parasitology*. 2022. Vol. 52, n° 13, pp. 843-853. DOI [10.1016/j.ijpara.2022.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2022.09.004).

HAZARD, D., MORISSET, A., FOULQUIE, D., DELVAL, E., DOULS, S., CARRIERE, F., et al., 2019. Divergent genetic selections for an early behavioural reactivity in meat sheep. In : 70. Annual Meeting of the European Association for Animal Production. 2019. [Consulté le 16 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/647471eebf943c8c79822a24>

HERD, R.M. et ARTHUR, P.F., 2009. Physiological basis for residual feed intake. *Journal of Animal Science*. 2009. Vol. 87, Suppl 14, pp. E64-E71.
DOI [10.2527/jas.2008-1345](https://doi.org/10.2527/jas.2008-1345).

HERD, R.M., DICKER, R.W., ODDY, V.H., JOHNSTON, D.J., HAMMOND, A.J. et LEE, G.J., 2004. Steer growth and feed efficiency on pasture are favourably associated with genetic variation in sire net feed intake. *Science Access*. 2004. Vol. 1, n° 1, pp. 93-96. DOI [10.1071/sa0401024](https://doi.org/10.1071/sa0401024).

HERNANDEZ-SANABRIA, E., GOONEWARDENE, L.A., WANG, Z., DURUNNA, O.N., MOORE, S.S. et GUAN, L.L., 2012. Impact of feed efficiency and diet on adaptive variations in the bacterial community in the rumen fluid of cattle. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. Vol. 78, n° 4, pp. 1203-1214.
DOI [10.1128/AEM.05114-11](https://doi.org/10.1128/AEM.05114-11).

HOSTE, H., JACKSON, F., ATHANASIADOU, S., THAMSBORG, S.M. et HOSKIN, S.O., 2006. The effects of tannin-rich plants on parasitic nematodes in ruminants. *Trends in Parasitology*. 2006. Vol. 22, n° 6, pp. 253-261.
DOI [10.1016/j.pt.2006.04.004](https://doi.org/10.1016/j.pt.2006.04.004).

HOUDIJK, J.G.M., TOLKAMP, B.J., ROOKE, J.A. et HUTCHINGS, M.R., 2017. Animal health and greenhouse gas intensity: the paradox of periparturient parasitism. *International Journal for Parasitology*. 2017. Vol. 47, n° 10, pp. 633-641.
DOI [10.1016/j.ijpara.2017.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2017.03.006).

HUNTLEY, J.F., SCHALLIG, H.D., KOOYMAN, F.N., MACKELLAR, A., MILLERSHIP, J. et SMITH, W.D., 1998. IgE responses in the serum and gastric lymph of sheep infected with *Teladorsagia circumcincta*. *Parasite Immunology*. 1998. Vol. 20, n° 4, pp. 163-168. DOI [10.1046/j.1365-3024.1998.00137.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3024.1998.00137.x).

HUTCHINGS, M.R., GORDON, I.J., ROBERTSON, E., KYRIAZAKIS, I. et JACKSON, F., 2000. Effects of parasitic status and level of feeding motivation on the diet selected by sheep grazing grass/clover swards. *The Journal of Agricultural Science*. 2000. Vol. 135, n° 1, pp. 65-75. DOI [10.1017/S002185969900790X](https://doi.org/10.1017/S002185969900790X).

ILIAN, M.A., RAZZAQUE, M.A., AL-AWADI, A. et SALMAN, A.J., 1988. Use of fat in diets of sheep in hot environments. I. Effects on performance, carcass characteristics and lipid composition of plasma. *Animal Feed Science and Technology*. 1988. Vol. 19, n° 4, pp. 327-341. DOI [10.1016/0377-8401\(88\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90023-5).

ILIEV, P., PRELEZOV, P., IVANOV, A., KIRKOVA, Z. et TONEV, A., 2017. Clinical study of acute haemonchosis in lambs. *Trakia Journal of Sciences*. 2017. Vol. 15, pp. 74-78. DOI [10.15547/tjs.2017.01.012](https://doi.org/10.15547/tjs.2017.01.012).

IPAMPA - Idele.fr, 2024. Institut de l'Élevage [en ligne]. [Consulté le 1 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/ipampa>

JACKSON, F. et COOP, R.L., 2007. Gastrointestinal helminthosis. In : *Diseases of sheep* [en ligne]. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 185-195. [Consulté le 9 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470753316.ch27>

KADARMIDEEN, H.N., 2004. Genetic correlations among body condition score, somatic cell score, milk production, fertility and conformation traits in dairy cows. *Animal Science*. 2004. Vol. 79, n° 2, pp. 191-201. DOI [10.1017/S1357729800090056](https://doi.org/10.1017/S1357729800090056).

KAMINSKY, R., DUCRAY, P., JUNG, M., CLOVER, R., RUFENER, L., BOUVIER, J., et al., 2008. A new class of anthelmintics effective against drug-resistant nematodes. *Nature*. 2008. Vol. 452, n° 7184, pp. 176-180. DOI [10.1038/nature06722](https://doi.org/10.1038/nature06722).

KARIM, A., 2013. Évaluation de l'état corporel des brebis : grille de notation. *La Semaine Vétérinaire* [en ligne]. 2013. n° 1546. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/la-semaine-veterinaire/article/n-1546/evaluation-de-l-etat-corporel-des-brebis-grille-de-notation.html>

KEBETA, M.M., HINE, B.C., WALKDEN-BROWN, S.W., KAHN, L.P. et DOYLE, E.K., 2020. Evaluation of Barbervax® vaccination for lambing Merino ewes. *Veterinary Parasitology*. 2020. Vol. 283, 109187. DOI [10.1016/j.vetpar.2020.109187](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2020.109187).

KENNY, D. A., FITZSIMONS, C., WATERS, S. M. et MCGEE, M., 2018. Invited review: Improving feed efficiency of beef cattle – the current state of the art and future challenges. *Animal*. 2018. Vol. 12, n° 9, pp. 1815-1826. DOI [10.1017/S1751731118000976](https://doi.org/10.1017/S1751731118000976).

KNOTT, S.A., CUMMINS, L.J., DUNSHEA, F.R. et LEURY, B.J., 2008. The use of different models for the estimation of residual feed intake (RFI) as a measure of feed efficiency in meat sheep. *Animal Feed Science and Technology*. 2008. Vol. 143, n° 1, pp. 242-255. DOI [10.1016/j.anifeedsci.2007.05.013](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.013).

KOCH, R.M., SWIGER, L.A., CHAMBERS, D. et GREGORY, K.E., 1963. Efficiency of Feed Use in Beef Cattle. *Journal of Animal Science*. 1963. Vol. 22, n° 2, pp. 486-494. DOI [10.2527/jas1963.222486x](https://doi.org/10.2527/jas1963.222486x).

KONG, R.S.G., LIANG, G., CHEN, Y., STOTHARD, P. et GUAN, L.L., 2016. Transcriptome profiling of the rumen epithelium of beef cattle differing in residual feed intake. *BMC Genomics*. 2016. Vol. 17, n° 1, 592. DOI [10.1186/s12864-016-2935-4](https://doi.org/10.1186/s12864-016-2935-4).

KUMAR, N., RAO, T.K.S., VARGHESE, A. et RATHOR, V.S., 2013. Internal parasite management in grazing livestock. *Journal of Parasitic Diseases: Official Organ of the Indian Society for Parasitology*. 2013. Vol. 37, n° 2, pp. 151-157. DOI [10.1007/s12639-012-0215-z](https://doi.org/10.1007/s12639-012-0215-z).

LAFFONT, C.M., BOUSQUET-MÉLOU, A., BRALET, D., ALVINERIE, M., FINK-GREMMELS, J. et TOUTAIN, P.-L., 2003. A pharmacokinetic model to document the actual disposition of topical ivermectin in cattle. *Veterinary Research*. 2003. Vol. 34, n° 4, pp. 445-460. DOI [10.1051/vetres:2003014](https://doi.org/10.1051/vetres:2003014).

LANCASTER, P.A., CARSTENS, G.E., MICHAL, J.J., BRENNAN, K.M., JOHNSON, K.A. et DAVIS, M.E., 2014. Relationships between residual feed intake and hepatic mitochondrial function in growing beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2014. Vol. 92, n° 7, pp. 3134-3141. DOI [10.2527/jas.2013-7409](https://doi.org/10.2527/jas.2013-7409).

LANUSSE, C.E. et PRICHARD, R.K., 1993. Clinical pharmacokinetics and metabolism of benzimidazole anthelmintics in ruminants. *Drug Metabolism Reviews*. 1993. Vol. 25, n° 3, pp. 235-279. DOI [10.3109/03602539308993977](https://doi.org/10.3109/03602539308993977).

LAWRENCE, P., KENNY, D. A., EARLEY, B. et MCGEE, M., 2012. Grazed grass herbage intake and performance of beef heifers with predetermined phenotypic

residual feed intake classification. *Animal*. 2012. Vol. 6, n° 10, pp. 1648-1661.
DOI [10.1017/S1751731112000559](https://doi.org/10.1017/S1751731112000559).

LE GRAVERAND, Q., MARIE-ETANCELIN, C., MEYNADIER, A., WEISBECKER, J.-L., MARCON, D. et TORTEREAU, F., 2023. Predicting feed efficiency traits in growing lambs from their ruminal microbiota. *Animal*. 2023. Vol. 17, n° 6, 100824.
DOI [10.1016/j.animal.2023.100824](https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100824).

LI, Y.Z., CHRISTOPHERSON, R.J., LI, B.T. et MOIBI, J.A., 2000. Effects of a beta-adrenergic agonist (L-644,969) on performance and carcass traits of growing lambs in a cold environment. *Canadian Journal of Animal Science*. 2000. Vol. 80, n° 3, pp. 459-465. DOI [10.4141/A99-076](https://doi.org/10.4141/A99-076).

LIU, H., ZHANG, Y., LIU, F., YE, L., LIU, X., WANG, C. et al., 2023. Progress and challenges for developing vaccines against gastrointestinal nematodes of ruminants. *Veterinary Vaccine*. 2023. Vol. 2, n° 3, 100041. DOI [10.1016/j.vetvac.2023.100041](https://doi.org/10.1016/j.vetvac.2023.100041).

LOBLEY, G.E., 2003. Protein turnover—what does it mean for animal production?. *Canadian Journal of Animal Science*. 2003. Vol. 83, n° 3, pp. 327-340.
DOI [10.4141/A03-019](https://doi.org/10.4141/A03-019).

MACHEFERT, C., ROBERT-GRANIÉ, C., LAGRIFFOUL, G., PARISOT, S., ALLAIN, C., PORTES, D., et al., 2023. Opportunities and limits of commercial farm data to study the genetic determinism of feed efficiency throughout lactation in dairy sheep. *Animal*. 2023. Vol. 17, n° 9, 100951. DOI [10.1016/j.animal.2023.100951](https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100951).

MAIERLE, C., 2022. Impact of *Haemonchus contortus* on feed efficiency and feeding behavior of Katahdin and Suffolk lambs. Thèse de doctorat. West Virginia University. 114 p. DOI [10.33915/etd.11451](https://doi.org/10.33915/etd.11451).

MARAI, I.F.M., EL-DARAWANY, A.A., FADIEL, A. et ABDEL-HAFEZ, M.A.M., 2007. Physiological traits as affected by heat stress in sheep—a review. *Small Ruminant Research*. 2007. Vol. 71, n° 1, pp. 1-12. DOI [10.1016/j.smallrumres.2006.10.003](https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.10.003).

MARIE-ETANCELIN, C., FRANCOIS, D., WEISBECKER, J.-L., MARCON, D., MORENO-ROMIEUX, C., BOUVIER, F. et al., 2019. Detailed genetic analysis of feeding behaviour in romane lambs and links with residual feed intake. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2019. Vol. 136, n° 3, pp. 174-182.
DOI [10.1111/jbg.12392](https://doi.org/10.1111/jbg.12392).

MARIE-ETANCELIN, C., WEISBECKER, J.-L., MARCON, D., ESTIVALET, L., LE GRAVERAND, Q. et TORTEREAU, F., 2023. Selecting feed-efficient sheep with concentrates alters their efficiency with forages and behaviour. In : *European Federation of Animal Science*. 2023.

MARTIN, P., DUCROCQ, V., GORDO, D.G.M. et FRIGGENS, N.C., 2021. A new method to estimate residual feed intake in dairy cattle using time series data. *Animal*. 2021. Vol. 15, n° 2, 100101. DOI [10.1016/j.animal.2020.100101](https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100101).

MARTIN, R.J., 1997. Modes of action of anthelmintic drugs. *Veterinary Journal*. 1997. Vol. 154, n° 1, pp. 11-34. DOI [10.1016/s1090-0233\(05\)80005-x](https://doi.org/10.1016/s1090-0233(05)80005-x).

MARTIN, R.J. et ROBERTSON, A.P., 2007. Mode of action of levamisole and pyrantel, anthelmintic resistance, E153 and Q57. *Parasitology*. 2007. Vol. 134, n° 8, pp. 1093-1104. DOI [10.1017/S0031182007000029](https://doi.org/10.1017/S0031182007000029).

MAVROGIANNI, V.S., PAPADOPOULOS, E., FRAGKOU, I.A., GOUGOULIS, D.A., VALASI, I., ORFANO, D.C., et al., 2011. Administration of a long-acting antiparasitic to pre-pubertal ewe-lambs in Greece results in earlier reproductive activity and improved reproductive performance. *Veterinary Parasitology*. 2011. Vol. 177, n° 1, pp. 139-144. DOI [10.1016/j.vetpar.2010.11.045](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2010.11.045).

MAVROT, F., HERTZBERG, H. et TORGERSON, P., 2015. Effect of gastro-intestinal nematode infection on sheep performance: a systematic review and meta-analysis. *Parasites & Vectors*. 2015. Vol. 8, n° 1, 557. DOI [10.1186/s13071-015-1164-z](https://doi.org/10.1186/s13071-015-1164-z).

MCKELLAR, Q.A. et JACKSON, F., 2004. Veterinary anthelmintics: old and new. *Trends in Parasitology*. 2004. Vol. 20, n° 10, pp. 456-461. DOI [10.1016/j.pt.2004.08.002](https://doi.org/10.1016/j.pt.2004.08.002).

MCKELLAR, Q.A. et SCOTT, E.W., 1990. The benzimidazole anthelmintic agents--a review. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*. 1990. Vol. 13, n° 3, pp. 223-247. DOI [10.1111/j.1365-2885.1990.tb00773.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.1990.tb00773.x).

MCRAE, K.M., STEAR, M.J., GOOD, B. et KEANE, O.M., 2015. The host immune response to gastrointestinal nematode infection in sheep. *Parasite Immunology*. 2015. Vol. 37, n° 12, pp. 605-613. DOI [10.1111/pim.12290](https://doi.org/10.1111/pim.12290).

MEDEROS, A.E., RAMOS, Z. et BANCHERO, G.E., 2014. First report of monepantel *Haemonchus contortus* resistance on sheep farms in Uruguay. *Parasites & Vectors*. 2014. Vol. 7, n° 1, 598. DOI [10.1186/s13071-014-0598-z](https://doi.org/10.1186/s13071-014-0598-z).

MILLER, H.R., 1987. Gastrointestinal mucus, a medium for survival and for elimination of parasitic nematodes and protozoa. *Parasitology*. 1987. Vol. 94, Suppl 1 pp. S77-S100. DOI [10.1017/s0031182000085838](https://doi.org/10.1017/s0031182000085838).

MOALLEM, U., LEHRER, H., LIVSHITZ, L., ZACHUT, M. et YAKOBY, S., 2009. The effects of live yeast supplementation to dairy cows during the hot season on

production, feed efficiency, and digestibility. *Journal of Dairy Science*. 2009. Vol. 92, n° 1, pp. 343-351. DOI [10.3168/jds.2007-0839](https://doi.org/10.3168/jds.2007-0839).

MONTANHOLI, Y., SWANSON, K., PALME, R., SCHENKEL, F., MCBRIDE, B., LU, D. et MILLER, S., 2010. Assessing feed efficiency in beef steers through feeding behavior, infrared thermography and glucocorticoids. *Animal*. 2010. Vol. 4, pp. 692-701. DOI [10.1017/S1751731109991522](https://doi.org/10.1017/S1751731109991522).

MOORE, K., JOHNSTON, D., GRASER, H.-U. et HERD, R.M., 2005. Genetic and phenotypic relationships between insulin-like growth factor-I (IGF-I) and net feed intake, fat, and growth traits in Angus beef cattle. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2005. Vol. 56, n° 3, pp. 211-218 DOI [10.1071/AR04248](https://doi.org/10.1071/AR04248).

MOORS, E. et GAULY, M., 2009. Is the FAMACHA® chart suitable for every breed? Correlations between FAMACHA® scores and different traits of mucosa colour in naturally parasite infected sheep breeds. *Veterinary Parasitology*. 2009. Vol. 166, n° 1, pp. 108-111. DOI [10.1016/j.vetpar.2009.07.040](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2009.07.040).

MORGAN, E.R. et VAN DIJK, J., 2012. Climate and the epidemiology of gastrointestinal nematode infections of sheep in Europe. *Veterinary Parasitology*. 2012. Vol. 189, n° 1, pp. 8-14. DOI [10.1016/j.vetpar.2012.03.028](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.03.028).

MUCHA, S., TORTEREAU, F., DOESCHL-WILSON, A., RUPP, R. et CONINGTON, J., 2022. Animal board invited review: meta-analysis of genetic parameters for resilience and efficiency traits in goats and sheep. *Animal*. 2022. Vol. 16, n° 3, 100456. DOI [10.1016/j.animal.2022.100456](https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100456).

MUGAMBI, J.M., BAIN, R.K., WANYANGU, S.W., IHIGA, M.A., DUNCAN, J.L., MURRAY, M. et STEAR, M.J., 1997. Resistance of four sheep breeds to natural and subsequent artificial *Haemonchus contortus* infection. *Veterinary Parasitology*. 1997. Vol. 69, n° 3-4, pp. 265-273. DOI [10.1016/s0304-4017\(96\)01128-4](https://doi.org/10.1016/s0304-4017(96)01128-4).

NAKAGAWA, S. et SCHIELZETH, H., 2013. A general and simple method for obtaining r^2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*. 2013. Vol. 4, pp. 133-142. DOI [10.1111/J.2041-210x.2012.00261.X](https://doi.org/10.1111/J.2041-210x.2012.00261.X).

NAVAJAS, E., CIAPPESONI, G., GIMENO, D., VELAZCO, J. et BARBIERI, I., 2022. Association of genetic resistance to internal nematodes and production traits on feed efficiency and methane emissions in Corriedale lambs. In : *World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*. 2022.

NOZIERE, P., SAUVANT, D. et DELABY, L., 2018. Inra, 2018. Alimentation des ruminants [en ligne]. Versailles, France : Editions Quae. 728p.

[Consulté le 22 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02789908>

O'CONNOR, L.J., WALKDEN-BROWN, S.W. et KAHN, L.P., 2006. Ecology of the free-living stages of major trichostrongylid parasites of sheep. *Veterinary Parasitology*. 2006. Vol. 142, n° 1-2, pp. 1-15. DOI [10.1016/j.vetpar.2006.08.035](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.08.035).

