HAL open science

Modéliser la variabilité biologique en réponse aux pratiques de conduite. Application au troupeau caprin laitier

Laurence Puillet

To cite this version:

Laurence Puillet. Modéliser la variabilité biologique en réponse aux pratiques de conduite. Application au troupeau caprin laitier. Sciences agricoles. ABIES Doctoral School, 2010. Français. NNT : . pastel-00619406v1

HAL Id: pastel-00619406

https://hal.inrae.fr/pastel-00619406v1

Submitted on 6 Jun 2020 (v1), last revised 6 Sep 2011 (v2)

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

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

N° /__/__/__/__/__/__/__/__/__/__/

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Spécialité : Sciences Animales

présentée et soutenue publiquement
par

Laurence Puillet

le 21 janvier 2010

MODÉLISER LA VARIABILITE BIOLOGIQUE EN REPONSE AUX PRATIQUES DE CONDUITE

APPLICATION AU TROUPEAU CAPRIN LAITIER

Directeur de thèse : **Daniel SAUVANT**

Codirecteur de thèse : **Muriel TICHIT**

Travail réalisé à :

UMR 791 INRA-AgroParisTech MoSAR, 16 rue Claude Bernard F-75231 Paris cedex 05
UMR 1048 INRA-AgroParisTech SAD-APT, 16 rue Claude Bernard F-75231 Paris cedex 05

Devant le jury composé de :

M. Daniel SAUVANT, Professeur, **AgroParisTech (Paris)**	**Président**
M. Benoît DEDIEU, Directeur de recherche, **INRA (Clermont-Ferrand)**	**Rapporteur**
M. Graeme MARTIN, Professor, **University of Western Australia (Perth)**	**Rapporteur**
M. François BOCQUIER, Professeur, **SupAgro (Montpellier)**	**Examinateur**
M. Jean-Baptiste COULON, Directeur de recherche, **INRA (Clermont-Ferrand)**	**Examinateur**
M. Jean-Louis PEYRAUD, Directeur de recherche, **INRA (Saint Gilles)**	**Examinateur**
Mme Géraldine VERDIER, Ingénieur agronome, **BRILAC (Mignaloux-Beauvoir)**	**Examinateur**
Mme Muriel TICHIT, Directeur de Recherche, **INRA (Paris)**	**Codirecteur de thèse**

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech) est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, composé de l'INA PG, de l'ENGREF et de l'ENSIA
(décret n° 2006-1592 du 13 décembre 2006)

Remerciements

Si la variabilité biologique a constitué l'objet de recherche de ce travail de thèse, la variabilité humaine en a défini le contexte d'encadrement. J'ai ainsi eu la chance de bénéficier des propriétés qui ont émergé de mon équipe d'encadrants dont les différentes compétences m'ont permis d'arriver au bout de ce projet. Je remercie donc très sincèrement Daniel Sauvant, Muriel Tichit et Olivier Martin de m'avoir guidée et formée pendant ces trois années, et de m'avoir donné l'envie et la confiance nécessaire pour continuer dans la recherche. Je remercie Daniel pour l'autonomie qu'il m'a laissée et pour m'avoir fait profiter de son « coup d'œil » systémique. Je remercie Muriel pour le sérieux de son encadrement, pour avoir su allier exigence, stimulation scientifique et qualités humaines. Enfin, je remercie Olivier pour sa patience et pour tout ce qu'il a su me transmettre dans le domaine de la modélisation, de la représentation schématique et systémique et de la science en général.

Je souhaite ensuite remercier les membres du jury de cette thèse, à la fois pour l'évaluation de mon travail mais aussi pour la richesse des débats lors de la soutenance. Merci à Benoît Dedieu et Graeme Martin d'avoir accepté la lourde charge d'être rapporteurs. Merci également à François Bocquier, Jean-Baptiste Coulon et Jean-Louis Peyraud d'avoir accepté le rôle d'examinateur et de bloquer un peu de leur emploi du temps chargé. Enfin merci à Géraldine Verdier de s'être plongée dans un travail de modélisation.

Une thèse est avant tout un projet et le comité de pilotage est un élément essentiel de son bon déroulement. Ainsi, j'adresse tous mes remerciements à Nicole Bossis, Sylvie Cournut, Philippe Faverdin, François Léger et Charles-Henri Moulin pour leurs remarques et conseils avisés au cours de ce travail de thèse. J'adresse ici un merci particulier à Charles-Henri qui me suit depuis mes débuts à l'Agro Montpellier et je glisse ici un grand merci aux enseignants chercheurs de l'UMR ERRC, en grande partie à l'origine de ma fibre « zoot » ! Pour rester dans la logique « projet », je remercie toutes les personnes qui ont participé au projet Praiterre. Les séminaires m'ont permis de présenter mon travail et de comprendre les rouages d'un projet ANR. Ce projet m'a ouvert les portes de la filière caprine Poitou-Charentes me permettant d'établir de riches collaborations. Je remercie mon comité technique (Frantz Jénot, Mélanie Talbot, Evelyne Bruneteau, Karine Boissard, Bernard Leboeuf, Hughes Coutineau), Jacky Losdat et Alain Panelle du BTPL, Geneviève Freund, Sébastien Simon et toutes les

personnes que j'ai pu croiser pendant les animations de la profession caprine. Leur enthousiasme et leur ouverture d'esprit m'ont motivée tout au long de ces trois ans.

Une thèse, c'est un « labo » et dans mon cas, c'était même deux labos ! Je remercie donc toutes les personnes de l'équipe Concepts du SAD-APT (mention spéciale à Aude dans la catégorie R et Rodolphe dans la catégorie solidarité thésards) et de l'UMR PNA (mention spéciale à Hélène, Laurent, Nicolas, Philippe et Valérie pour leur soutien). Merci pour les discussions informelles, les débats à la volée et tout simplement l'ambiance collective qui permet de souffler. Un grand merci à Marie-Paul Poulin pour la gestion de mon dossier administratif compliqué (les joies du co-financement !) et pour la prise en charge des aspects pratiques de la thèse. Une thèse, c'est aussi une vie de « thésard ». Je salue ici l'animation pour les doctorants qui existe au SAD à travers les fameuses JDD. Cet espace aux vertus quasi « thérapeutiques » est une véritable soupape pendant la thèse. Merci à tous les doctorants que j'ai pu y croiser (mention spéciale aux mirecurtiens, à Gilles, collègue Sad-Phase, aux animateurs Patrick, Laurent, Cécile et Bernadette). Merci également aux doctorants de l'équipe Concepts (Céline, Emilia, Noémie, Mourad, Manu, Félix), à Virginie, doctorante-collègue de bureau, à Laure, doctorante-colocataire et à Guillaume, doctorant-Elemidi. Une thèse, c'est aussi une institution de recherche. Je tiens donc à remercier les différents chercheurs avec qui j'ai pu échanger, rapidement ou plus longuement, au cours des Réflexives ou des actions d'animation scientifique (mention spéciale aux zootechniciens du SAD).

Pour finir, une thèse c'est un environnement affectif. Je remercie donc Claude, Jean-Paul, Loïc et Jeannette (plus connus sous le nom de Maman, Papa, Frangin et Mamie) pour leur soutien indéfectible pendant ma thèse et bien au delà! Merci d'avoir essayé de comprendre ce que je pouvais bien faire dans la vie et merci pour votre compassion pendant mes phases de stress ! Merci aussi à la tribu des oncles, tantes et cousins, du Lyonnais ou du Sud, du 1er ou du 3ème degré. Et parce qu'une thèse ne se ferait pas sans décompression et sans esprit festif, j'adresse un grand merci à la troupe d'amis (en particulier aux Ficelles : Bouchon, Elo, Milou et Roxane et aux gars : Alex, Bifi, Fred, Guillaume, Luc, Mathieu, Tom et le pti Roubier) qui ont autant su écouter mes délires modélo-caprin que me les faire oublier ! Je remercie également Linda Denham and Elena Kucharik pour leur belle imagination. Enfin, parce qu'on écrit les remerciements au terme d'une phase de rédaction qui n'est pas des plus reposantes, je remercie d'avance les personnes que j'aurais pu oublier de ne pas se vexer…

Table des matières

Remerciements.....3
Table des matières.....5
Liste des tableaux.....8
Liste des figures.....10
Liste des annexes.....15
Réalisations scientifiques.....16

INTRODUCTION..... **19**

CHAPITRE I REPRESENTATION DE LA VARIABILITE INDIVIDUELLE DANS LES MODELES DE FONCTIONNEMENT DU TROUPEAU..... **31**

1 Introduction..... **33**

2 Représentation de la composante biologique dans les modèles de fonctionnement du troupeau..... **37**
2.1 L'individu, une réponse reproductive.....37
2.2 L'individu, une réponse productive potentielle.....38
2.3 L'individu, une réponse productive réalisée.....40

3 Représentation de la composante décisionnelle dans les modèles de fonctionnement de troupeau..... **43**
3.1 Le troupeau, niveau agrégé de gestion de la reproduction et du renouvellement.....43
3.2 L'individu, niveau fin de gestion de la reproduction et du renouvellement.....44
3.3 Le lot, niveau de gestion de l'alimentation ou de la reproduction et du renouvellement.....44
3.4 Le lot, entité de gestion à l'interface d'un projet d'élevage et d'un système de pratiques.....46

4 Cahier des charges pour la construction d'un simulateur permettant d'étudier la variabilité individuelle..... **48**

5 Références bibliographiques..... **53**

CHAPITRE II MODELISATION DES PERFORMANCES INDIVIDUELLES..... **59**

1 Introduction..... **61**

2 Représentation des priorités entre fonctions physiologiques..... **67**
2.1 Cas des femelles matures.....67
2.1.1 Priorité relative des fonctions de gestation et de gestion des réserves.....67
2.1.1.1 Expression du potentiel.....67
2.1.1.2 Environnement contraignant.....68
2.1.2 Priorité relative des fonctions de lactation et de gestion des réserves.....69
2.1.2.1 Expression du potentiel.....69
2.1.2.2 Environnement contraignant.....70
2.1.3 Priorités relatives des fonctions de gestation, de lactation et de gestion des réserves.....71
2.2 Cas des femelles en croissance.....71
2.2.1 Priorités relatives des fonctions de croissance et de gestion des réserves.....71
2.2.1.1 Expression du potentiel.....71
2.2.1.2 Environnement contraignant.....72
2.2.2 Modulation des priorités relatives des fonctions de gestation et de gestion des réserves par la croissance.....72

2.2.2.1 Expression du potentiel 72
2.2.2.2 Environnement contraignant 72
2.2.3 Modulation des priorités relatives des fonctions de lactation et de gestion des réserves par la croissance 73
2.2.3.1 Expression du potentiel 73
2.2.3.2 Environnement contraignant 74
2.2.4 Modulation des priorités relatives des fonctions de gestation, de lactation et de gestion des réserves par la croissance 74
2.3 Conclusion 74

3 Modélisation des performances de la chèvre laitière au cours de sa vie productive . 76
3.1 Sous-système régulateur 76
3.2 Sous-système opérant 80
3.2.1 Principe général 80
3.2.2 Conversion de la ration distribuée en énergie ingérée 85
3.2.3 Ventilation du différentiel d'énergie entre les fonctions physiologiques 86
3.2.4 Réponse des flux de matière au différentiel d'énergie 88
3.2.5 Variables permettant la connexion avec le niveau troupeau 89
3.3 Evaluation du modèle de chèvre laitière 90
3.3.1 Analyses de sensibilité 91
3.3.2 Confrontation aux courbes individuelles du troupeau expérimental de l'UMR PNA 94
3.3.3 Niveaux de potentiel laitier et d'apports d'aliment concentré 95
3.3.4 Confrontation des dynamiques d'évolution des réserves corporelles aux données de la littérature 97
3.3.5 Conduite en lactation longue 98
3.4 Conclusion 100

4 Références bibliographiques 101

CHAPITRE III SIGHMA, SIMULATION OF GOAT HERD MANAGEMENT 107

1 Analyse du système réel : la gestion du troupeau caprin dans un système laitier intensif 110
1.1 Pratiques de reproduction 110
1.1.1 Organisation des mises-bas et projet de production 110
1.1.2 Techniques de mise à la reproduction et gestion des échecs de reproduction 117
1.2 Pratiques d'allotement 122
1.3 Pratiques de renouvellement 123
1.3.1 Politique d'effectifs 123
1.3.2 Composition du troupeau 123
1.3.3 Causes de réforme 124
1.4 Pratiques d'alimentation 124
1.4.1 Systèmes alimentaires 124
1.4.2 Adaptation de la ration pendant la campagne et entre les lots 126
1.4.3 Combinaison entre système alimentation et stratégie de reproduction 127
1.5 Conclusions sur l'analyse du système réel 127
1.6 Références bibliographiques 128

2 Modèle conceptuel de gestion technique du troupeau caprin laitier 131
2.1 Du projet d'élevage à la configuration du troupeau en lots fonctionnels 131
2.2 Planification et pilotage des opérations techniques au sein des lots fonctionnels : motif élémentaire de gestion 135
2.3 Conclusion 138
2.4 Références bibliographiques 140

3 Simulateur du fonctionnement du troupeau caprin 141
3.1 Introduction 144

3.2 The dairy goat herd management model SIGHMA *145*
3.2.1 General framework *145*
3.2.2 Management sub-model: a planned set of discrete events formalizing decision rules and technical operations *148*
3.2.3 Animal sub-model: a set of compartmental models formalizing individual variability *151*
3.2.4 Outputs and simulations *153*
3.3 Results *156*
3.3.1 Sensitivity analysis *156*
3.3.2 Factorial experimental design *158*
3.3.3 Exploring individual variability underlying herd performance *159*
3.4 Discussion *162*
3.4.1 Simulation results *162*
3.4.2 Modelling approach *163*
3.5 Conclusion *165*

4 Introduire l'efficacité dans l'analyse de la variabilité des carrières individuelles : une clé pour le diagnostic de la conduite du troupeau. **171**
4.1 Introduction *172*
4.2 Matériels et méthodes *173*
4.2.1 Description du simulateur *173*
4.2.2 Utilisation du simulateur pour trois plans d'expérience *175*
4.2.3 Analyse des sorties *176*
4.3 Résultats *177*
4.3.1 Caractérisation de la variabilité des carrières individuelles *177*
4.3.2 Effets des options de conduite sur la variabilité des carrières individuelles *179*
4.3.3 Performances globales du troupeau *185*
4.4 Discussion *187*
4.4.1 Résultats des simulations *187*
4.4.2 Intérêt de la variabilité individuelle pour le diagnostic des pratiques *188*
4.5 Conclusion *191*
4.6 Références *192*

DISCUSSION GENERALE **195**

1 Démarche de modélisation **199**
1.1 Développement du simulateur *199*
1.1.1 Composante biotechnique *199*
1.1.2 Composante décisionnelle *199*
1.2 Utilisation du simulateur pour la recherche *200*
1.3 Utilisation du simulateur pour le terrain *202*

2 Pistes d'améliorations **204**
2.1 Composante biotechnique *204*
2.1.1 Animal *204*
2.1.2 Ressources du système d'élevage *207*
2.2 Composante décisionnelle *208*
2.2.1 Questions de recherche autour de la variabilité individuelle *208*
2.2.2 Questions de recherche futures *208*

3 Contribution de la variabilité individuelle aux questionnements de la zootechnie des systèmes d'élevage **209**

4 Références bibliographiques **213**

CONCLUSION **219**

Liste des tableaux

Tableau 1 Représentations de l'individu et des types de pratiques utilisées dans les différents travaux de modélisation du fonctionnement du troupeau 52

Tableau 2 Effets des variations d'apports énergétiques sur le gain de poids de la chèvre laitière pendant la gestation.. 69

Tableau 3 Variables du sous-système régulateur. 79

Tableau 4 Paramètres du sous-système régulateur. 79

Tableau 5 Paramètres du sous-système opérant. 82

Tableau 6 Flux d'énergie du sous-système opérant associés aux fonctions physiologiques. . 82

Tableau 7 Variables de performance du sous-système opérant. 83

Tableau 8 Variables de connexion avec le modèle de gestion dans le sous-système opérant (les évènements du modèle de gestion sont figurés en italique). 90

Tableau 9 Effectifs et résultats de reproduction des chèvres (n = 33604) de 19 élevages sur la période 1998-2008 en fonction de la saison et du type de reproduction.. 118

Tableau 10 Données de la littérature sur les résultats de reproduction en insémination artificielle (IA) et saillie naturelle (SN) à différentes périodes de reproduction. 119

Tableau 11 Règles de gestion des chèvres multipares et nullipares dans les trois projets de production identifiés dans les élevages de Poitou-Charentes. 120

Tableau 12 Pourcentage de chèvres conduites en lactation longue dans les études de Bossis (1995), Gendron et Reveau (1994) et Gateff (2002). 120

Tableau 13 Taux de réforme et de renouvellement dans quatre études sur la région Poitou-Charentes. 123

Tableau 14 Description des ressources mobilisées pour l'analyse des systèmes alimentaires. 125

Tableau 15 Opérations techniques relatives aux stratégies de conduite de la reproduction, du renouvellement et de l'alimentation du troupeau considérées dans le modèle. ... 136

Table 16 Herd configuration into functional groups (FG) for the three main farmers' production projects in Poitou-Charentes. 147

Table 17 Description of the events which occurred in the elementary management pattern of a functional group. 150

Table 18 Feeding values of diet feedstuffs 155

Table 19 Concentrate (kg of dry matter) for each feeding sequence and reference animal .. 155
Table 20 Parameterisation of sensitivity analysis for SIGHMA evaluation..... 155
Tableau 21 Results of model sensitivity analysis. 157
Tableau 22 Paramétrage des 14 simulations réalisées dans le cadre de trois plans d'expériences avec le simulateur. 176
Tableau 23 Moyennes des variables individuelles simulées dans les 14 simulations. L'écart-type est indiqué entre parenthèses. 182
Tableau 24 Effets du rang de lactation, de la race et du poids de portée sur le gain de poids vif pendant la gestation. 228
Tableau 25 Résultats de l'analyse statistique du poids vif et de la production laitière (estimation du coefficient pour les covariables et moyennes issues des moindres carrés pour les facteurs). 230
Tableau 26 Récapitulatif des données sur les réserves corporelles issues de la littérature. .. 232
Tableau 27 Variables déduites des équations de prédiction des besoins des chèvres laitières (Sauvant *et al.*, 2007). 237

Liste des figures

Figure 1 Schéma global de la démarche mise en œuvre dans la thèse 27

Figure 2 Représentation conceptuelle de l'élaboration des réponses du troupeau sous l'effet des pratiques aux différents niveaux d'organisation du système. 35

Figure 3 Evolution de la représentation conceptuelle du fonctionnement biologique d'une femelle laitière, depuis un convertisseur passif d'énergie vers un organisme adapté à son milieu. 63

Figure 4 Représentation schématique de la succession et de la superposition des stades physiologiques d'une chèvre laitière, au cours de trois cycles reproductifs, et grille d'analyse de la littérature associée pour identifier les règles de priorités d'allocation d'énergie aux fonctions.. 66

Figure 5 Représentation de l'importance relative des différentes situations de priorités (en % du temps total de vie) pendant la vie productive d'une femelle réalisant 4 lactations.. 66

Figure 6 Effet du poids de portée mis bas (PCHV, en kg) sur le gain de poids vif (hors utérus gravide) pendant la gestation (GAINGEST, en kg) pour 330 gestations (données du troupeau expérimental de l'UMR PNA).. 68

Figure 7 Fonctions affectées par un différentiel d'énergie (dE) non nul entre les besoins d'énergie liés au potentiel et l'énergie ingérée.. 75

Figure 8 Structure du sous-système régulateur du modèle de chèvre laitière. 78

Figure 9 Dynamiques des compartiments du sous-système régulateur du modèle de chèvre laitière représentatifs des priorités entre fonctions. 78

Figure 10 Représentation schématique du sous-système opérant du modèle de chèvre laitière. 81

Figure 11 Logigramme représentant la détermination des coefficients p, q et r en fonction du stade physiologique de la femelle. 87

Figure 12 Allures des fonctions théoriques X et Z qui modulent les coefficients de ventilation du différentiel d'énergie p, q et r pour calculer les coefficients p_2, q_2 et r_2 en fonction de la proportion de réserves corporelles par rapport au poids vif vide (en kg/kg). 88

Figure 13 Dynamiques de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg réalisant 5 lactations successives avec un potentiel laitier (POT) variant de 2 à 7 kg (production laitière brute au pic de la troisième lactation). 91

Figure 14 Dynamiques de production laitière brute (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg réalisant 5 lactations successives avec un potentiel laitier (POT) variant de 2 à 7 kg (production laitière brute au pic de la troisième lactation). 92

Figure 15 Dynamiques de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg et de potentiel laitier égal à 4 kg (pic de production atteint en troisième lactation) en début de troisième lactation avec un potentiel laitier de 4kg et alimentée avec des quantités d'aliment concentré variant de 0 à 1.5 kg/j. 93

Figure 16 Dynamiques de production laitière brute (PLB) simulées en début de lactation pour une chèvre de 65 kg avec un potentiel laitier de 4 kg alimentée avec des quantités de concentré variant de 0 à 1.5 kg/j. 93

Figure 17 Courbes potentielles de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de poids vif mature. 94

Figure 18 Courbes potentielles de productions laitières brutes (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiel laitier (production laitière au pic de la troisième lactation). 95

Figure 19 Evaluation des réponses de la production laitière brute (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiels (3, 4 et 5 kg de lait potentiel au pic de la 3ème lactation) combinés à trois niveaux d'alimentation (-10%, 0% et +10% des besoins). 96

Figure 20 Evaluation des réponses du poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiels (3, 4 et 5 kg de lait potentiel au pic de la 3ème lactation) combinés à trois niveaux d'alimentation (-10%, 0% et +10% des besoins). 96

Figure 21 Comparaison des données de la littérature avec l'évolution de la proportion de réserves corporelles simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux d'apports d'aliment concentré. 97

Figure 22 Courbes de productions laitières simulées par le modèle de chèvre laitière dans le cas d'une conduite en lactation longue sur 670 jours pour trois niveaux de potentiels (2.5, 3.5 et 4.5 kg). 99

Figure 23 Courbes de poids vifs simulés par le modèle de chèvre laitière dans le cas d'une conduite en lactation longue sur 670 jours (traits pleins) et d'une conduite standard en deux lactations (traits pointillés) pour trois niveaux de potentiel laitier (2.5, 3.5 et 4.5 kg). 99

Figure 24 Comparaison de la production laitière simulée par le modèle de chèvre laitière pour une femelle conduite en lactation longue avec les données de l'étude de Salama et al. (2005) incorporées en fond de graphique. 100

Figure 25 Répartition mensuelle des mises bas dans les régions Poitou-Charentes et Provence-Alpes-Côte d'Azur..... 112

Figure 26 Répartition des élevages en fonction du pourcentage de mises-bas d'automne (MBA) sur le second semestre..... 113

Figure 27 Répartition mensuelle des mises bas (diagramme) et des livraisons de lait (les symboles correspondent aux valeurs moyennes et l'enveloppe aux valeurs minimum et maximum) pour les adhérents de la coopérative laitière Sèvre et Belle (d'après les données de Losdat et Simon, 2006 ; 2007) qui organisent la reproduction en saison (a), à contre-saison (b) et sur deux périodes (c)..... 115

Figure 28 Variation interannuelle moyenne (minimum 8 ans) de 15 éleveurs adhérents à la Coopérative Laitière de la Sèvre pour lesquels les données de reproduction ont fait l'objet d'une extraction de la base de données du Contrôle Laitier. 116

Figure 29 Répartition de l'utilisation des techniques de mise à la reproduction en fonction du type de femelles (M : multipares ; P : primipares) au sein des groupes d'éleveurs identifiés par Bossis (1995) sur la base de leurs choix de stratégie de reproduction.. 118

Figure 30 Répartition mensuelle des mises-bas ayant donné lieu à une lactation longue dans les 48 élevages de l'étude de Gateff (2002)..... 122

Figure 31 Décomposition du taux réforme (nombre de chèvres sorties/nombre de chèvres présentes pendant la campagne) en fonction des causes de réforme identifiées . 124

Figure 32 Représentativité des types de systèmes alimentaires d'après les résultats de Leclerc (2000), Bossis (2003), Gateff (2002), Bessonnet (2006) et du réseau national (2007).. 126

Figure 33 Représentation des collectifs d'animaux dans le modèle conceptuel de gestion du troupeau caprin. 132

Figure 34 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «saison »..... 133

Figure 35 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «contre-saison». 134

Figure 36 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «régulier».. 134

Figure 37 Représentation de trois stratégies d'alimentation du lot en fonction du niveau de production laitière de l'animal pilote (en kg/j de lait au pic de la 3ème lactation). 138

Figure 38 Functional groups (FG) of goats as basic management entities of the herd for a regular milk production project. 147

Figure 39 Chronological succession of events traducing the implementation of feeding, reproductive and replacement strategies within an elementary management pattern ensuring the operation of a functional group (FG). 149

Figure 40 State transition diagram of a goat during the elementary management pattern operation. 153

Figure 41 Model simulations of herd production (mean value over the last 10 years, ± standard error over 15 replications) and efficiency (mean milk feed cost over the last 10 years, ± standard error over 15 replications) in a 2 x 2 factorial arrangement with mean genetic potential (H: 5 kg; L: 4 kg) and reference animal (H: 5 kg; L: 4 kg). 158

Figure 42 The level plot of milk production (MP in kg of milk/day of lactation) and efficiency (milk feed cost in €/kg) over goat productive lives simulated by the model for four treatments following a 2x2 factorial plan with genetic herd level (H: 5 kg; L: 4 kg) and feeding management represented by reference animal (H: 5 kg; L:4 kg). 160

Figure 43 The level plot of milk production (MP on lactation 2, in kg) and differential of body weight between simulated and potential (deltaBW, in kg) over productive life of goats simulated by the model for four treatments following a 2x2 factorial plan with genetic herd level (H: 5 kg; L: 4 kg) and feeding management represented by reference animal (H: 5 kg; L:4 kg). 161

Figure 44 Illustration du calcul de la variable dBWlac2 pour une chèvre de potentiel de production égal à 4 kg (pic de production laitière atteint en troisième lactation) alimentée avec deux niveaux d'animal pilote (exprimé dans la même unité que le potentiel de production) : a) animal pilote égal à 5 kg et b) animal pilote à 3 kg.. 177

Figure 45 Positionnement des 17 variables individuelles en fonction de leurs coordonnées sur les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales. 179

Figure 46 Positionnement des individus générés par les trois plans d'expériences dans le plan défini par les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales. 180

Figure 47 Projection de la moyenne des coordonnées des individus sur l'axe 2 en fonction de la valeur sur l'axe 1 pour les 14 simulations. 182

Figure 48 Pourcentage d'individus dont le poids vif est à l'équilibre en début de deuxième lactation pour chacune des 14 simulations. 184

Figure 49 Répartition des individus simulés dans trois contextes de conduite (S_{10}, S_4 et S_3) en fonction de la valeur de la variable $dBWlac_2$ qui représente l'écart (en kg) entre le poids vif réalisé et le poids vif potentiel à 90 jours de la 2ème lactation. 185

Figure 50 Résultats des 14 simulations à l'échelle du troupeau pour l'efficacité alimentaire du troupeau en fonction de la production laitière annuelle. 186

Figure 51 Relation entre le coût alimentaire (en €) du kg de lait produit et la production laitière annuelle du troupeau pour les 14 simulations. 187

Figure 52 Evolution de la production laitière brute atteinte au pic de lactation en fonction du rang de lactation, exprimée en proportion de la production atteinte au pic de la troisième lactation, pour les données du Contrôle Laitier de 2004 à 2007. 236

Figure 53 Relation entre la perte de poids vif sur le début de lactation et le potentiel laitier pour les primipares et pour les multipares 237

Liste des annexes

Annexe 1 Analyse statistique des données du troupeau expérimental de l'UMR PNA 225

Annexe 2 Données de la littérature sur le niveau des réserves corporelles chez la chèvre 231

Annexe 3 Détermination des relations entre le potentiel laitier, le rang de lactation et la perte de poids vif dans le modèle de chèvre laitière 235

Annexe 4 Représentation des régulations physiologiques dans un modèle de femelle laitière : application à la chèvre laitière (Puillet L, Martin O, Tichit M et Sauvant D, 2008) 239

Annexe mobile Eléments du modèle de chèvre laitière, abréviations et paramétrage des simulations

Réalisations scientifiques

Revues avec comité de lecture

Puillet L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., **2008**. Simple representation of physiological regulations in a model of lactating female: application to the dairy goat. ***Animal*** 2, 235-246

Tichit M., Puillet L., Sauvant D., **sous presse**. How models contribute to livestock farming system research: overview of recent advances. ***Options Méditerranéennes***

Puillet L., Martin O., Sauvant D., Tichit M., **accepté (révisions mineures)**. An individual-based model combining reproduction and feeding management as a tool to simulate dairy goat herd performance. ***Animal***

Puillet L., Sauvant D. et Tichit M, **soumis**. Représentation des déterminants de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement de troupeau. ***INRA Productions Animales***

Puillet L., Martin O., Sauvant D., Tichit M. Intégrer l'efficacité dans l'analyse de la variabilité individuelle : une clé pour le diagnostic de la conduite. ***Manuscrit pour Animal***

Communications orales dans des congrès internationaux et nationaux

(: personne qui a présenté la communication orale)*

Puillet* L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2007. A simple modelling approach of regulations in energy partitioning for the lactating female: application to the dairy goat. *58th Annual Meeting of European Association for Animal Production Dublin, Ireland*, 212

Puillet* L., Tichit M., Martin O., Tessier. J, Sauvant D., 2008. Identifying priorities among physiological functions: interactions between growth, pregnancy and lactation in dairy goat. *59th Annual Meeting of European Association for Animal Production Vilnius, Lituania*, 2

Puillet* L., Martin O., Sauvant D., Tichit M., 2008. Diversité des carrières des chèvres laitières et pratiques d'alimentation et de reproduction : approche par modélisation. 15ème *Rencontres Recherche Ruminants, Paris*, 171-174

Puillet* L., Martin O., Sauvant D., Tichit M., 2009. Integrating feeding and reproductive management: a modelling approach to assess dairy goat herd performance. *60th Annual Meeting of European Association for Animal Production Barcelona, Spain*, 291

Puillet* L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2009. Sensitivity analysis of production potential expression under different management practices with a dynamic individual based herd model. *7th International Workshop "Modelling Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals", Paris*

Affiches dans des congrès internationaux et nationaux

Puillet* L., Martin O., Tichit M., Tessier. J, Sauvant D., 2007. Modélisation des courbes de lactation chez la chèvre laitière. *14ème Rencontres Recherche Ruminants, Paris*, 105

Puillet L., Sauvant D., Tichit M., 2008. In-herd diversity of lifetime performances: a key for the sustainability of livestock farming system based on grassland. *International XXI IGC - VIII IRC congress, Hohhot, China*, 71

Textes de vulgarisation

Développement d'un simulateur du fonctionnement du troupeau caprin laitier. L'Egide, *Bulletin trimestriel d'information scientifique et technique du Centre de Ressources et Documentation Caprine*, n°52, septembre 2008.