PAGANONI, B., ROSE, G., MACLEAY, C., JONES, C., BROWN, D. J., KEARNEY, G., et al., 2017. More feed efficient sheep produce less methane and carbon dioxide when eating high-quality pellets. *Journal of Animal Science*. 2017. Vol. 95, n° 9, pp. 3839-3850. DOI [10.2527/jas.2017.1499](https://doi.org/10.2527/jas.2017.1499).

PALKUMBURA, P.G.A.S., MAHAKAPUGE, T.A.N., WIJESUNDERA, R.R.M.K.K., WIJEWARDANA, V., KANGETHE, R.T. et RAJAPAKSE, R.P.V.J., 2024. Mucosal immunity of major gastrointestinal nematode infections in small ruminants can be harnessed to develop new prevention strategies. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, n° 3, 1409. DOI [10.3390/ijms25031409](https://doi.org/10.3390/ijms25031409).

PARAUD, C., MARCOTTY, T., LESPINE, A., SUTRA, J. F., PORS, I. et DEVOS, I., 2016. Cross-resistance to moxidectin and ivermectin on a meat sheep farm in France. *Veterinary Parasitology*. 2016. Vol. 226, pp. 88-92. DOI [10.1016/j.vetpar.2016.06.033](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2016.06.033).

PARKINS, J.J. et HOLMES, P.H., 1989. Effects of gastrointestinal helminth parasites on ruminant nutrition. *Nutrition Research Reviews*. 1989. Vol. 2, n° 1, pp. 227-246. DOI [10.1079/NRR19890016](https://doi.org/10.1079/NRR19890016).

PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S. et SARKAR, S., 2024. nlme: linear and nonlinear mixed effects models [en ligne]. 2024. [Consulté le 2 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>

PONNAMPALAM, E.N., MCCASKILL, M., GIRI, K., MUIR, S.K., CAMERON, F., JACOBS, J.L., et al., 2022. Temperature and temperature humidity index changes during summer to autumn in a temperate zone may affect liveweight gain and feed efficiency in sheep. *Ruminants*. 2022. Vol. 2, n° 4, pp. 390-406. DOI [10.3390/ruminants2040027](https://doi.org/10.3390/ruminants2040027).

PULINA, G., AVONDO, M., MOLLE, G., FRANCESCONI, A.H.D., ATZORI, A.S. et CANNAS, A., 2013. Models for estimating feed intake in small ruminants. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2013. Vol. 42, pp. 675-690. DOI [10.1590/S1516-35982013000900010](https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000900010).

RAINBIRD, M.A., MACMILLAN, D. et MEEUSEN, E.N., 1998. Eosinophil-mediated killing of *Haemonchus contortus* larvae: effect of eosinophil activation and role of

antibody, complement and interleukin-5. *Parasite Immunology*. 1998. Vol. 20, n° 2, pp. 93-103. DOI [10.1046/j.1365-3024.1998.00132.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3024.1998.00132.x).

RAMOS, F., PORTELLA, L.P., RODRIGUES, F.D.S., REGINATO, C.Z., CEZAR, A.S., SANGIONI, L.A., et al., 2018. Anthelmintic resistance of gastrointestinal nematodes in sheep to monepantel treatment in central region of Rio Grande do Sul, Brazil. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 2018. Vol. 38, pp. 48-52. DOI [10.1590/1678-5150-PVB-5188](https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-5188).

R Core Team, 2024. R: a language and environment for statistical computing [computer software]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RCP: LEVISOLE injectable, 2019. Index des médicaments vétérinaires autorisés en France [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ircp.anmv.anses.fr/rcp.aspx?NomMedicament=LEVISOLE+INJECTABLE>

RCP: ZOLVIX 25mg/mL buvable, 2009. Index des médicaments vétérinaires autorisés en France [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ircp.anmv.anses.fr/fiche.aspx?NomMedicament=ZOLVIX+25+MG%2fML+SOLUTION+BUVABLE+POUR+OVINS>

REDDEN, R.R., SURBER, L.M.M., ROEDER, B.L., NICHOLS, B.M., PATERSON, J.A. et KOTT, R.W., 2011. Residual feed efficiency established in a post-weaning growth test may not result in more efficient ewes on the range. *Small Ruminant Research*. 2011. Vol. 96, n° 2, pp. 155-159. DOI [10.1016/j.smallrumres.2010.12.007](https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.12.007).

REEVES, M.C., BOOTH, N., FOX, N.J., DONBAVAND, J., JACK, M., KENYON, F., et al., 2024. The impact of gastrointestinal parasitism on the behaviour and welfare of weaned housed lambs. *Applied Animal Behaviour Science*. 2024. Vol. 276, 106323. DOI [10.1016/j.applanim.2024.106323](https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106323).

RICHARDSON, E., HERD, R., ARCHER, J et ARTHUR, P, 2004. Metabolic differences in angus steers divergently selected for residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2004. Vol. 44, n° 5, pp. 451-452. DOI [10.1071/EA02219](https://doi.org/10.1071/EA02219).

RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, P., REYES-PALOMO, C., SANZ-FERNÁNDEZ, S., RUFINO-MOYA, P.J., ZAFRA, R., MARTÍNEZ-MORENO, F.J., et al., 2023. Antiparasitic tannin-rich plants from the south of Europe for grazing livestock: a review. *Animals*. 2023. Vol. 13, n° 2, 201. DOI [10.3390/ani13020201](https://doi.org/10.3390/ani13020201).

ROEBER, F., JEX, A.R. et GASSER, R.B., 2013. Advances in the diagnosis of key gastrointestinal nematode infections of livestock, with an emphasis on small ruminants. *Biotechnology Advances*. 2013. Vol. 31, n° 8, pp. 1135-1152. DOI [10.1016/j.biotechadv.2013.01.008](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.008).

ROSE, H., CAMINADE, C., BOLAJOKO, M.B., PHELAN, P., VAN DIJK, J., BAYLIS, M., et al., 2016. Climate-driven changes to the spatio-temporal distribution of the parasitic nematode, *Haemonchus contortus*, in sheep in Europe. *Global Change Biology*. 2016. Vol. 22, n° 3, pp. 1271-1285. DOI [10.1111/gcb.13132](https://doi.org/10.1111/gcb.13132).

ROSE VINEER, H., MORGAN, E.R., HERTZBERG, H., BARTLEY, D.J., BOSCO, A., CHARLIER, J., et al., 2020. Increasing importance of anthelmintic resistance in European livestock: creation and meta-analysis of an open database. *Parasite*. 2020. Vol. 27, 69. DOI [10.1051/parasite/2020062](https://doi.org/10.1051/parasite/2020062).

RUBIN, B., BELLET, V., BOSSIS, N., BERRUYER, M., FAGGION, C.-L., PINEAU, C., et al., 2022. Observatoire des prix et des marges - Résultats 2020 et Estimations 2021. Institut de l'Élevage [en ligne]. 2022. [Consulté le 1 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/observatoire-des-prix-et-des-marges-resultats-2020-et-estimations-2021>

SABATINI, G.A., DE ALMEIDA BORGES, F., CLAEREBOUT, E., GIANECHINI, L.S., HÖGLUND, J., KAPLAN, R.M., et al., 2023. Practical guide to the diagnostics of ruminant gastrointestinal nematodes, liver fluke and lungworm infection: interpretation and usability of results. *Parasites & Vectors*. 2023. Vol. 16, 58. DOI [10.1186/s13071-023-05680-w](https://doi.org/10.1186/s13071-023-05680-w).

SAGOT, L., 2019. Résistance aux antiparasitaires : état des lieux dans 7 élevages du nord-est de la Nouvelle Aquitaine [en ligne]. 2019. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/resistance-aux-antiparasitaires-etat-des-lieux-dans-7-elevages-du-nord-est-de-la-nouvelle-aquitaine>

SAJOVITZ, F., ADDUCI, I., YAN, S., HINNEY, B., WIEDERMANN, S., TICHY, A., et al., 2023. O-045 Correlation of fecal egg count with clinical parameters in dairy sheep. *Animal*. 2023. Vol. 14, n° 1, pp. 87-88. DOI [10.1016/j.anscip.2023.01.121](https://doi.org/10.1016/j.anscip.2023.01.121).

SALLÉ, G., DEISS, V., MARQUIS, C., TOSSER-KLOPP, G., CORTET, J., SERREAU, D., et al., 2021. Genetic × environment variation in sheep lines bred for divergent resistance to strongyle infection. *Evolutionary Applications*. 2021. Vol. 14, n° 11, pp. 2591-2602. DOI [10.1111/eva.13294](https://doi.org/10.1111/eva.13294).

SANTOS, M.C., XAVIER, J.K., AMARANTE, M.R.V., BASSETTO, C.C. et AMARANTE, A.F.T., 2014. Immune response to *Haemonchus contortus* and

Haemonchus placei in sheep and its role on parasite specificity. Veterinary Parasitology. 2014. Vol. 203, n° 1-2, pp. 127-138. DOI [10.1016/j.vetpar.2014.02.048](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2014.02.048).

SCOTT, I., UMAIR, S., SAVOIAN, M.S. et SIMPSON, H.V., 2017. Abomasal dysfunction and cellular and mucin changes during infection of sheep with larval or adult *Teladorsagia circumcincta*. PloS One. 2017. Vol. 12, n° 10, e0186752. DOI [10.1371/journal.pone.0186752](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186752).

SEPULVEDA, B.J., MUIR, S.K., BOLORMAA, S., KNIGHT, M.I., BEHRENDT, R., MACLEOD, I.M., et al., 2022. Eating time as a genetic indicator of methane emissions and feed efficiency in Australian maternal composite sheep. Frontiers in Genetics. 2022. Vol. 13, 883520. DOI [10.3389/fgene.2022.883520](https://doi.org/10.3389/fgene.2022.883520).

SEYMOUR, D.J., CÁNOVAS, A., CHUD, T.C.S., CANT, J.P., OSBORNE, V.R., BAES, C.F., et al., 2020. The dynamic behavior of feed efficiency in primiparous dairy cattle. Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103, n° 2, pp. 1528-1540. DOI [10.3168/jds.2019-17414](https://doi.org/10.3168/jds.2019-17414).

SHARIFABADI, H.R., ZAMIRI, M.J., ROWGHANI, E. et BOTTJE, W.G., 2012. Relationship between the activity of mitochondrial respiratory chain complexes and feed efficiency in fat-tailed ghezel lambs. Journal of Animal Science. 2012. Vol. 90, n° 6, pp. 1807-1815. DOI [10.2527/jas.2011-4791](https://doi.org/10.2527/jas.2011-4791).

SHIKE, D., 2013. Beef cattle feed efficiency. In : Driftless Region Beef Conference. 2013. pp. 3-4.

SKUCE, P., INNOCENT, G. et BARTLEY, D., 2014. Modelling the risk of specific parasites to UK sheep under predicted climate change. Scotland's Centre of Expertise on Climate Change. 6 p.

SOTO-BARRIENTOS, N., CHAN-PÉREZ, J. I., ESPAÑA-ESPAÑA, E., NOVELO-CHI, L. K., PALMA-ÁVILA, I., CEBALLOS-MENDOZA, A.C., et al., 2018. Comparing body condition score and FAMACHA© to identify hair-sheep ewes with high faecal egg counts of gastrointestinal nematodes in farms under hot tropical conditions. Small Ruminant Research. 2018. Vol. 167, pp. 92-99. DOI [10.1016/j.smallrumres.2018.08.011](https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.08.011).

SOTOMAIOR, C.S., ROSALINSKI-MORAES, F., DA COSTA, A.R.B., MAIA, D., MONTEIRO, A.L.G. et VAN WYK, J.A., 2012. Sensitivity and specificity of the FAMACHA© system in suffolk sheep and crossbred boer goats. Veterinary Parasitology. 2012. Vol. 190, n° 1, pp. 114-119. DOI [10.1016/j.vetpar.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.06.006).

STEAR, M.J., BISHOP, S.C., HENDERSON, N.G. et SCOTT, I., 2003. A key mechanism of pathogenesis in sheep infected with the nematode *Teladorsagia*

circumcincta. Animal Health Research Reviews. 2003. Vol. 4, n° 1, pp. 45-52.
DOI [10.1079/AHRR200351](https://doi.org/10.1079/AHRR200351).

STEARNS, S.C., 1992. The evolution of life histories. Oxford, New York : Oxford University Press. 249 p.

STEVENSON, L.M., HUNTLEY, J.F., SMITH, W.D. et JONES, D.G., 1994. Local eosinophil- and mast cell-related responses in abomasal nematode infections of lambs. FEMS immunology and medical microbiology. 1994. Vol. 8, n° 2, pp. 167-173.
DOI [10.1111/j.1574-695X.1994.tb00439.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-695X.1994.tb00439.x).

SWAN, G.E., 1999. The pharmacology of halogenated salicylanilides and their anthelmintic use in animals. Journal of the South African Veterinary Association. 1999. Vol. 70, n° 2, pp. 61-70. DOI [10.4102/jsava.v70i2.756](https://doi.org/10.4102/jsava.v70i2.756).

TAMPONI, C., DESSÌ, G., VARCASIA, A., KNOLL, S., MELONI, L. et SCALA, A., 2022. Preliminary assessment of body condition score as a possible marker for the targeted selective treatment of dairy sheep against gastrointestinal nematodes. Acta Parasitologica. 2022. Vol. 67, n° 1, pp. 362-368. DOI [10.1007/s11686-021-00470-9](https://doi.org/10.1007/s11686-021-00470-9).

TARIQ, K.A., 2015. A review of the epidemiology and control of gastrointestinal nematode infections of small ruminants. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences. 2015. Vol. 85, n° 2, pp. 693-703.
DOI [10.1007/s40011-014-0385-9](https://doi.org/10.1007/s40011-014-0385-9).

TAUSSAT, S., SAINTILAN, R., KRAUSS, D., MAUPETIT, D., FOUILLOUX, M.-N. et RENAND, G., 2019. Relationship between feed efficiency and slaughter traits of french charolais bulls. Journal of Animal Science. 2019. Vol. 97, n° 6, pp. 2308-2319.
DOI [10.1093/jas/skz108](https://doi.org/10.1093/jas/skz108).

TAYLOR, M.A., COOP, R.L. et WALL, R., 2015. Veterinary Parasitology. John Wiley & Sons. 1032 p.

THIENPONT, D., BRUGMANS, J., ABADI, K. et TANAMAL, S., 1969. Tétramisole dans le traitement des infections par les nématodes chez l'homme. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 1969. Vol. 18, n° 4, pp. 520-525.

THOMPSON, J.M. et MEYER, H.H., 1994. Body condition scoring of sheep. Oregon State University. 1994. 4p.

TILMAN, D., CASSMAN, K., MATSON, P., NAYLOR, R. et POLASKY, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature. 2002. Vol. 418, n° 6898, pp. 671-677. DOI [10.1038/nature01014](https://doi.org/10.1038/nature01014).

TORTEREAU, F., MARIE-ETANCELIN, C., WEISBECKER, J.-L., MARCON, D., BOUVIER, F., MORENO-ROMIEUX, C. et al., 2020. Genetic parameters for feed efficiency in romane rams and responses to single-generation selection. *Animal*. 2020. Vol. 14, n° 4, pp. 681-687. DOI [10.1017/S1751731119002544](https://doi.org/10.1017/S1751731119002544).

TOUITOU, F., TORTEREAU, F., BRET, L., MARTY-GASSET, N., MARCON, D. et MEYNADIER, A., 2022. Evaluation of the Links between Lamb Feed Efficiency and Rumen and Plasma Metabolomic Data. *Metabolites*. 2022. Vol. 12, n° 4, 304. DOI [10.3390/metabo12040304](https://doi.org/10.3390/metabo12040304).

TRAN, V.H.H., GILBERT, H. et DAVID, I., 2017. How to improve breeding value prediction for feed conversion ratio in the case of incomplete longitudinal body weights1. *Journal of Animal Science*. 2017. Vol. 95, n° 1, pp. 39-48. DOI [10.2527/jas.2016.0980](https://doi.org/10.2527/jas.2016.0980).

TURNBULL, F., DEVANEY, E., MORRISON, A.A., LAING, R. et BARTLEY, D.J., 2019. Genotypic characterisation of monepantel resistance in historical and newly derived field strains of *Teladorsagia circumcincta*. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*. 2019. Vol. 11, pp. 59-69. DOI [10.1016/j.ijpddr.2019.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2019.10.002).

TURVEY, S.E. et BROIDE, D.H., 2010. Innate immunity. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2010. Vol. 125, n° 2, Suppl 2, pp. S24-S32. DOI [10.1016/j.jaci.2009.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jaci.2009.07.016).

VAHEDI, V., HEDAYAT-EVRIGH, N., HOLMAN, B.W.B. et PONNAMPALAM, E.N., 2021. Supplementation of macro algae (*Azolla pinnata*) in a finishing ration alters feed efficiency, blood parameters, carcass traits and meat sensory properties in lambs. *Small Ruminant Research*. 2021. Vol. 203, 106498. DOI [10.1016/j.smallrumres.2021.106498](https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106498).

VALDERRÁBANO, J., DELFA, R. et URIARTE, J., 2002. Effect of level of feed intake on the development of gastrointestinal parasitism in growing lambs. *Veterinary Parasitology*. 2002. Vol. 104, n° 4, pp. 327-338. DOI [10.1016/s0304-4017\(01\)00638-0](https://doi.org/10.1016/s0304-4017(01)00638-0).

VANDEHAAR, M., ARMENTANO, L., WEIGEL, K., SPURLOCK, D.M., TEMPELMAN, R. et VEERKAMP, R., 2016. Harnessing the genetics of the modern dairy cow to continue improvements in feed efficiency. *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99, n° 6, pp. 4941-4954. DOI [10.3168/jds.2015-10352](https://doi.org/10.3168/jds.2015-10352).

VATTA, A.F., LETTY, B.A., VAN DER LINDE, M. J., VAN WIJK, E.F., HANSEN, J.W. et KRECEK, R.C., 2001. Testing for clinical anaemia caused by *Haemonchus* spp. in goats farmed under resource-poor conditions in South Africa using an eye colour

chart developed for sheep. *Veterinary Parasitology*. 2001. Vol. 99, n° 1, pp. 1-14. DOI [10.1016/S0304-4017\(01\)00446-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(01)00446-0).

VERCRUYSSSE, J. et CLAEREBOUT, E., 2014. Benzimidazoles - pharmacology. *MSD Veterinary Manual* [en ligne]. 2014. [Consulté le 14 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.msdrvetermanual.com/pharmacology/anthelmintics/benzimidazoles>

VERMOREL, M., 1995. Emissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production. *Productions Animales*. 1995. Vol. 8, n° 4, pp. 265-272.

VLASSOFF, A., LEATHWICK, D.M. et HEATH, A.C., 2001. The epidemiology of nematode infections of sheep. *New Zealand Veterinary Journal*. 2001. Vol. 49, n° 6, pp. 213-221. DOI [10.1080/00480169.2001.36235](https://doi.org/10.1080/00480169.2001.36235).

VOKAER, B., CHARBONNIER, L.-M. et LE MOINE, A., 2011. IL-17: maladies auto-immunes et transplantation. In : *Actualités néphrologiques Jean Hamburger*. Flammarion médecine-sciences. pp. 153-173.

WHITTAKER, J.H., CARLSON, S.A., JONES, D.E. et BREWER, M.T., 2017. Molecular mechanisms for anthelmintic resistance in strongyle nematode parasites of veterinary importance. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*. 2017. Vol. 40, n° 2, pp. 105-115. DOI [10.1111/jvp.12330](https://doi.org/10.1111/jvp.12330).

WILLIAMS, A.R. et PALMER, D.G., 2012. Interactions between gastrointestinal nematode parasites and diarrhoea in sheep: pathogenesis and control. *Veterinary Journal*. 2012. Vol. 192, n° 3, pp. 279-285. DOI [10.1016/j.tvjl.2011.10.009](https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.10.009).

WILLIAMS, G.C., 2008. *Adaptation and natural selection: a critique of some current evolutionary thought*. Princeton University Press. 336 p. Disponible à l'adresse : <https://muse.jhu.edu/pub/267/monograph/book/33159>

WOLSTENHOLME, A.J. et ROGERS, A.T., 2005. Glutamate-gated chloride channels and the mode of action of the avermectin/milbemycin anthelmintics. *Parasitology*. 2005. Vol. 131, Suppl, pp. S85-S95. DOI [10.1017/S0031182005008218](https://doi.org/10.1017/S0031182005008218).

XIANG, H., FANG, Y., TAN, Z. et ZHONG, R., 2022. *Haemonchus contortus* infection alters gastrointestinal microbial community composition, protein digestion and amino acid allocations in lambs. *Frontiers in Microbiology* [en ligne]. 2022. Vol. 12, 797746 [Consulté le 16 juillet 2024]. DOI [10.3389/fmicb.2021.797746](https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.797746).

ZAJAC, A.M., 2006. Gastrointestinal nematodes of small ruminants: life cycle, anthelmintics, and diagnosis. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. 2006. Vol. 22, n° 3, pp. 529-541. DOI [10.1016/j.cvfa.2006.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2006.07.006).

ZAJAC, A.M. et GARZA, J., 2020. Biology, Epidemiology, and Control of Gastrointestinal Nematodes of Small Ruminants. *The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2020. Vol. 36, n° 1, pp. 73-87. DOI [10.1016/j.cvfa.2019.12.005](https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.12.005).

ZAJAC, A et PETERSSON, K, 2016. Why and how to do FAMACHA© scoring [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse : https://www.wormx.info/files/ugd/6ef604_a03db012b88e4bceb8c701accefc9a0b.pdf

ZHANG, X., WANG, W., MO, F., LA, Y., LI, C. et LI, F., 2017. Association of residual feed intake with growth and slaughtering performance, blood metabolism, and body composition in growing lambs. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, n° 1, 12681. DOI [10.1038/s41598-017-13042-7](https://doi.org/10.1038/s41598-017-13042-7).

ZUIDHOF, M.J, 2019. A review of dietary metabolizable and net energy: uncoupling heat production and retained energy. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019. Vol. 28, n° 2, pp. 231-241. DOI [10.3382/japr/pfx062](https://doi.org/10.3382/japr/pfx062).

ZUUR, A., IENO, E.N., WALKER, N., SAVELIEV, A.A. et SMITH, G.M., 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science & Business Media. 574 p.

ANNEXES

Annexe 1: Valeurs alimentaires théoriques des aliments distribués

AGRICULTURES & TERRITOIRES CHAMBRE D'AGRICULTURE INDRE		RAPPORT D'ANALYSE VALEURS ALIMENTAIRES ET NUTRITIVES FOIN																												
ANALYSE RÉALISÉE PAR LA CHAMBRE D'AGRICULTURE AVEC AgrINIR™, TECHNOLOGIE INFRA ROUGE																														
Chambre d'Agriculture de l'Indre 24 rue des Ingrains 36022 Chateauroux cedex Conseiller - Échantillon INRA 5 Descriptif échantillon: 2e coupe dactyle - Quincay 6 Date de récolte 05/07/2022 Date de prélèvement Date d'analyse			N° ÉLEVAGE :																											
RÉSULTATS					REPÈRES																									
ANALYSE INFRAROUGE AgrINIR™			APPRÉCIATIONS																											
ÉLÉMENTS CHIMIQUES	RÉSULTATS / MS	UNITÉS	FAIBLE	NORMAL	ÉLEVÉ	Moyenne de l'année																								
Matière Sèche (MS)	87,6%	%																												
Matière Azotée	118,5	g/kg																												
Amidon																														
DT Amidon																														
NDF	567	g/kg																												
ADF	310,1	g/kg																												
CB calculée	285	g/kg																												
Cendres	87,6	g/kg																												
Matière Grasse	22,9	g/kg																												
Digestibilité	63%	%																												
VALEURS ALIMENTAIRES CALCULÉES (ÉQUATIONS Systall 2018)			APPRÉCIATIONS			Moyenne de l'année																								
ÉLÉMENTS	RÉSULTATS / MS		FAIBLE	NORMAL	ÉLEVÉ																									
UEL	1,05																													
UEB	1,10																													
UFL	0,80																													
UFV	0,74																													
DMO	66																													
PDI	77																													
BPR	-12																													
PDIA	26																													
NI ref 1,95 Valeurs INRA 2007 Valeurs Systall 2018																														
<table border="1"> <tr> <td>UEL</td><td>1,05</td><td>UFL</td><td>0,76</td><td>PDIN</td><td>78</td><td>PDIE</td><td>86</td><td>PDIA</td><td>36</td><td>DMO_N</td><td>66%</td> </tr> <tr> <td>UEB</td><td>1,10</td><td>UFV</td><td>0,68</td><td>UEM</td><td>1,38</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>EB</td><td>4330</td> </tr> </table>							UEL	1,05	UFL	0,76	PDIN	78	PDIE	86	PDIA	36	DMO_N	66%	UEB	1,10	UFV	0,68	UEM	1,38					EB	4330
UEL	1,05	UFL	0,76	PDIN	78	PDIE	86	PDIA	36	DMO_N	66%																			
UEB	1,10	UFV	0,68	UEM	1,38					EB	4330																			

Valeurs alimentaires théoriques du fourrage

Aliment concentré	LACTATION	ENTRETIEN
MS	1,00	1,00
UFL/kg MS	0,82	0,83
PDIN/kg MS	128	115
PDIE/kg MS	120	99
Ca g/kg MS	3,4	16,0
P g/kg MS	5,5	5,0

Valeurs alimentaires théoriques des aliments concentrés



DAC

Distributeur Automatique de Céréales ou Concentrés pour Petits Ruminants

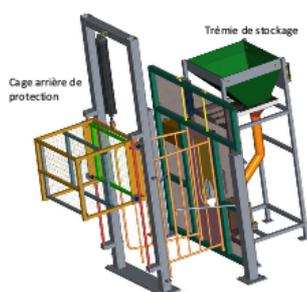


Adapté aux ovins et aux caprins pour des formats de 20 à 100 kg de poids vif
Existe aussi pour les palmipèdes et en cours d'étude pour les lapins.

Fonctionne avec le programme DAAMIC et l'interface de supervision WebDistri

L'outil

1 DAC pour un lot de 20 à 24 animaux



Industrialisés en partenariat avec la société toulousaine Atlas

Ses principaux équipements

- Une unité de distribution avec trémie de stockage, tiroirs de distribution (*ad libitum* ou rationné) et auge montée sur **balance (précision à 1g)**
- Un panneau d'accueil (commun avec le DAF) support des bat-flancs de semi-contention et d'une porte dont la hauteur d'accès à l'auge est **réglable en fonction du format des animaux**
- **Deux modes de distribution** : *Ad libitum* ou rationné
- Une cage de protection de l'animal dont l'activation est recommandée pour le bien-être animal lors du fonctionnement en mode rationné.

La flexibilité du mode rationné de l'interface WebDistri

Le rationnement paramétré en kg/jour (à 10 g près) :

- est attribué à l'animal ou au lot d'animaux
- peut être réparti sur 6 tranches horaires/j en fixant la quantité par tranche et la taille maximale du repas.

Après le transfert en temps réel de chaque visite, le droit restant à consommer est calculé dans la tranche horaire en cours pour l'animal concerné.

En début de chaque visite, le DAC récupère la quantité restante à manger par l'animal identifié, et en fonction du poids d'aliment dans l'auge, va distribuer ou non, une à plusieurs doses de 50 grammes, et ouvrir ou non la porte d'accès.

Type de rationnement	
Règle :	720g 01 default 0h
Aliment :	Concentre Dextro Extratex
Quantité journalière :	0.72
Schéma des doses :	0.0.0.240.0.120.0.16.0.240.0.120.16.24.0.240.0.120.
Seuil de repas :	0.015
Pourcentage du repas :	100
Donne de distribution :	0.015
Repart de tranche :	Ou
Repart de la veille :	Non

Distributeur

- DAC.BOU.DAAMIC012
- DAC.BOU.DAAMIC022
- DAC.BOU.DAAMIC032
- DAC.BOU.DAAMIC042

Les principaux financeurs :

- Europe : FEDER – FEADER
- INRAE : le département GA – CNUe – UE P3R
- Projets scientifiques GenPhySE : GrassToGas – Smarter – Agricygen – Gemanema – Résilait – ...

Brevet INRA 2012
Déclaration d'Invention et de
Résultats Valorisables 2018

D Marcon



E Ricard, JF Bompa, T Heirman



JL Weisbecker, C Huau





DH₂O

Distributeur Automatique d'Eau pour Petits Ruminants

Adapté aux ovins et aux caprins pour des formats de 20 à 100 kg de poids vif
Fonctionne avec le programme DAAMIC et l'interface de supervision WebDistri

L'outil

1 DH₂O pour un lot de 20 à 40 animaux



Industrialisés en partenariat avec la société toulousaine **ATAS**



Ses principaux équipements

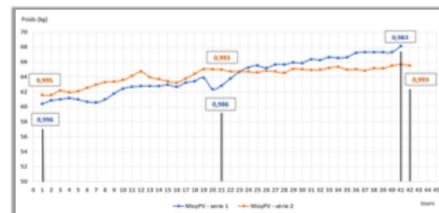
- Une vanne pneumatique dont la mesure du nombre d'activations et du temps d'ouverture permet d'estimer une précision à la buvée de l'ordre de **30 ml**
- Un réservoir tampon permettant de s'affranchir des problèmes de variation de pression d'eau
- La possibilité d'y ajouter une cage de pesée animale.

Particularité : la pesée des animaux pendant la buvée



Poids vifs de 2 séries de 18 ovins en pesée automatique au DH₂O et corrélations avec les chantiers de pesées stabilisées (précision 500g)

Corrélation minimale de **0.98** entre la moyenne des pesées automatiques journalières au DH₂O et les chantiers de pesées stabilisées.



- Enregistrement de 2 pesées par seconde et calcul du poids moyen de l'animal à chaque visite
- Obtention de plusieurs pesées/animal/jour : de 1 à plus de 10 selon les individus, la ration, la période d'observation
- Permet de tracer les trajectoires pondérales individuelles.

Brevet INRA 2012
Déclaration d'Invention et de Résultats Valorisables 2018

Les principaux financeurs :

- Europe : FEDER – FEADER
- INRAE : le département GA – CNUe – UE P3R
- Projets scientifiques GenPhySE : GrassToGas – Smarter – Agricygen – Gemanema – Résilait – ...

D Marcon



JF Bompas, E Ricard, T Heirman



C Huau, JL Weisbecker





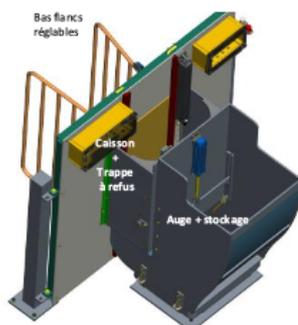
DAF

Distributeur Automatique de Fourrage pour Petits Ruminants



Adapté aux ovins et aux caprins pour des formats de 20 à 100 kg de poids vif
Fonctionne avec le programme DAAMIC et l'interface de supervision WebDistri

L'outil



3 DAF pour un lot de 20 à 24 animaux

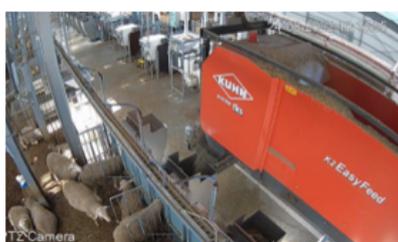


Industrialisés en partenariat avec la société toulousaine Atlas

Ses principaux équipements

- Une auge montée sur **balance (précision à 5g)** avec réserve de fourrage d'une contenance de 3 à 10 kg suivant la nature et la finesse de hachage du foin
- Un panneau d'accueil (commun avec le DAC) support des bat-flancs de semi-contention et d'une porte dont la hauteur d'accès à l'auge est **réglable en fonction du format des animaux**
- Un caisson isolant la tête de l'animal de la partie auge dans les phases clefs du pesage (début et fin de visites).

Un robot d'affouragement interconnecté avec les DAF et WebDistri



Le robot d'affouragement des DAFs est piloté par WebDistri selon 2 modes :

- soit suivant des horaires prédéfinis,
- soit en mode automatique avec les étapes suivantes :

- 1) Scrutation toutes les 5 minutes du poids des DAF (à la fin de la dernière visite)
- 2) Calcul de la quantité totale à charger dans le robot (en fonction des reliquats de chaque DAF et de leur contenance maximale)
- 3) Envoi des instructions au robot (Numéro et quantité maximale à distribuer dans chaque DAF)
- 4) Le DAF (équipé d'une balance de précision) interrompt la distribution du robot dès que sa contenance maximale est atteinte.

Les principaux financeurs :

- Europe : FEDER – FEADER
- INRAE : le département GA – CNOC – CNUE – UE P3R
- Projets scientifiques GenPhySE :
GrassToGas – Smarter – Agricygen – Gemanema – Résilait – ...

Brevet INRA 2012

Déclaration d'Invention et de Résultats Valorisables 2018

D Marcon

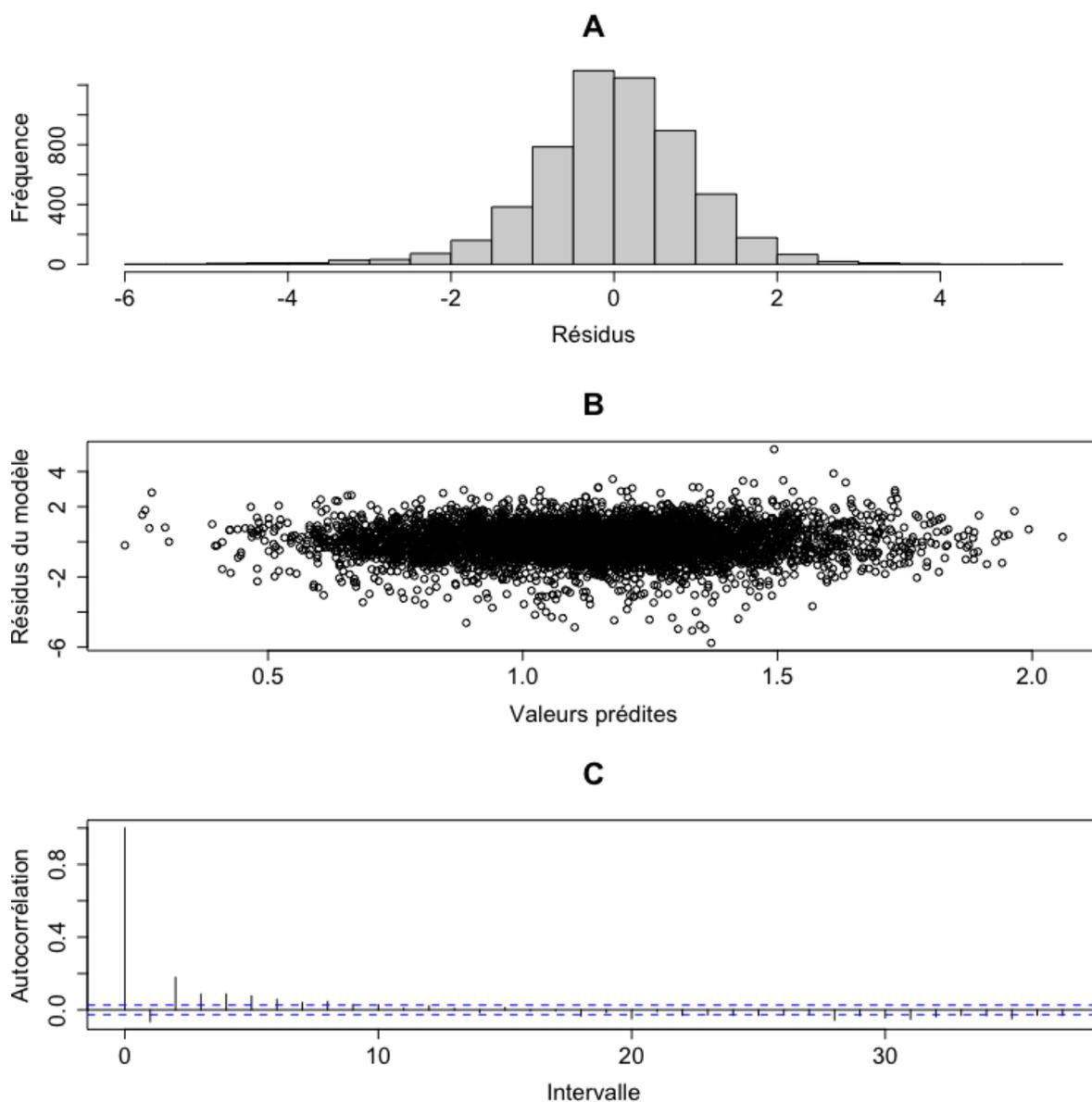


E Ricard, T Heirman, JF Bompà



JL Weisbecker, C Huau





Examen des résidus du modèle de l'ingestion de fourrage avant la mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Jour de mise-bas	-0,012	0,046
Portée supérieure à 2 x Jour de mise bas	-0,001	0,018
Lot 80	0,105	0,006

Principaux coefficients significatifs du modèle de l'ingestion de fourrage avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	Jour : 61