La simulation informatique explore l'intérêt des lactations longues. *La Chèvre*, n°289, septembre-novembre 2008.

Introduction

La profonde mutation de l'agriculture, et plus particulièrement celle de l'élevage, s'est traduite par l'abandon des exigences productivistes d'après-guerre, basées sur la maximisation d'une composante productive, au profit d'exigences de durabilité, reposant sur l'élaboration de **performances** multiples. Non seulement les systèmes d'élevage doivent transformer efficacement des matières premières en produits animaux mais ils doivent aussi rester compétitifs et procurer un revenu suffisant à l'éleveur. De plus, il leur faut garantir le bien-être animal et limiter leurs impacts sur l'environnement en valorisant et produisant des services écosystémiques. Enfin, ils doivent répondre aux exigences réglementaires de traçabilité et de qualité sanitaire des produits. Cette attente de performances multiples s'inscrit dans un environnement incertain du point de vue de l'évolution des prix, des politiques publiques ou encore des conditions climatiques, sans compter l'occurrence imprévue de nouvelles crises alimentaires. Ce contexte d'incertitudes multiples et non maîtrisables implique un renouvellement de la définition de la performance. Celle-ci ne se réduit plus à l'atteinte d'un certain niveau de production à court terme mais comprend aussi la stabilité temporelle de ce niveau. Ainsi, les notions de robustesse (Klopčič *et al.*, 2009) ou de flexibilité (Dedieu *et al.*, 2008) sont de plus en plus utilisées pour décrire les propriétés attendues des systèmes d'élevage, à différentes échelles, et leurs aptitudes à faire face aux incertitudes.

L'élaboration de performances multiples dans un environnement marqué par l'incertitude met plus que jamais en avant la nécessité d'approfondir notre compréhension du fonctionnement des **systèmes d'élevage**. L'accroissement des connaissances dans ce domaine est nécessaire pour évaluer et valoriser les **mécanismes de régulations** internes de ces systèmes. Depuis une quinzaine d'années, ces mécanismes sont considérés comme les déterminants de la capacité d'adaptation des systèmes d'élevage dans un environnement fluctuant (Landais et Balent, 1993). La recherche doit ainsi développer des indicateurs et des outils de diagnostic des propriétés de régulations internes des systèmes d'élevage et doit également concevoir des innovations autour du **pilotage** des systèmes conduisant à une meilleure utilisation de leurs régulations internes pour assurer autant que possible la stabilité des performances. L'intérêt pour les propriétés régulatrices n'est pas nouveau (Santucci, 1991). Ces propriétés reposent sur la **variabilité** de processus qui se déroulent à différents niveaux d'organisation et qui relient, dans un système d'élevage, le troupeau et les ressources. Ainsi, les régulations peuvent s'envisager au niveau des ressources fourragères (Andrieu *et al.*, 2007), au niveau du troupeau (Cournut et Dedieu, 2004) ou de l'interaction entre ces deux

composantes (Jouven et Baumont, 2008 ; Martin, 2009). Au niveau du **troupeau**, l'animal est l'entité élémentaire à l'interface entre processus biologiques et pratiques de conduite. La variabilité des réponses individuelles constitue un processus central dont le rôle reste à quantifier.

Enjeux scientifiques autour de la variabilité individuelle

Les notions de diversité et variabilité, mobilisées par les sciences animales entre autres disciplines scientifiques, sont clairement distinctes. La diversité est une notion statique. Sur le plan étymologique, elle *« vient du latin diversitas « divergence, contradiction » et « variété, différence ». C'est le caractère, l'état de ce qui est divers* » (Rey, 2005). La variabilité est au contraire une notion dynamique. *« Le terme variabilité est emprunté au latin variabilis « sujet à varier», […] qui est susceptible de se modifier de changer souvent au cours du temps »* (*ibid.*). Comme le souligne Jacob (1986), variabilité et diversité jouent un rôle central pour expliquer le développement de la vie : *« […] il ne peut y avoir de sélection, donc de changement qu'entre ce qui n'est pas identique. C'est la variabilité individuelle qui nourrit l'évolution. C'est parce que les individus présentent des singularités héréditaires qu'ils se reproduisent différentiellement, que certains laissent une descendance plus nombreuse que d'autres. Pour Wiessmann, la sexualité, avec l'extraordinaire variété de ses formes dans le monde vivant, prenait un sens si elle servait à produire la variabilité individuelle ».* Ces rôles moteurs de la variabilité et de la diversité dans les mécanismes liés à l'évolution expliquent l'intérêt continu et soutenu de différentes disciplines scientifiques.

En écologie comportementale, l'enjeu est de comprendre pourquoi la variabilité d'un trait phénotypique se maintient dans une population (Réale *et al.*, 2007). En biologie des populations, l'aptitude d'une population à persister dans le temps dépend fortement du degré et des modalités de la variabilité individuelle (Grimm *et al.*, 1999). L'écologie végétale met l'accent sur la diversité qui est envisagée sous l'angle de l'hypothèse « d'assurance temporelle » (Yachi et Loreau 1999). Cette hypothèse propose que la diversité joue le rôle d'une assurance face aux variations environnementales si les espèces sont fonctionnellement complémentaires dans le temps. Ainsi en environnement fluctuant, les écosystèmes à plus forte diversité ont une productivité temporelle moyenne supérieure et une plus faible variance de leur productivité. En écophysiologie, Bennett (1987) repris ensuite par Williams (2008) évoquent « *the tyranny of the Golden Mean* » et remettent en question la seule considération

de la moyenne des variables étudiées. Ces auteurs arguent que l'étude des processus physiologiques serait enrichie par l'observation des causes et des conséquences de la variabilité des réponses individuelles des organismes.

En sciences animales, jusqu'à présent, la variabilité a surtout été étudiée et exploitée par les généticiens dans un objectif de sélection. Elle permet d'identifier des caractéristiques individuelles « à sélectionner ». A titre d'exemple, les travaux de Mialon *et al.* (2001) sur la quantification des différentes sources de variance résiduelle de la durée d'anoestrus post-partum visent à identifier la part d'aptitude individuelle qui explique la variance de ce trait et à évaluer les possibilités de sélection. La variabilité individuelle est également abordée dans les autres domaines des sciences animales avec l'idée qu'elle n'est pas seulement un bruit aléatoire à contrôler par des traitements statistiques appropriés mais que la compréhension de ses déterminants permettrait de mieux connaître et gérer les individus. La variabilité individuelle est alors un moyen d'identifier des caractéristiques individuelles « à gérer ». Faire progresser les connaissances sur ses déterminants est par exemple nécessaire pour concevoir des **stratégies d'alimentation** qui limitent les risques de problèmes sanitaires ou de reproduction (Ingvartsen et Friggens, 2005) ou encore pour identifier les différences individuelles dans les capacités d'adaptation au stress métabolique en début de lactation (Kessel *et al.*, 2008). En système de production d'animaux monogastriques, la maitrise du niveau d'alimentation et de la variabilité des performances d'un lot sont des questions centrales (Pomar *et al.*, 2003 ; O'Connell *et al.*, 2005 ; Brossard *et al.*, 2009). Ces travaux pointent l'importance de la variabilité individuelle pour prédire les réponses d'une population à un traitement.

En zootechnie des systèmes d'élevage, la variabilité individuelle est abordée par la diversité des **carrières** animales au sein du troupeau. La carrière décrit le déroulement du cycle biologique d'un animal, le plus souvent d'une femelle, par l'enchaînement des **événements** individuels caractérisant sa vie sur le plan de sa croissance, de sa production, de sa reproduction et de son état sanitaire, de sa naissance à sa mort ou à sa réforme (Lasseur et Landais, 1992). Elle est également vue comme la résultante d'**interactions** entre les caractéristiques propres de l'animal et celles relatives à son environnement (Coulon *et al.*, 1993). Dans le contexte des systèmes d'élevage extensifs, la diversité des carrières a été initialement étudiée comme une source de régulation du fonctionnement du troupeau (Santucci, 1991 ; Moulin, 1993 ; Gibon, 1994). Elle est aujourd'hui envisagée comme un

moyen de segmenter le troupeau pour mettre au point des pratiques ciblées valorisant au mieux les aptitudes individuelles (*e.g.* systèmes ovins australiens : Lee *et al.*, 2009). Dans les systèmes d'élevage intensifs, sa prise en compte est plus récente (*e.g.* porcins : Martel *et al.*, 2008 ; ovins : Cournut et Dedieu, 2004).

Le fonctionnement du troupeau vu sous l'angle de la construction conjointe de la variabilité individuelle par les pratiques de conduite et le fonctionnement biologique des animaux est un objet de recherche **complexe**, de par le nombre important de composantes qui interagissent, à travers des fonctions compliquées, à différents niveaux hiérarchisés d'organisation. La **modélisation** apparait comme une méthodologie adaptée à l'exploration du rôle de la variabilité au sein d'un troupeau. Elle représente un moyen de formalisation des différents niveaux d'organisation du troupeau et de leurs interactions avec le pilotage. La modélisation est donc un outil puissant pour étudier de façon dissociée puis combinée les effets de différents « leviers » à l'origine de la variabilité et évaluer en retour le rôle de cette variabilité dans la performance globale du troupeau.

Objectifs

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un **simulateur individu-centré** du fonctionnement du troupeau **caprin laitier** intégrant les principaux mécanismes d'élaboration des performances. Ces mécanismes concernent les réponses biologiques individuelles sous l'effet des pratiques de conduite. Il s'agit de formaliser explicitement l'effet de ces pratiques sur le déroulement des cycles biologiques individuels. En termes de type de pratiques, nous nous focalisons sur les leviers majeurs des réponses biologiques que sont les pratiques de conduite de la reproduction, de l'alimentation et de renouvellement. Les pratiques de conduite sanitaire et de sélection génétique ne sont pas considérées dans ce travail, bien qu'elles soient potentiellement importantes par rapport au fonctionnement du troupeau.

Le simulateur est envisagé comme un **outil de recherche** et non comme un outil d'aide à la décision. C'est un outil pour étudier l'effet des pratiques de conduite sur la variabilité individuelle au sein d'un troupeau. C'est également un outil pour quantifier le lien entre performance au niveau du troupeau et variabilité individuelle. Son développement a été structuré par quatre grandes questions. Les deux premières questions correspondent à des verrous méthodologiques. Les deux suivantes traitent du rôle de la variabilité dans le troupeau.

- Au niveau du troupeau, les concepts disponibles dans les modèles de fonctionnement du troupeau sont-ils opérationnels pour représenter l'interaction entre pratiques et réponses individuelles et permettre ainsi l'étude de la variabilité individuelle ?
- Au niveau de l'animal, quelle structure minimale permet d'incorporer les déterminants biologiques majeurs de la variabilité individuelle ?
- Quels sont les effets (relatifs et combinés) des pratiques de conduite sur la variabilité individuelle des réponses biologiques et quel est, en retour, le rôle de cette variabilité dans l'élaboration des performances du troupeau ?
- La prise en compte d'indicateurs de l'efficacité du processus d'élaboration des réponses individuelles permet-elle d'enrichir le diagnostic des effets des pratiques au niveau individuel et troupeau ?

Démarche et organisation du manuscrit

L'objet de recherche de ce travail est **la construction de la variabilité individuelle à partir des réponses biologiques et des pratiques de conduite**. Cet objet spécifie deux grandes caractéristiques du simulateur. Celui-ci doit intégrer une composante décisionnelle, *i.e.* un modèle de gestion technique et une composante biologique, *i.e.* un modèle de chèvre laitière. L'objet d'étude de ce travail de thèse est le fonctionnement du troupeau. Cet objet est clairement défini par la communauté des zootechniciens « systèmes d'élevage » : le fonctionnement du troupeau correspond à l'interaction dynamique entre un système décisionnel, à l'origine des pratiques, et un système biotechnique, à l'origine des performances (Gibon, 1999; Dedieu *et al.*, 2008).

Le domaine d'application de ce travail cible les **troupeaux caprins laitiers de Poitou-Charentes**. Ces systèmes intensifs, souvent considérés comme peu économes et surtout peu autonomes, sont particulièrement sensibles à la maitrise des coûts de production. La maîtrise et l'optimisation du plan de rationnement des lots, l'allongement de la longévité des femelles pour amortir la phase d'élevage, la maitrise de la reproduction pour homogénéiser les stades physiologiques et limiter le temps improductif des femelles sont autant de pistes pour améliorer les performances de ces élevages. Ces leviers techniques doivent s'envisager dans le contexte d'agrandissement des troupeaux et de simplification de la gestion. La

compréhension des effets des pratiques sur la variabilité individuelle est un enjeu majeur pour comprendre comment s'élaborent les performances des systèmes caprins laitiers et identifier des marges de manœuvre techniques pour améliorer le processus de production.

La Figure 1 présente l'architecture générale du manuscrit. Le **premier chapitre** du document présente une revue des modèles existants de fonctionnement du troupeau du point de vue de la représentation de la variabilité individuelle et débouche sur le cahier des charges du modèle. Le développement du simulateur a été structuré en deux sous-projets. Chaque modèle a été développé comme un projet de modélisation à part entière, comprenant une analyse des connaissances disponibles, une phase d'élaboration d'un modèle conceptuel et une phase d'implémentation informatique. Le **second chapitre** présente donc le modèle individuel de chèvre laitière. Le développement du modèle de gestion technique ainsi que sa connexion avec les modèles individuels pour aboutir au simulateur de fonctionnement du troupeau sont décrits dans le **troisième chapitre**. Ce chapitre présente également l'utilisation du simulateur dans le cadre de plans d'expériences permettant de tester 14 scénarios de modification des leviers de conduite. Dans le **quatrième chapitre,** la démarche globale de la thèse ainsi que les pistes d'améliorations des différentes composantes du simulateur sont discutées. Enfin, ce chapitre propose des perspectives de recherche ouvertes par la question du pilotage de la variabilité individuelle dans les troupeaux.

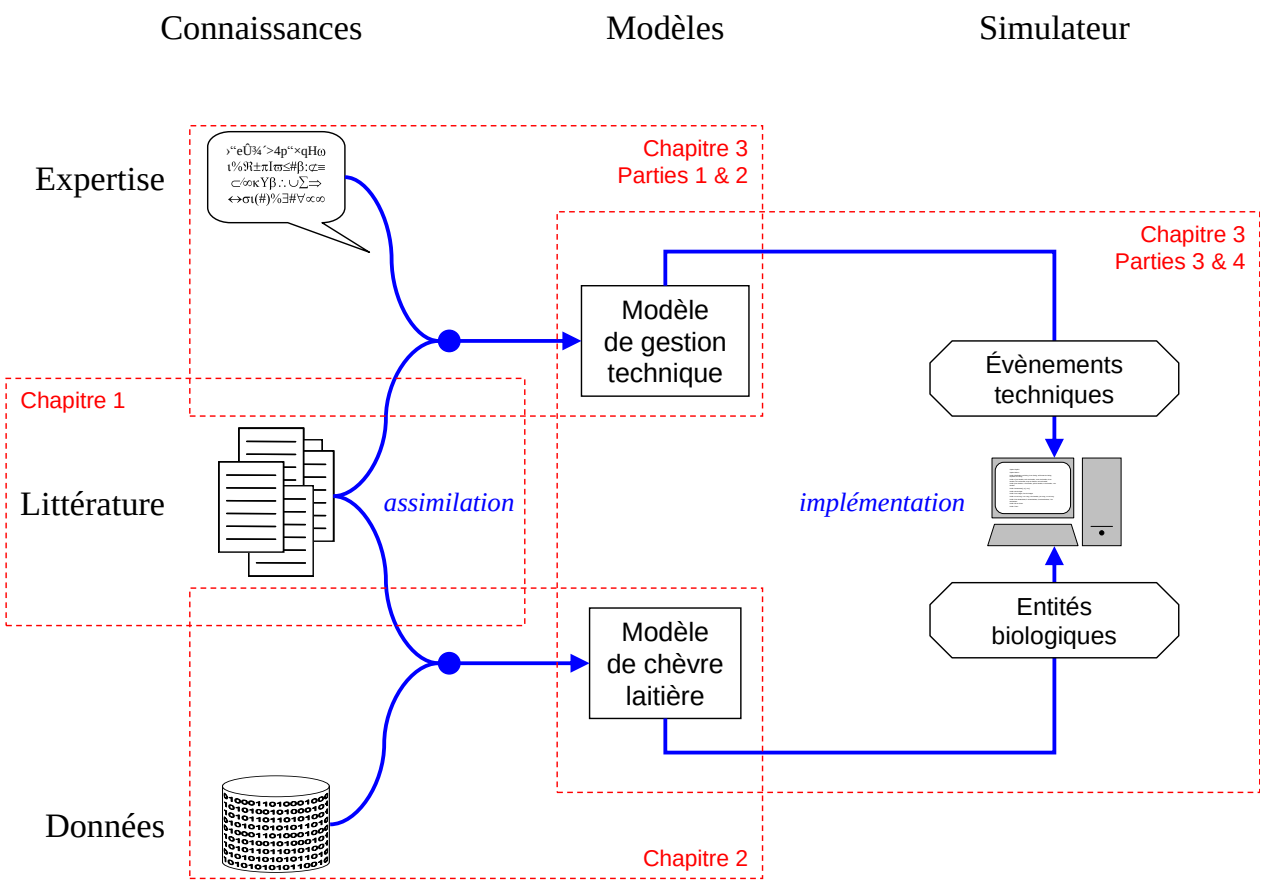


Figure 1 Schéma global de la démarche mise en œuvre dans la thèse

Références bibliographiques

Andrieu N, Poix C, Josien E et Duru M, 2007. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. Computers and Electronics in Agriculture 55, 36-48.

Bennett AF, 1987. Interindividual variability: an underutilized resource. In : New directions for ecological physiology. Feder ME, Bennett AF, Burggren WW et Huey RB (Eds). Cambridge University Press, New York, USA. 147-169.

Brossard L, Dourmad JY, Rivest J et van Milgen J, 2009. Modelling the variation in performance of a population of growing pig as affected by lysine supply and feeding strategy. Animal 3, 1114-1123.

Coulon JB, Lescourret F, Faye B, Landais E, Troccon JL et Pérochon L, 1993. Description de la base de données "LASCAR", un outil pour l'étude des carrières des vaches laitières. INRA Productions Animales 6, 151-160.

Cournut S et Dedieu B, 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. Animal Research 53, 383-403.

Dedieu B, Faverdin P, Dourmad JY et Gibon A, 2008. Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. INRA Productions Animales 21, 45-58.

Klopčič M, Reents R, Philipsson J et Kuipers A (Eds) 2009. Breeding for robustness in cattle. EAAP Publication n°126. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands. 281pp.

Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds) 2008. L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptations des exploitations d'herbivores. Editions Quae, Versailles, France. 294pp.

Gibon A, 1994. Landscape preservation objectives and the sheep flock management in Meditarranean moutains. Proceedings of a meeting held within the technical consultation of the FAO-CIHEAM Network on Cooperative Sheep and Goat Research, Thessaloniki, Greece, 19-22 June 1994, 188-193.

Gibon A, Sibbald AR, Flamant JC, Lhoste P, Revilla R, Rubino R et Sorensen JT, 1999. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. Livestock Production Science 61, 121-137.

Grimm V, Wyszomirski T, Aikman D et Uchmanski J, 1999. Individual-based modelling and ecological theory: synthesis of a workshop. Ecological Modelling 115, 275-282.

Ingvartsen KL et Friggens NC, 2005. To what extent do variabilities in hormones, metabolites and energy intake explain variability in milk yield? Domestic Animal Endocrinology 29, 294-304.

Jacob F, 1986. Le jeu des possibles. LGF-Livre de Poche, Paris.

Jouven M et Baumont R, 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. Agricultural Systems 96, 260-272.

Kessel S, Stroehl M, Meyer HHD, Hiss S, Suaerwein H, Schwarz J et Bruckmaier RM, 2008. Individual variability in physiological adaptation to metabolic stress during early lactation in dairy cows kept under equal conditions. Journal of Animal Science 86, 2903-2912.

Landais E et Balent G, 1993. Introduction à l'étude des systèmes d'élevage extensif. INRA, Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement 27, 13-35.

Lasseur J et Landais E, 1992. Mieux valoriser l'information contenue dans les carnets d'agnelages pour évaluer des performances et des carrières de reproduction en élevage ovin-viande. INRA Productions Animales 5, 43-58.

Lee GJ, Atkins KD et Sladek MA, 2009. Heterogeneity of lifetime performance, its components and associations with wool production and liveweight of Merino ewes. Animal Production Science 49, 624-629.

Martel G, Dourmad JY et Dedieu B, 2008. Simulation of sow herd dynamics with emphasis on performance and distribution of periodic task events. Journal of Agricultural Science 146, 345-380.

Martin G, 2009. Analyse et conception de systèmes fourragers flexibles par modélisation systémique et simulation dynamique. Thèse de doctorat, SEVAB, Toulouse, France.

Mialon MM, Renand G, Krauss D et Ménissier F, 2001. Variability of the postpartum recovery of sexual activity of Charolais cows. Livestock Production Science 69, 217-226.

Moulin CH, 1993. Le concept de fonctionnement de troupeau. Diversité des pratiques et variabilité des performances animales dans un système agropastoral sahélien. INRA, Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement 27, 73-94.

O'Connell NE, Beattie VE et Watt D, 2005. Influence of regrouping strategy on performance, behaviour and carcass parameters in pigs. Livestock Production Science 97, 107-115.

Pomar C, Kyriazakis I, Emmans GC et Knap PW, 2003. Modeling stochasticity: Dealing with populations rather than individual pigs. Journal of Animal Science 81, E.Suppl.2, 178-186.

Réale D, Reader SM, Sol D, McDougall PT et Dingemanse NJ, 2007. Integrating animal temperament within ecology and evolution. Biological Reviews 82, 291-318.

Rey A, 2005. Dictionnaire culturel en langue française. Editions Le Robert, Paris.

Santucci P, 1991. Le troupeau et ses propriétés régulatrices, bases de l'élevage extensif. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France.