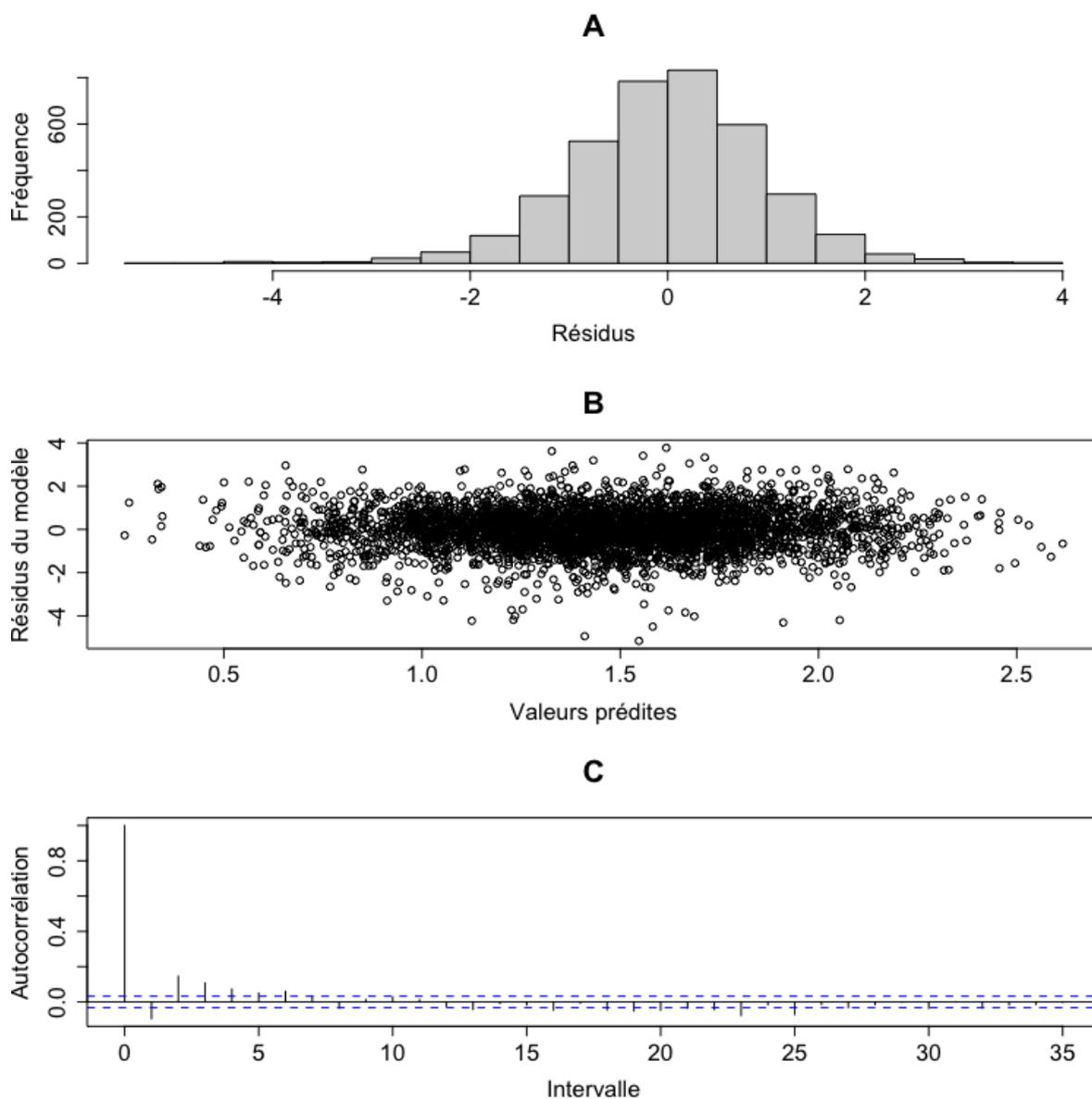
	sgiR
sgiS	Jours : 55,56,57,58

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi +	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55, 56,57,58,59,60,61,62	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38, 39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55, 56,57,58,59,60,61,62
rfi -	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55, 56,57,58,59,60,61,62	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55, 56,57,58,59,60,61,62

Significativité par jour entre les moyennes ajustées des lignées RFI et des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)

La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1



Examen des résidus du modèle de l'ingestion de fourrage après la mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
2 Agneaux allaités	0,215	0,046
2 Agneaux allaités x Jour de mise bas	-0,004	0,000
Lot 80	0,104	0,108

Principaux coefficients significatifs du modèle de l'ingestion de foin après la mise-bas
Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

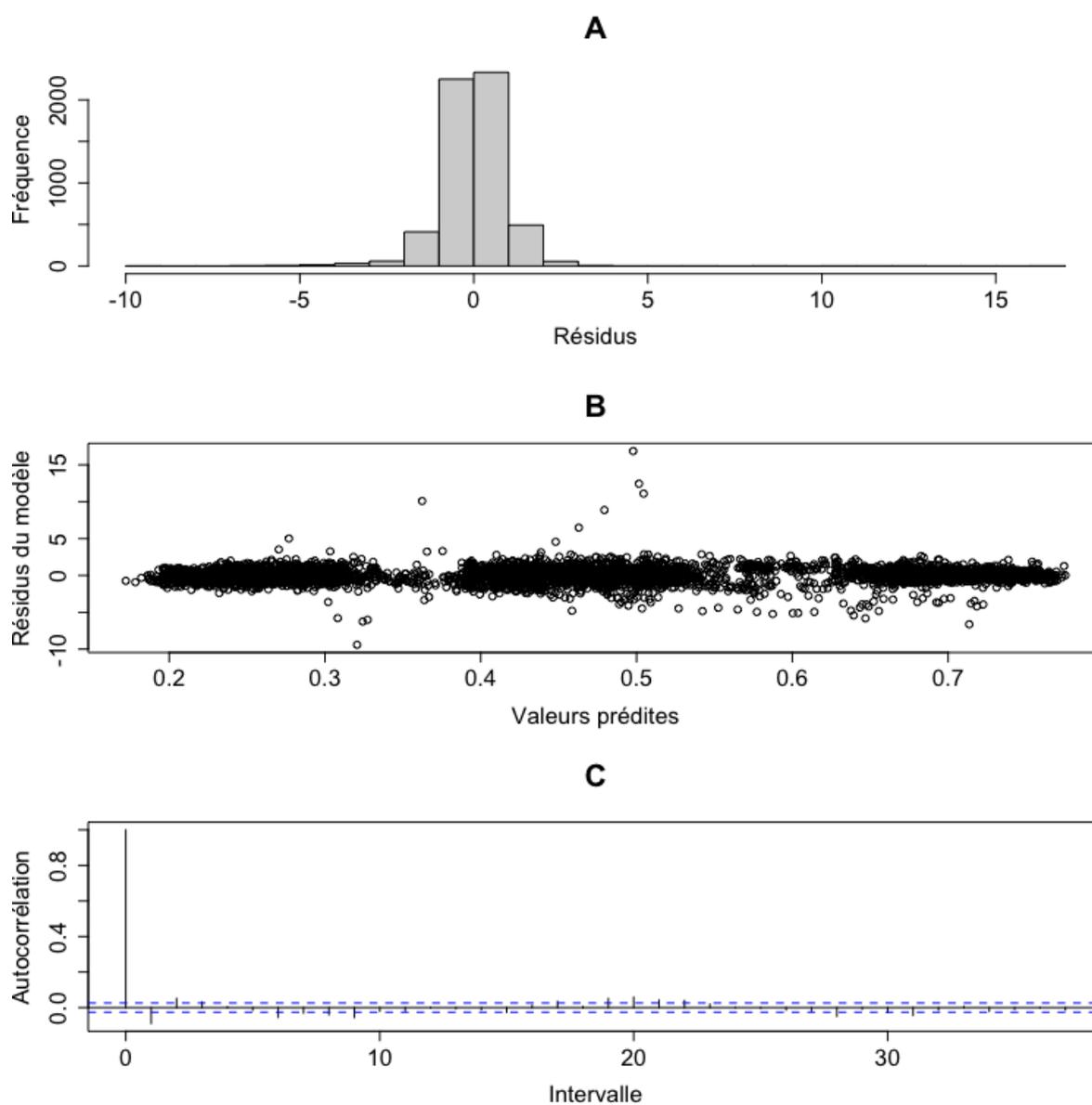
	rfi-
rfi +	Aucun jour

	sgiR
sgiS	Aucun jour

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	Jours: 58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93, 94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105	Jours: 58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93, 94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105
rfi-	Jours: 58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93, 94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105	Jours: 58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93, 94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)
La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1



Examen des résidus du modèle de l'ingestion de concentré avant la mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Lot 80	-0,008	0,026

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle de l'ingestion de concentré avant la mise-bas
Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

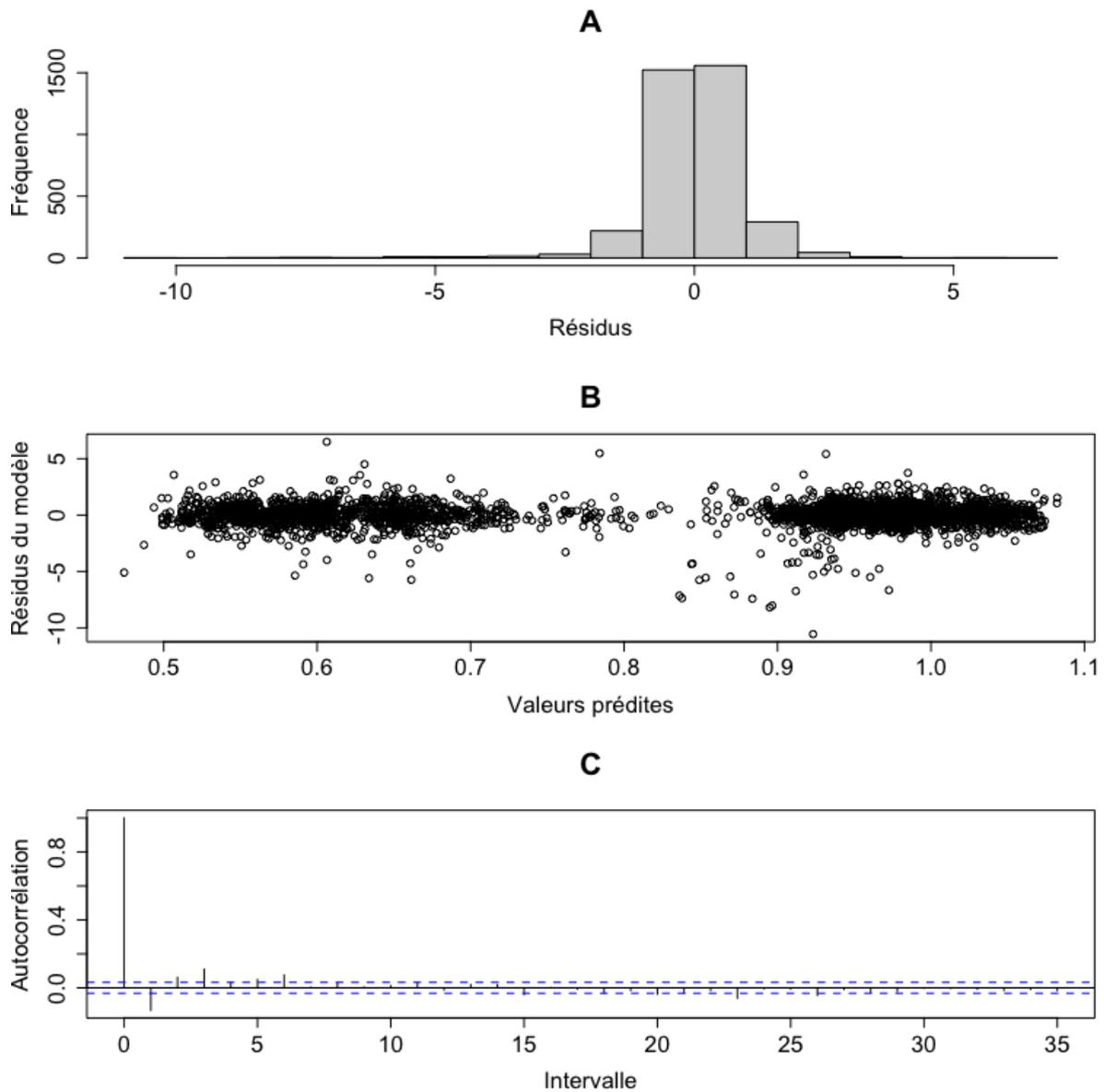
	rfi-
rfi +	Jours: 2,3,61,62

	sgiR
sgiS	Jours: 55,58

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	Jours 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62
rfi-	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	Jours: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)
La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1



Examen des résidus du modèle de l'ingestion de concentré après la mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Lot 80	0,049	0,000

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle de l'ingestion de concentré avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	NS: <i>p-value > 0,1</i>

	sgiR
sgiS	NS: <i>p-value > 0,1</i>

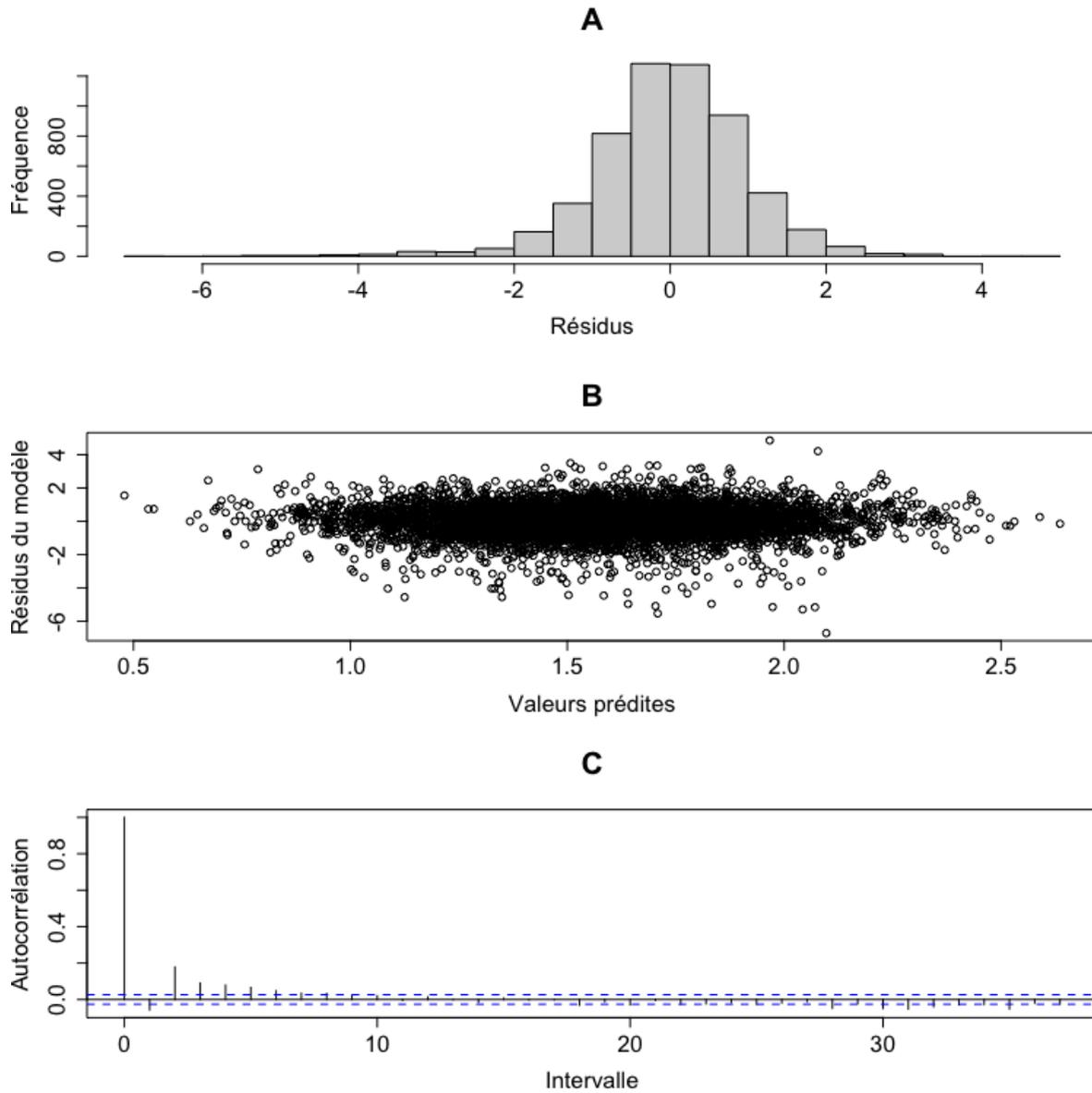
Différences entre les moyennes ajustées des lignées RFI et des lignées SGI au seuil de 95% pendant la période post mise-bas

S : différence significative (p-value < 0,05) et NS: différence non significative (p-value > 0,1)

	sgiS	sgiR
rfi+	S: <i>p-value < 0,05</i>	S: <i>p-value < 0,05</i>
rfi-	S: <i>p-value < 0,05</i>	S: <i>p-value < 0,05</i>

Significativité de la comparaison sur la période post mise-bas des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI

S : différence significative (p-value < 0,05) et NS: différence non significative (p-value > 0,1)



Examen des résidus du modèle de l'ingestion totale de matière sèche avant la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Lot 80	0,097	0,013
Jour de mise-bas	-0,010	0,087
Portée supérieure à 2 x Jour de mise bas	-0,001	0,020

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle de l'ingestion de matière sèche totale avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	Jours : 61,62

	sgiR
sgiS	Jours : 55,56,57,58

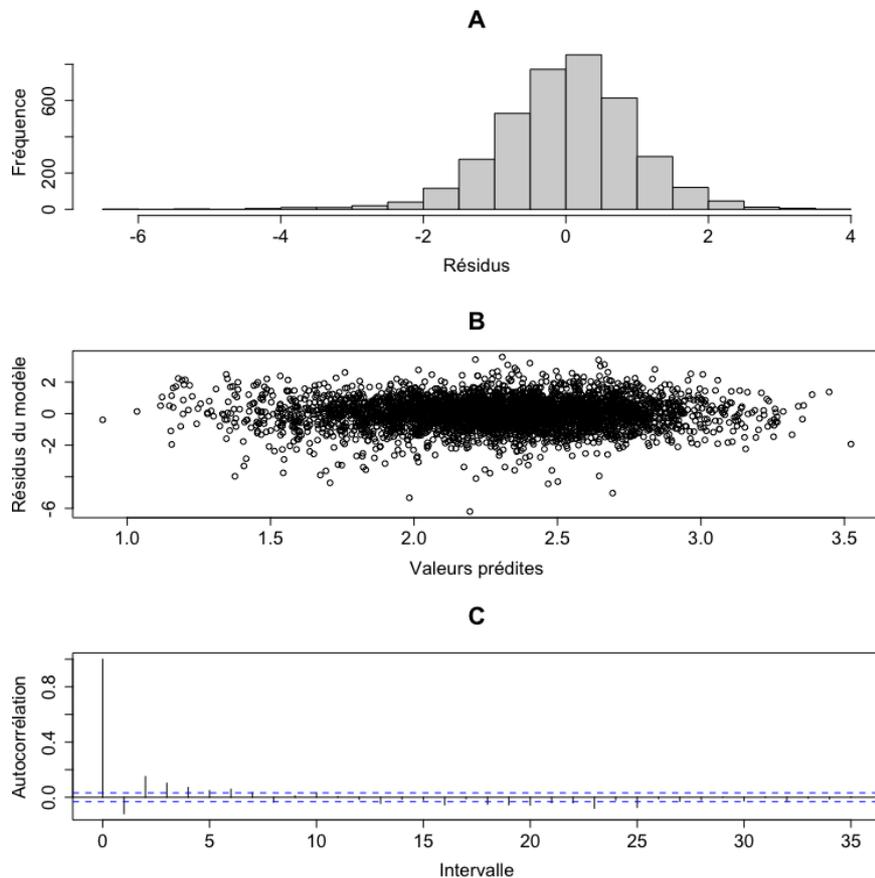
Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	JOURS: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	JOURS: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62
rfi-	JOURS: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	JOURS: 1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27, 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45, 46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)

La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1

Annexe 10: Examen des résidus et résultats du modèle d'ingestion de MS totale après la mise-bas



Examen des résidus du modèle de l'ingestion totale de matière sèche après la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
2 Agneaux allaités	0,220	0,000
2 Agneaux allaités x Jour de mise bas	-0,004	0,000
Lot 80	0,155	0,033

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle de l'ingestion de matière sèche totale avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

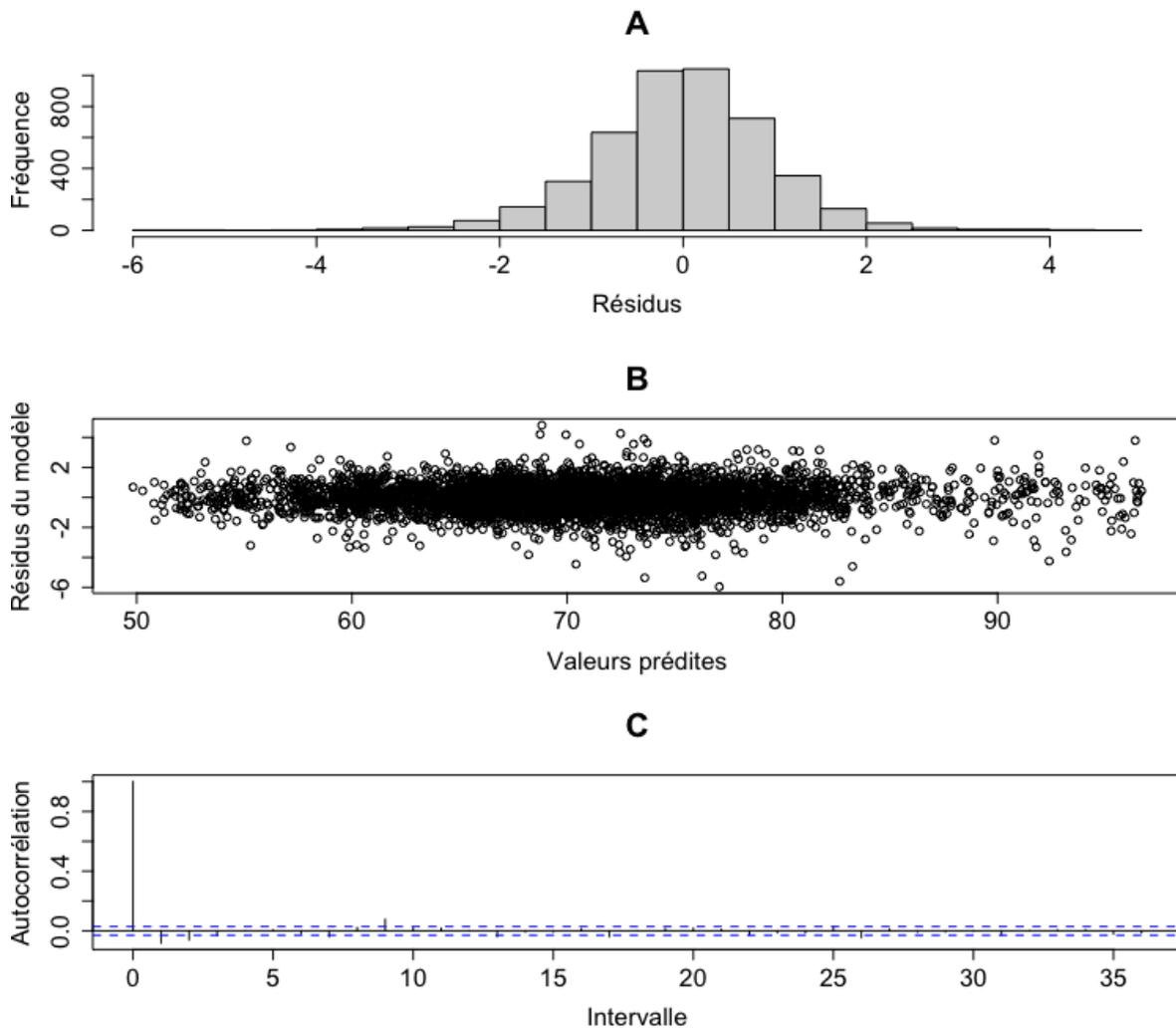
	rfi-
rfi +	Aucun jour

	sgiR
sgiS	Aucun jour

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignes RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>
rfi-	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignes RFI avec les moyennes ajustées des lignes SGI (p-value associée à chaque jour)
La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1



Examen des résidus du modèle de poids vif avant la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Jour de mise bas	-0,386	0,022
Lot 80	8,143	0,000

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle du poids vif avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	Jours : 61,62

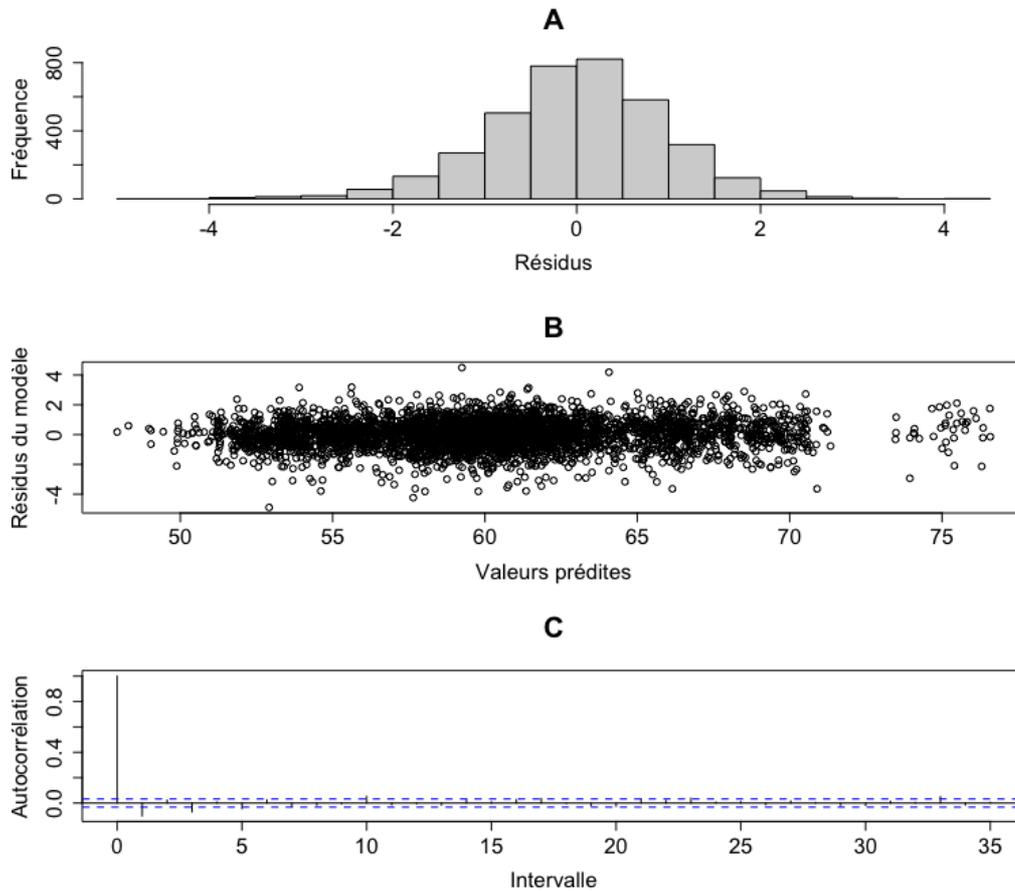
	sgiR
sgiS	Jours : 55,56,57,58

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	Jours: 1,7,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48, 49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	Jours: 1,7,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48, 49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62
rfi-	Jours: 1,7,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48, 49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62	Jours: 1,7,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48, 49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)
La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : $p\text{-value} < 0,05$, rouge : $0,05 < p\text{-value} < 0,1$ et vert : $p\text{-value} > 0,1$

Annexe 12: Examen des résidus et résultats du modèle de PV après la mise-bas



Examen des résidus du modèle de PV après la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
2 Agneaux allaités x Jour de mise bas	-0,048	0,008
Lot 80	5,847	0,000

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle du poids vif avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

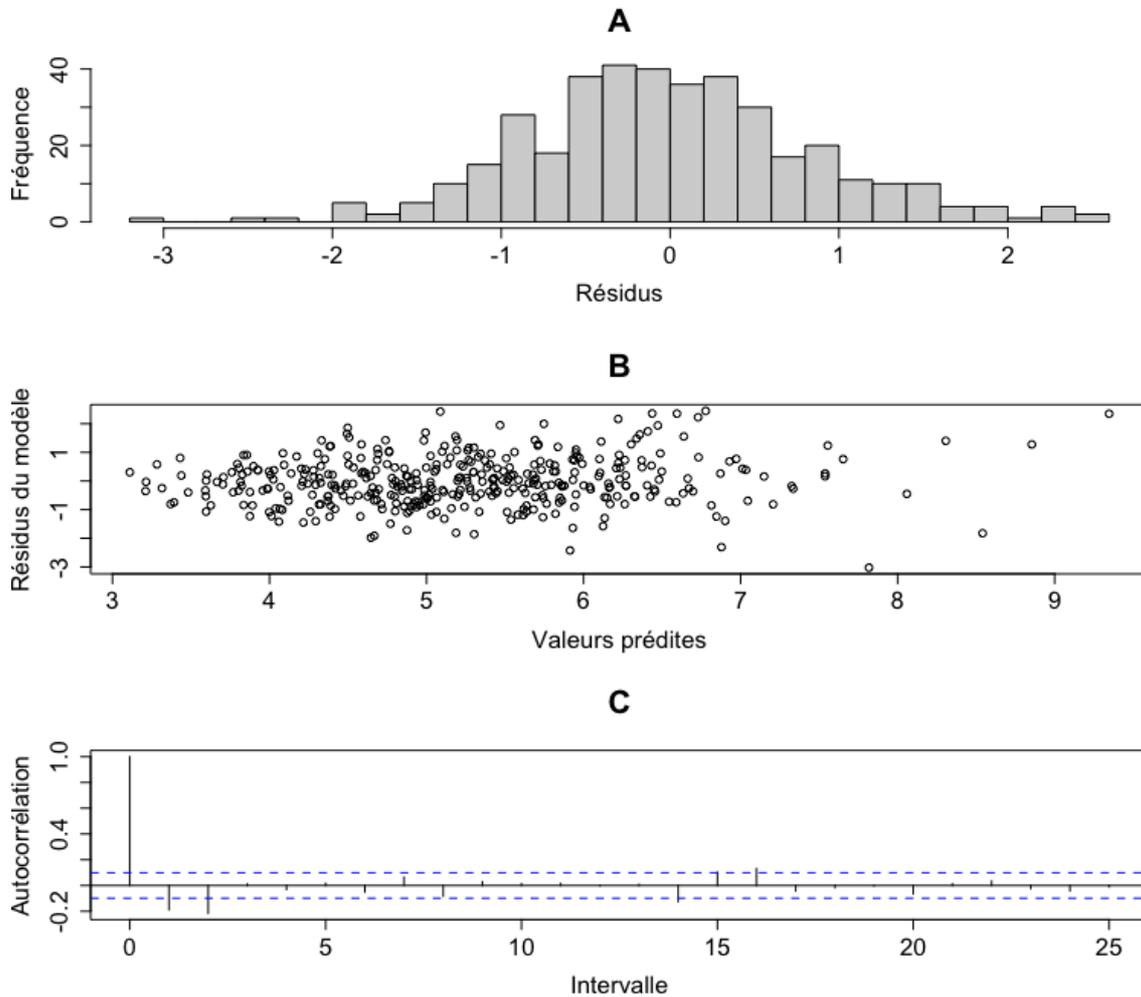
	rfi-
rfi +	Aucun jour

	sgiR
sgiS	Aucun jour

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>
rfi-	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>	<p>Jours:</p> <p>58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105</p>

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI (p-value associée à chaque jour)
 La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : p-value < 0,05, rouge : 0,05 < p-value < 0,1 et vert : p-value > 0,1



Examen des résidus du modèle de l'épaisseur de gras avant mise-bas sélectionné

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Portée supérieure à 2 agneaux	-0,570	0,068
Lot 80	0,333	0,007

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle du poids vif avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	Aucun Jour

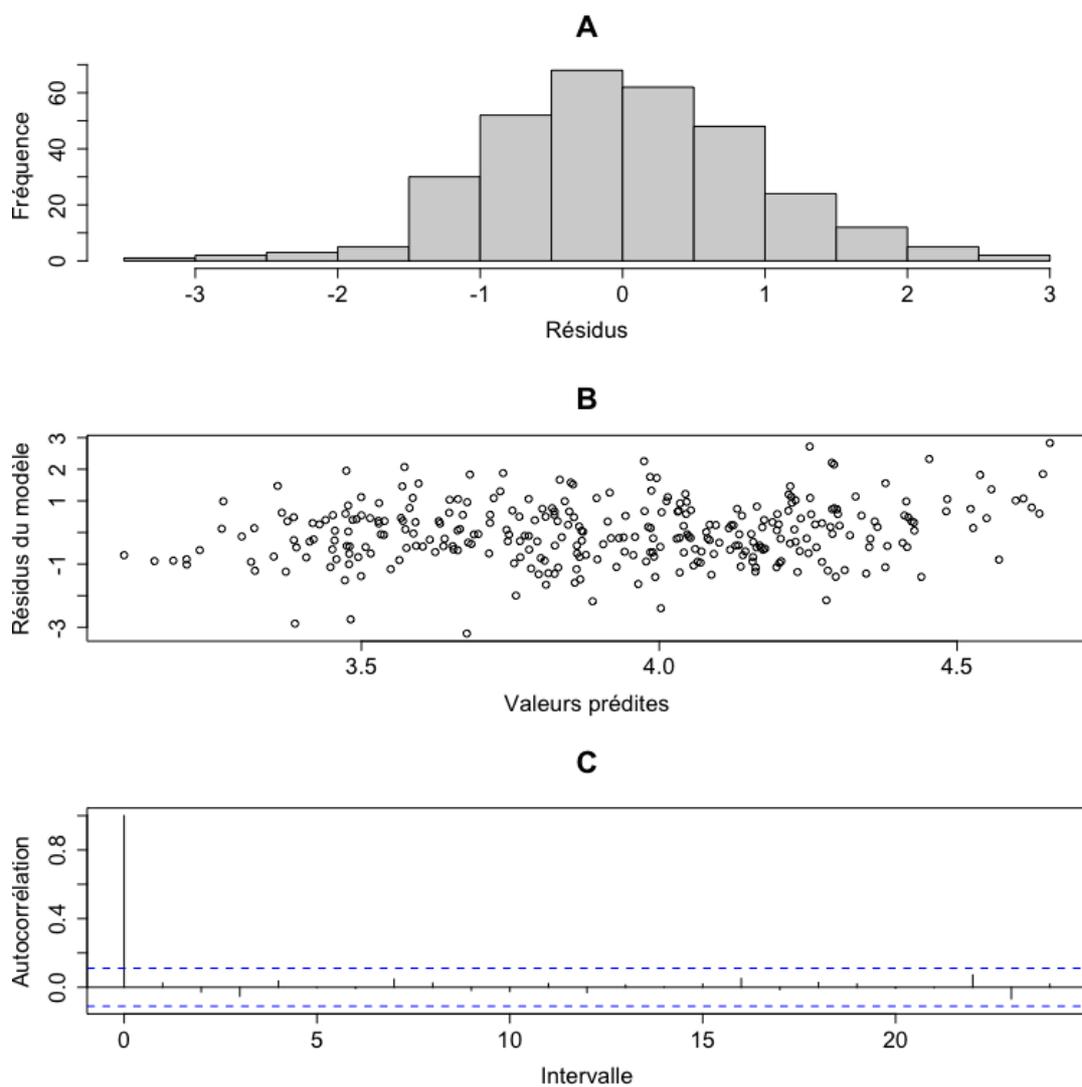
	sgiR
sgiS	Jours : 21,35,49

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignes RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	Jours: 1,21,35,49	Jours: 1,21,35,49
rfi-	Jours: 1,21,35,49	Jours: 1,21,35,49

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignes RFI avec les moyennes ajustées des lignes SGI (p-value associée à chaque jour)

La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : $p\text{-value} < 0,05$, rouge : $0,05 < p\text{-value} < 0,1$ et vert : $p\text{-value} > 0,1$



Examen des résidus du modèle de l'épaisseur de gras après mise-bas
 A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

	rfi-
rfi +	Aucun jour

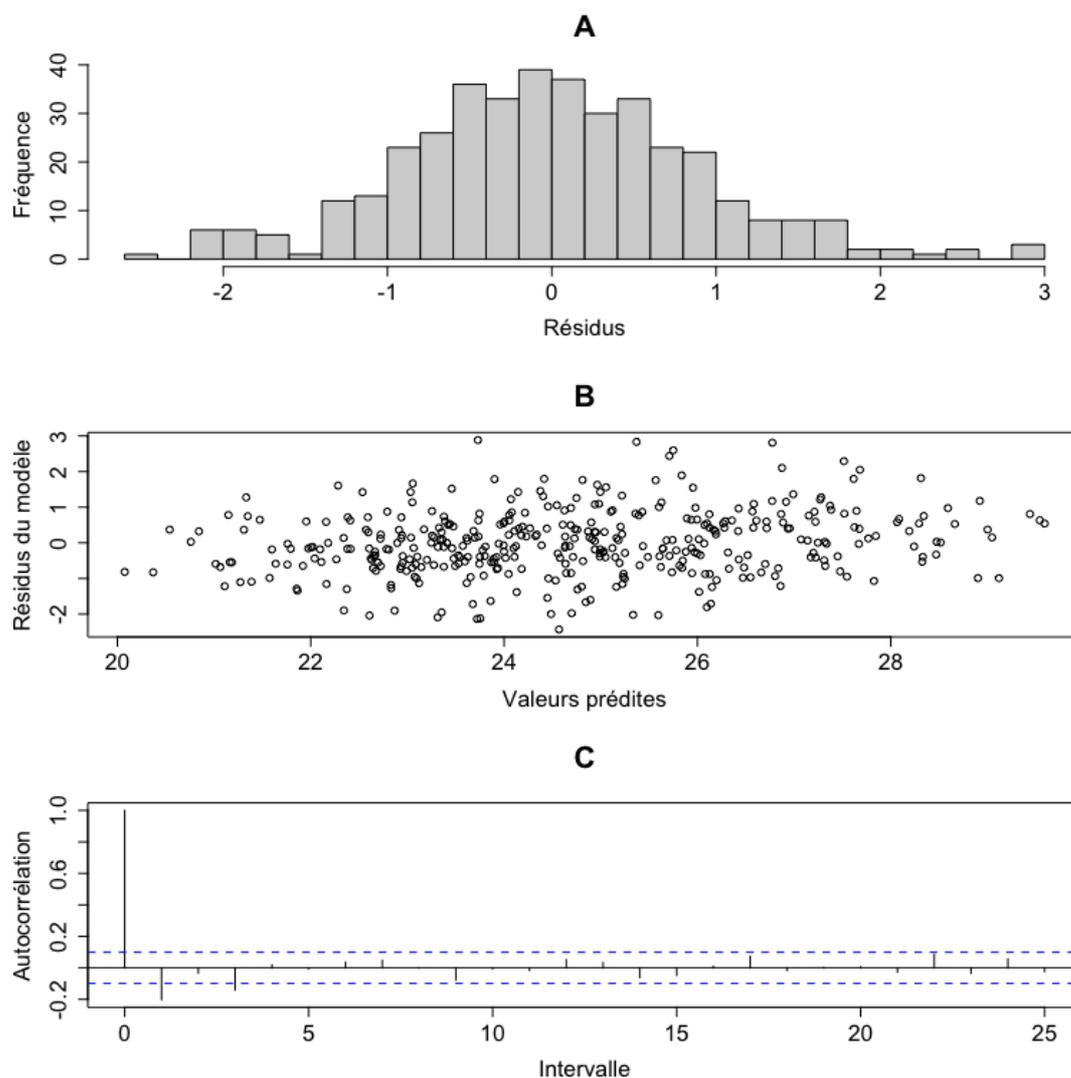
	sgiR
sgiS	Jours : 63,77,91,105

Jours où des différences significatives ont été observées entre les moyennes ajustées des lignées RFI et SGI, avec un niveau de confiance de 95%.