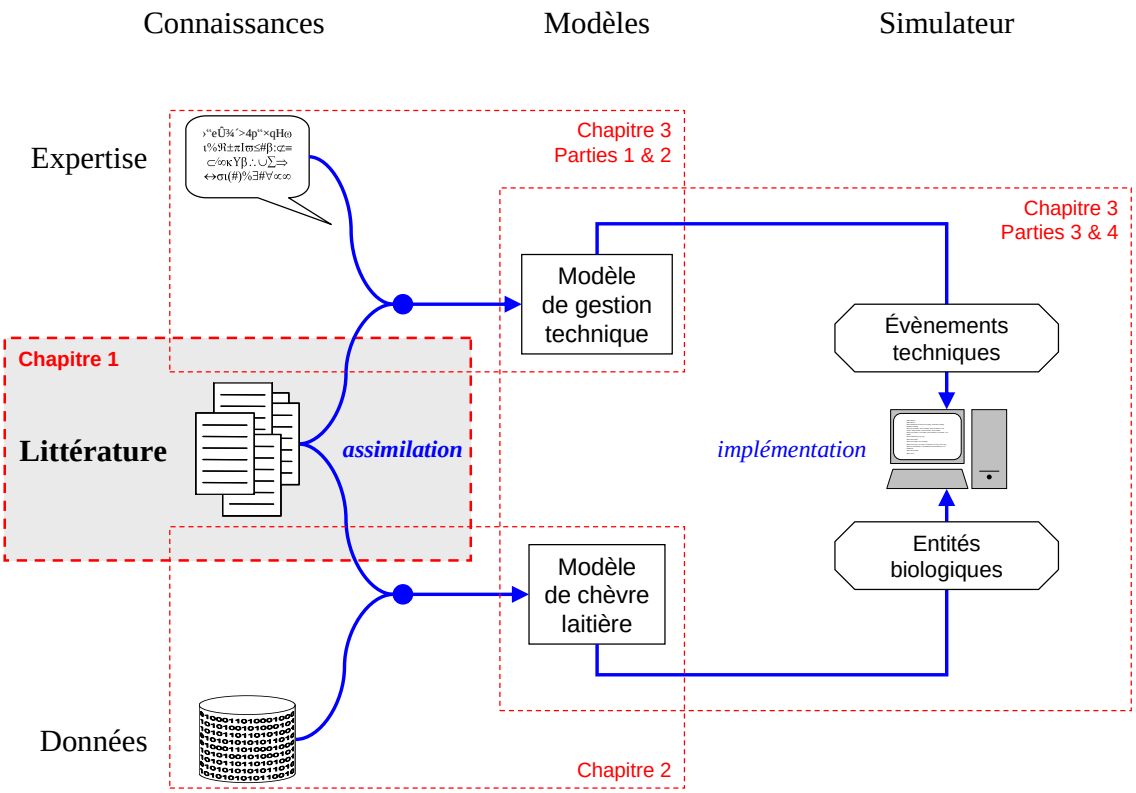
Yachi S et Loreau M, 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment; the insurance hypothesis. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 96, 1463-1468.

Williams TD, 2008. Individual variation in endocrine systems: moving beyond the "tyranny of the Golden Mean". Philosophical Transactions of the Royal Society B 363, 1687-1698.

Chapitre I Représentation de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau

Il n'y a pas de modèle pour qui cherche ce qu'il n'a jamais vu.

Paul Eluard



1 Introduction

Les travaux de recherche sur le fonctionnement du troupeau visent à améliorer notre compréhension de la façon dont les décisions de conduite interagissent avec les comportements productifs d'animaux pour donner lieu à une production (niveau et répartition dans le temps) et au renouvellement du troupeau sur plusieurs années (Tichit *et al.*, 2004). Le fonctionnement du troupeau est formalisé comme l'interaction dynamique entre un système décisionnel et un système biotechnique (Dedieu *et al.* 2008). Le système décisionnel est à l'origine des pratiques de conduite dont les actions sur le système biotechnique produisent en retour un certain nombre de réponses, source d'information pour le système décisionnel. Cette interaction entre le système décisionnel et le système biotechnique détermine le déroulement des cycles biologiques des individus au sein du troupeau.

La carrière est un objet d'étude pour décrire le déroulement du cycle d'un individu dans le troupeau et étudier les performances animales en réponse aux pratiques sur le long terme. La carrière est un objet partagé sur lequel les zootechniciens et les physiologistes ont développés des questions de recherche spécifiques. Les zootechniciens analysent les carrières pour diagnostiquer les pratiques de conduite d'un troupeau (Landais, 1987 ; Roux, 1992 ; Moulin, 1993) ou encore les interactions entre l'animal et son environnement (Coulon *et al.* 1993). Les physiologistes s'intéressent à la carrière comme le résultat des arrière-effets entre fonctions physiologiques (Gunn, 1977 ; Broster et Broster, 1984 ; Rhind *et al.*, 1998).

Les pratiques de conduite pilotent le déroulement des carrières individuelles au sein du troupeau de plusieurs façons. Tout d'abord, les pratiques de renouvellement déterminent le début et la fin du séjour d'un individu dans le troupeau, conditionnant ainsi sa longévité. Les pratiques de reproduction conditionnent le rythme de la succession des cycles gestation-lactation et donc la dynamique des stades physiologiques. Enfin, les pratiques d'alimentation déterminent le niveau et le rythme de distribution des ressources à l'individu. Les pratiques, en plus d'intervenir sur le déroulement des cycles biologiques, ciblent différents niveaux d'organisation et peuvent ainsi être raisonnées par rapport au troupeau, au lot ou à l'individu. Par exemple, les pratiques de réforme combinent une composante quantitative et qualitative.

La première porte sur le nombre de femelles à réformer qui se raisonne à l'échelle du troupeau (politique d'effectifs et taille du troupeau) et du lot. La seconde concerne les caractéristiques des femelles à réformer et se raisonne à l'échelle de l'individu. Les pratiques de conduite sont ainsi une source de variabilité des cycles individuels par la diversité de leurs effets sur les individus et par la combinaison de différents niveaux d'organisation ciblés.

Le fonctionnement biologique des individus constituent la seconde source de variabilité des cycles au sein du troupeau. Celui-ci est conditionné par le génotype et par l'expression du génotype permise par l'environnement d'élevage. L'allocation d'énergie à l'individu est un des leviers majeurs de l'expression de son génotype. La partition de l'énergie acquise par l'individu entre les différentes fonctions biologiques est assurée par les régulations physiologiques. A court terme, ces régulations correspondent aux régulations d'homéostase qui assurent le maintien de la constance du milieu intérieur (*e.g.* réponse glycémique post-prandiale, Sauvant, 1994). A long terme, ces régulations correspondent aux régulations d'homéorhèse (ou de téléophorèse) qui permettent l'enchaînement des différents stades physiologiques en pilotant les priorités relatives d'allocation d'énergie aux différentes fonctions biologiques (Bauman et Currie, 1980). Le pilotage de la partition d'énergie par les régulations est une des sources majeures de variabilité des réponses biologiques individuelles et des capacités d'adaptation des individus à leur environnement. Les réserves corporelles jouent un rôle central par rapport à la partition d'énergie en assurant le stockage ou à l'inverse la fourniture d'énergie aux fonctions. Elles permettent ainsi de tamponner les variations de disponibilité des ressources. Elles ont également un rôle central dans la régulation des fonctions reproductives. Leur niveau et leur dynamique d'utilisation conditionnent fortement l'engagement d'une femelle dans un nouveau cycle de reproduction (Friggens, 2003). Elles sont ainsi un élément clé des interactions entre les fonctions de nutrition et de reproduction.

La variabilité du déroulement des cycles biologiques individuels est ainsi déterminée par les interactions entre le pilotage, la variabilité des potentiels génétique et l'expression des régulations. C'est une composante clé pour comprendre l'effet des pratiques sur le fonctionnement du troupeau et pour déterminer les réponses du troupeau à partir des réponses élaborées aux niveaux d'organisations sous-jacents (Figure 2). En raison de son origine multi-niveaux, l'analyse du rôle de la variabilité des carrières individuelles dans le fonctionnement du troupeau est une question difficile à traiter. Les modèles constituent une ressource méthodologique pour améliorer notre compréhension des interactions pratiques / individus et

faire progresser notre capacité à prédire les réponses du troupeau aux pratiques de conduite (Tichit *et al.*, sous presse).

Depuis une vingtaine d'années, un grand nombre de modèles de fonctionnement du troupeau ont été développés. Ces modèles représentent le fonctionnement du troupeau comme l'interaction entre un système décisionnel et un système biotechnique. Ils intègrent ainsi au minimum une composante décisionnelle et une composante biologique. Ils prennent en compte de façon inégale la variabilité individuelle et ses déterminants. L'objectif de cette synthèse bibliographique est d'analyser comment les modèles de fonctionnement du troupeau existants ont représenté les composantes décisionnelle, *i.e.* les pratiques, et biologique, *i.e.* l'animal, et dans quelle mesure ces représentations sont opérationnelles pour étudier le rôle de la variabilité individuelle dans le fonctionnement du troupeau.

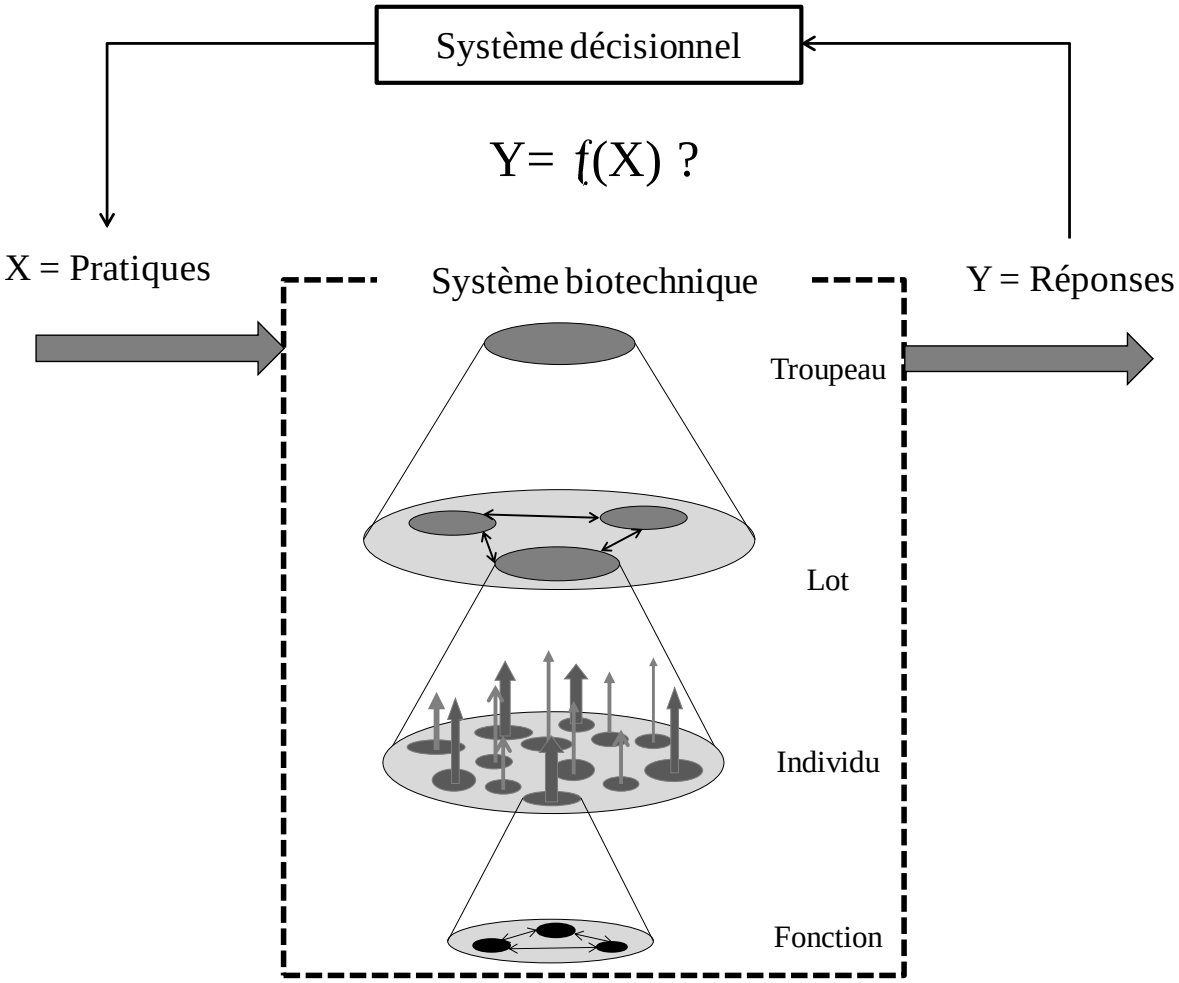


Figure 2 Représentation conceptuelle de l'élaboration des réponses du troupeau sous l'effet des pratiques aux différents niveaux d'organisation du système.

Cette synthèse porte sur les modèles de simulation du fonctionnement de troupeaux de ruminants, laitiers ou allaitants, inséré ou pas dans l'exploitation agricole. L'analyse porte principalement sur les modèles sources et non sur les différentes adaptations qui ont pu en découler, comme par exemple le modèle de troupeau bovin allaitant de Sanders et Cartwright (1979) repris, entre autres, par Kahn et Spedding (1983) ou Bourdon et Brinks (1987). Les modèles d'optimisation ont été exclus de l'analyse (*e.g.* Kristensen, 1987 ; Vargas *et al.*, 2001). En effet, l'optimisation dynamique implique de limiter le nombre d'états et de contrôle du système pour éviter les problèmes d'explosion combinatoire. Le corollaire de cette contrainte technique est que les modèles d'optimisation restent frustres tant du point de vue de la composante décisionnelle que de la représentation de la variabilité. De même, les travaux de modélisation du système fourrager où le troupeau est représenté comme une fonction de prélèvement constante (Cros *et al.*, 2001) n'ont pas été considérés.

La première partie étudie les différentes représentations de la composante biologique, à la fois en termes de type de réponses biologiques modélisées et également en termes de représentation des mécanismes d'élaboration de ces réponses. La seconde partie analyse les différentes représentations de la composante décisionnelle, à la fois en termes de niveau d'organisation utilisé comme support du raisonnement des pratiques et de type de pratiques représenté. La dernière partie récapitule les limites des modèles existants par rapport à la représentation de la variabilité. Elle propose un cahier des charges pour le développement d'un modèle intégrant explicitement la variabilité individuelle des carrières et permettant d'étudier son rôle dans le fonctionnement d'un troupeau laitier.

2 Représentation de la composante biologique dans les modèles de fonctionnement du troupeau

Quelles sont les réponses biologiques utilisées pour représenter les individus dans les modèles de fonctionnement du troupeau et quelle formalisation de l'élaboration de ces réponses ont été proposées ?

2.1 L'individu, une réponse reproductive

Un premier ensemble de modèles formalise l'individu par sa fonction reproductive. Cette fonction est considérée soit comme le moteur de la dynamique des stades physiologiques, soit comme le moteur de la dynamique des effectifs du troupeau ou encore comme la combinaison de ces deux composantes.

Les modèles envisageant la reproduction comme le moteur de la dynamique des stades physiologiques représentent l'individu par son stade physiologique, sans considération de son âge. La structure démographique du troupeau n'est donc pas prise en compte. Le modèle de Benoit (1998) simule la dynamique des effectifs de femelles vides ou gestantes dans deux groupes de lutte. Ces groupes ont des fertilités différentes (effet de la saison). Une proportion donnée de femelles restées vides après la lutte peut être transférée dans l'autre groupe de lutte afin d'avoir une nouvelle opportunité de reproduction. Le modèle de Denham *et al.* (1991) considère également les femelles gestantes ou vides mais distingue en plus les femelles cyclées. Ces deux approches sont déterministes : les femelles ont toutes la même probabilité de cyclicité ou de conception. Pleasants (1997) va plus loin et propose une approche stochastique dans laquelle des distributions de probabilité de conception et de durée de gestation permettent de prédire la distribution des mises-bas.

Les modèles envisageant la reproduction comme le moteur de la dynamique des effectifs du troupeau représentent l'individu principalement par son âge. Les modèles matriciels d'Upton (1993), de Schmitz (1997) et de Lesnoff (1999) répartissent les individus dans des classes d'âges et de sexe. Les transitions entre classes sont gérées par des probabilités de fertilité ou de survie, fonction de l'âge. Ces modèles testent l'effet des probabilités de survie

ou de fertilité sur l'évolution des effectifs. La probabilité de fertilité est le moteur de génération des individus dans chaque classe d'âge.

Les modèles envisageant la reproduction comme le moteur de la dynamique des stades physiologiques et des effectifs intègrent à la fois l'âge et le statut physiologique des individus. Le modèle d'Azzam *et al.* (1990) repris par Werth *et al.* (1991) considère des classes d'individus basées sur l'âge. Au sein de ces classes, les individus ont une probabilité d'atteinte de la puberté, de cyclicité et de fécondation. Dans cette approche, le processus de reproduction est décomposé en une succession d'états physiologiques (pubère, cyclique, fécondée, …). Les transitions entre états dépendent de l'âge ou encore de certains traits déterminés de façon stochastique (*e.g.* l'occurrence d'une dystocie à la mise-bas, générée par une distribution de probabilité, influence la durée de l'anoestrus post-partum). La décomposition du processus de reproduction en une succession d'états physiologiques a été approfondie par les approches individu-centrées. Le modèle de Johnson et Notter (1987) représente chaque individu par un taux de conception à la première saillie et une durée d'anœstrus post-partum. Ces traits sont déterminés aléatoirement afin d'analyser la relation entre leur variance et la variance du taux de mise bas annuel du troupeau. Le modèle d'Oltenacu *et al.* (1980) propose un découpage fin du processus de reproduction sur la base de l'occurrence d'évènements biotechniques: une mise-bas est le résultat d'une ovulation, de l'apparition d'un œstrus, de la détection de cet œstrus, de la fécondation et de l'absence de mortalité embryonnaire. Les probabilités d'occurrence des évènements dépendent de l'âge et de certains aspects de gestion (*e.g.* taux de détection des chaleurs). Le modèle de Cournut et Dedieu (2004) propose un découpage moins fin du processus de reproduction mais intègre les effets du passé reproductif des animaux sur leur performances : les probabilités de fertilité et de fécondation d'une femelle dépendent de sa réussite ou de son échec lors de la session de reproduction précédente. Le modèle de Pérochon *et al.* (2009) intègre les effets de la note d'état et de la date de vêlage sur la durée de l'anoestrus post-partum sur la base du modèle proposé par Blanc et Agabriel (2008).

2.2 L'individu, une réponse productive potentielle

Les modèles qui formalisent l'individu par rapport à ses réponses productives potentielles intègrent systématiquement la dynamique biologique liée au processus de reproduction. Ces modèles approfondissent la représentation de l'individu, depuis une entité qui vieillit et dont

le statut physiologique change au cours du temps, vers une entité exprimant des réponses productives potentielles.

Le modèle d'Oltenacu *et al.* (1980) a été enrichi en caractérisant chaque femelle par une courbe de production laitière (Wood, 1967) et intègre donc l'effet du niveau de production sur la fertilité (Oltenacu *et al.*, 1981). Cette approche est également reprise par Marsh *et al.* (1987) pour d'évaluer l'effet des politiques de réforme basées sur des critères reproductifs et laitiers.

Une étape supplémentaire dans la formalisation des réponses individuelles s'appuie sur l'utilisation des systèmes de recommandations alimentaires. Les réponses productives de l'individu sont déterminées par son potentiel de production et par la dynamique des stades physiologiques. L'individu réalise alors une trajectoire potentielle de production correspondant à l'expression de son génotype. Cette trajectoire permet de prédire la dynamique des besoins de l'individu. Cette représentation de l'individu vu comme un générateur de réponses et un consommateur de ressources a été largement utilisée pour tester les effets des pratiques de conduite du troupeau sur les coûts de production. Les pratiques testées sont assez diversifiées : l'effet du nombre de périodes de lutte (Guimaeres *et al.*, 2009), les effets de la reproduction et de la réforme (Congleton, 1984) ou encore les effets du type de croisement génétique (Wolfova *et al.*, 2005). Cette représentation de l'individu permet également de tester des scénarios conçus à l'échelle de l'exploitation d'élevage. Le modèle de Jouven et Baumont (2008) utilise les performances animales pour prédire les besoins en matière sèche du troupeau et évaluer les effets du pâturage sur l'évolution de la biomasse des prairies. Les modèles de Rotz *et al.* (1999, 2005) ou de Shalloo *et al.* (2004) utilisent les besoins du troupeau pour prédire les flux de matière et d'énergie entre les ateliers de production et tester différentes stratégies de gestion de l'exploitation agricole. Certaines approches ont détourné l'utilisation des performances potentielles pour se diriger vers une représentation des performances permises par les ressources. Le modèle d'Ezanno (2005) considère les femelles réparties dans des classes d'âges, de statuts physiologiques et de notes d'état corporel. Les transitions entre classes dépendent de la note d'état. Ce modèle considère que les stratégies de complémentation du troupeau génèrent des proportions variables d'individus dans les différentes classes de notes d'état. Ces différentes proportions d'individus ont un impact sur la dynamique des effectifs et les résultats de reproduction. Ainsi, le modèle permet d'étudier indirectement les effets de l'alimentation sur les

performances du troupeau. Ce type d'approche demande une étude empirique approfondie (suivi pluriannuel des variations de notes d'états des animaux) pour calculer les probabilités de transition entre classes.

2.3 L'individu, une réponse productive réalisée

L'intégration des effets de l'environnement sur l'expression du potentiel de production demande de modéliser l'allocation de nutriments aux différentes fonctions productives. La formalisation des performances de l'individu repose alors non plus sur des modèles de besoins mais sur des modèles de réponses. Certains modèles troupeaux intègrent des modèles individuels développés antérieurement (*e.g.* le modèle de Zom *et al.* utilisé par Schils *et al.*, 2008; le modèle de Freer, 1997 utilisé par Romera *et al.*, 2004). D'autres modèles ont développés leurs propres équations (*e.g.* Sanders et Cartwright, 1987 ; Tess et Kolstad, 2000a). La réponse à l'alimentation est basée sur une simplification des mécanismes physiologiques de nutrition à l'exception du modèle de Beukes *et al.* (2008). Ce modèle d'exploitation laitière herbagère simule le fonctionnement métabolique de la vache laitière en s'appuyant sur une adaptation proposée par Palliser *et al.* (2001) du modèle Molly (Baldwin *et al.*, 1987). Ce modèle ne simule cependant qu'une seule année de fonctionnement de l'exploitation. Le principe de base des modèles de réponse est de confronter le besoin de l'individu défini par son potentiel de production à l'offre alimentaire. Cette confrontation génère un différentiel d'énergie ventilé entre les différentes fonctions de l'individu. Certains modèles affectent directement ce différentiel au poids vif (Chardon, 2008 ; Vayssières *et al.*, 2009), d'autres formalisent explicitement le système de règles de priorités entre fonctions (*e.g.* Sanders et Cartwright, 1987). Bien que la partition des nutriments soit au cœur des modèles de réponses, seuls Tess et Kolstad (2000a) mentionnent explicitement les régulations d'homéorhèse comme pilotes de cette partition. Les auteurs résument les effets des régulations dans quatre règles statiques d'affectation de l'énergie aux fonctions. La représentation des réponses de l'individu à l'offre alimentaire a permis d'élargir le champ d'utilisation des modèles, principalement par rapport à l'alimentation. Les modèles se sont principalement intéressés aux effets:

- de la gestion du pâturage sur les performances productives (White *et al.*, 1983 ; Cacho *et al.*, 1995 ; Romera *et al.*, 2004) ;

- d'un environnement donné sur l'expression d'un génotype (Sanders et Cartwright, 1979 ; Blackburn et Cartwright, 1987a ; Tess et Kolstad, 2000a);

- des stratégies d'alimentation (Sorensen *et al.*, 1992 ; Bosman *et al.*, 1997 ; Vayssières *et al.*, 2009) ;

- des stratégies de vêlages (Pérochon *et al.*, 2009 ; Villalba *et al.*, 2009).

L'intégration des réponses à l'alimentation a également permis de représenter les effets des réserves sur les réponses reproductives. Par exemple, Bosman *et al.* (1997) utilisent le ratio entre le poids vif de l'individu et son poids vif optimal pour corriger la probabilité de mise-bas. Tess et Koldstad (2000a) utilisent la note d'état corporel pour moduler la longueur de l'anoestrus post-partum. Blackburn et Cartwright (1987a) combinent un indicateur du niveau des réserves corporelles et un indicateur du changement de ces réserves sur la période précédente pour déterminer la probabilité de conception de l'individu. Ces effets sont introduits de façon empirique grâce à un ensemble de relations entre les indicateurs relatifs au poids vif et la probabilité de fécondation ou de mise-bas.

L'ensemble de ces travaux montre que la reproduction est la fonction biologique minimale représentée dans les modèles troupeaux. La représentation de l'individu sous l'angle de sa fonction reproductive a évolué depuis une approche descriptive de la variabilité des stades ou de l'âge vers une approche où la variabilité est générée de façon aléatoire par une succession de probabilités de transition entre états, depuis l'ovulation jusqu'à la mise bas. Quelque soit le niveau de formalisation de l'individu, celui-ci reste empirique et repose sur des distributions de probabilités, dépendantes de la disponibilité des données. La considération de la seule composante reproductive limite la représentation de la variabilité individuelle puisque la performance d'un individu se limite à sa productivité numérique.

Les modèles intégrant les réponses potentielles des individus ont enrichi la représentation de la variabilité individuelle en combinant plusieurs indicateurs du fonctionnement biologique. Cependant, dans ces approches, la variabilité est envisagée d'un point de vue descriptif. Elle ne dépend que de la dynamique des stades physiologiques et du potentiel de production. Ce dernier est le plus souvent présenté comme un paramètre permettant le calcul des équations déterminant les besoins. La façon dont les valeurs de potentiel de production sont attribuées aux individus est rarement explicitée par les auteurs.

Le raffinement de la formalisation des fonctions productives a abouti à l'intégration de modèles individuels simulant les performances en réponse à l'alimentation. Les performances résultent alors de l'allocation des nutriments aux différentes fonctions de production. Bien que certains modèles intègrent des niveaux de réponses liés au métabolisme, très peu de modèles abordent le pilotage de la partition des nutriments par les régulations. D'une façon générale, les modèles existants ne proposent pas de vision intégrée de l'animal, vu comme un système ayant son propre fonctionnement biologique au sein du troupeau.

3 Représentation de la composante décisionnelle dans les modèles de fonctionnement de troupeau

Quelles les pratiques de conduite représentées dans les modèles de fonctionnement du troupeau et quels sont les niveaux d'organisation utilisés comme support du raisonnement de ces pratiques ?

3.1 Le troupeau, niveau agrégé de gestion de la reproduction et du renouvellement

Le troupeau est le niveau le plus agrégé de raisonnement des pratiques formalisé dans les modèles. C'est également le niveau obligatoire de gestion dans les modèles qui représentent les individus regroupés en classe (*e.g.* d'âge, de statut). La gestion de la reproduction est le plus souvent formalisée à l'échelle du troupeau où elle correspond à une période et une durée pendant laquelle les individus peuvent changer de statut (Denham *et al.*, 1991 ; Pleasants, 1997). Cette représentation n'est pas seulement présente dans les modèles de classe (*e.g.* Sanders et Cartwright, 1979) mais également dans les modèles individu-centrés (*e.g.* Villalba *et al.*, 2009). L'intégration d'indicateurs relatifs au taux de détection des chaleurs ou à la qualité de l'inséminateur est une alternative pour enrichir la représentation de la gestion de la reproduction au niveau du troupeau (Oltenacu *et al.*, 1980).

La plupart des modèles intègrent une structure démographique dynamique qui implique de représenter les pratiques de renouvellement. La gestion du renouvellement s'appuie nécessairement sur le niveau troupeau pour définir un nombre d'animaux sortant du troupeau et un nombre d'animaux immatures intégrant le troupeau. La gestion des effectifs réformés et des effectifs de nouvellement est représentée la plupart du temps sous forme d'un taux. Comme pour la reproduction, la représentation du renouvellement sous forme d'un taux n'est pas uniquement utilisée dans les modèles représentant des classes d'individus (*e.g.* Chardon, 2008 ; Rotz *et al.*, 1999 ; 2005) mais également dans les modèles individu-centrés (*e.g.* Johnson et Notter, 1997). Certains modèles basés sur des classes ont raffiné cette représentation en déclinant le taux par classe d'âge (Lesnoff, 1999, Ezanno, 2005) ou en

utilisant un processus markovien pour simuler différentes stratégies de réforme et déterminer les probabilités de transition entre classes d'âge (Azzam *et al.*, 1990).

3.2 L'individu, niveau fin de gestion de la reproduction et du renouvellement

Le niveau individuel est le niveau le plus fin de raisonnement des pratiques. Il est exclu des modèles basés sur des classes d'individus. Cette représentation permet d'approfondir la formalisation des interactions entre le système décisionnel et le système biotechnique. Les pratiques de reproduction s'appuyant sur des informations individuelles sont surtout représentées dans les modèles d'élevages bovins laitiers où la reproduction est raisonnée à l'échelle de la vache. La date de première insémination est déterminée par rapport à la date de vêlage de la femelle et à l'intervalle vêlage-insémination déterminé en entrée du modèle (Oltenacu *et al.*, 1980 ; 1981 ; Marsh *et al.*, 1987). La prise en compte du niveau individuel pour raisonner les pratiques de réforme permet de déterminer de façon qualitative le nombre d'individus à réformer ou à intégrer dans le troupeau. La représentation des pratiques de réforme s'appuie sur des critères comme le nombre de jours vides (*e.g.* Congleton, 1984), le niveau de production laitière (*e.g.* Sorensen *et al.*, 1992), l'état corporel (*e.g.* Romera *et al.*, 2004) ou encore l'âge (*e.g.* Blackburn et Cartwright, 1987b). Certains modèles intègrent également des critères individuels de sélection des femelles de renouvellement tel que le potentiel laitier (Congleton, 1984 ; Sorensen *et al.*, 1992), le potentiel de croissance (Tess et Kolstad, 2000b) ou encore la période de lutte ayant donné naissance à la femelle (Cournut et Dedieu, 2004).

3.3 Le lot, niveau de gestion de l'alimentation ou de la reproduction et du renouvellement

Le niveau du lot est explicitement modélisé soit pour gérer l'alimentation soit pour gérer la reproduction et le renouvellement du troupeau. Deux types de modèles intègrent le lot pour formaliser les pratiques d'alimentation. Le premier type s'appuie sur le lot pour représenter l'alimentation nécessaire au fonctionnement des modèles animaux qui simulent les réponses aux apports alimentaires (*e.g.* Sanders et Cartwright, 1979 ; Blackburn et Cartwright, 1987a ; Bosman *et al.*, 1997). Ces modèles permettent de regrouper les individus (par âge, par sexe, par statut physiologique) pour leur attribuer différents types et quantités d'aliments (*e.g.* Sorensen *et al.*, 1992). Le second type de modèles s'appuie sur le lot pour représenter des

systèmes au pâturage ou pour représenter le fonctionnement de l'exploitation agricole. Dans les modèles s'intéressant au pâturage, le lot correspond à un type de femelles (*e.g.* génisses, vaches taries, vaches en lactation) qui exploite un type de ressource (White et Bowman, 1983 ; Cacho *et al.*, 1995 ; Romera *et al.*, 2004 ; Jouven et Baumont, 2008). Le lot permet alors d'identifier un type de prélèvement et de simuler l'effet de ce prélèvement sur une ressource donnée. Le même type de logique se retrouve dans les modèles à l'échelle de l'exploitation agricole. L'identification des types d'animaux grâce au lot permet de discriminer différents postes de consommation des ressources de l'exploitation ainsi que différents postes d'achat de ressources à l'extérieur. Cette représentation permet alors de simuler les flux de matières dans l'exploitation agricole (Rotz *et al.*, 1999 ; 2005; Shalloo *et al.*, 2004 ; Schils *et al.*, 2007; Chardon, 2008 ; Vayssières *et al.*, 2009).

Le lot est également un support de représentation des pratiques de reproduction et de renouvellement. Ce niveau de gestion est utilisé pour simuler des systèmes avec plusieurs périodes de reproduction dans l'année et n'a été modélisé que dans le contexte des élevages de petits ruminants. Chaque lot correspond à une période de lutte et la gestion du renouvellement est déclinée pour chaque lot. La gestion des différents lots peut donner lieu à une formalisation simplifiée, sur la base de taux de fertilité et de renouvellement différentiels (Benoit, 1998 ; Guimaraes *et al.*, 2009). La gestion des différents lots peut faire l'objet d'une modélisation explicite des évènements de conduite (*e.g.* lutte, diagnostic de gestation, tarissement, réforme dans le modèle de Cournut et Dedieu, 2004). La représentation de différentes périodes de reproduction s'appuie également sur la représentation des échecs de reproduction et de leur gestion. Les femelles échouant à la lutte sont transférées dans un autre lot pour avoir une opportunité supplémentaire de se reproduire. Cette pratique a été initialement conceptualisée dans des systèmes ovins allaitants par Girard et Lasseur (1997) qui ont défini la notion de calibre, c'est-à-dire la proportion de femelles susceptibles de changer de lot de lutte. Ce concept a été repris et implémenté par Benoit (1998) qui représente la gestion des échecs de reproduction par un flux de femelles entre lots. La même formalisation sur la base de flux de femelles est reprise dans le modèle caprin de Guimaraes *et al.* (2009). Le modèle individu-centré de Cournut et Dedieu (2004) approfondit la formalisation de la gestion des échecs de reproduction puisque la décision de changement de lot est prise sur la base d'indicateurs individuels du statut physiologique, déterminés lors du diagnostic de gestation.

3.4 Le lot, entité de gestion à l'interface d'un projet d'élevage et d'un système de pratiques

Bien que le lot soit un niveau présent dans les modèles de fonctionnement du troupeau, il est utilisé soit pour représenter l'alimentation soit pour représenter la reproduction et le renouvellement. Dans la plupart des modèles, il n'est pas formalisé comme une entité de gestion à part entière, support d'un système de pratiques intégrant l'alimentation, la reproduction et le renouvellement. Le lot est pourtant le niveau où se mettent en œuvre les relations logiques et fonctionnelles entre les différentes pratiques (Landais 1987 citant les travaux de Cristofini *et al.*, 1978). Les limites dans la formalisation du lot sont à relier aux limites des modèles par rapport à la prise en compte du projet d'élevage dans l'élaboration des pratiques. « *On connaît les projets par les pratiques, on comprend les pratiques par les projets* » (Landais et Deffontaines, 1988). Cette formule met l'accent sur le rôle des pratiques dans la réalisation du projet d'élevage et les positionne comme le résultat d'un processus de décision.

La formalisation de la décision a fait l'objet de développements conceptuels dans le domaine de l'agronomie (Aubry *et al.*, 1998) ainsi que dans le domaine des systèmes fourragers (Coléno et Duru, 2005). Le processus de décision met en jeu un projet ainsi qu'une stratégie pour réaliser ce projet. Cette stratégie passe par la planification et le pilotage des opérations techniques de conduite du système d'élevage ou de culture. La prise en compte du processus d'élaboration des pratiques, tant au niveau conceptuel qu'informatique, est assez limité dans les modèles de troupeau. La majorité des approches proposent une vision descendante des pratiques sous forme d'un jeu de paramètres agissant sur les individus. La gestion est alors formalisée en spécifiant les valeurs des paramètres. Certains modèles à l'échelle de l'exploitation agricole (Chardon, 2008 ; Vayssières *et al.*, 2009) positionnent leur approche de modélisation au niveau de la représentation du processus de décision en se focalisant simplement sur la gestion globale des ateliers de production. La représentation de la gestion du troupeau reste donc assez simplifiée. Ces modèles proposent cependant une représentation de la construction de l'offre alimentaire intéressante car ils prennent en compte les aléas et les ajustements en cours de campagne (calendrier de pâturage pour Chardon, 2008 ; ration en fonction des stocks de matières sur l'exploitation pour Vayssières *et al.*, 2009). Au niveau du troupeau, la formalisation de la gestion proposée par Cournut et Dedieu (2004) est la plus aboutie. Ces auteurs intègrent le lien entre projet d'élevage et opérations techniques sur les individus en formalisant explicitement les entités de gestion mises en place

par l'éleveur. Cependant, leurs efforts se sont portés sur la conduite de la reproduction. La sous-estimation du rôle des pratiques d'alimentation dans le projet d'élevage est une limite forte dès lors que l'on étudie des systèmes d'élevage intensifs dans lesquels la coordination des trois composantes clés (alimentation, reproduction et renouvellement) joue un rôle important dans l'efficacité du processus d'élaboration de la production.

4 Cahier des charges pour la construction d'un simulateur permettant d'étudier la variabilité individuelle

L'analyse des travaux de modélisation du fonctionnement du troupeau met en évidence plusieurs limites par rapport à la représentation des composantes biologique et décisionnelle de la variabilité individuelle. Ces limites, qui concernent à la fois le système biotechnique et le système décisionnel, sont synthétisées dans le Tableau 1. Du point de vue de la composante biologique de la variabilité, les modèles présentent une vision partielle du fait de l'absence:

- de la représentation de plusieurs types de réponses biologiques ;
- de l'élaboration des réponses biologiques en réponse à l'alimentation ;
- d'une formalisation explicite des régulations qui gèrent l'allocation d'énergie entre les fonctions et sont à l'origine des réponses biologiques.

Du point de vue de la composante décisionnelle de la variabilité, les modèles abordent la variabilité d'une façon partielle du fait de :

- d'une approche par classe d'individus limitant la prise en compte des informations individuelles pour la mise en œuvre de la conduite ;
- la représentation d'un seul type de pratiques alors que les pratiques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement sont en soit un système de pratiques raisonnées de façon conjointe à l'échelle du lot ;
- l'absence de formalisation du lien entre projet d'élevage et pratiques, se traduisant dans la plupart des cas par l'absence d'entités de gestion.

Au terme de ce bilan, il apparaît que la formalisation du système biotechnique doit s'appuyer sur une approche individu-centrée. L'intérêt d'une approche individu-centrée pour étudier le rôle des pratiques par rapport à la variabilité individuelle a déjà été souligné (Agabriel et Ingrand, 2001 ; Tichit *et al.*, 2004). Le niveau individuel est nécessaire pour

représenter l'élaboration des informations individuelles conditionnant la prise de décision notamment par rapport à la gestion des réformes ou de l'infertilité. Le niveau individuel est également nécessaire pour représenter l'élaboration des réponses à l'alimentation sous le contrôle du potentiel de production et des régulations biologiques. Certains modèles vont dans ce sens (*e.g.* Tess et Kolstad, 2000a) mais aucun n'a proposé une approche intégrée de l'animal, vu comme une entité biologique active avec son propre agenda (Friggens et Newbold, 2007). Toutefois, un cadre conceptuel intéressant a été proposé par Sauvant (1994). L'animal est vu comme la combinaison d'un système régulateur et d'un système opérant. Cette représentation permet une formalisation explicite des régulations ainsi qu'une vision intégrée de l'ensemble des réponses productives.

Les entités de gestion doivent être au cœur du système décisionnel. Elles représentent le support du raisonnement technique de l'éleveur et elles permettent d'articuler de façon cohérente les opérations techniques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement dans un système de pratiques dont la finalité est la production (Landais, 1987, Landais et Deffontaines, 1988). La formalisation de la stratégie d'alimentation demande des approfondissements importants car ce type de pratique a été largement sous-estimé dans les modèles de fonctionnement du troupeau, y compris dans les systèmes de type trois agnelage en deux ans ou les femelles sont fortement sollicitées sur le plan biologique (*e.g.* Cournut et Dedieu, 2004). Ce type de pratique est pourtant cependant assez finement conceptualisé dans les approches descriptives des systèmes d'élevage (Guérin et Bellon, 1989).

Les zootechniciens des système d'élevage ont posé les bases conceptuelles du fonctionnement du troupeau vu comme l'interaction dynamique entre un système décisionnel et un système biotechnique (Dedieu *et al.*, 2008; Gibon, 1999). Cette représentation conceptuelle est opérationnelle pour aborder la diversité des déterminants de la variabilité individuelle des carrières et les interactions entre ces déterminants. Ainsi, l'enjeu autour de l'étude de la variabilité individuelle n'est pas de remettre en question cette représentation du troupeau mais d'approfondir la représentation des différentes composantes. Un simulateur dans lequel le système de pratiques modulerait l'élaboration des réponses biologiques individuelles devrait permettre d'étudier la construction de la variabilité individuelle des carrières et sa contribution à la performance globale du troupeau.

Tableau 1 Représentations de l'individu et des types de pratiques utilisées dans les différents travaux de modélisation du fonctionnement du troupeau.

Référence	Espèce[1]	Modèle de représentation de l'individu			Représentation des pratiques[2]							
					Reproduction			Réforme		Renouvellement		Alimentation[5]
		IC[3]	besoin	réponse	T[4]	L	I	T	I	T	I	L
Sanders et Cartwright, 1979 *Performances de différents génotypes dans différents environnements*	BA			•[6]	•			•		•		•
Oltenacu et al., 1980 *Effets de la conduite de la reproduction sur les performances du troupeau*	BL	•	•[7]		•		•	•	•	•	np[8]	
White et Bowman, 1983 *Effet du chargement et de la date d'agnelage sur les performances du troupeau*	OV			•	•			•		•		•
Congleton, 1984 *Effets de différentes stratégies de gestion sur les performances du troupeau*	BL	•	•				•	•	•	•	•	•
Dijkhuizen et al., 1986 *Effets de la gestion des réformes et de la reproduction sur performances du troupeau*	BL	•	•				•	•	•	•	•	
Blackburn et Cartwright, 1987a *Performances de différents génotypes dans différents environnements*	OV	•		•	•			•	•	•	np	•
Johnson et Notter, 1987 *Effets de l'anoestrus post-partum et du taux de conception sur les performances du troupeau pour plusieurs génotypes*	BA	•	•		•			•		•		
Marsh et al., 1987 *Effets de 4 stratégies de réforme, du taux de détection des œstrus et du taux de conception sur les résultats du troupeau*	BL	•	•				•	•	•	•		
Azzam et al., 1990 *Effets de la date de début de mise à la reproduction et de la durée sur les performances du troupeau*	BA				•			•		•		
Denham et al., 1991 *Effets du taux de conception et de la durée de la reproduction sur les performances du troupeau*	BA				•							

Sorensen et al., 1992 *Effets de la stratégie d'alimentation, de réforme et de distribution des vêlages sur les performances du troupeau*	BL	•		•			•	•	•	•	•	•
Upton , 1993 *Relation entre structure du troupeau et production annuelle*	BA				•			•		•		
Cacho et al., 1995 *Chargement permis par différentes gestion des parcelles de pâturage et effet du niveau de chargement sur les performances du troupeau*	OV	•		•	•			•		•		•
Bosman et al., 1997 *Effets de l'alimentation sur les performances du troupeau*	CA	•		•	•			•		•		•
Pleasants, 1997 *Effets de la date de début de mise à la reproduction sur les performances du troupeau*	BA				•							
Schmitz, 1997 *Relations entre la structure du troupeau, la conduite du renouvellement et la production du troupeau*	BA				•			•		•		
Benoit, 1998 *Effets de la fertilité et du choix des périodes de lutte sur les performances du troupeau*	OV				•	•		•		•		
Lesnoff, 1999 *Effets de la fertilité et de la prolificité sur la démographie du troupeau*	OV				•			•		•		
Rotz et al., 1999 *Prédiction des besoins, des performances et des effluents d'un troupeau dans une exploitation*	BL		•		•			•		•		•
Tess et Kolstad, 2000 *Performances de différents génotypes dans différents environnements et pour différentes stratégies de croisement génétique*	BA	•		•	•			•	•	•	•	•
Cournut et Dedieu, 2004 *Effets de la gestion de la reproduction et du renouvellement sur les performances du troupeau*	OV	•			•	•	•	•	•	•	•	
Romera et al., 2004 *Effets de différentes stratégies fourragères sur les performances du troupeau*	BA	•		•	•			•	•	•	•	•
Shalloo et al., 2004 *Sensibilité du profit de l'exploitation agricole aux variations de paramètres de l'atelier laitier*	BL		•		•			•		•		•

Ezanno, 2005 *Effets de différentes stratégies de supplémentation sur la démographie du troupeau*	BA				•				•		•		
Rotz et al., 2005 *Prédiction des besoins, des performances et des effluents d'un troupeau dans une exploitation*	BA		•		•				•		•		•
Wolfova et al., 2005 *Poids économiques de différents traits de production pour 4 systèmes de croisement et de finition des produits*	BA		•		•				•		•		
Shils et al., 2007 *Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole*	BL			•	•				•		•		•
Beukes et al., 2008 *Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole*	BL	•		•	•				np		np		•
Chardon, 2008 *Relations entre la gestion et les flux de matières dans l'exploitation agricole*	BL			•	•				•		•		•
Jouven et Baumont, 2008 *Effets de différentes stratégies de gestion du pâturage sur la production de viande et la biodiversité des prairies*	BA		•		•								•
Guimaraes et al., 2009 *Effets du nombre de périodes de reproduction sur les performances du troupeau*	CA		•		•	•			•		•		
Pérochon et al., 2009 *Effets des stratégies de reproduction et d'alimentation sur les performances du troupeau*	BA	•			•		•		•	•	•	np	
Vayssières et al., 2009 *Relations entre la gestion et les flux de matières dans l'exploitation agricole*	BL			•	•				•		•		•
Villalba et al., 2009 *Effets de différentes stratégies de gestion d'alimentation et de reproduction sur les performances du troupeau*	BA	•		•	•		np		•	•	•	np	•

[1]BA : bovins allaitants ; BL : bovins laitiers ; OV : ovins ; CA : caprins.

[2]Le niveau lot n'a pas été précisé pour les pratiques de réforme et de

[3]IC : individu centrée.

[4]T : troupeau ; I : individu ; L : lot.

[5]L'alimentation est considérée comme étant représentée dans le modèle dès lors que l'individu correspond à un modèle de réponse, que le modèle intègre le pâturage et les mouvements

[6]•: individu ou pratique représenté dans le modèle au niveau de représentation concerné.

[7]Oltenacu et al., 1981

[8]np : non précisé

5 Références bibliographiques

Agabriel J et Ingrand S, 2004. Modelling the performance of the beef cow to build a herd functioning simulator. Animal Research 53, 347-361.

Aubry C, Capillon A et Papy F, 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. Agricultural Systems 56, 45-65.

Azzam SM, Kinder JE et Nielsen MK, 1990. Modelling reproductive management systems for beef cattle. Agricultural Systems 34, 103-122.

Baldwin RL, France J et Gill M, 1987. Metabolism of the lactating cow. I. Animal elements of a mechanistic model. Journal of Dairy Research 54, 77-105.

Bauman DE et Currie WB, 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. Journal of Dairy Science 63, 1514-1529.

Benoit M, 1998. Un outil de simulation du fonctionnement du troupeau ovin allaitant et de ses résultats économiques : une aide pour l'adaptation à des contextes nouveaux. INRA Productions Animales 11, 199-209.

Beukes PC, Palliser CC, Macdonald KA, Lancaster JAS, Levy G, Thorrold BS et Wastney ME, 2008. Evaluation of a Whole-Farm Model for pasture-based dairy systems. Journal of Dairy Science 91, 2353-2360.

Blackburn HD et Cartwright TC, 1987a. Description and validation of the Texas A&M sheep simulation model. Journal of Animal Science 65, 373-386.

Blackburn HD et Cartwright TC, 1987b. Simulated production and biological efficiency of sheep flocks in a shifting environment. Journal of Animal Science 65, 399-408.

Blanc F et Agabriel J, 2008. Modelling the reproductive efficiency in a beef cow herd: effect of calving date, bull exposure and body condition at calving on the calving-conception interval and calving distribution. Journal of Agricultural Science 146, 143-161.

Bosman HG, Ayantunde AA, Steenstra FA et Udo HMJ, 1997. A simulation model to assess productivity of goat production in the tropics. Agricultural Systems 54, 539-576.

Bourdon RM et Brinks JS, 1987. Simulated efficiency of range beef production. I. Growth and milk production. Journal of Animal Science 65, 943-955.

Broster WH et Broster VJ, 1984. Reviews of the progress of dairy science: long term effects of plane of nutrition on the performance of the dairy cow. Journal of Dairy Research 51, 149-196.

Cacho OJ, Finlayson JD et Bywater AC, 1995. A simulation model of grazing sheep: II. Whole farm model. Agricultural Systems 48, 27-50.

Chardon X, 2008. Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matière: développement et application du simulateur Mélodie. Thèse de doctorat, Agroparistech, Paris, France.

Coléno F et Duru M, 2005. L'apport de la gestion de production aux sciences agronomique. Le cas des ressources fourragères. Natures Sciences Sociétés 13, 247-257.

Congleton WR, Jr, 1984. Dynamic model for combined simulation of dairy management strategies. Journal of Dairy Science 67, 644-660.

Cournut S et Dedieu B, 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. Animal Research 53, 383-403.

Cristofini B, Deffontaisnes JP, Raichon C et DeVerneuil B, 1978. Pratiques d'élevage en Castagniccia. Exploration d'un milieu naturel et social en Corse. Etudes Rurales 71-72, 51-59.

Cros MJ, Duru M, Garcia F et Martin-Clouaire R, 2001. Simulating rotational grazing management. Environment International 27, 139-145.

Dedieu B, Faverdin P, Dourmad JY et Gibon A, 2008. Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. INRA Productions Animales 21, 45-58.

Denham SC, Larsen RE, Boucher J et Adams EL, 1991. Structure and behavior of a deterministic model of reproductive performance in beef cattle. Agricultural Systems 35, 21-36.

Dijkhuizen AA, Stelwagen J et Renkema JA, 1986. A stochastic model for the simulation of management decisions in dairy herds, with special reference to production, reproduction, culling and income. Preventive Veterinary Medicine 4, 273-289.

Ezanno P, 2005. Dynamics of a tropical cattle herd in a variable environment: a modelling approach in order to identify the target period and animals on which concentrating management efforts to improve productivity. Ecological Modelling 188, 470-482.

Friggens NC, 2003. Body lipid reserves and the reproductive cycle: towards a better understanding. Livestock Production Science 83, 219-236.

Friggens NC et Newbold JR, 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87-97.

Gibon A, Sibbald AR, Flamant JC, Lhoste P, Revilla R, Rubino R et Sorensen JT, 1999. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. Livestock Production Science 61, 121-137.

Girard N et Lasseur J, 1997. Stratégies d'élevage et maîtrise de la répartition temporelle de la reproduction. Exemples en élevage ovin en montagne méditerranéenne. Cahiers Agricultures 6, 115-124.

Guimaraes VP, Tedeshi LO et Rodrigues MT, 2009. Development of a mathematical model to study the impact of production and management policies on the herd dynamics and profitability of dairy goats. Agricultural Systems 101, 186-196.

Guérin G et Bellon S, 1989. Analysis of the functions of pastoral areas in forage systems in mediterranean region. Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires 16, 147-156.

Gunn RG, 1977. The effects of two nutritional environments from 6 weeks prepartum to 12 months of age on lifetime performance and reproductive potential of Scottish Blackface ewes in two adult environments. Animal Production 25, 155-164.

Johnson MH et Notter DR, 1987. Simulation of genetic control of reproduction in beef cows. I. Simulation model. Journal of Animal Science 65, 68-75.

Jouven M et Baumont R, 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. Agricultural Systems 96, 260-272.

Kahn HE et Spedding CRW, 1983. A dynamic model for the simulation of cattle herd production systems: Part 1. General description and the effects of simulation techniques on model results. Agricultural Systems 12, 101-111.

Kristensen AR, 1987. Optimal replacement and ranking in dairy cows determined by a hierarchic markov process. Livestock Production Science 16, 131-144.

Landais E, 1987. Recherches sur les systèmes d'élevage. Questions et perspectives. Document de travail INRA SAD Versailles. Décembre 1987. 75p.

Landais E et Deffontaines JP, 1988. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. Etudes Rurales 109, 125-158.

Lesnoff M, 1999. Dynamics of a sheep population in a Sahelian area (Ndiagne district in Senegal): a periodic matrix model. Agricultural Systems 61, 207-221.

Marsh WE, Dijkhuizen AA et Morris RS, 1987. An economic comparison of four culling decision rules for reproductive failure in United States dairy herds using DairyORACLE. Journal of Dairy Science 70, 1274-1280.

Moulin CH, 1993. Performances animales et pratiques d'élevage en Afrique Sahélienne. La diversité du fonctionnement des troupeaux de petits ruminants dans la communauté rurale de N'Diagne (Sénégal). Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France.

Oltenacu PA, Milligan RA, Rounsaville TR et Foote RH, 1980. Modelling reproduction in a herd of dairy cattle. Agricultural Systems 5, 193-205.

Oltenacu PA, Rounsaville TR, Milligan RA et Foote RH, 1981. Systems analysis for designing reproductive management programs to increase production and profit in dairy herds. Journal of Dairy Science 64, 2096-2104.

Palliser CC, Bright KP, Macdonald KA, Penno JW et Wastney ME, 2001. Adapting the MOLLY cow model to fit production data from New Zealand animals. Proceedings of New Zealand Society of Animal Production 6, 234–236.

Pérochon L, Ingrand S, Force C, Dedieu B, Blanc F et Agabriel J, 2009. Simbal : a model to simulate functions of a beef cow herd. 7th International Workshop of Modelling Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals. 10-12 September 2009. Paris, France.

Pleasants AB, 1997. Use of a stochastic model of a calving distribution for beef cows for formulating optimal natural mating strategies. Animal Science 64, 413-421.

Rhind SM, Elston DA, Jones JR, Rees ME, McMillen SR et Gunn RG, 1998. Effects of restriction of growth and development of Brecon Cheviot ewe lambs on subsequent lifetime reproductive performance. Small Ruminant Research 30, 121-126.

Romera AJ, Morris ST, Hodgson J, Stirling WD et Woodward SJR, 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. Computers and Electronics in Agriculture 42, 67-86.

Rotz CA, Mertens DR, Buckmaster DR, Allen MS et Harrison JH, 1999. A dairy herd model for use in whole farm simulations. Journal of Dairy Science 82, 2826-2840.

Rotz CA, Buckmaster DR et Comerford JW, 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm systems. Journal of Animal Science 83, 231-242.

Sanders JO et Cartwright TC, 1979. A general cattle production systems model. I: Structure of the model. Agricultural Systems 4, 217-227.

Sauvant D, 1994. Modelling homeostatic and homeorhetic regulations in lactating animals. Livestock Production Science 39, 105-113.

Schils RLM, de Haan MHA, J.G.A. H, van den Pol-van Dasselaar A, de Boer JA, Evers AG, Holshof G, van Middelkoop JC et Zom RLG, 2007. DairyWise, a whole-farm dairy model. Journal of Dairy Science 90, 5334-5346.

Schmitz JD, 1997. Dynamics of beef cow herd size: an inventory approach. American Journal of Agricultural Economics 79, 532-542.

Shalloo L, Dillon P, Rath M et Wallace M, 2004. Description and validation of the Moorepark dairy system model. Journal of Dairy Science 87, 1945-1959.