	sgiS	sgiR
rfi+	Jours: 63,77,91,105	Jours: 63,77,91,105
rfi-	Jours: 63,77,91,105	Jours: 63,77,91,105

Significativité de la comparaison par jour des moyennes ajustées des lignes RFI avec les moyennes ajustées des lignes SGI (p-value associée à chaque jour)
La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : $p\text{-value} < 0,05$, rouge : $0,05 < p\text{-value} < 0,1$ et vert : $p\text{-value} > 0,1$

Annexe 15: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de muscle dorsal avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle sélectionné de l'épaisseur de muscle avant la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Portée supérieure à 2 x Jour de mise bas	-0,026	0,002

Principaux coefficients associés aux variables significatives dans le modèle de l'épaisseur de muscle avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	NS: <i>p-value</i> > 0,1

	sgiR
sgiS	NS: <i>p-value</i> > 0,1

Différences entre les moyennes ajustées des lignées RFI et des lignées SGI au seuil de 95% pendant la période pré-mise-bas

S : différence significative et NS: différence non significative

La couleur indique la *p-value* associée au jour : avec violet : *p-value* < 0,05, rouge : 0,05 < *p-value* < 0,1 et vert : *p-value* > 0,1

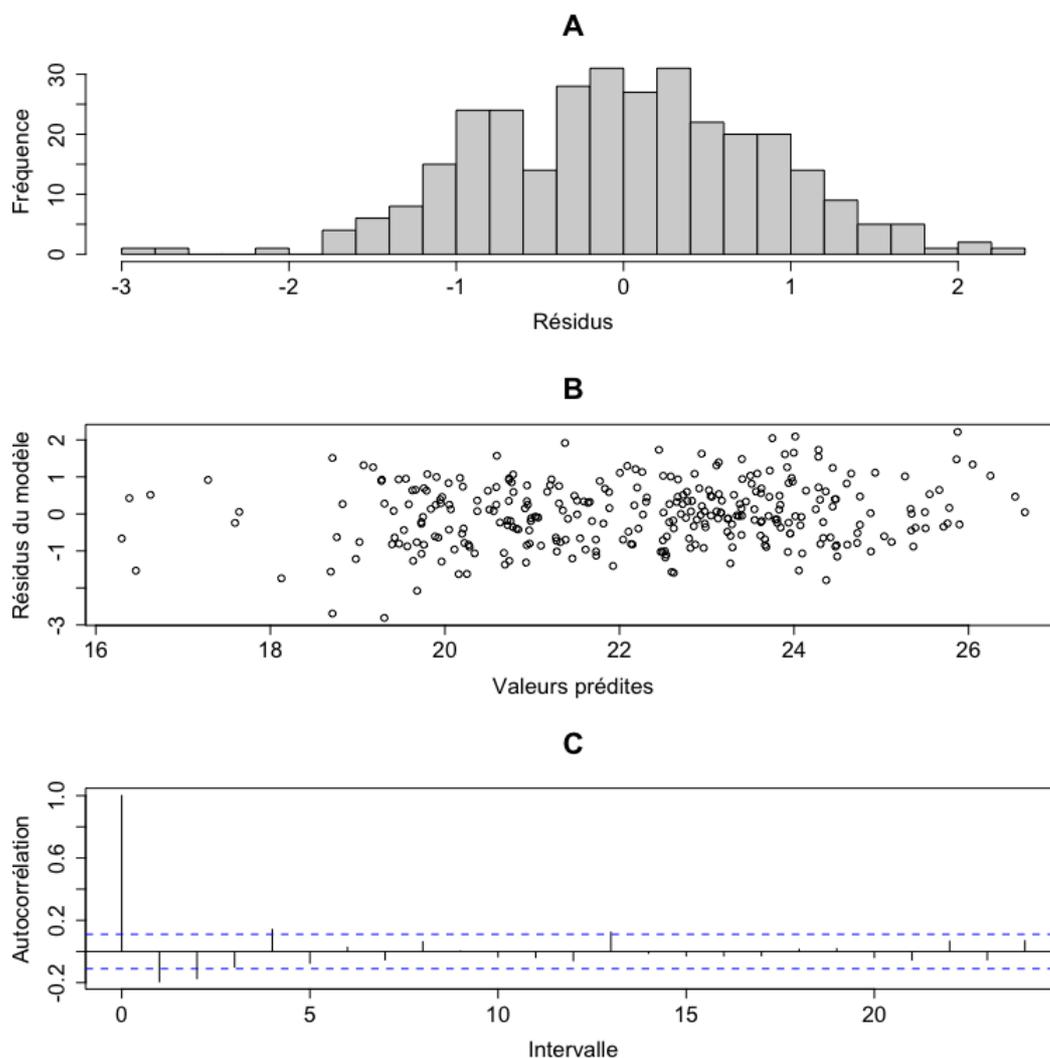
	sgiS	sgiR
rfi+	S: <i>p-value</i> < 0,05	NS: 0,05 < <i>p-value</i> < 0,1
rfi-	S: <i>p-value</i> < 0,05	S: <i>p-value</i> < 0,05

Significativité de la comparaison sur la période pré-mise-bas des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI

S : différence significative et NS: différence non significative

La couleur indique la *p-value* associée au jour : avec violet : *p-value* < 0,05, rouge : 0,05 < *p-value* < 0,1 et vert : *p-value* > 0,1

Annexe 16: Examen des résidus et résultats du modèle d'épaisseur de muscle dorsal après la mise-bas



Examen des résidus du modèle sélectionné de l'épaisseur de muscle après la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

	rfi-		sgiR
rfi +	NS : <i>p-value</i> > 0,1	sgiS	NS : <i>p-value</i> > 0,1

Différences entre les moyennes ajustées des lignées RFI et des lignées SGI au seuil de 95% pendant la période post-mise-bas

S : différence significative et NS: différence non significative

La couleur indique la *p-value* associée au jour : avec violet : *p-value* < 0,05, rouge : 0,05 < *p-value* < 0,1 et vert : *p-value* > 0,1

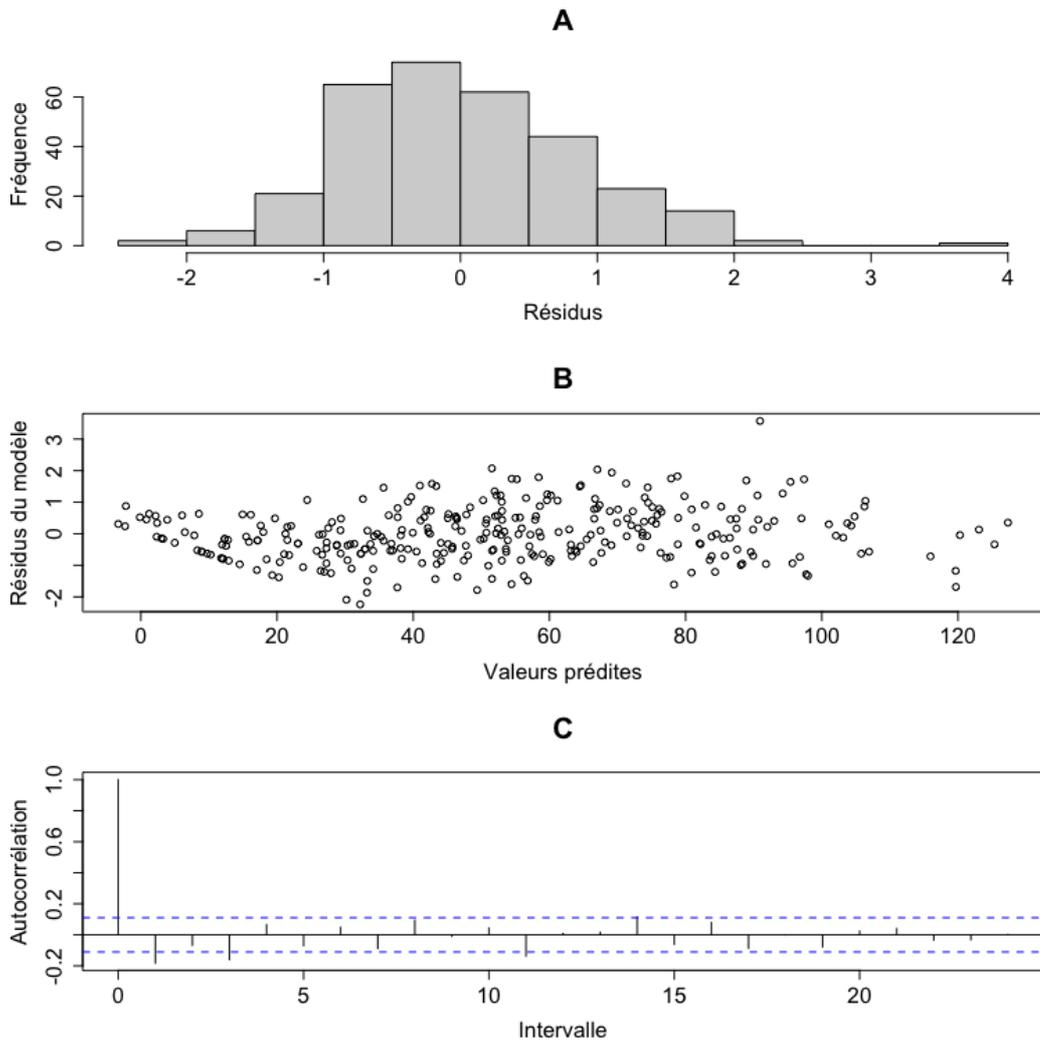
	sgiS	sgiR
rfi+	S: <i>p-value</i> < 0,05)	NS: 0,05 < <i>p-value</i> < 0,1
rfi-	S: <i>p-value</i> < 0,05)	S: <i>p-value</i> < 0,05

Significativité de la comparaison sur la période post-mise-bas des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI

S : différence significative et NS: différence non significative

La couleur indique la *p-value* associée au jour : avec violet : *p-value* < 0,05, rouge : 0,05 < *p-value* < 0,1 et vert : *p-value* > 0,1

Annexe 17: Examen des résidus et résultats du modèle d'OPG avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle de la quantité d'OPG avant la mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Jour de mise bas	2,934	0,001

Principaux coefficients significatifs du modèle d'OPG avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

	rfi-
rfi +	NS: <i>p-value > 0,1</i>

	sgiR
sgiS	NS: <i>0,05 < p-value < 0,1</i>

Différences entre les moyennes ajustées des lignées RFI et des lignées SGI au seuil de 95% pendant la période pré-mise-bas

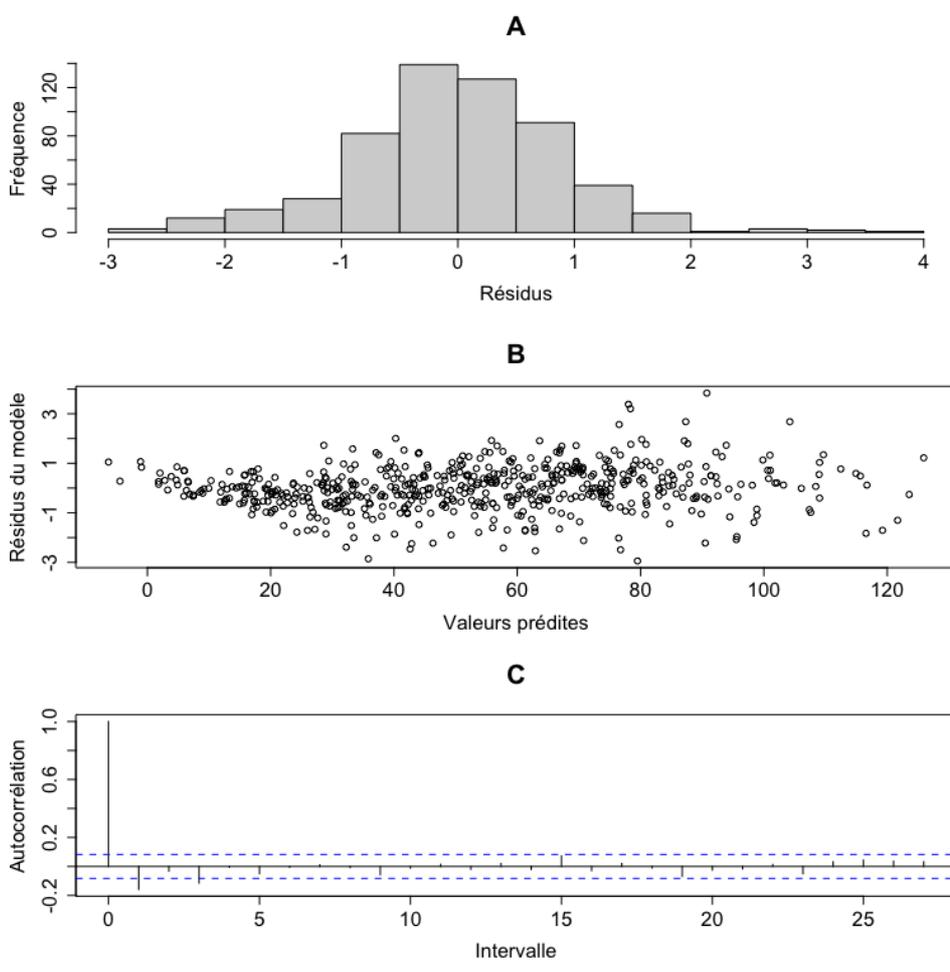
	sgiS	sgiR
rfi+	NS: <i>p-value > 0,1</i>	NS: <i>p-value > 0,1</i>
rfi-	NS: <i>p-value > 0,1</i>	NS: <i>p-value > 0,1</i>

Significativité de la comparaison sur la période pré-mise-bas des moyennes ajustées des lignées RFI avec les moyennes ajustées des lignées SGI

S : différence significative et NS: différence non significative

La couleur indique la p-value associée au jour : avec violet : $p\text{-value} < 0,05$, rouge : $0,05 < p\text{-value} < 0,1$ et vert : $p\text{-value} > 0,1$

Annexe 18: Examen des résidus et résultats du modèle d'OPG après la mise-bas

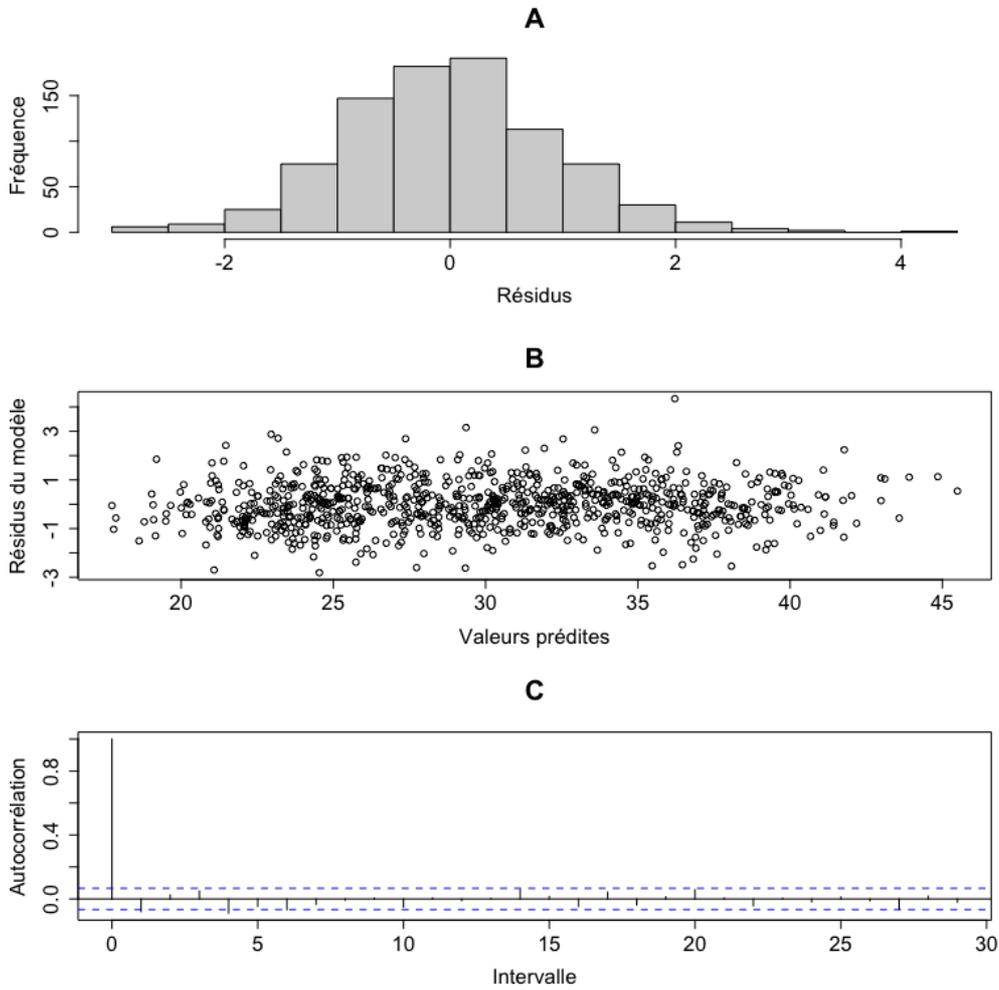


Examen des résidus du modèle de la quantité d'OPG après la mise-bas
 A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
2 agneaux allaités	6,27	0,262