Sorensen JT, Kristensen ES et Thysen I, 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. Agricultural Systems 39, 177-200.

Tess MW et Kolstad BW, 2000a. Simulation of cow-calf production systems in a range environment: I. Model development. Journal of Animal Science 78, 1159-1169.

Tess MW et Kolstad BW, 2000b. Simulation of cow-calf production systems in a range environment: II. Model evaluation. Journal of Animal Science 78, 1170-1180.

Tichit M, Puillet L et Sauvant D, sous presse. How models contribute to livestock farming system research: overview of recent advances. Options Méditerranéennes.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J et Dedieu B, 2004. Analyser la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices : intérêt pour modéliser le fonctionnement du troupeau bovin allaitant. INRA Productions Animales 17, 123-132.

Upton M, 1993. Livestock productivity assessment and modelling. Agricultural Systems 43, 459-472.

Vargas B, Herrero M et Van Arendonk JAM, 2001. Interactions between optimal replacement policies and feeding strategies in dairy herds. Livestock Production Science, 69, 17-31.

Vayssières J, Guerrin F, Paillat JM et Lecomte P, 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part I – Whole-farm dynamic model. Agricultural Systems 101, 128-138.

Villalba D, Ripoll G, Ruiz R et Bernués A, 2009. Analyzing trade-offs between production, economics, land use and labour in mountain farming systems throughout long-term simulation. 60th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Barcelona, 24-27 August 2009. 290.

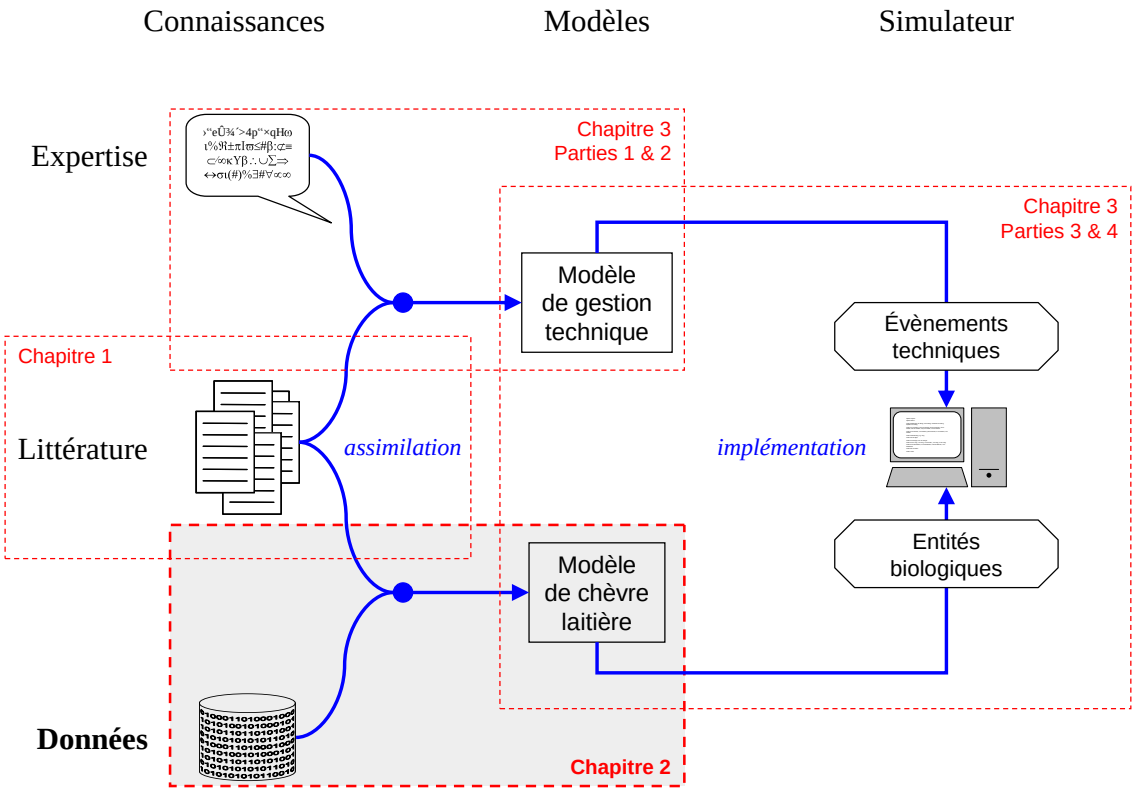
Werth LA, Azzam SM, Nielsen MK et Kinder JE, 1991. Use of a simulation model to evaluate the influence of reproductive performance and management decisions on net income in beef production. Journal of Animal Science 69, 4710-4721.

White DH, Bowman PJ, Morley FHW, McManus WR et Filan SJ, 1983. A simulation model of a breeding ewe flock. Agricultural Systems 10, 149-189.

Wolfova M, Wolf J, Pribyl J, Zahradkova R et Kica J, 2005. Breeding objectives for beef cattle used in different production systems: 1. Model development. Livestock Production Science 95, 201-215.

Wood PDP, 1967. Algebraic models of lactation curve in cattle. Nature 216, 164–165.

Chapitre II Modélisation des performances individuelles



1 Introduction

Ce chapitre présente le développement du modèle individuel de chèvre laitière, entité biologique élémentaire du simulateur troupeau. Le modèle de chèvre laitière est l'unité de base dont la démultiplication permet de représenter l'ensemble des individus composant le troupeau. Il représente le variant biologique du simulateur troupeau, chaque individu possédant des caractéristiques propres. L'enjeu méthodologique autour du modèle individuel est de proposer une structure minimale incorporant les déterminants biologiques majeurs de la variabilité individuelle. Le modèle de chèvre laitière doit simuler les réponses dynamiques du poids vif et de la production laitière en fonction de l'alimentation distribuée et des événements de reproduction rythmant la carrière de la femelle. Afin d'anticiper le couplage entre un ensemble de modèles individuels et des évènements représentants la conduite, la simplicité du modèle individuel est un pré-requis. Elle offre une sécurité d'une part pour maitriser le fonctionnement du simulateur et d'autre part pour gérer le temps, à la fois en termes de vitesse de calcul et de conduite du projet de thèse. Cette contrainte de simplicité a orienté un premier choix de représentation : le fonctionnement de l'individu est basé sur l'énergie. Les autres choix de représentation fondant le développement du modèle minimal de chèvre laitière sont présentés dans cette partie introductive.

Le changement de paradigme de la nutrition animale a profondément modifié le point de vue porté sur l'animal (Figure 3). L'objectif de la nutrition a évolué depuis la maitrise de la couverture des besoins pour maximiser l'expression d'une composante productive (Figure 3a) vers la compréhension et la prédiction des réponses multiples aux régimes (Sauvant, 1999). L'approche par les lois de réponses multiples aux régimes a redonné une place centrale à la compréhension des mécanismes physiologiques à l'origine des performances et à la façon dont l'animal transforme l'énergie ingérée (Figure 3b). La transformation de l'énergie ingérée repose sur la partition de l'énergie entre les fonctions physiologiques. La gestion de cette allocation d'énergie entre les fonctions de l'animal implique un système de priorités entre ces fonctions. Pour une femelle laitière, il existe ainsi des règles d'allocation d'énergie entre les fonctions de croissance, de gestation, de lactation et de gestion des réserves. Ces règles d'allocation changent au cours de la vie productive de la femelle en fonction de la dynamique

des stades physiologiques en lien avec la succession des cycles reproductifs. Les variations des réponses biologiques sont ainsi d'abord l'expression du déroulement dans le temps de la trajectoire de vie de la femelle. Cette dynamique des priorités au cours de la vie productive met en jeu les régulations d'homéorhèse. Ces régulations génèrent une trajectoire des dynamiques biologiques relatives aux différents compartiments physiologiques de la femelle (utérus, réserves corporelles, poids vif non labile) ainsi qu'à l'exportation de lait. Une autre source de variabilité des réponses biologiques est liée au génotype de la femelle. L'expression du génotype génère ainsi une trajectoire des réponses biologiques potentielles, qui dépendent de la dynamique des priorités et du génotype de la femelle. On parle par exemple de trajectoire génétiquement déterminée d'utilisation des réserves (Friggens *et al.*, 2009). La réalisation des trajectoires potentielles implique de satisfaire une dynamique des besoins énergétiques permettant de couvrir l'expression du potentiel de production (Figure 3c). Cette représentation positionne le potentiel de production de l'individu comme un optimum et non comme un maximum. L'environnement nutritionnel dans lequel est placée la femelle va plus ou moins permettre d'assurer la couverture du besoin lié à l'expression de son potentiel de production. Ainsi, l'environnement nutritionnel génère un différentiel d'énergie, de signe positif ou négatif, qui induit une variation des performances, de même signe (Figure 3d). La troisième source de variation des performances est alors liée à la façon dont le différentiel d'énergie affecte chacune des fonctions physiologiques. La répartition du différentiel d'énergie entre les fonctions physiologiques met en jeu les régulations d'homéostase. Ainsi, les variations des réponses biologiques en réponse aux variations d'apports résultent d'un arbitrage entre un potentiel et un possible, sous le contrôle des régulations d'homéorhèse et d'homéostase.

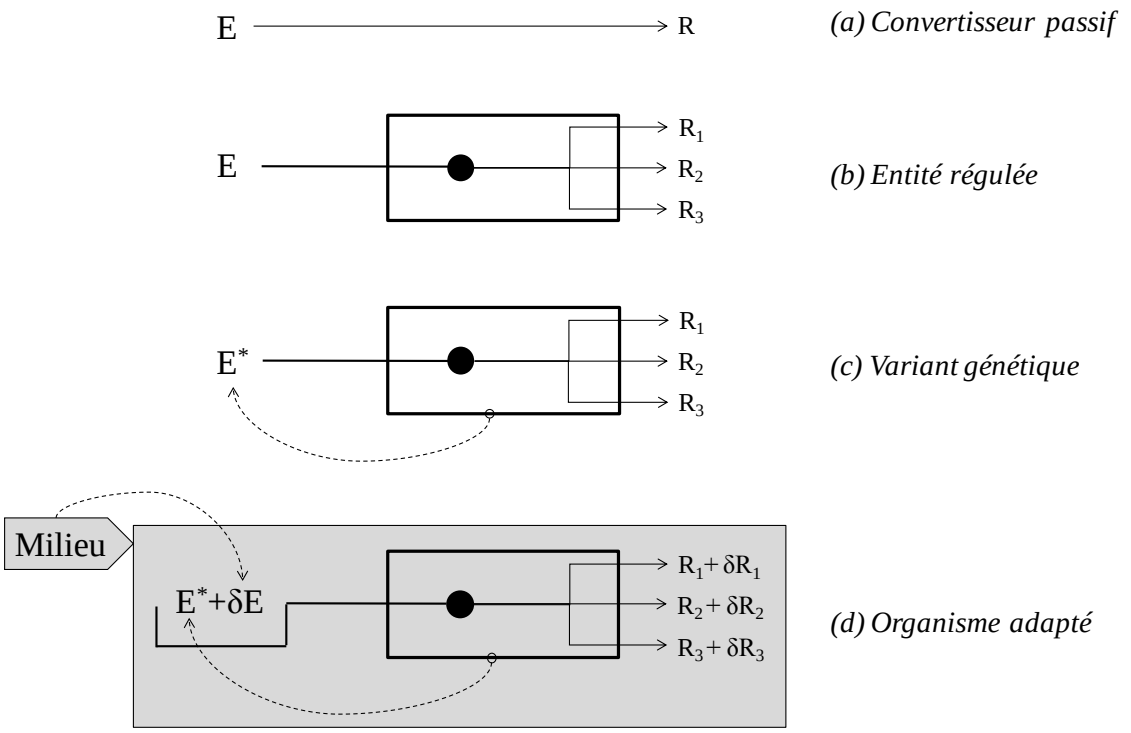


Figure 3 Evolution de la représentation conceptuelle du fonctionnement biologique d'une femelle laitière, depuis un convertisseur passif d'énergie vers un organisme adapté à son milieu. E : énergie ; R : réponse ; Ri : réponse de la fonction i ; E* : besoin de couverture d'un fonctionnement autorisant l'expression d'un génotype ; δE : différentiel d'énergie généré par le milieu ; δRi : variation de la réponse de la fonction i générée par le milieu.

Dans ce travail, la femelle est vue comme une entité biologique régulée. Elle est représentée comme l'interaction entre deux sous systèmes : un sous-système régulateur et un sous-système opérant (Sauvant, 1994). Le sous-système régulateur traduit la dynamique temporelle des priorités relatives des fonctions physiologiques de croissance, de gestation, de lactation et de gestion des réserves corporelles au cours de la succession des cycles reproductifs. La représentation des priorités entre fonctions s'appuie sur le concept de méta-hormones (Sauvant, 1994 ; Friggens et Newbold, 2007). Ce concept permet de représenter de façon synthétique le pilotage par le sous-système régulateur des flux d'énergie associés aux fonctions physiologiques du sous-système opérant. Le sous-système opérant représente l'allocation concrète d'énergie aux fonctions selon le potentiel de production et l'énergie ingérée.

Le développement du sous-système régulateur a nécessité d'évaluer les priorités relatives des différentes fonctions physiologiques de la femelle au cours de sa vie productive. L'évaluation des priorités relatives entre fonctions s'est appuyée sur les connaissances issues

de la littérature. La question des priorités entre fonctions est extrêmement vaste et a été abordée par de nombreux auteurs dans différentes disciplines scientifiques (écologie, biologie des mammifères, zootechnie). Cette question est notamment centrale par rapport à la compréhension des mécanismes d'adaptations des femelles aux contraintes environnementales (Blanc *et al.*, 2008) ou par rapport à la compréhension de la plasticité phénotypique des animaux à l'origine de leur robustesse (Stranberg, 2009). Il était donc indispensable de considérer une grille de lecture précise des travaux. Les priorités relatives comprennent deux composantes : une composante temporelle liée à la dynamique des stades physiologiques et une composante environnementale liée à la disponibilité des ressources. Ces deux composantes renvoient à deux questions distinctes par rapport à l'évaluation des priorités relatives entre fonctions :

- Quelles sont les priorités relatives entre fonctions à l'origine de la trajectoire potentielle des dynamiques biologiques correspondant à l'expression du potentiel de production ?
- Quelles sont les priorités relatives entre fonctions à l'origine de la répartition du différentiel d'énergie généré par l'écart entre les besoins et la disponibilité des ressources alimentaires ?

La première question renvoie à l'évaluation de la dynamique temporelle des priorités au cours de la vie productive de la femelle. Dans le contexte d'un élevage laitier, les fonctions physiologiques d'une femelle se chevauchent donnant lieu à un continuum de situations de priorités relatives. Nous avons choisi de discrétiser ces différentes situations en considérant sept contextes de priorités relatives, présentés ici de façon chronologique par rapport à la vie productive de la femelle :

- Croissance et gestion des réserves
- Croissance, gestation et gestion des réserves
- Croissance, lactation et gestion des réserves
- Croissance, gestation, lactation et gestion des réserves
- Gestation et gestion des réserves
- Lactation et gestion des réserves
- Lactation, gestation et gestion des réserves.

La deuxième question renvoie à l'évaluation des priorités relatives dans deux types d'environnement : un environnement autorisant l'expression du potentiel et un environnement contraignant. Les contraintes génèrent un différentiel d'énergie du fait d'un déficit ou d'un excédent d'énergie ingérée. Ainsi, chaque situation de priorités relatives est envisagée dans le contexte d'expression du potentiel de production et dans le contexte d'un environnement contraignant. Les sept situations de priorités déclinées pour les deux types d'environnement constituent la grille de lecture utilisée pour faire le bilan des connaissances produites dans la littérature (Figure 4). L'importance relative des situations de priorités est illustrée sur la Figure 5. Nous n'avons pas visé l'exhaustivité mais chercher à utiliser les connaissances produites dans différents travaux de recherche pour alimenter le développement du modèle de chèvre laitière. Les priorités sont envisagées du point de vue des effets des apports énergétiques sur les dynamiques biologiques relatives aux réserves corporelles, au poids vif non labile, à l'utérus gravide et à la production laitière. Ainsi, nous n'avons pas considéré la composition corporelle de la femelle. L'analyse de la littérature présente plusieurs limites car les aspects suivants n'ont pas été abordés :

- les aspects liés au métabolisme et au contrôle hormonal ;
- les arrières-effets à long terme (d'une fonction sur une autre ou de l'alimentation);
- la qualité de l'énergie ingérée ;
- les arbitrages liés à l'engagement de la femelle dans une gestation : la gestation est abordée sous l'angle de la croissance pondérale de l'utérus gravide.

Les travaux mobilisés concernent autant que possible l'espèce caprine mais également l'espèce bovine, étant donnée l'importance des productions scientifiques sur cette espèce, et l'espèce ovine. Le bilan des connaissances issues de la littérature est présenté dans la deuxième partie du chapitre. Le modèle de chèvre laitière développé par la suite est présenté dans la troisième partie du chapitre.

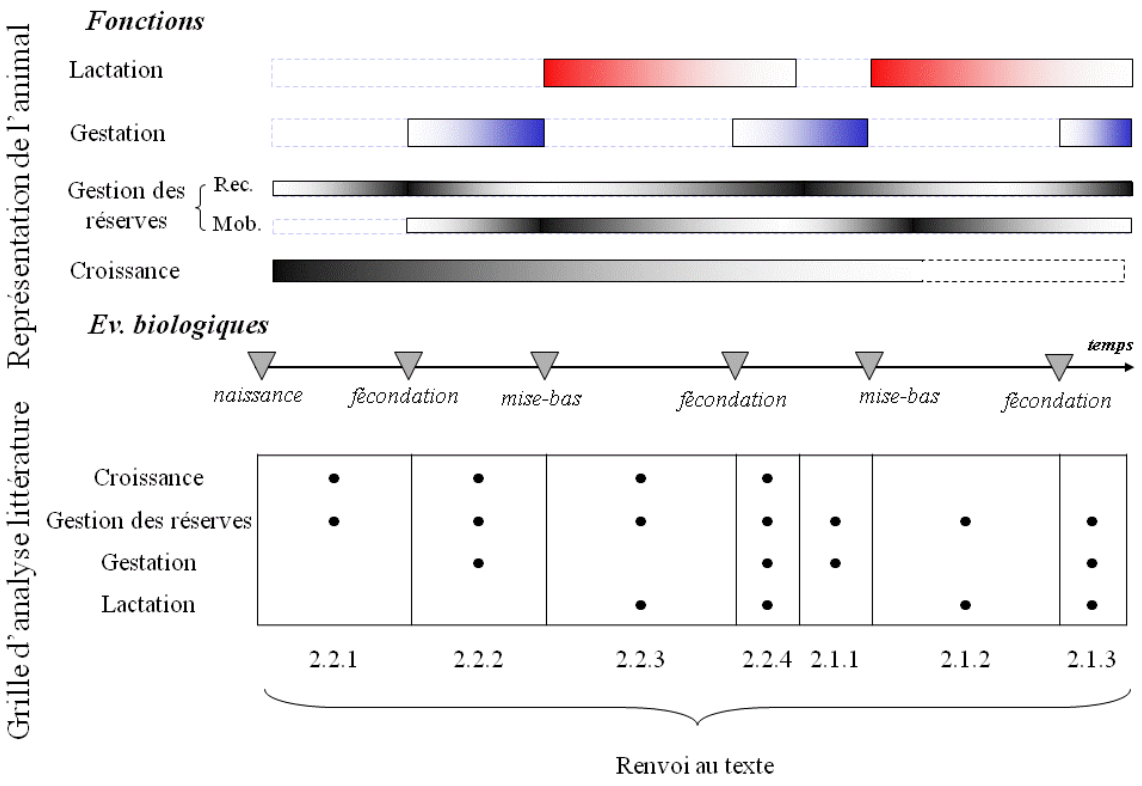


Figure 4 Représentation schématique de la succession et de la superposition des stades physiologiques d'une chèvre laitière, au cours de trois cycles reproductifs, et grille d'analyse de la littérature associée pour identifier les règles de priorités d'allocation d'énergie aux fonctions. Ev. : évènement. Rec. : reconstitution ; Mob. : mobilisation. Le renvoi au texte concerne la partie 2 du chapitre II.

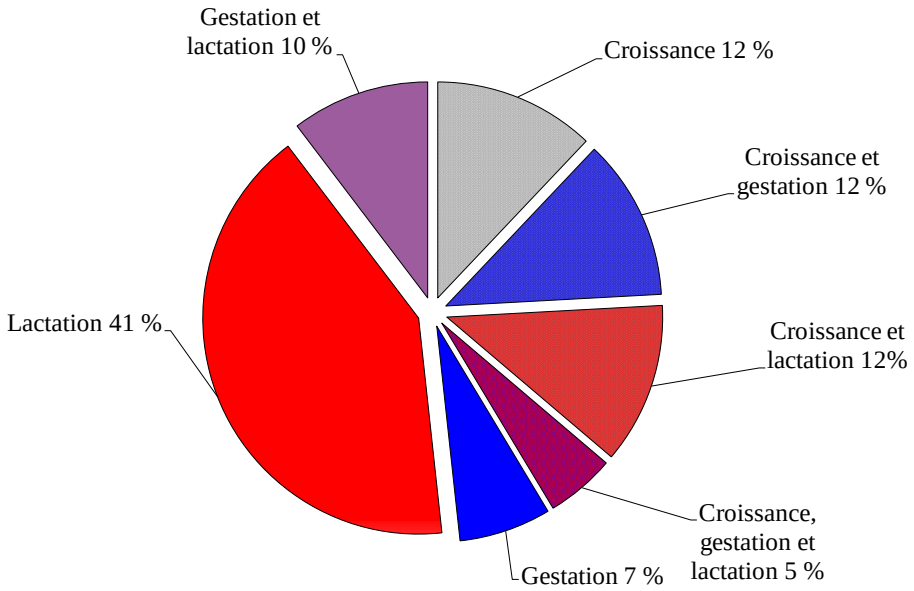


Figure 5 Représentation de l'importance relative des différentes situations de priorités (en % du temps total de vie) pendant la vie productive d'une femelle réalisant 4 lactations. Pour simplifier, la croissance est considérée sur le premier cycle de gestation-lactation seulement et la femelle est supposée réformée à la fin de la 4ème lactation.

2 Représentation des priorités entre fonctions physiologiques

Ce chapitre présente l'analyse des connaissances issues de la littérature selon la grille de lecture proposée en introduction afin d'identifier les priorités relatives des fonctions physiologiques nécessaires à l'élaboration du modèle de chèvre laitière. Une analyse des données individuelles du troupeau caprin expérimental de l'UMR PNA a également été mobilisée (annexe 1).

2.1 Cas des femelles matures

2.1.1 Priorité relative des fonctions de gestation et de gestion des réserves

2.1.1.1 Expression du potentiel

Chez les mammifères, bien que la gestation corresponde à un investissement moindre que la lactation (Clutton-Brock *et al.*, 1989), cette fonction représente tout de même un coût énergétique substantiel pour la femelle. Ce coût augmente principalement sur le dernier tiers de la gestation : environ 80% de la croissance fœtale est achevée sur les derniers 40% de la durée de gestation (Robbins et Robbins, 1979). De ce fait, pour une femelle en fin de gestation, les besoins sont augmentés d'au moins 50 % par rapport à une femelle de même poids non gestante (Brody, 1938). La couverture de cette demande énergétique se traduit au niveau du tissu adipeux par une séquence d'accumulation et de mobilisation, respectivement sur la première et la dernière partie de la gestation (Chilliard, 1987 en vache et brebis; Vernon, 1981 en brebis). Cette séquence est commune aux mammifères dont la stratégie de reproduction et de survie du jeune repose sur la lactation. Chez les espèces prolifiques (*e.g.* brebis, chèvre), l'effort physiologique imposé par la gestation est variable, les tailles de portée pouvant aller de 1 à 5 jeunes. Chez la chèvre, d'après les données de 330 gestations du troupeau expérimental de l'UMR PNA, le poids de chevreaux mis bas varie de 9 à 19 % du poids vif post-partum de la mère pour des portées de 1 à 5 chevreaux. Le tissu adipeux joue un rôle de soutien par rapport à cette demande énergétique variable. Chez la chèvre laitière, le gain net de poids en dehors de l'utérus gravide est corrélé négativement à la taille de portée (Economides et Louca, 1981) ou au poids de portée (Figure 6). Les mêmes effets sont observables chez la brebis et la vache laitière (Chilliard, 1987).

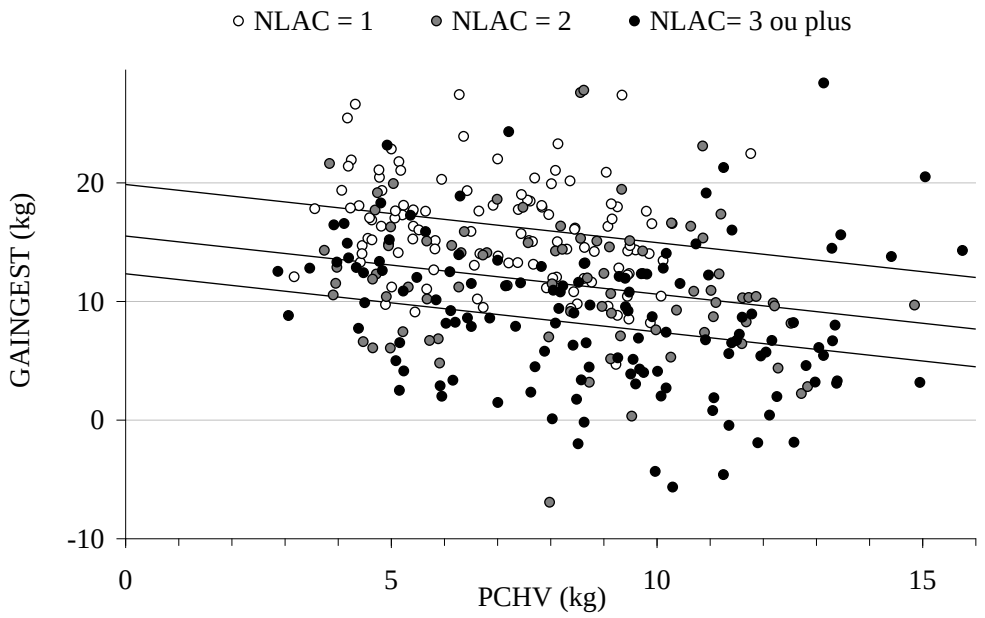


Figure 6 Effet du poids de portée mis bas (PCHV, en kg) sur le gain de poids vif (hors utérus gravide) pendant la gestation (GAINGEST, en kg) pour 330 gestations (données du troupeau expérimental de l'UMR PNA). Les droites représentées sur le graphique correspondent aux régressions pour chaque rang de lactation (NLAC) suivant l'équation: GAINGEST = a - 0.49·PCHV avec a = 19.85 pour le rang 1 de lactation, a = 15.51 pour le rang 2 de lactation et a = 12.33 pour le rang 3 ou plus de lactation.

2.1.1.2 Environnement contraignant

Des travaux conduits dans l'espèce caprine (Tableau 2) montrent qu'avec des rations courantes, le tissu adipeux semble tamponner complètement les variations d'apports et de besoins énergétiques pendant la gestation. Le poids vif à la naissance ne semble pas être affecté par les variations d'apports dont les effets sont reportés sur le poids vif de la mère, ce dans une large gamme de variation (-40 à +100%). Dans l'espèce ovine, des données expérimentales montrent que pour une restriction énergétique de 40% en dessous des apports recommandés, le poids mis bas est réduit de 26% pour une portée double (Geisler et Neal, 1979). Ainsi, le rôle de soutien du tissu adipeux semble s'exercer dans une certaine gamme de sous-nutrition mais au delà d'un seuil, la survie de l'individu devient prioritaire par rapport au maintien de l'utérus gravide. En caprin, la probabilité d'avortement en condition extensive augmente pour les femelles les plus maigres (Mellado *et al.*, 2004).

Tableau 2 Effets des variations d'apports énergétiques sur le gain de poids de la chèvre laitière pendant la gestation. L'effet des traitements alimentaires sur le poids de portée est non significatif dans toutes les publications (*p-value*>0.05).

Référence	Race	Variation des apports (% recommandations)	Effet sur le gain de poids de la mère pendant la gestation
Economides et Louca, 1981	Damascus	+ 25	+
Sahlu et al., 1995	Alpine	- 17	ns
		+ 17	ns
Sibanda et al., 1997	Matebele	+ 50	+
		+ 100	+
Sibanda et al.,1999	Matebele	- 20	-
		- 40	-
Goetsch et al., 2001	Alpine	- 17	-
		+ 10	+

ns : effet non significatif (*p-value*>0.05) ; + : effet significativement positif (*p-value*<0.001); - : effet significativement négatif (*p-value*<0.001).

2.1.2 Priorité relative des fonctions de lactation et de gestion des réserves

2.1.2.1 Expression du potentiel

D'un point de vue évolutif, la lactation est un élément essentiel de la stratégie de reproduction des mammifères (Pond, 1984). Les réserves corporelles sont un élément essentiel dans la mise en place du processus de lactation et sur l'aptitude de la glande mammaire à fournir des nutriments à la progéniture. En effet, l'exportation d'énergie dans le lait au démarrage de lactation ne pourrait être satisfaite uniquement sur la base des ressources alimentaires ingérées à cette période (Oftedal, 2000). Cette nécessaire accumulation d'énergie dans les réserves corporelles afin d'assurer la survie du jeune est temporaire. Il existe un cycle d'utilisation des réserves corporelles différencié par l'évolution et qui permet d'alterner des phases de stockage et de mobilisation.

Chez les espèces domestiques, cet aspect évolutif se traduit par une composante génétique de la dynamique d'utilisation des réserves au cours du cycle de gestation-lactation (Friggens *et al.*, 2004; 2009). Cette composante génétique explique l'échec des essais qui ont tenté d'annuler la mobilisation en début de lactation en manipulant le niveau des apports alimentaires (Broster et Broster, 1984). Cette composante explique également le fait qu'une femelle laitière tende à revenir à un niveau cible de réserves corporelles (Friggens, 2003) et que l'ingestion soit régulée par le niveau des réserves énergétiques (Kennedy, 1953). Enfin, la sélection génétique focalisée essentiellement sur des critères de production laitière a entraîné

une demande accrue des nutriments vers la mamelle et une capacité d'ingestion supérieure. Cette sélection sur l'aptitude à produire s'est aussi accompagnée d'une sélection sur l'aptitude à mobiliser les réserves (Dillon *et al.*, 2006). Autrement dit, la sélection génétique a entraîné une augmentation de la priorité de la fonction de lactation ce qui s'est accompagné d'un accroissement du soutien de la lactation par les réserves corporelles.

La trajectoire d'utilisation des réserves pendant la lactation se traduit par la succession d'une phase de mobilisation puis de reconstitution (Bauman et Currie, 1980 chez la vache laitière ; Vernon *et al.*, 1981 chez la brebis ; Chilliard, 1985 chez la chèvre laitière). Cette trajectoire traduit une priorité de la fonction de lactation après la mise-bas et une mobilisation des réserves supportant cette fonction. Chez la chèvre laitière, la quantité de lipides mobilisée se situe entre 4 et 8 kg sur les 6 premières semaines de lactation (Chilliard, 1985) mais peut être très variable (de 0.5 à 6 kg de lipides mobilisés, Sauvant et Morand-Fehr, 1991). Au cours de l'évolution de la lactation, la priorité de la lactation diminue au profit de la reconstitution des réserves. Cette évolution des priorités entre la lactation et le stockage d'énergie traduit le changement global de priorités depuis la progéniture née vers la progéniture à naître (Friggens, 2003). Ce changement de priorités se produit autour de la 8ème semaine de lactation pour la vache laitière (Martin et Sauvant, 2002 ; Faverdin *et al.*, 2007) et autour de la 7ème semaine pour la chèvre laitière (Sauvant, 1981 ; annexe 1). Les données du troupeau de l'UMR PNA ont montré qu'une forte production en milieu de lactation était associée à une reconstitution plus lente (annexe 1).

2.1.2.2 Environnement contraignant

Les réserves corporelles ont un rôle tampon dynamique par rapport à la variation da la disponibilité des ressources alimentaires (Chilliard *et al.*, 2000). Ce rôle est cependant partiel aussi bien en situation de déficit que d'excédent des apports. Chez la vache laitière, le poids vif et la production laitière répondent de façon conjointe à un changement de ration (Broster et Broster, 1984). Par exemple, aux alentours de l'équilibre énergétique, environ 50% de l'énergie ingérée serait dirigée vers le poids vif et 50% vers le lait (Sauvant, non publié). Chez la chèvre laitière, les réponses marginales à la distribution de concentrés indiquent également une réponse conjointe du poids vif et de la production laitière à des variations d'apports énergétiques (Sauvant *et al.*, 2007 ; Sauvant et Giger-Reverdin, 2006). Cette réponse globale moyenne de lot est donnée à l'échelle de périodes d'étude de plusieurs semaines au sein de la

lactation. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de cette partition entre le poids vif et la production laitière en fonction du stade de lactation.

2.1.3 Priorités relatives des fonctions de gestation, de lactation et de gestion des réserves

La gestation a un effet dépressif sur la lactation en provoquant une redirection des nutriments de la mamelle vers l'utérus gravide. L'effet dépressif de la gestation, mesuré par la baisse de production laitière, est lié au poids de portée (Hayden, 1979). Il existe donc un changement des priorités avec la gestation qui devient d'autant plus prioritaire sur la lactation qu'elle demande un effort physiologique important. L'effet dépressif de la gestation sur la production laitière semble devenir significatif à la moitié de la gestation (Salama *et al.*, 2005 en chèvre; Coulon *et al.*, 1995 en vache) au moment où les besoins liés à la croissance fœtale deviennent significatifs. La réorientation d'énergie de la lactation vers la gestation et le stockage des réserves traduit le changement d'investissement de la femelle de la progéniture née vers la progéniture à naître (Friggens, 2003). A notre connaissance, l'étude de la compétition entre gestation et lactation n'a pas fait l'objet de manipulations nutritionnelles.

2.2 Cas des femelles en croissance

Pour les femelles nullipares ou primipares la fonction de croissance coexiste avec la gestation et la lactation. Les priorités relatives entre la croissance et le stockage d'énergie sont difficiles à appréhender car la croissance implique l'augmentation pondérale des réserves corporelles. L'étude de la priorité relative de la croissance nécessiterait de distinguer les tissus protéiques et lipidiques de la femelle et d'analyser des processus métaboliques fins. Pour ces raisons, cette partie se limitera à déterminer dans quelle mesure l'existence de la croissance va modifier les règles de priorités identifiées pour les femelles matures.

2.2.1 Priorités relatives des fonctions de croissance et de gestion des réserves

2.2.1.1 Expression du potentiel

La croissance est la fonction biologique permettant l'augmentation pondérale des différents compartiments du poids vif, dont les réserves corporelles assurant la fonction de stockage d'énergie. Les différents compartiments n'ont pas la même vitesse de croissance au cours du développement de l'animal. Ces relations dites d'allométrie se traduisent par des vagues de

croissance différentielle : le tissu nerveux est le premier à se développer, suivi des tissus osseux, musculaire et finalement adipeux (Palsson, 1955).

2.2.1.2 Environnement contraignant

L'accroissement du niveau alimentaire entraîne une augmentation de la croissance pondérale et une augmentation de la teneur en lipide du croît (Robelin, 1990). Le concept de maturité traduit l'idée que pour les mammifères, il existe un format génétiquement déterminé vers lequel tend l'animal en croissance. Lorsque les apports sont supérieurs aux besoins, l'excédent d'énergie est dirigé vers les réserves corporelles. Lorsque les apports sont en dessous des besoins, il y a dans un premier temps une réduction des dépenses énergétiques principalement via le métabolisme des tissus splanchniques (Hoch et Agabriel, 2004). Ensuite, les réserves corporelles sont sollicitées afin de préserver les tissus protéiques, prioritaires sur les tissus adipeux. L'étude de Bocquier *et al.* (1998) a montré sur des chevrettes Alpines que pour une sous alimentation équivalente à 86 % des besoins pendant 40 jours, la croissance est stoppée et les réserves sollicitées (environ -60 g/j).

2.2.2 Modulation des priorités relatives des fonctions de gestation et de gestion des réserves par la croissance

2.2.2.1 Expression du potentiel

Les primipares ont des gains nets de poids vif plus importants que les multipares pendant la gestation (Blanchard et Sauvant, 1974 ; annexe 1) confirmant que le processus de croissance se poursuit. L'intensité de l'effort physiologique de gestation, fonction de la taille de portée, module cette croissance : le gain de poids vif pendant la gestation diminue avec la taille de portée (Figure 6).

2.2.2.2 Environnement contraignant

Les résultats d'Aregheore *et al.* (1992) montrent que pour une sous nutrition équivalente à 90 % des apports recommandés, le poids à la naissance n'est pas affecté et le gain de la mère est réduit. Ainsi, comme pour les femelles matures, la gestation est prioritaire. Cependant, la gamme de sous nutrition supportée par les femelles en croissance semble plus réduite que celle supportée par les multipares. Dans des situations de sous nutrition sévère, les primipares présentent une probabilité d'avortement plus élevée que les multipares (Mellado *et al.*, 2004). La surnutrition de jeunes femelles en gestation a été très peu étudiée. Les travaux de Wallace (2000) montrent que chez les brebis en croissance et gestantes la surnutrition induit une

augmentation de la croissance de la mère et un ralentissement de la croissance fœtale. Les priorités sont profondément modifiées par l'excédent d'énergie qui conduirait à une compétition entre hormone de croissance et hormones placentaires, les effets de ces dernières étant inhibés.

2.2.3 Modulation des priorités relatives des fonctions de lactation et de gestion des réserves par la croissance

2.2.3.1 Expression du potentiel

Chez les femelles en lactation et en croissance, le début de lactation est caractérisé, comme chez les adultes, par une mobilisation des réserves pour supporter l'exportation d'énergie dans le lait. Cependant, les données du troupeau expérimental de l'UMR PNA ont montré que la chute pondérale en début de lactation était moins importante chez les primipares que chez les multipares (annexe 1). La priorité de lactation diminue ensuite au profit de la reconstitution des réserves corporelles. Cependant, la demande énergétique liée à la fonction de croissance, la maturité incomplète des organes et le moindre investissement dans la fonction de reproduction des femelles en croissance modulent les règles d'allocation d'énergie entre les fonctions de lactation et de stockage d'énergie. La production laitière des primipares est moins importante que celle des primipares et l'allure de la courbe de production est différente : les primipares ont un pic de production moins prononcé que les multipares et une persistance plus élevée (Bouloc, 1991 en chèvre laitière ; Martin et Sauvant, 2002 en vache laitière). Au niveau de l'évolution des réserves corporelles, Chilliard (1992) montre que chez la vache laitière la quantité de lipides déposés pendant le cycle est moins importante chez les primipares (86 kg de lipides) que chez les multipares (104 kg de lipides). Cet auteur montre également que les primipares ont déposé une quantité de lipides plus importante au moment du pic de lactation (89 kg) que les multipares (72 kg). Toujours chez la vache laitière, Friggens *et al.* (2009) montrent que les primipares ont un bilan énergétique (MJ/jour) moindre que les multipares. Cette moindre mobilisation semble être liée à la plus faible production laitière des primipares. Faverdin *et al.* (2007) précisent qu'à même production laitière, les primipares ont une aptitude à la mobilisation plus importante que les multipares. Chez la chèvre laitière, la croissance semble accélérer la diminution des priorités de la lactation au profit de celle de stockage d'énergie : les primipares ont un gain de poids vif environ deux fois plus important que les multipares sur le milieu de lactation (annexe 1).

2.2.3.2 Environnement contraignant

Chez la chèvre laitière, la production laitière des primipares semble être moins sensible à une augmentation de concentrés que celles des multipares (Goetsch *et al.*, 2001) indiquant que l'excédent d'énergie est redirigé vers le gain de poids vif. Cette partition est liée au fait qu'il est moins possible pour les primipares de rediriger l'énergie vers le lait, leur mamelle ayant une capacité de synthèse plus faible que les multipares (Friggens *et al.*, 2004).

2.2.4 Modulation des priorités relatives des fonctions de gestation, de lactation et de gestion des réserves par la croissance

Chez la vache laitière, il semble que l'effet inhibiteur de la gestation sur la persistance de la production laitière soit moins fort chez les primipares (Coulon *et al.*, 1995). L'hypothèse avancée ici est que les mécanismes qui permettent aux primipares d'être plus persistantes leur permettent aussi d'être moins sensibles à l'effet inhibiteur de la gestation. La différence entre primipares et multipares n'a pas été étudiée chez la chèvre. L'expression des règles de priorité entre gestation et lactation n'a pas été étudiée sous l'angle de la réponse aux apports énergétiques.

2.3 Conclusion

La gestation est une fonction prioritaire soutenue par les réserves corporelles dans une gamme de sous nutrition moyenne. Lorsque la sous-nutrition devient sévère (au delà de 40% en dessous des besoins), la survie de l'individu devient prioritaire au détriment du fœtus (ralentissement de la croissance fœtale voire avortement). Cet effet de la sous-nutrition est dépendant du stade de gestation : la deuxième partie de gestation est une période plus sensible aux variations d'apports. La gamme de sous nutrition supportée par les femelles en croissance semble plus réduite que la gamme supportée par les adultes. En cas de surnutrition, il semble qu'il y ait une profonde modification des priorités, la croissance devenant délétère pour la gestation. La lactation est une fonction prioritaire et soutenue par la mobilisation des réserves corporelles pendant environ les deux premiers mois post-partum, même dans le cas d'une femelle en croissance. La priorité de cette fonction diminue ensuite progressivement pour être partagée avec la reconstitution des réserves corporelles. La diminution de la priorité de la lactation est accentuée par la fonction de croissance. Une modification des apports nutritionnels engendre une réponse conjointe des fonctions de lactation et de gestion des réserves. La fonction de croissance semble modulée cette réponse conjointe en privilégiant le poids vif. Ainsi, si les apports sont excédentaires, les réserves sont favorisées et à l'inverse si

les apports sont déficitaires, les réserves sont préservées. La gestation devient prioritaire sur la lactation et entraîne une baisse de la production laitière dès lors que les besoins qui lui sont associés deviennent significatifs.

Cette étude de la littérature a permis d'identifier les priorités entre fonctions physiologiques dans un contexte d'expression du potentiel de production et dans un contexte environnemental contraignant où il existe un différentiel d'énergie entre les besoins et l'ingéré. Notre approche est positionnée au niveau des fonctions physiologiques. Il existe une mesure directe de la priorité à la fonction de lactation à travers la quantité de lait produit. En revanche, le poids vif seul est un indicateur partiel de l'état des réserves car il intègre le poids des contenus digestifs modulés par l'ingestion et difficilement mesurables. Des travaux ont été menés pour quantifier les réserves corporelles (*e.g.* méthode de dilution) mais sur le terrain, c'est la note d'état corporel qui est utilisée pour apprécier l'état des réserves. Ainsi, les variations de cet indicateur reflètent les modifications de priorité à la fonction de gestion des réserves.

Les priorités relatives entre fonctions dans le contexte d'expression du potentiel (*i.e.* lorsque le différentiel entre les besoins énergétiques et l'énergie ingérée est nul) sont décrites dans la présentation du sous-système régulateur du modèle de chèvre laitière. La ventilation du différentiel d'énergie est décrite dans la présentation du sous système-opérant. La Figure 7 présente rapidement les hypothèses que nous faisons sur les fonctions affectées par un différentiel d'énergie non nul.

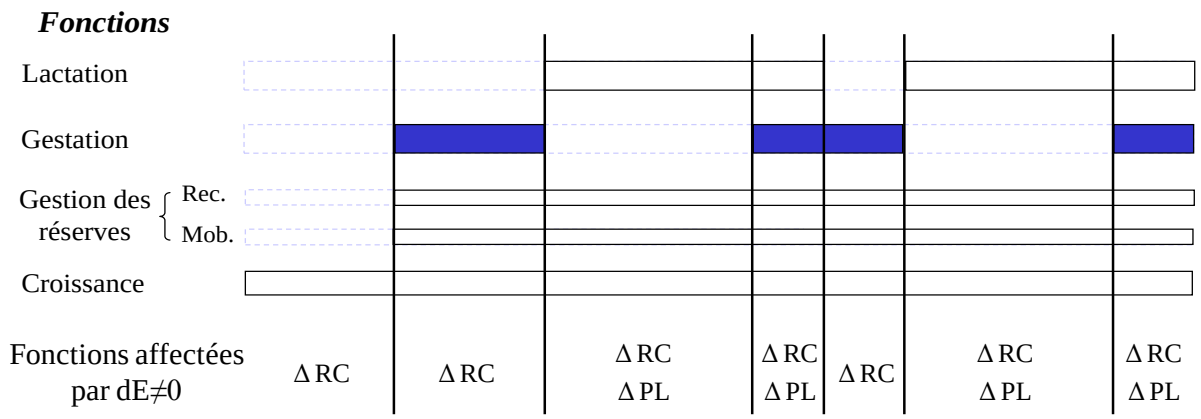


Figure 7 Fonctions affectées par un différentiel d'énergie (dE) non nul entre les besoins d'énergie liés au potentiel et l'énergie ingérée. RC : réserves corporelles ; PL : production laitière ; Rec. : reconstitution ; Mob. : mobilisation.

3 Modélisation des performances de la chèvre laitière au cours de sa vie productive

La chèvre laitière est représentée par deux sous-systèmes en interaction : le sous-système régulateur et le sous système opérant. Le sous-système régulateur représente les priorités relatives des fonctions physiologiques grâce à un ensemble de méta-hormones théoriques. La dynamique des méta-hormones au cours des cycles reproductifs représente la dynamique temporelle des priorités. Le sous-système opérant représente les fonctions productives de la femelle vue comme un convertisseur de matière sèche en lait. Ce sous-système comprend le poids vif non labile, les réserves corporelles et l'utérus gravide. La composition corporelle et les contenus digestifs ne sont pas considérés. La transmission des priorités du sous-système régulateur aux flux du sous-système opérant intègre l'effet du potentiel de production représenté par le potentiel laitier et le poids vif mature. Les flux d'énergie nette et de matière associés au fonctionnement des compartiments biologiques sont ainsi déterminés par deux composantes : une composante liée au sous-système régulateur (expression temporelle des priorités relatives et potentiel de production) et une composante liée à la répartition du différentiel d'énergie généré par l'alimentation. Le fonctionnement du modèle sur la base de la composante liée à l'expression du potentiel dans le temps a fait l'objet d'une publication dans la revue Animal (annexe 4).

3.1 Sous-système régulateur

Le sous système régulateur incorpore trois ensembles de compartiments représentatifs des priorités relatives aux fonctions de croissance, de gestation et de lactation. Ces ensembles sont qualifiés de moteurs. Dans chaque compartiment, une quantité de matière fixe sans unité s'écoule selon le principe de loi d'action de masse entre les compartiments. Cet écoulement génère, au niveau des compartiments, des dynamiques de méta-hormones théoriques représentatives de l'évolution des priorités relatives. Un ensemble de variables de contrôle booléennes, représentatives du stade physiologique de la femelle, pilote les dynamiques du régulateur en fonction de l'occurrence d'évènements de reproduction (fécondation et mise-bas) ou de gestion (tarissement). Le sous-système régulateur ainsi que les dynamiques générées dans les compartiments sont présentés sur les Figure 8 etFigure **9**. L'ensemble des

équations et paramètres du sous-système régulateur sont récapitulées dans les Tableau 3 Tableau 4. Les équations présentes dans les tableaux sont appelées par T_i et les équations présentes dans le texte par E_i. Pour faciliter la lecture, les noms des éléments du modèle et leur description sont rappelés dans une annexe mobile. Les dynamiques des moteurs de croissance et de gestation sont représentées par des fonctions exponentielles (équations T_5 et T_6). A la naissance, le moteur de croissance (M) est initialisé et égal à 1. La croissance est sans point d'inflexion ce qui correspond aux courbes généralement observées. Le moteur de gestation (G) est initialisé lors de la fécondation et arrêté à la mise-bas. Le moteur de lactation est représenté par 4 compartiments (C_0, C, L et A). Les compartiments C, L et A représentent les priorités relatives des fonctions de mobilisation des réserves, de lactation et de reconstitution des réserves. Le compartiment C_0 est un compartiment d'accumulation sans signification biologique. En dehors de la période de lactation, il contient une quantité de matière égale à 1. La mise-bas déclenche la vidange instantanée de C_0 et ainsi la circulation de matière à travers les compartiments C, L et A (équations T_{1-4} et T_{7-11}). Cette circulation génère les dynamiques de priorités associées à la mobilisation, la production laitière et la reconstitution au cours du cycle de lactation. A mesure que la lactation progresse, la matière vient s'accumuler dans C_0 dont le niveau redevient égal à 1 en fin de lactation. Le retour de la matière depuis les compartiments représentatifs de la lactation et de l'anabolisme vers le compartiment d'accumulation est piloté par la dynamique de G (équations T_{10} et T_{11}). Lorsque le niveau de G augmente, les flux de L vers A et de A vers C_0 sont augmentés. Ainsi, plus la priorité de gestation est importante, plus la vitesse de retour de la matière vers C_0 est élevée. Cette liaison entre les moteurs de lactation et gestation permet de formaliser la diminution des priorités associées à la lactation et ainsi de représenter l'effet inhibiteur de la gestation sur la lactation. Les dynamiques des méta-hormones théoriques générées dans les compartiments du sous-système régulateur sont transmises aux flux du sous-système opérant grâce à un ensemble de paramètres d'échelle (détermination des flux de matière) et de paramètres de conversion énergétique (détermination des flux d'énergie).

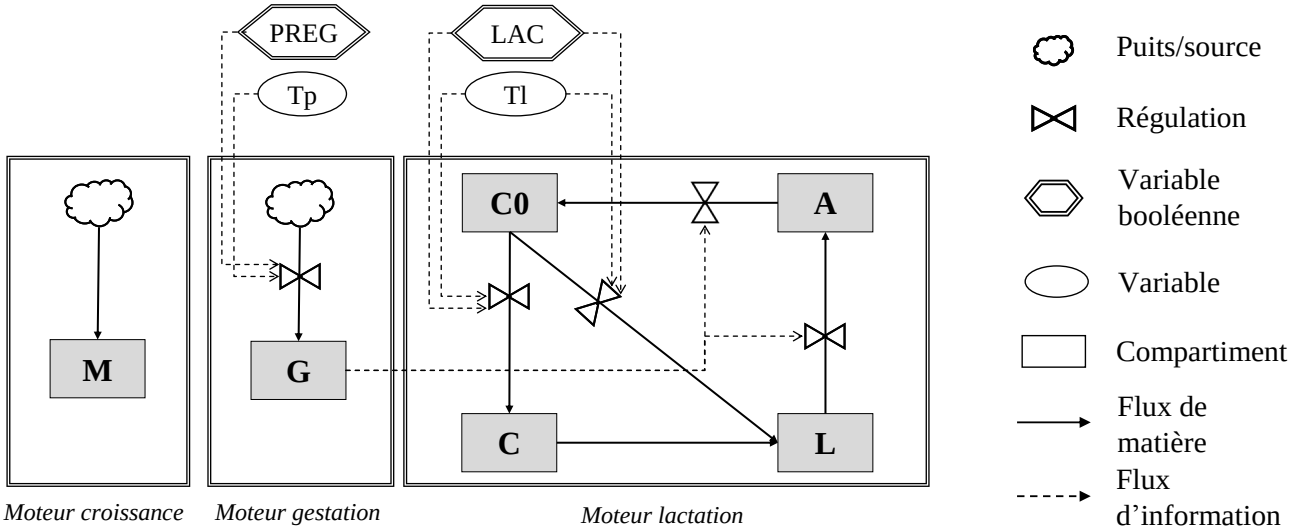


Figure 8 Structure du sous-système régulateur du modèle de chèvre laitière. A : anabolisme ; C : catabolisme ; C0 : compartiment d'accumulation ; L : lactation ; G : gestation et M : croissance. LAC : variable booléenne représentative du statut de lactation ; PREG: variable booléenne représentative du statut de gestation ; Tp : temps physiologique de gestation ; Tl : temps physiologique de lactation.

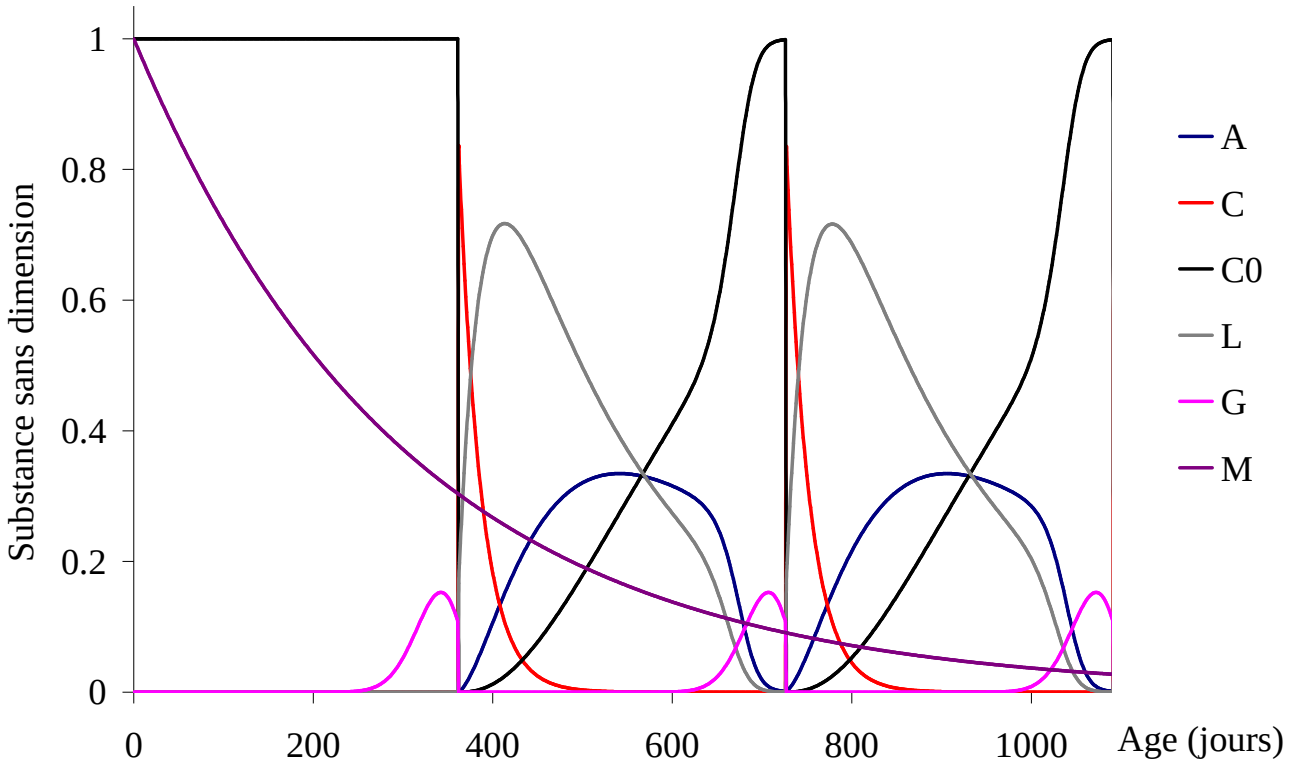


Figure 9 Dynamiques des compartiments du sous-système régulateur du modèle de chèvre laitière représentatifs des priorités entre fonctions. A : anabolisme ; C : catabolisme ; C_0 : compartiment d'accumulation ; L : lactation ; G : gestation et M : croissance.