Principaux coefficients significatifs du modèle d'OPG avant la mise-bas
 Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

Annexe 19: Examen des résidus et résultats du modèle d'hématocrite avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle de l'hématocrite avant la mise-bas

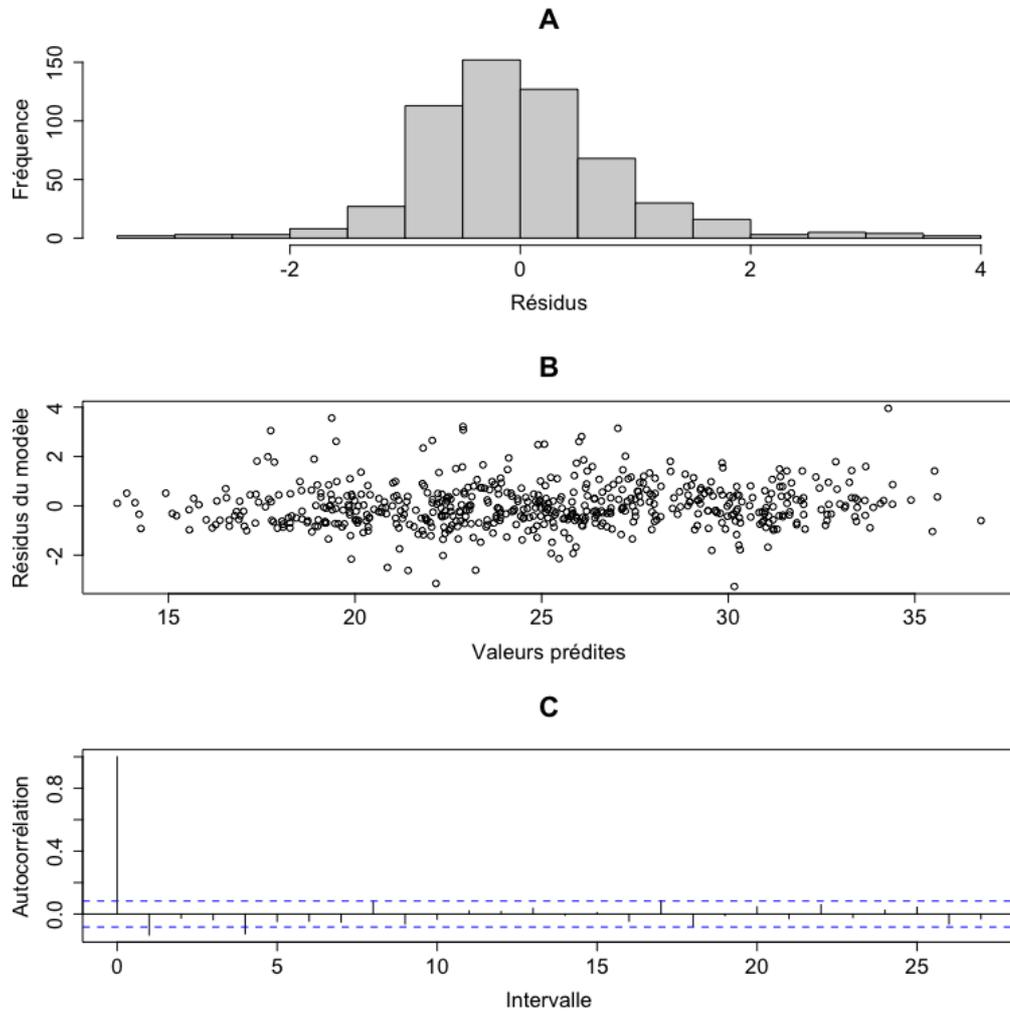
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Jour de mise-bas	-0,289	0,002
Portée supérieure à 2 x Jour de mise bas	-0,051	0,004
Lot 80	1,209	0,041

Principaux coefficients significatifs du modèle d'hématocrite avant la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

Annexe 20: Examen des résidus et résultats du modèle d'hématocrite après la mise-bas



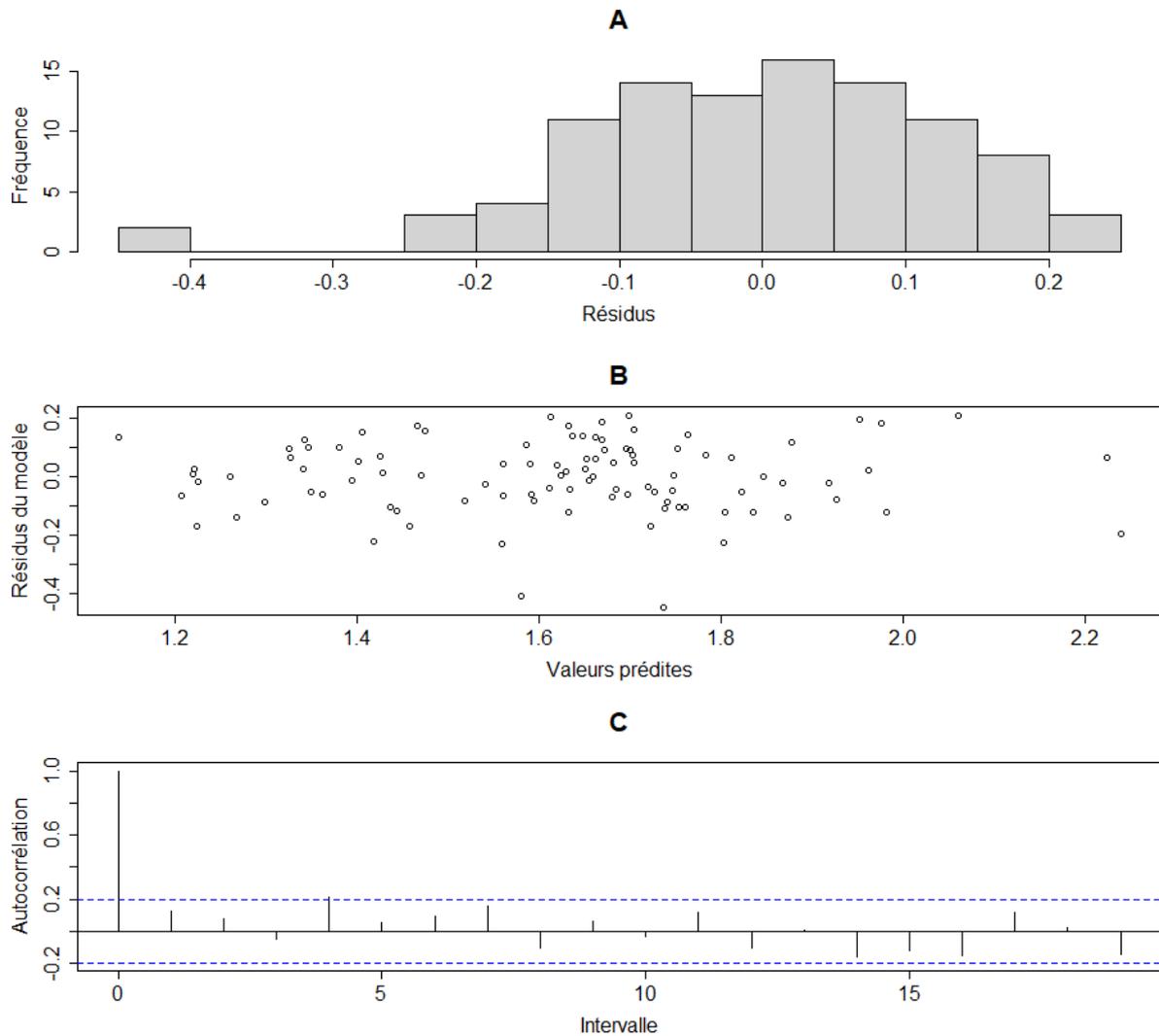
Examen des résidus du modèle d'analyse de l'hématocrite après la mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Variable	Coefficient	P-value
Jour de mise-bas	-0,351	0,095

Principaux coefficients significatifs du modèle d'analyse de l'hématocrite après la mise-bas

Les coefficients présentés sont uniquement les coefficients significatifs utilisés dans l'interprétation des résultats

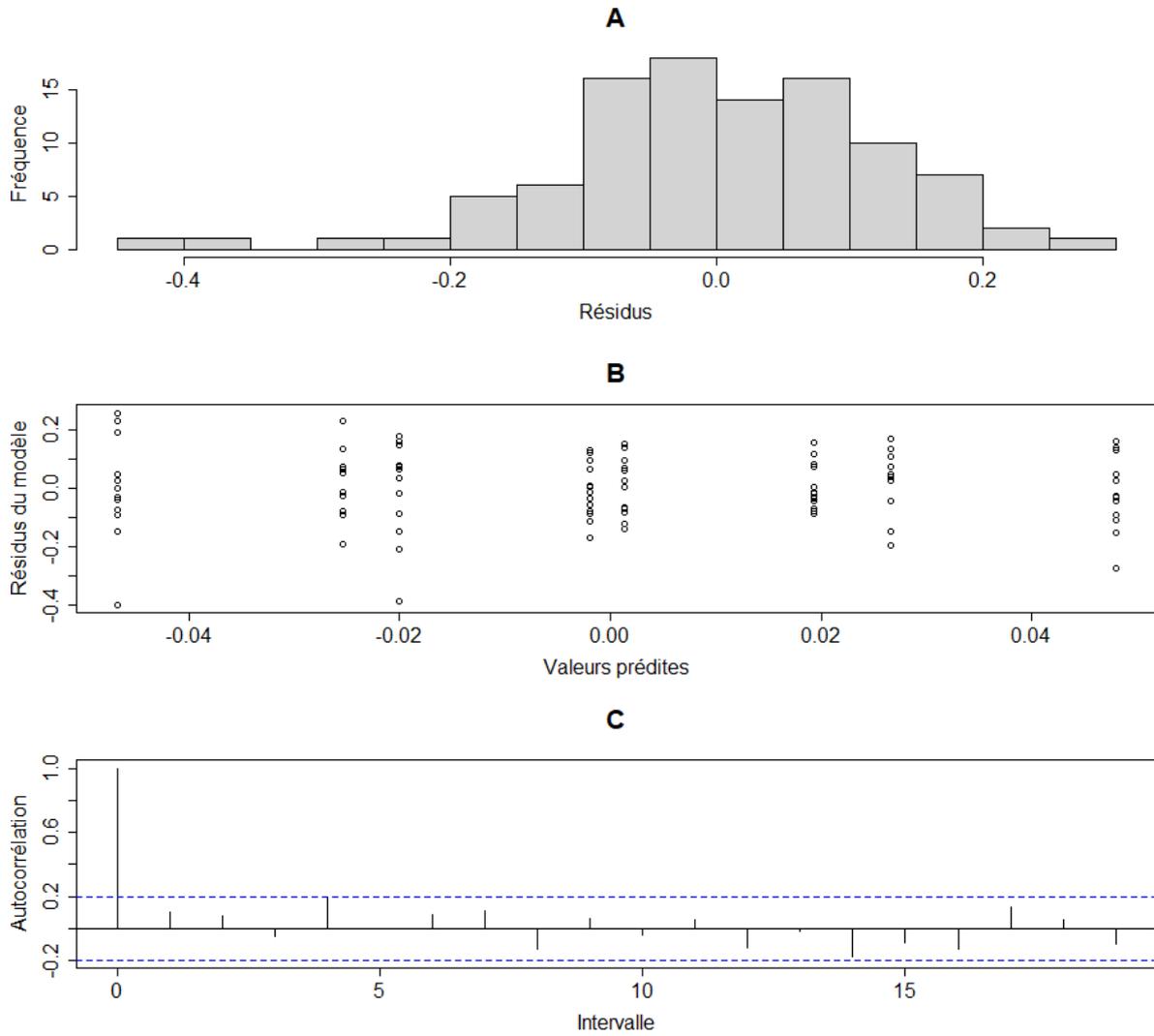
Annexe 21: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFI (RFI simplifié) avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle de calcul du RFI avant mise-bas

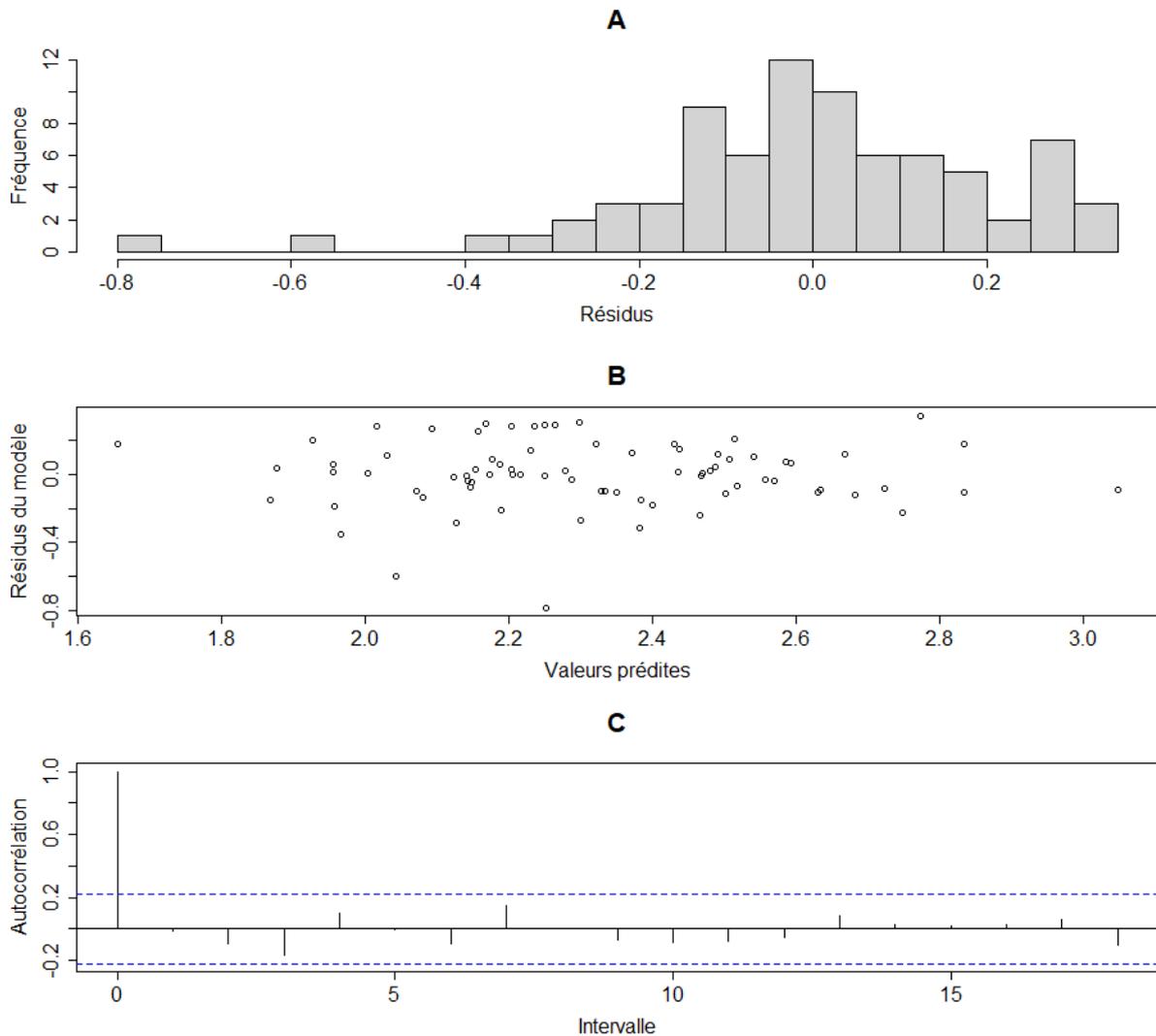
A : *histogramme des résidus du modèle*, B : *résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle*, C : *Corrélation entre les résidus à différents intervalles*

Annexe 22: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI simplifié) après la mise-bas



Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI avant mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

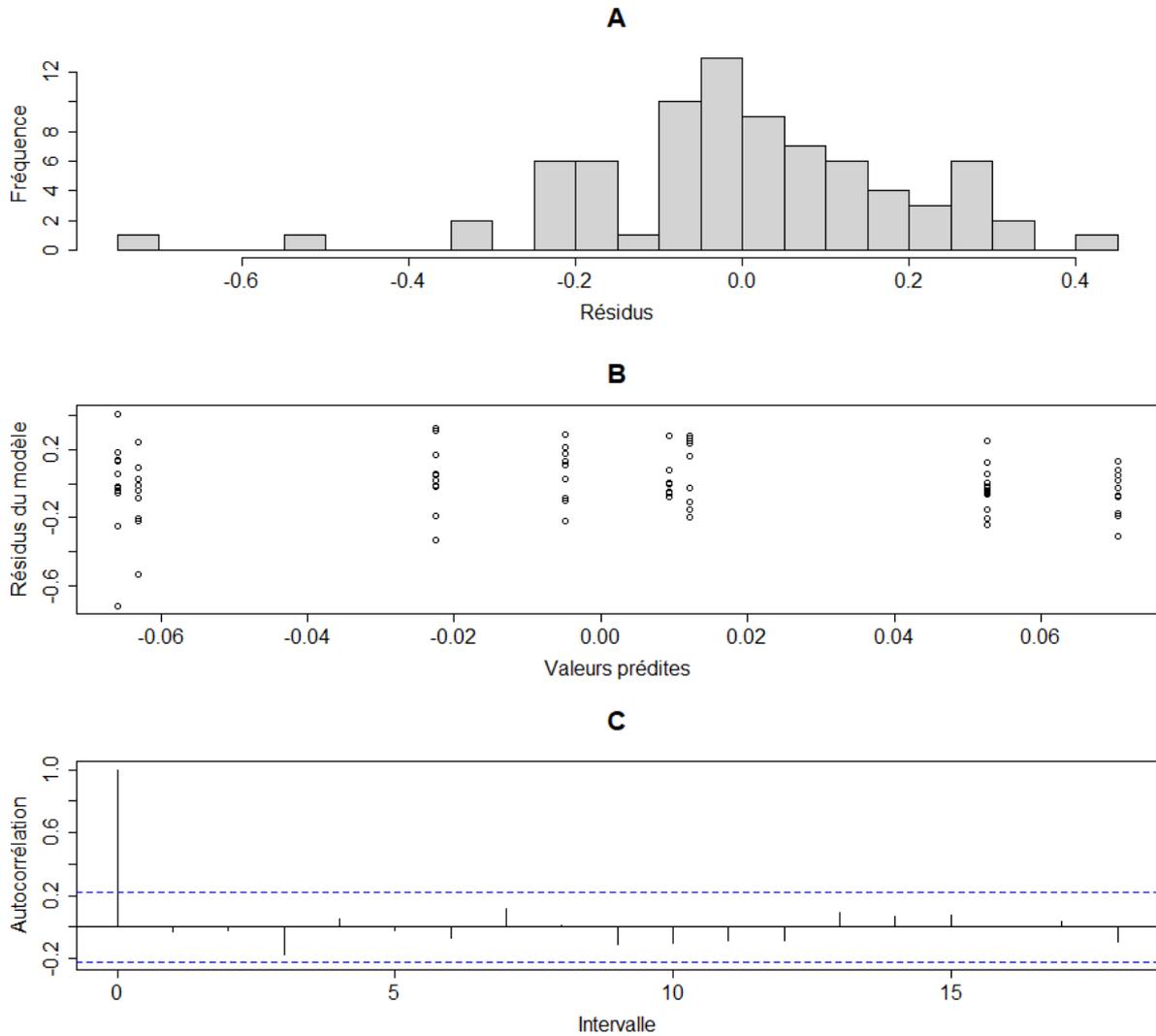
Annexe 23: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFIs (RFI simplifié) après la mise-bas