Tableau 3 Variables du sous-système régulateur.

Variable	Description	Equation	N°
Hormone théorique			
A	Anabolisme	$\frac{dA}{dt}=-f_{AC_0}+f_{LA}$	T_1
C	Catabolisme	$\frac{dC}{dt}=f_{C_0C}-f_{CL}$	T_2
L	Lactation	$\frac{dL}{dt}=f_{C_0L}+f_{CL}-f_{LA}$	T_3
C_0	Compartiment d'accumulation	$\frac{dC_0}{dt}=-f_{C_0C}-f_{C_0L}+f_{AC_0}$	T_4
M	Croissance	$\frac{dM}{dt}=-k_M \cdot M$	T_5
G	Gestation[1]	$\frac{dG}{dt}=GU_i \cdot \exp(GU_a \cdot Tp^2+GU_b \cdot Tp+GU_c) \cdot ((2 \cdot GU_a \cdot Tp+GU_b)^2+2 \cdot GU_a) \cdot PREG$	T_6
Flux			
f_{C_0C}	C_0 à C	$f_{C_0C}=\begin{cases} k_{C_0} \cdot C_0 \cdot LAC \text{ si } Tl \in [1,2] \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$	T_7
f_{C_0L}	C_0 à L	$f_{C_0L}=\begin{cases} k_{C_0L} \cdot C_0 \cdot LAC \text{ si } Tl \in [1,2] \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$	T_8
f_{CL}	C à L	$f_{CL}=k_{CL} \cdot C \cdot ON$	T_9
f_{LA}	L à A	$f_{LA}=L \cdot (k_{LA}+k_{GA} \cdot G) \cdot ON$	T_{10}
f_{AC_0}	A à C_0	$f_{AC_0}=(A \cdot (k_{AC_0}+k_{GC_0} \cdot G)) \cdot ON$	T_{11}
Contrôle			
ON	Statut vivant	$ON=\begin{cases} 1 \text{ à la naissance} \\ 0 \text{ à la réforme} \end{cases}$	T_{12}
LAC	Statut lactation	$LAC=\begin{cases} 1 \text{ à la mise-bas} \\ 0 \text{ au tarissement} \end{cases}$	T_{13}
PREG	Statut gestation	$PREG=\begin{cases} 1 \text{ à la fécondation} \\ 0 \text{ à la mise-bas} \end{cases}$	T_{14}
Tl	Temps de lactation (jours)	$\frac{dTl}{dt}=LAC$	T_{15}
Tp	Temps de gestation (jours)	$\frac{dTp}{dt}=PREG$	T_{16}

[1]formalisme mathématique de l'équation proposée par Koong *et al.*, 1975.

Tableau 4 Paramètres du sous-système régulateur.

Paramètre	Valeur
k_M[1]	0.0033
GU_i[2]	0.000103
GU_a[2]	-0.00038
GU_b[2]	0.128
GU_c[2]	0.613
k_{C0C}[3]	5
k_{C0L}[3]	1
k_{CL}[3]	0.04
k_{LA}[3]	0.006
k_{GA}[3]	0.8
k_{AC0}[3]	0.007
k_{GC0}[3]	0.85

[1]calibré pour obtenir M=0.5 à t=210 jours ; [2]calibration basée sur Koong *et al.* (1975) ; [3]calibré pour obtenir la circulation complète en 360 jours d'une unité de substance sans dimension dans la boucle C_0-C-L-A-C_0.

3.2 Sous-système opérant

3.2.1 Principe général

Le sous-système opérant réalise la conversion d'un flux entrant d'énergie nette (EIN_{DIET}) en flux d'énergie nette associés aux fonctions physiologiques d'entretien (E_{MNT}), de croissance (E_{GR}), de gestation (E_{GU}), de production laitière (E_{MY}), de mobilisation (E_{MB}) et de reconstitution (E_{ST}) des réserves corporelles. Le formalisme du sous-système opérant repose sur l'équilibre entre entrées et sorties d'énergie:

$$EIN_{DIET} + E_{MB} = E_{GR} + E_{MNT} + E_{GU} + E_{ST} + E_{MY} \qquad E_1$$

Un premier niveau de détermination des flux correspond à l'expression du potentiel de production : les flux du sous-système opérant sont déterminés par les compartiments du sous-système régulateur et dénotés comme des flux potentiels d'énergie:

$$EIN_p = E_{GR\,p} + E_{MNT\,p} + E_{GU\,p} + E_{ST\,p} + E_{MY\,p} - E_{MB\,p} \qquad E_2$$

L'énergie ingérée potentielle est une sortie correspondant à la satisfaction des besoins liés à l'expression du potentiel de production. L'énergie réellement ingérée (EIN_{DIET}) est déterminée par la distribution d'aliments et leur encombrement. La comparaison de cette ingestion réelle avec l'ingestion potentielle détermine un différentiel d'énergie nette (dE en Mcal/j):

$$dE = EIN_{DIET} - EIN_P \qquad E_3$$

La ventilation de ce différentiel entre les fonctions physiologiques permet le calcul des flux réels d'énergie permis par la ration. Les fonctions de croissance, de gestation et d'entretien sont supposées ne pas être affectées par le différentiel d'énergie. Ainsi :

$$E_{MNTp} = E_{MNT} \qquad E_4$$

$$E_{GR} = E_{GR_p} \qquad E_5$$

$$E_{GU} = E_{GU_p} \qquad E_6$$

Le différentiel d'énergie affecte les fonctions de lactation, de mobilisation et de reconstitution des réserves dans des proportions définies par les coefficients r_2, p_2 et q_2. Ainsi les flux réels de lactation, de mobilisation et reconstitution peuvent s'écrire :

$$E_{MY} = E_{MY_p} + r_2 \cdot dE \qquad E_7$$

$$E_{MB} = E_{MB_p} + p_2 \cdot dE \qquad E_8$$

$$E_{ST} = E_{ST_p} + q_2 \cdot dE \qquad E_9$$

L'équilibre des entrées-sorties dans le sous-système opérant s'écrit alors :

$$EIN_{DIET}+(E_{MBp}+p_2\cdot dE)=E_{GR}+E_{MNT}+E_{GU}+(E_{STp}+q_2\cdot dE)+(E_{MYp}+r_2\cdot dE) \quad E_{10}$$

$$EIN_{DIET}+(p_2\cdot dE)-(q_2\cdot dE)-(r_2\cdot dE)=E_{GR}+E_{MNT}+E_{GU}+E_{STp}+E_{MYp}-E_{MBp} \quad E_{11}$$

$$EIN_{DIET}+dE\cdot(p_2-q_2-r_2)=EIN_p \quad E_{12}$$

$$q_2+r_2-p_2=1 \quad E_{13}$$

La relation entre les coefficients p_2, q_2 et r_2 garantit la conservation d'énergie entre entrées et sorties dans le sous-système opérant. La conversion des flux d'énergie associés à la croissance, la gestation, la mobilisation et la reconstitution des réserves en flux de matière (coefficients présentés dans le Tableau 5) permet de générer l'évolution dynamique des composantes du poids vif : poids vif vide (équation T_{36}), réserves corporelles (équation T_{37}) et utérus gravide (équation T_{39}). Le flux d'énergie associé à la lactation permet le calcul des productions laitières brute et standard (équations T_{42} et T_{43}). La production laitière standard est définie comme la production d'un kg de lait avec un taux butyreux égal à 35 g/kg, un taux protéique égal à 31 g/kg et un taux de lactose égal à 43 g/kg (Sauvant *et al.*, 2007). Le schéma d'ensemble du système opérant est présenté dans la Figure 10 et les équations du sous-système opérant sont présentées dans les Tableau 6 etTableau **7**.

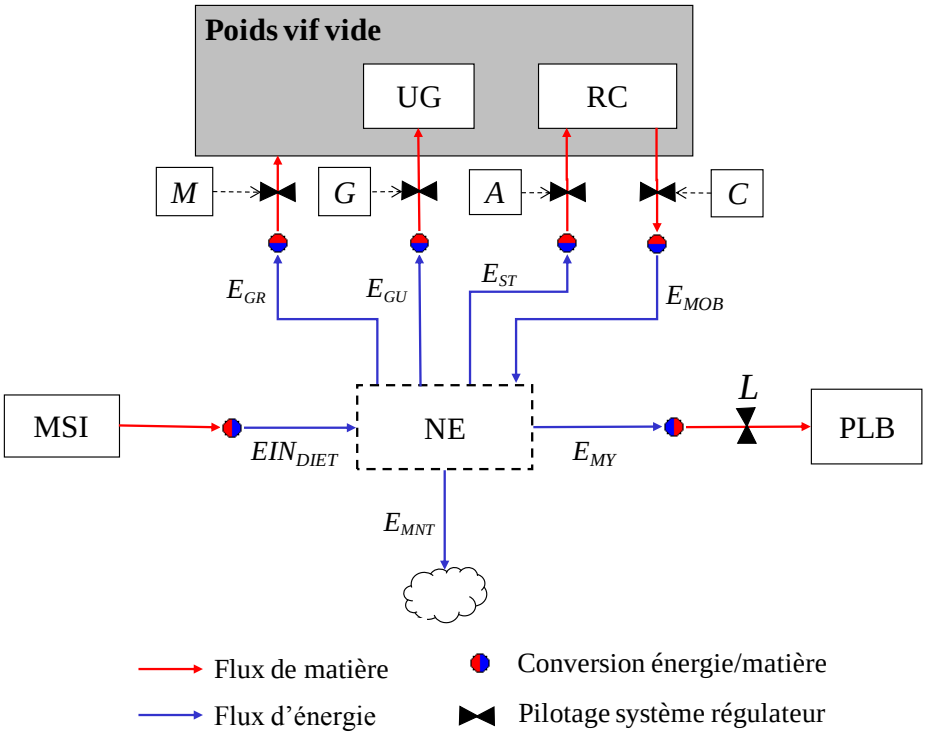


Figure 10 Représentation schématique du sous-système opérant du modèle de chèvre laitière. UG : utérus gravide ; RC : réserves corporelles ; NE : compartiment zéro-pool d'énergie nette ; MSI : matière sèche ingérée ; PLB : production laitière brute ; E_{GR} : flux d'énergie associé à la croissance ; E_{GU} : flux d'énergie associé à la croissance de l'utérus gravide ; E_{ST} : flux d'énergie associé à la reconstitution ; E_{MB} : flux d'énergie associé à la mobilisation ; EIN_{DIET} : flux d'énergie ingérée ; E_{MY} : flux d'énergie exportée dans le lait ; E_{MNT} : flux d'énergie associé à l'entretien ; M, G, A, C, L : compartiments du sous-système régulateur représentant respectivement les hormones théoriques de croissance, de gestation, d'anabolisme, de catabolisme et de lactation.

Tableau 5 Paramètres du sous-système opérant.

	Valeur	Unité
Conversion énergétique		
EV_{GU}	0.78[1]	Mcal /kg utérus gravide
EV_{GR}	3.31[2]	Mcal /kg poids vif
EV_{MB}	4.42[3]	Mcal /kg poids vif
EV_{ST}	6.60[4]	Mcal /kg poids vif
EV_{FCMY}	0.67[4]	Mcal /kg lait standard
EV_{UFL}	1.70[4]	Mcal /UFL
Changement d'échelle des flux du sous-système régulateur		
k_{CA}	3.78	
k_{MY}	0.45	
Paramètres d'entrée		
BW_b	utilisateur	kg
BW_m	utilisateur	kg
POT	utilisateur	kg
LS	2	entier
$pctBR_p$	0.2	kg/kg

[1] Martin, 2009.
[2] Luo *et al.*, 2004.
[3] Sauvant, communication personnelle.
[4] Sauvant *et al.*, 2007.

Tableau 6 Flux d'énergie du sous-système opérant associés aux fonctions physiologiques.

Variable	Description	Equation	N°
Flux d'énergie (Mcal/j)			
E_{GR}	Croissance	$E_{GR} = EV_{GR} \cdot M \cdot k_M \cdot (BW_m - BW_b) \cdot ON$	T_{17}
E_{GU}[1]	Utérus gravide	$E_{GU} = EV_{GU} \cdot G \cdot (-0.1016 \cdot LS^2 + 1.0659 \cdot LS + 0.0358) \cdot ON$	T_{18}
E_{MNT}[2]	Entretien	$E_{MNT} = (0.79 + 0.01 \cdot (BW_p - 60)) \cdot EV_{ufl} \cdot ON$	T_{19}
E_{MBp}	Mobilisation potentielle	$E_{MBp} = C \cdot EV_{MB} \cdot k_{MB} \cdot ON$	T_{20}
E_{STp}	Reconstitution potentielle	$E_{STp} = A \cdot EV_{ST} \cdot (k_{MB}/k_{CA}) \cdot ON$	T_{21}
E_{MYp}[3]	Energie lait potentielle	$E_{MY_p} = \begin{cases} ((k_{MY} \cdot C + (1 - k_{MY}) \cdot L) \cdot POT \cdot 1.446 \cdot LAC \cdot NLAC_{effect} \cdot ON & si\ Tl \epsilon]0, LL] \\ 0\ sinon \end{cases}$	T_{22}
E_{INp}	Ingestion potentielle	$E_{INp} = ((E_{GR} + E_{GU} + E_{MNT} + E_{STp} + E_{MYp}) - E_{MBp}) \cdot ON$	T_{23}
E_{MB}	Mobilisation	$E_{MB} = E_{MBp} + p_2 \cdot dE$	T_{24}
E_{ST}	Reconstitution	$E_{ST} = E_{STp} + q_2 \cdot dE$	T_{25}
E_{MY}	Energie lait	$E_{MY} = E_{MYp} + r_2 \cdot dE$	T_{26}
Contrôle			
dE	Différentiel d'énergie entre ingestion réelle et l'ingestion potentielle	$dE = (E_{IN_{diet}} - E_{INp}) \cdot ON$	T_{27}
k_{MB}[4]	Variable d'échelle permettant d'associer perte de poids vif et potentiel de production laitier	$k_{MB} = \begin{cases} 0.09317 \cdot POT - 0.02637 & si\ NLAC > 1 \\ 0.08944 \cdot POT - 0.02532 & si\ NLAC = 1 \end{cases}$	T_{28}

TreshDead[5]	Valeur seuil utilisée pour le tirage aléatoire représentant l'occurrence de la réforme involontaire	$ThreshDead = \begin{cases} 2.28 \cdot 10^{-5} \cdot NLAC^2 - 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot NLAC + 5.4 \cdot 10^{-4} \\ \text{si } NLAC \epsilon]0,13] \\ 0.5 \\ \text{si } NLAC \geq 13 \text{ ou } AGE \geq 4745 \text{ ou } BW < 30 \end{cases}$	T_{29}

Coefficient de partition d'énergie

p	Mobilisation potentielle	Voir logigramme (Figure 11)	
q	Reconstitution potentielle	Voir logigramme (Figure 11)	
r	Energie lait potentielle	Voir logigramme (Figure 11)	
p_2	Mobilisation	$p_2 = \begin{cases} p \cdot Z & \text{si } LAC=1 \\ p & \text{sinon} \end{cases}$	T_{30}
q_2	Reconstitution	$q_2 = \begin{cases} q \cdot X & \text{si } LAC=1 \\ q & \text{sinon} \end{cases}$	T_{31}
r_2	Energie lait	$r_2 = r + (1-X) \cdot q - (1-Z) \cdot p$	T_{32}

Fonction théorique

X	Modulation du coefficient q	$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{pctBR}{0.25}\right)^{30}}$	T_{33}
Z	Modulation du coefficient p	$Z = \frac{1}{1 + \left(\frac{pctBR - 0.3}{0.25}\right)^{30}}$	T_{34}

[1] L'équation intègre la relation entre prolificité et poids de l'utérus gravide juste avant la mise-bas sur la base de 426 mises-bas obtenues à l'UMR PNA (2002-2006).
[2] Sauvant *et al.*, 2007.
[3] La valeur 1.446 correspond au calcul suivant : le maximum de production laitière brute et le maximum de production laitière standard sont liés par :
max E_{MYp}=1.05.POT d'après les données de Sauvant et Morand-Fehr (1978). Max E_{MYp} est également défini par : max(C, L).k=POT.EV_{FCMY}.1.05 avec max (C,L)=0.486 au niveau du sous-système régulateur. Ainsi, k=(0.67.1.05)/0.486=1.446.
[4] Le calcul de la variable k_{MB} est détaillé en annexe 3.
[5] La relation entre le rang de lactation et la probabilité journalière de réforme involontaire (mortalité et pathologie) a été calculée sur la base des données de Malher *et al.* (2001).

Tableau 7 Variables de performance du sous-système opérant.

Variable	Description	Equation	Unité	N°
Composition du poids vif				
BW_p	Poids vif vide potentiel	$\frac{dBW_p}{dt} = (BW_m - BW_b) \cdot k_M \cdot M + ((\frac{A}{k_{CA}} \cdot k_{MB}) - C \cdot k_{MB})$	kg/j	T_{35}
BW	Poids vif vide	$\frac{dBW}{dt} = (BW_m - BW_b) \cdot k_M \cdot M + \frac{A \cdot k_{MB}}{k_{CA}} + \frac{q_2 \cdot dE}{EV_{ST}} - C \cdot k_{MB} - \frac{p_2 \cdot dE}{EV_{MB}}$	kg/j	T_{36}
BR	Réserves corporelles	$\frac{dBR}{dt} = pctBR_p \cdot (BW_m - BW_b) \cdot k_M \cdot M + (\frac{A \cdot k_{MB}}{k_{CA}}) + (\frac{q_2 \cdot dE}{EV_{ST}}) - C \cdot k_{MB} - (\frac{p_2 \cdot dE}{EV_{MB}})$	kg/j	T_{37}
pctBR	Proportion de réserves corporelles	$pctBR = \frac{BR}{BW_p}$		

GU[1]	Utérus gravide	$\frac{dGU}{dt} = G \cdot (-0.016 \cdot LS^2 + 1.0659 \cdot LS + 0.0358)$	kg/j	T_{38}
Production				
MY_p[2]	Production laitière brute potentielle	$MY_p = \begin{cases} L \cdot POT \cdot 1.3943 \cdot LAC \cdot NLAC_{effect} \text{ if } Tl \in]0, LL] \\ 0 \text{ else} \end{cases}$	kg/j	T_{39}
$FCMY_p$	Production laitière standard potentielle	$FCMY_p = \frac{E_{MY_p}}{EV_{FCMY}}$	kg/j	T_{40}
MY	Production laitière brute	$MY = MY_p + (0.428 \cdot (r_2 \cdot dE)^2 + 1.348 \cdot r_2 \cdot dE + 0.0016)$	kg/j	T_{41}
FCMY	Production laitière standard	$FCMY = \frac{E_{MY}}{EV_{FCMY}}$	kg/j	T_{42}
WKLAC	Semaine de lactation			
LL	Durée de lactation		jours	
NLAC	Numéro de lactation		entier	
$NLAC_{effect}$[3]	Effet du numéro de lactation	$NLAC_{effect} = 1.26 \cdot e^{-0.058 \cdot NLAC} - 0.92 \cdot e^{-0.92 \cdot NLAC}$		T_{43}
Ingestion d'énergie				
INTCAP[4]	Capacité d'ingestion	$INTCAP = (1.17 + (BW_p - 60) \cdot 0.016 + 0.24 \cdot FCMY_p) \cdot (0.5 + 0.5 \cdot (1 - e^{-0.6 \cdot WKLAC}))$	UE/j	T_{44}
QD_i	Quantité d'aliment i distribuée	Fichier ration	kg MS/j	
QI_i	Quantité d'aliment i ingérée	$QI_i = \begin{cases} 0.5 \cdot INTCAP / UE_i & \text{si } i = F_1 \text{ ou } i = F_2 \\ \max(0, (INTCAP - \sum_i QD_i \cdot UE_i) / UE_{F3} & \text{si } i = F_3 \\ QD_i & \text{si } i = C \end{cases}$	kg MS/j	T_{45}
UE_i[5]	Encombrement aliment i	$UE_i = \begin{cases} QI_C \cdot 0.38 \cdot UE_{F3} & \text{si } i = C \\ \text{fichier ration} & \text{sinon} \end{cases}$	UE/kg MS	T_{46}
UF_i	Valeur énergétique de l'aliment i	Fichier ration	UFL/kg MS	
E_{diet}	Energie nette ration ingérée	$E_{diet} = (QI_{F1} \cdot UF_{F1} + QI_{F2} \cdot UF_{F2} + QI_{F3} \cdot UF_{F3} + QD_C \cdot UF_C) \cdot EV_{UFL}$	Mcal/j	T_{47}
E_{MAJ}[6]	Majoration liée aux interactions digestives	$E_{MAJ} = 2.5 \cdot (\frac{FCMY_p}{BW_p}) \cdot EV_{UFL}$	Mcal/j	T_{48}
EIN_{diet}	Energie ingérée disponible	$EIN_{diet} = E_{diet} - E_{MAJ}$	Mcal/j	T_{49}

[1] Voir tableau 5, équation T_{18}.

[2] La valeur 1.3943 correspond au calcul suivant: $MYp(t) = POT \cdot L \cdot k$. En troisième lactation, au pic : $MYp = POT = POT \cdot Lmax \cdot k \Leftrightarrow Lmax \cdot k = 1 \Leftrightarrow k = 1/Lmax$. Avec Lmax=0.7172, k=1.3943.

[3] Le calcul de l'effet du rang de lactation est détaillé dans l'annexe 3

[4, 5, 6] Sauvant *et al.*, 2007.

3.2.2 Conversion de la ration distribuée en énergie ingérée

L'ingestion de MS repose sur les principes d'unités d'encombrement de lactation (UEL) et de substitution entre fourrage et concentré développés dans le chapitre sur les caprins (Sauvant *et al.*, 2007) de l'ouvrage de l'INRA sur l'Alimentation des bovins, ovins et caprins. Le modèle ne prend donc en compte que les phénomènes d'encombrement du rumen dans la détermination de l'ingestion de MS. La capacité d'ingestion (INTCAP, T_{44}) est calculée par rapport aux valeurs potentielles de poids vif et de production laitière standard. Elle n'intègre pas d'indicateur de l'état corporel ou de l'importance des réserves mobilisables. Les quantités distribuées sont déterminées par la stratégie d'alimentation. Elles sont constituées d'un fourrage F_1 distribué en quantité limitée et fixe (QD_{F1}, kg MS), d'un fourrage F_3 distribué ad libitum (QD_{F3}, kg MS), d'un aliment déshydraté F_2 (QD_{F2}, kg MS) et d'un concentré C (QD_C, kg MS). Les aliments sont décrits par leurs valeurs énergétiques (UF_{F1}, UF_{F2}, UF_{F3} et UF_C en UFL/kg MS) et leurs valeurs d'encombrement (UE_{F1}, UE_{F2}, UE_{F3} et UE_C, en UEL/kg MS). Les aliments F_1, F_2 et C sont ingérés de façon prioritaire. Les quantités ingérées (QI_{F1}, QI_{F2} et QI_C) sont donc égales aux quantités distribuées. Cette hypothèse implique que F_1 et F_2 soient distribués en quantité faible. La substitution fourrage-concentré s'applique uniquement entre F_3 et C. Le taux de substitution global (S_g) permet de prédire la valeur d'encombrement du concentré à partir de la valeur d'encombrement du fourrage et de la quantité de concentré distribué (équation T_{46}). La quantité de fourrage F_3 ingérée (QI_{F3}) est donc calculée ainsi :

$$QI_{F3} = \left(INTCAP - (QI_{F1} \cdot UE_{F1} + QI_{F2} \cdot UE_{F2} + QI_C{}^2 \cdot 0.38 \cdot UE_{F3})\right)/UE_{F3} \qquad E_{14}$$

Ainsi l'énergie nette ingérée (E_{diet} en Mcal) est égale à :

$$E_{DIET} = (QI_{F1} \cdot UF_{F1} + QI_{F2} \cdot UF_{F2} + QI_{F3} \cdot UF_{F3} + QI_C \cdot UF_C) \cdot EV_{UFL} \qquad E_{15}$$

Afin de prendre en compte la diminution de valeur énergétique des aliments liée aux niveaux élevés d'ingestion et aux interactions digestives dues aux apports de concentré, les besoins en énergie sont majorés (Sauvant *et al.*, 2007). Cette majoration (E_{MAJ} en Mcal/j) est calculée comme suit :

$$E_{maj} = 2.5 \cdot \left(FCMY_p/BW_p\right) \cdot EV_{UFL} \qquad E_{16}$$

Ainsi l'énergie nette ingérée effectivement disponible (EIN_{diet} en Mcal/j) est égale à :

$$EIN_{DIET} = E_{DIET} - E_{maj} \qquad E_{17}$$

La comparaison de l'énergie nette ingérée avec l'énergie potentielle déterminée par le sous-système régulateur génère le différentiel d'énergie qui est à ventiler entre les différentes fonctions.

3.2.3 Ventilation du différentiel d'énergie entre les fonctions physiologiques

La conservation de l'énergie entre entrées et sorties se traduit par (cf. 3.2.1):

$$q_2 + r_2 - p_2 = 1 \qquad E_{18}$$

Les coefficients de ventilation p_2, q_2 et r_2 sont définis ainsi :

$$p_2 = p \cdot Z \qquad E_{19}$$

$$q_2 = q \cdot X \text{ et} \qquad E_{20}$$

$$r_2 = r + (1 - X) \cdot q - (1 - Z) \cdot p \qquad E_{21}$$

Les coefficients p, q et r correspondent aux coefficients de ventilation de base, dépendants uniquement de dE et des dynamiques potentielles de mobilisation, lactation et reconstitution. Le logigramme de la Figure 11 représente la détermination des valeurs prises par p, q et r en fonction des états physiologiques. La détermination de p, q et r repose sur deux hypothèses :

- la partition entre l'énergie associée à la production laitière et l'énergie associée aux réserves est de 50% et donc $r = 0.5$ pendant la lactation
- la partition de dE entre mobilisation et reconstitution des réserves corporelles affecte le flux dont la valeur potentielle est la plus élevée.