Examen des résidus du modèle de calcul de RFIs après mise-bas

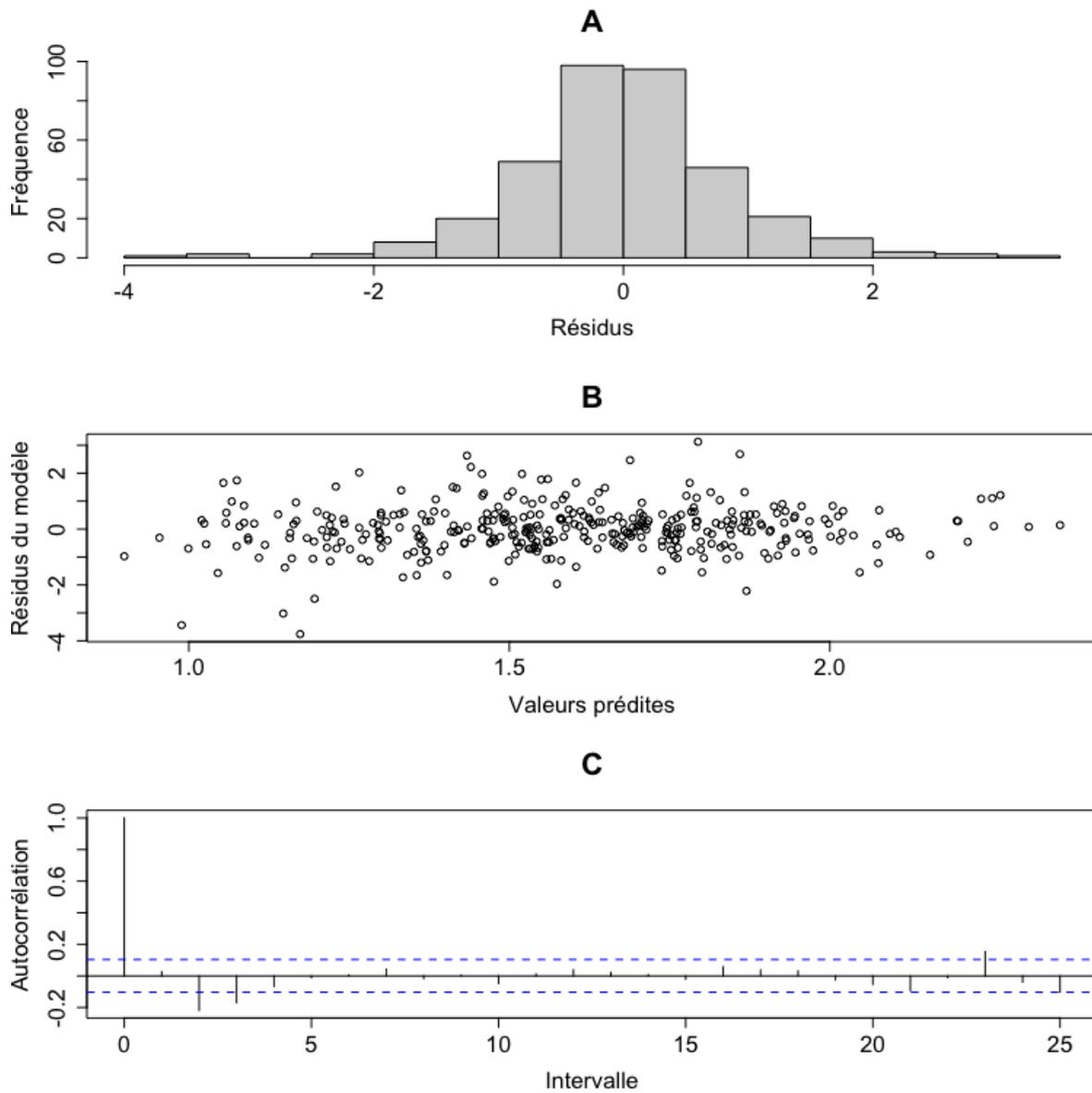
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Annexe 24: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI (RFI simplifié) après la mise-bas



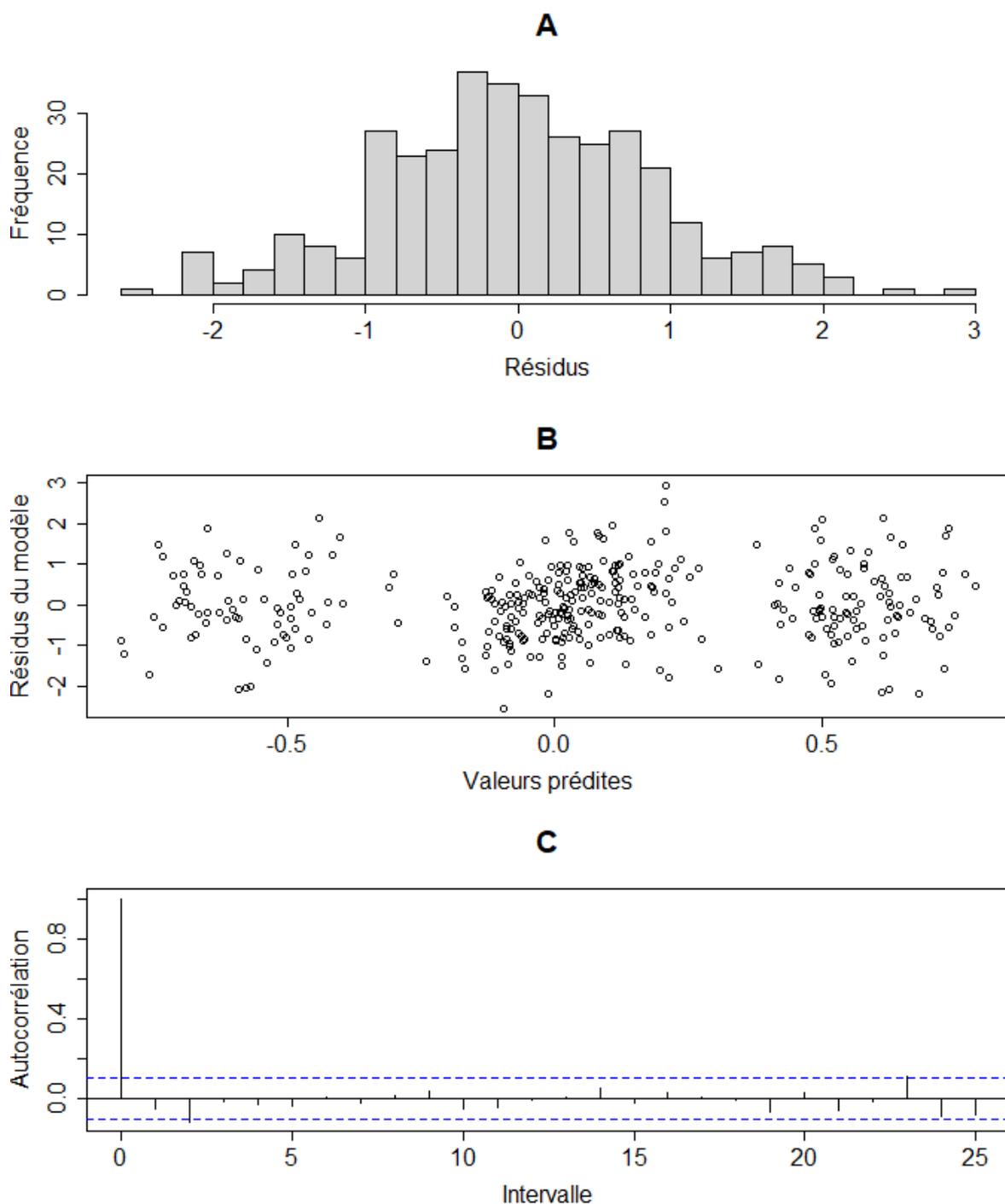
Examen des résidus du modèle d'analyse du RFI après mise-bas
A : *histogramme des résidus du modèle*, B : *résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle*, C : *Corrélation entre les résidus à différents intervalles*

Annexe 25: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFIe (RFI par jour d'échographie) avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle de calcul de RFIe avant mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

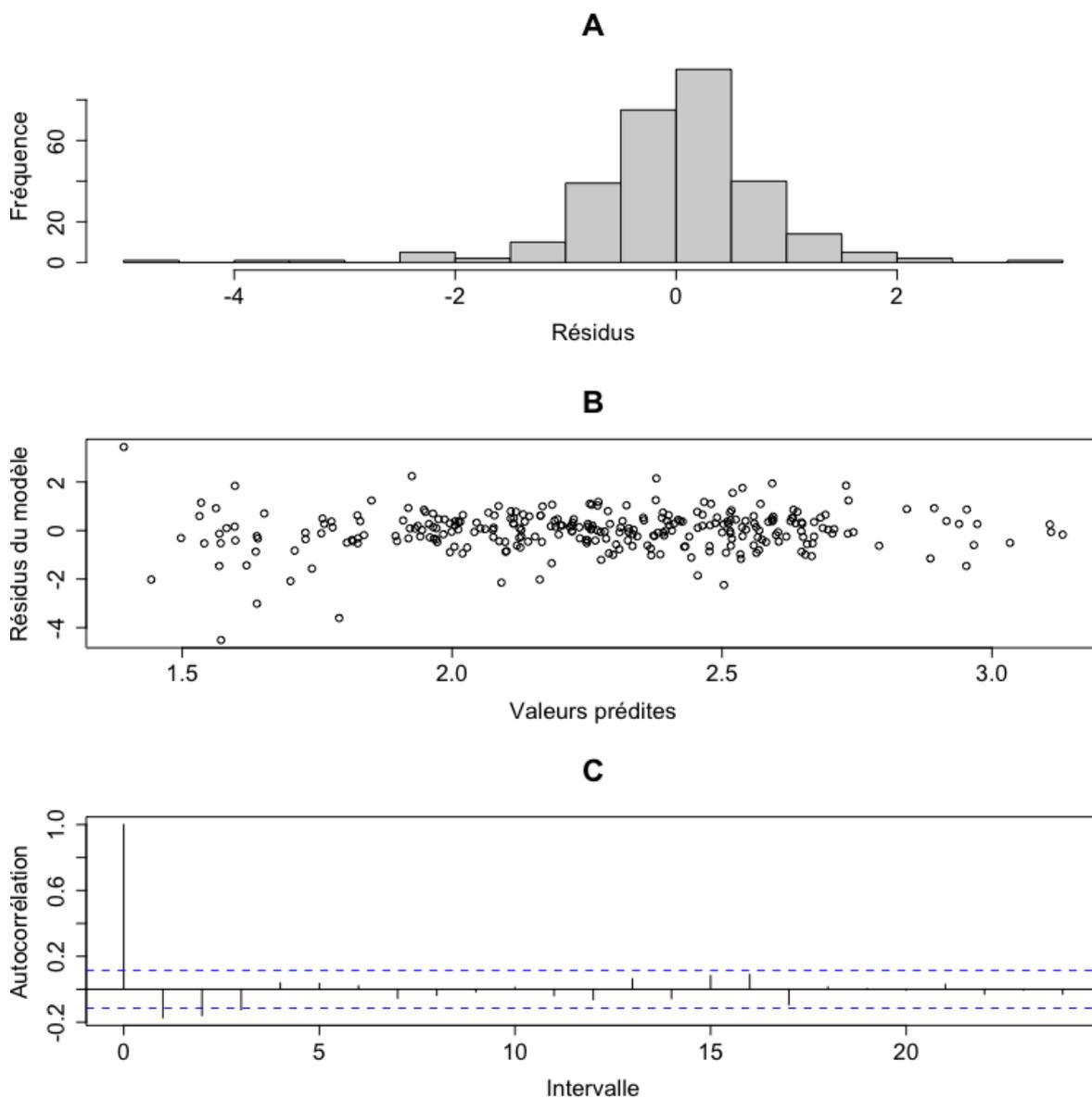
Annexe 26: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFIe (RFI par jour d'échographie) avant la mise-bas



Examen des résidus du modèle d'analyse du RFIe avant mise-bas

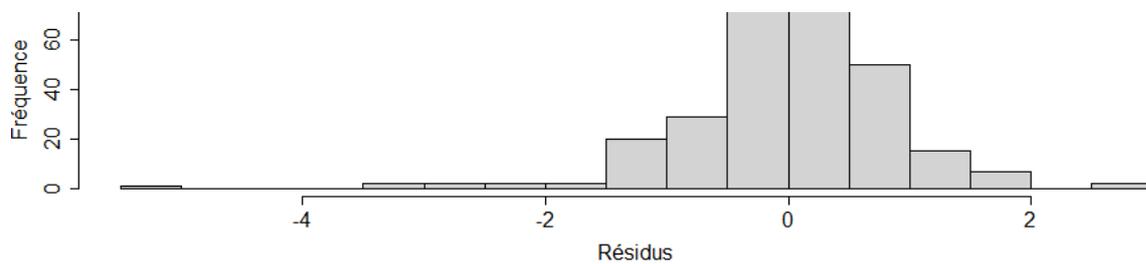
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

Annexe 27: Examen des résidus du modèle d'ingestion de MS permettant le calcul du RFIe (RFI par jour d'échographie) après la mise-bas

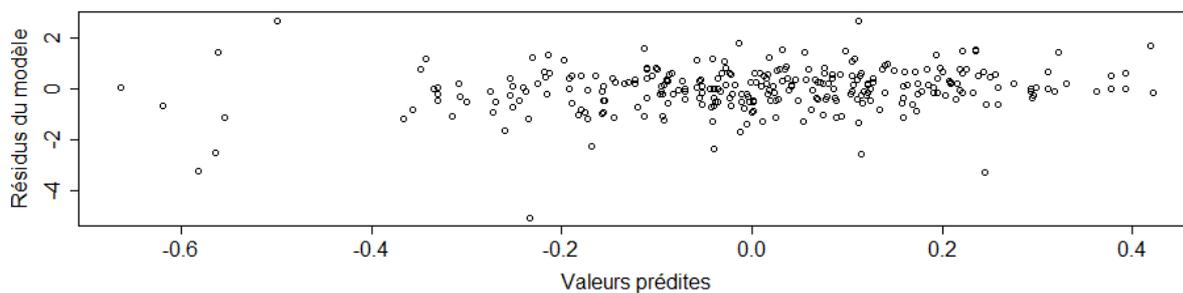


Examen des résidus du modèle de calcul du RFIe après mise-bas
A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

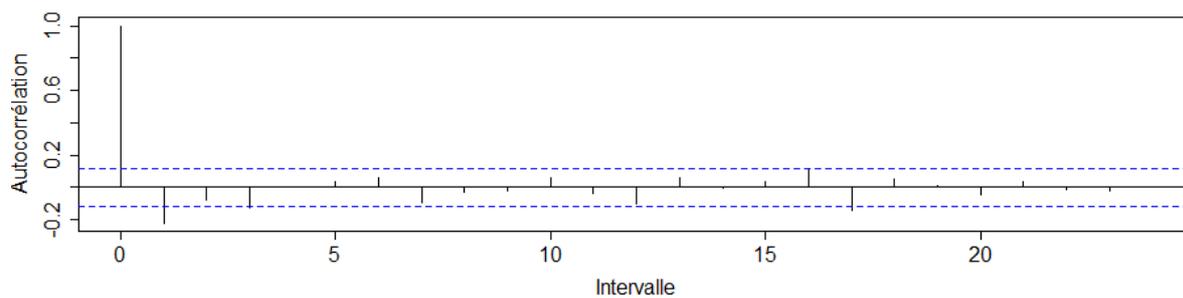
Annexe 28: Examen des résidus du modèle d'analyse du RFIe (RFI par jour d'échographie) après la mise-bas



B



C



Examen des résidus du modèle d'analyse du RFIe après mise-bas

A : histogramme des résidus du modèle, B : résidus du modèle en fonction des valeurs prédites par le modèle, C : Corrélation entre les résidus à différents intervalles

EFFICIENCE ALIMENTAIRE EN PHASE PÉRIPARTUM : UNE ÉTUDE CHEZ DES BREBIS ALLAITANTES PARASITÉES ISSUES DE SÉLECTIONS DIVERGENTES SUR L'EFFICIENCE ALIMENTAIRE OU LA RÉSISTANCE AU PARASITISME GASTRO-INTESTINAL

Auteur

AUROUZE Willy

Résumé

Au cours du 21^e siècle, l'élevage doit réduire son impact environnemental tout en maintenant une production suffisante. La sélection génétique sur la résistance au parasitisme gastro-intestinal et sur l'efficacité alimentaire pourrait permettre de répondre à ces défis. Cependant, les études des relations génétiques et des éventuels antagonismes entre ces caractères sont peu nombreuses et réalisées principalement chez les animaux en croissance. Ce travail, divisé en 2 parties, vise à apporter de nouvelles connaissances sur ces aspects, chez des brebis en phase péripartum. La première partie aborde l'efficacité alimentaire, le parasitisme gastro-intestinal et les compromis génétiques potentiels entre ces caractères. La seconde partie présente l'analyse des résultats d'une étude expérimentale, réalisée sur 104 brebis gestantes, parasitées et sélectionnées de manière divergente pour l'efficacité alimentaire ou la résistance au parasitisme gastro-intestinal. Durant l'étude, des données sur la santé, la production et l'ingestion de ces brebis ont été collectées. Dans ce travail, ces données sont analysées et utilisées pour déterminer l'efficacité alimentaire chez des brebis parasitées en phase péripartum. Contrairement aux résultats obtenus chez des lignées en croissance sélectionnées pour les mêmes caractères, nous n'avons pas mis en évidence d'améliorations de l'efficacité alimentaire et de la résistance au parasitisme gastro-intestinal chez les brebis en phase péripartum sélectionnées sur ces caractères. Cependant, notre étude a confirmé l'existence d'effets secondaires associés à ces sélections génétiques, ce qui pourrait indiquer l'existence d'un compromis génétique.

Mots-clés

Brebis allaitantes, efficacité alimentaire, parasitisme, sélection génétique, agroécologie

Jury

Président du jury	:	Pr CADORE Jean-Luc
Directeur de thèse	:	Dr DOUHARD Frédéric
1er assesseur	:	Dr BOURGOIN Gilles
2ème assesseur	:	Dr LURIER Thibaut
Membre invité	:	Dr TORTEREAU Flavie