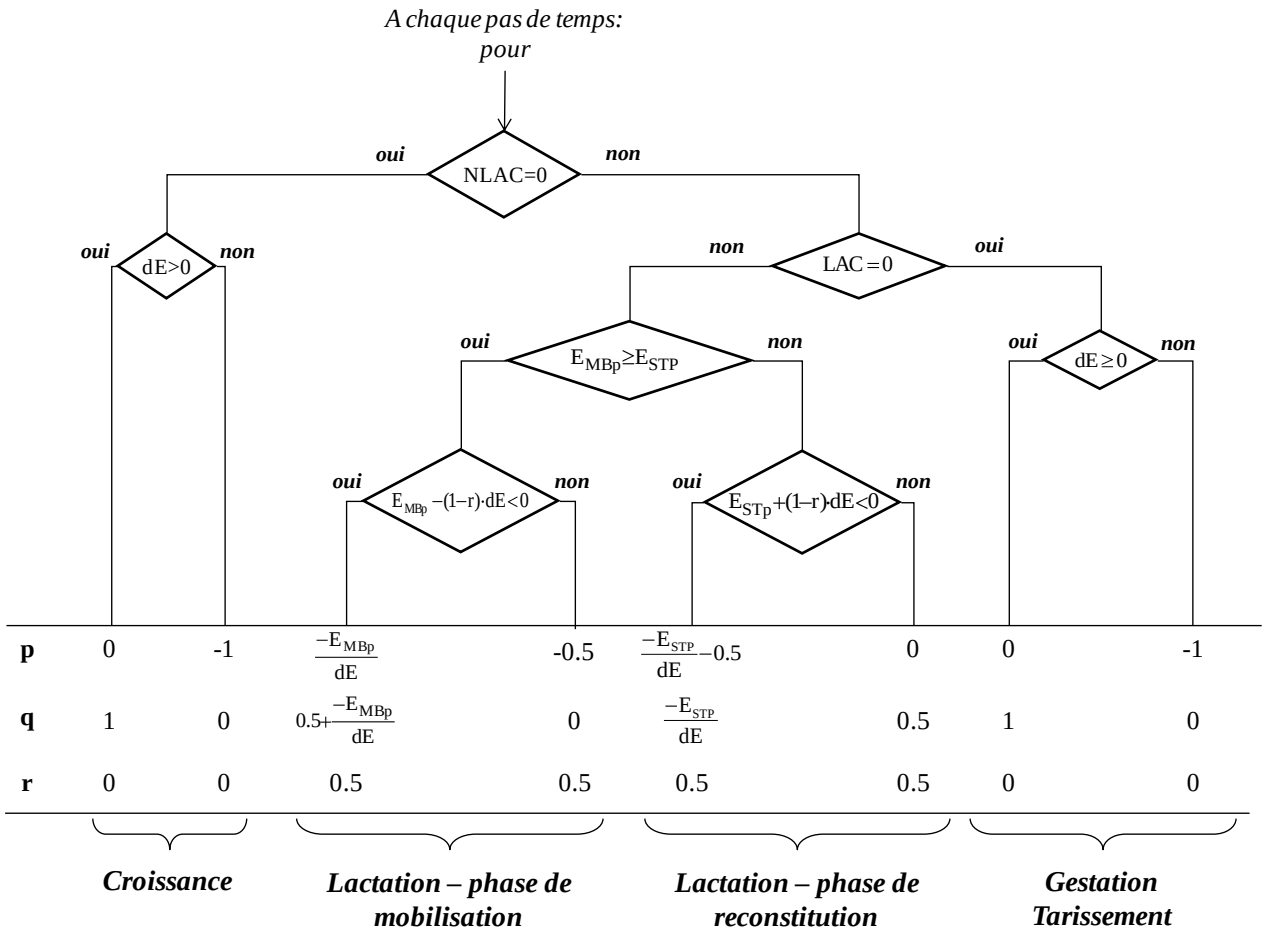


Figure 11 Logigramme représentant la détermination des coefficients p, q et r en fonction du stade physiologique de la femelle. Ces coefficients réalisent la ventilation du différentiel d'énergie dE (entre apports et besoins), généré par la ration ingérée, entre les fonctions de mobilisation, reconstitution et lactation. p : coefficient affectant l'énergie de mobilisation ; q : coefficient affectant l'énergie de reconstitution ; r : coefficient affectant l'énergie exportée vers le lait ; NLAC : rang de lactation ; LAC : statut de lactation; E_{MBp}: énergie potentielle de mobilisation; E_{STp}: énergie potentielle de reconstitution.

Par exemple, en début de lactation, si un excédent d'énergie est ingéré, le flux de mobilisation est prioritairement affecté par le différentiel jusqu'à devenir nul puis, si besoin est, le flux de reconstitution augmente jusqu'à ce que le différentiel d'énergie soit entièrement reporté. Réciproquement, si l'apport d'énergie est insuffisant, seule la mobilisation augmente pour compenser le différentiel d'énergie. Cette représentation traduit l'hypothèse que le flux ayant la priorité la plus importante est affecté prioritairement par le différentiel d'énergie. Les coefficients de base p, q et r sont modulés par deux fonctions théoriques (X et Z), dépendantes de la proportion de réserves corporelles par rapport au poids vif vide (Tableau 6, équation T_{38}). L'allure des fonctions X et Z est présentée sur la Figure 12. Entre des proportions de réserves corporelles égales à 0.1 et 0.2 kg/kg de poids vif vide, Z = 1 et X = 1 ce qui implique que :

$p_2 = p$	E_{22}
$q_2 = q$	E_{23}
$r_2 = r$	E_{24}

Lorsque la proportion de réserves corporelles est inférieure à 0.1 (kg/kg de poids vif vide) et que l'énergie ingérée est déficitaire, la fonction Z module p_2 de telle sorte que la mobilisation soit ralentie. Réciproquement lorsque la proportion de réserves corporelles est supérieure à 0.2 (kg/kg de poids vif vide) et que l'énergie ingérée est excédentaire, la fonction X module q_2 de telle sorte que la reconstitution soit ralentie. Les valeurs des proportions de réserves à partir desquelles les fonctions X et Z modulent les coefficients de partition ont été déterminées grâce à une analyse de la littérature sur les réserves corporelles de la chèvre (annexe 2).

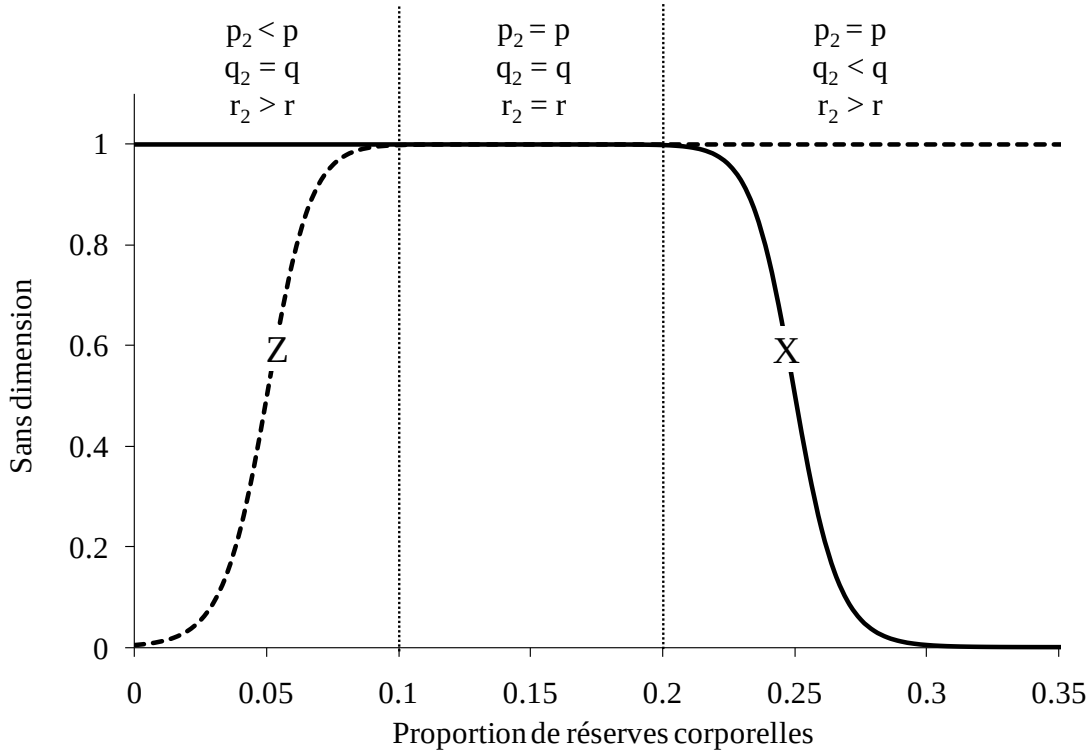


Figure 12 Allures des fonctions théoriques X et Z qui modulent les coefficients de ventilation du différentiel d'énergie p, q et r pour calculer les coefficients p_2, q_2 et r_2 en fonction de la proportion de réserves corporelles par rapport au poids vif vide (en kg/kg).

3.2.4 Réponse des flux de matière au différentiel d'énergie

Le modèle représente deux modes d'expression des réponses du système opérant : les flux d'énergie associés aux fonctions physiologiques et les flux de matière (poids vif, production laitière brute et standard). Le différentiel d'énergie est reporté en partie sur les variations de poids vif grâce aux flux de mobilisation et de reconstitution et aux coefficients de conversion énergétiques (en Mcal/kg) du gain ou de la perte d'un kg de réserves corporelles. La

production laitière standard s'obtient directement en divisant l'énergie exportée dans le lait (E_{MY}) par la valeur énergétique d'un kg de lait standard (0.67 Mcal/kg). Les réponses marginales de la production laitière brute et du taux butyreux à la quantité d'aliment concentré (kg/j) proposées dans les tables INRA (Sauvant *et al.*, 2007) permettent de calculer la réponse marginale du lait standard (Rep_{FCMY}) à la quantité d'aliment concentré et ainsi de relier MY et FCMY :

$$Rep_{MY} = 0.192 \cdot Rep_{FCMY}{}^2 + 0.9038 \cdot Rep_{FCMY} + 0.0016 \qquad E_{25}$$

La réponse marginale de FCMY s'obtient à partir de celle d'E_{MY} :

$$Rep_{FCMY} = \frac{r_{2 \cdot dE}}{0.67} \qquad E_{26}$$

Ainsi :

$$Rep_{MY} = 0.1925 \cdot \left(\frac{r_2 \cdot dE}{0.67}\right)^2 + 0.9038 \cdot \left(\frac{r_2 \cdot dE}{0.67}\right) + 0.0016 \qquad E_{27}$$

Le modèle permet alors de calculer MY en fonction de dE

$$MY = MY_p + 0.1925 \cdot \left(\frac{r_2 \cdot dE}{0.67}\right)^2 + 0.9038 \cdot \left(\frac{r_2 \cdot dE}{0.67}\right) + 0.0016 \qquad E_{28}$$

3.2.5 Variables permettant la connexion avec le niveau troupeau

La naissance d'une chèvre dans le troupeau est formalisée par :

- le changement de valeur de la variable booléenne ON, qui représente le statut mort ou vivant de l'individu ;
- l'attribution d'une valeur aux variables POT, BW_b et BW_m ;
- l'initialisation du moteur de croissance.

La mort ou la maladie, conduisant à l'arrêt du fonctionnement du modèle, sont gérées par un événement journalier de mortalité associé à une probabilité (ThreshDead, équation T_{29}) fonction de l'âge, du rang de lactation et du poids vif (Malher *et al.*, 2001). Enfin, le modèle est associé à 8 variables informatives (Tableau 8): un numéro d'identification (NumGoat), un numéro d'entité de gestion (ME), un numéro de sous lot de lutte (MG), une date de fécondation (DAT_{CON}), une date de prochaine mise-bas (DAT_{NXTKID}), une date de mise-bas précédente (DAT_{PRVKID}), une date de tarissement (DAT_{DRY}) et enfin une variable booléenne (EL) reflétant la décision de conduite en lactation longue prise au moment du diagnostic de

gestation. Ces variables n'ont de sens que par rapport à la gestion et n'interviennent pas dans la modélisation des processus biologiques.

Tableau 8 Variables de connexion avec le modèle de gestion dans le sous-système opérant (les évènements du modèle de gestion sont figurés en italique).

Variable	Description	Action évènements
Contrôle		
ExtLac	Statut de mise en lactation longue	$\text{ExtLAC} = \begin{cases} 1 \text{ à } \textit{Non pregnant goat management} \text{ évènement} \\ 0 \text{ sinon en fonction de NPregOption} \end{cases}$
NumGoat	Numéro individuel	NumGoat = i à *Birth*
ME	Numéro d'entité de gestion	*Birth, Death, Replacement integration, Non pregnant goat management, Voluntary culling*
MG	Numéro de sous-lot de lutte	MG = i à Mating Group Constitution évènement avec $i \in [1,3]$
Date		
DAT_{CON}	Fécondation	DAT_{CON} = t pendant l'évènement *Mating*
DAT_{NXTKID}	Prochaine mise-bas	$DAT_{NXTKID} = \begin{cases} DAT_{CON} + 150 & \text{lors de l'évènement } \textit{Pregnancy diagnosis} \\ 0 & \text{lors de l'évènement } \textit{Kidding} \end{cases}$
DAT_{PRVKID}	Précédente mise-bas	$DAT_{PRVKID} = \begin{cases} DAT_{NXTKID} & \text{lors de l'évènement } \textit{Kidding} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
DAT_{DRY}	Tarissement	$DAT_{DRY} = \begin{cases} DAT_{NXTKID} - 60 & \text{lors de l'évènement } \textit{Pregnant goat Management} \\ 0 & \text{lors de l'évènement } \textit{Drying} \end{cases}$

3.3 Evaluation du modèle de chèvre laitière

L'évaluation du modèle de chèvre laitière s'est d'abord appuyée sur l'analyse de sensibilité des dynamiques de poids vif et de production laitière au potentiel laitier (de 2 à 7 kg) et à la quantité d'aliment concentré distribuée (de 0 à 1.5 kg). Ensuite, les dynamiques simulées de poids vif et de production laitière sur 4 cycles de gestation-lactation ont été comparées qualitativement à des courbes individuelles du troupeau expérimental de l'UMR PNA. La même approche qualitative a été utilisée pour comparer un ensemble de données de la littérature sur les réserves corporelles chez la chèvre laitière avec les données simulées. Le modèle a également été évalué en simulant les réponses du poids vif et de la production laitière pour trois niveaux de potentiels laitiers (3, 4 et 5 kg) et pour trois types de rations correspondant aux stratégies d'alimentation envisagées à l'échelle troupeau. Enfin, le modèle a été utilisé pour tester une conduite en lactation longue, c'est à dire une absence de tarissement et une relance de la production déclenchée par un effet de l'alimentation. L'ensemble des données présentées dans l'évaluation du modèle, qu'elles soient issues de la littérature ou du troupeau expérimental de l'UMR, n'ont pas été utilisées dans la construction des équations.

3.3.1 Analyses de sensibilité

L'analyse de sensibilité sur le potentiel laitier a été conduite pour une gamme de potentiels laitiers variant de 2 à 7 kg. Les résultats sont présentés pour le poids vif (Figure 13) et la production laitière (Figure 14). Le modèle simule de façon cohérente l'augmentation de production laitière associée à l'augmentation du potentiel laitier. Il simule également l'accroissement de la mobilisation liée à l'augmentation du potentiel laitier. L'augmentation de la production pour une même valeur de potentiel laitier (Figure 14) traduit l'effet du rang de lactation sur la production : le potentiel laitier est atteint en troisième lactation.

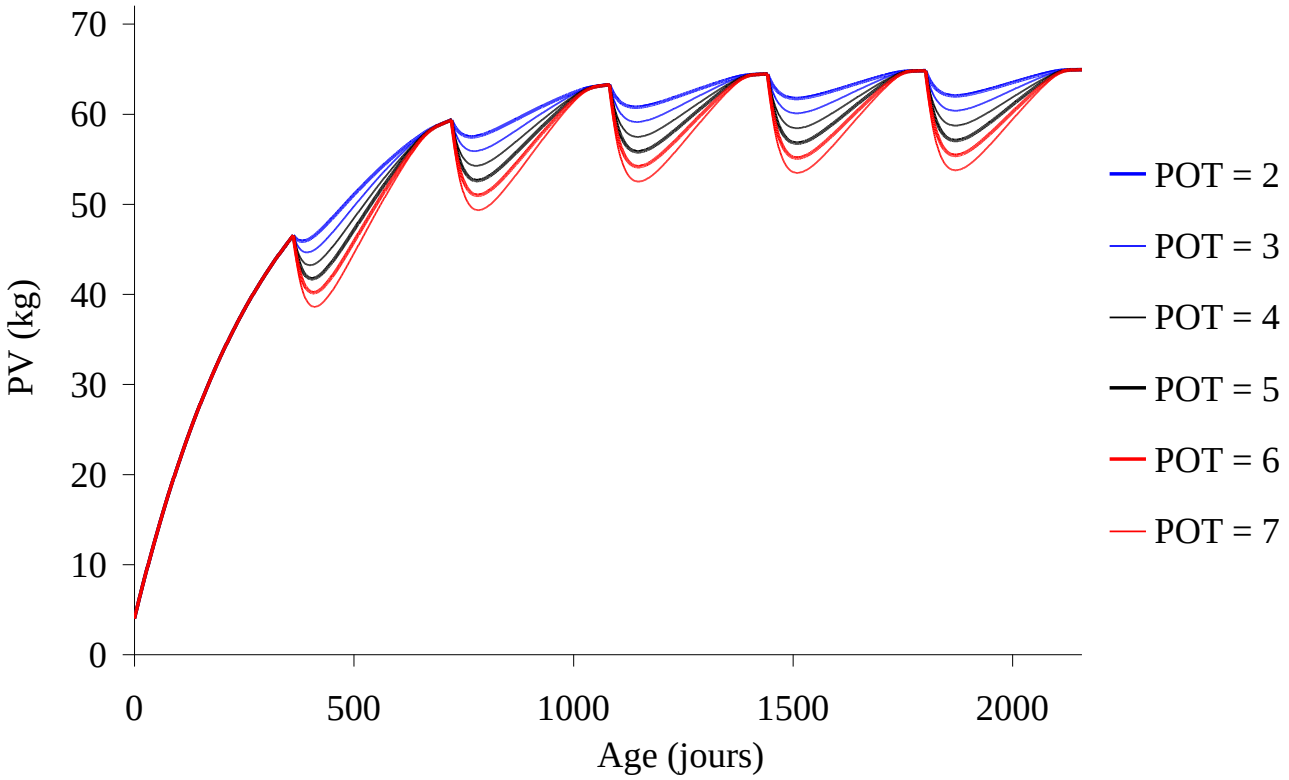


Figure 13 Dynamiques de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg réalisant 5 lactations successives avec un potentiel laitier (POT) variant de 2 à 7 kg (production laitière brute au pic de la troisième lactation).

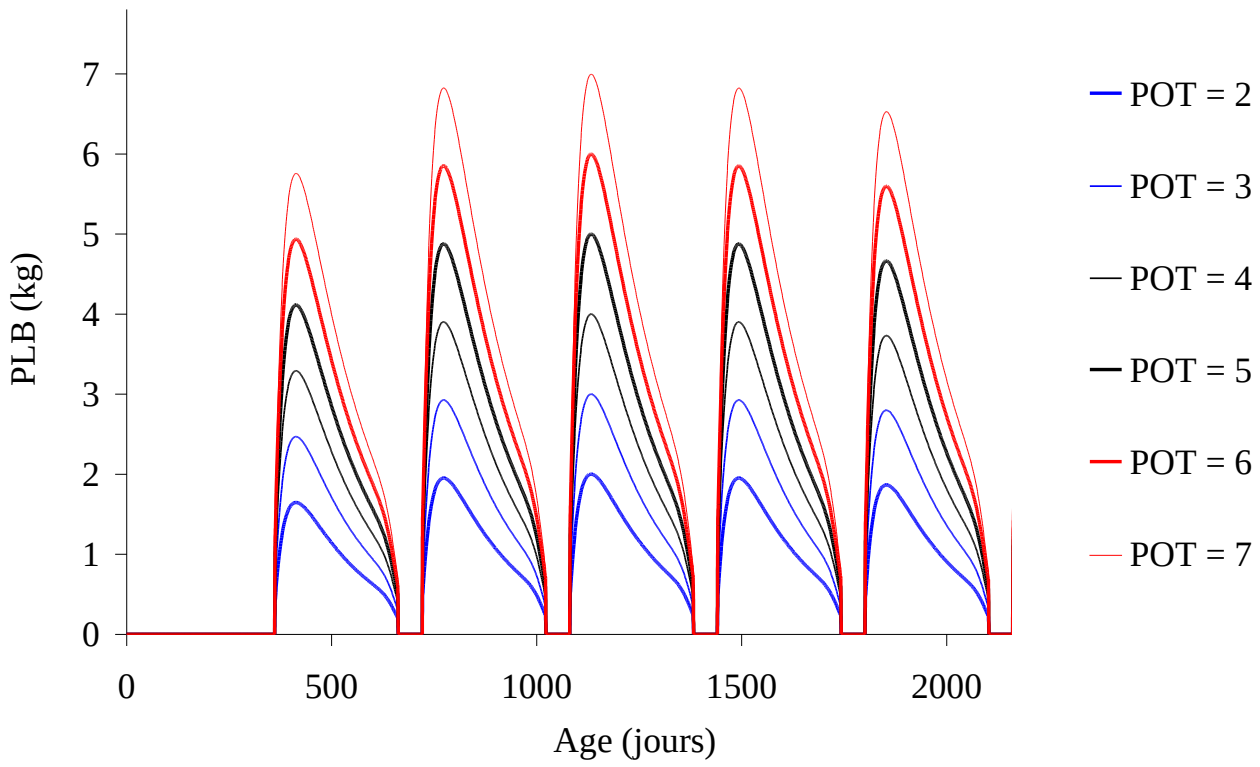


Figure 14 Dynamiques de production laitière brute (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg réalisant 5 lactations successives avec un potentiel laitier (POT) variant de 2 à 7 kg (production laitière brute au pic de la troisième lactation).

L'analyse de sensibilité sur l'apport de concentré a été conduite pour une gamme d'apports variant de 0.00 à 1.50 kg de MS d'aliment concentré par jour sur les 100 premiers jours de lactation. Les résultats obtenus pour le poids vif sont présentés sur la Figure 15 et les résultats obtenus pour la production laitière sont présentés sur la Figure 16. Le modèle simule de façon cohérente l'augmentation de production ainsi que la diminution de la mobilisation des réserves liées à une augmentation des apports de concentré. Pour la production laitière, l'aspect crénelé des courbes est lié au calcul de l'ingestion qui est corrigée en fonction de la semaine de lactation. Sur cette même figure, les courbes grises illustrent les réponses marginales de la production laitière brute d'après les tables INRA (Sauvant *et al.*, 2007). La production laitière maximale simulée (2.94 kg de lait brut à 50 jours de lactation environ) pour une quantité nulle d'aliment concentré dans la ration a été utilisée comme production de base à laquelle les réponses marginales pour 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 et 1.50 kg de MS/jour d'aliment concentré ont été ajoutées. Le modèle est cohérent avec les réponses marginales à partir de 0.75 kg de MS/jour d'aliment concentré. En revanche le modèle sous-estime la réponse du lait brut pour les apports égaux à 0.25 et 0.50 kg de MS/jour. Cette sous-estimation est liée au fait que le modèle réoriente plus d'énergie vers le poids vif ce qui diminue la réponse de la production laitière.

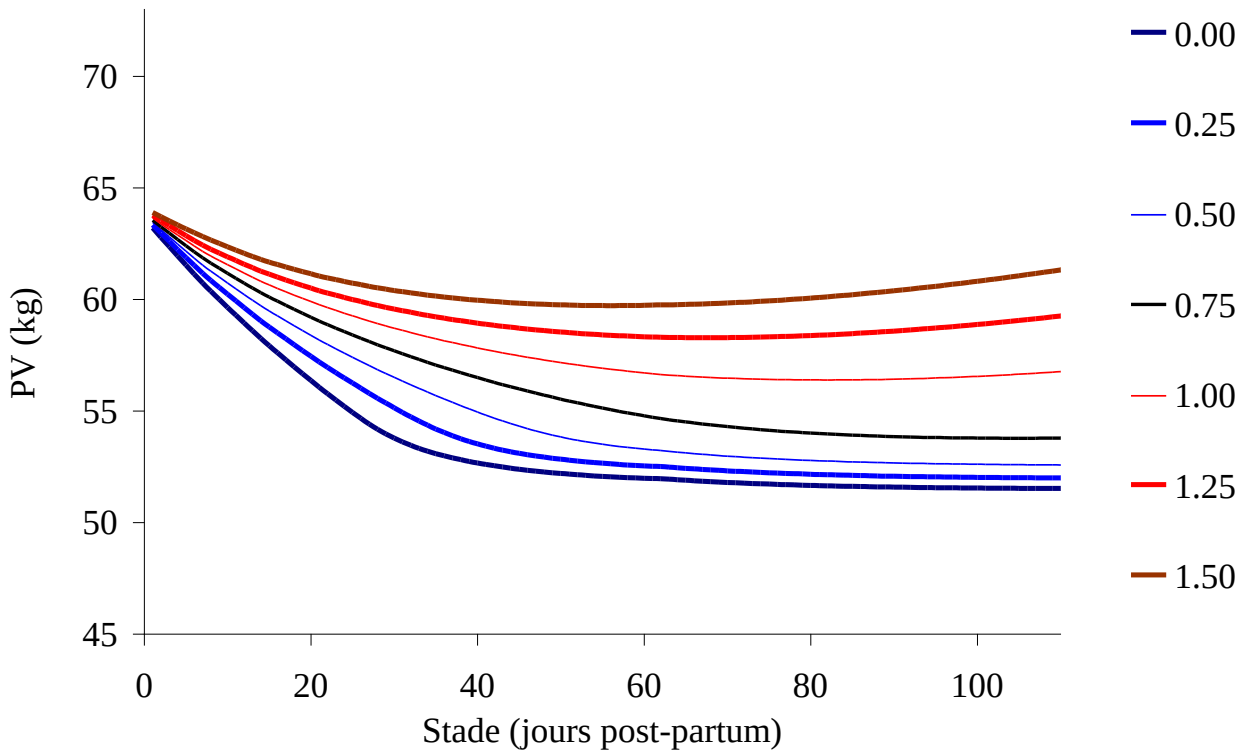


Figure 15 Dynamiques de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour une chèvre de 65 kg et de potentiel laitier égal à 4 kg (pic de production atteint en troisième lactation) en début de troisième lactation avec un potentiel laitier de 4kg et alimentée avec des quantités d'aliment concentré variant de 0 à 1.5 kg/j.

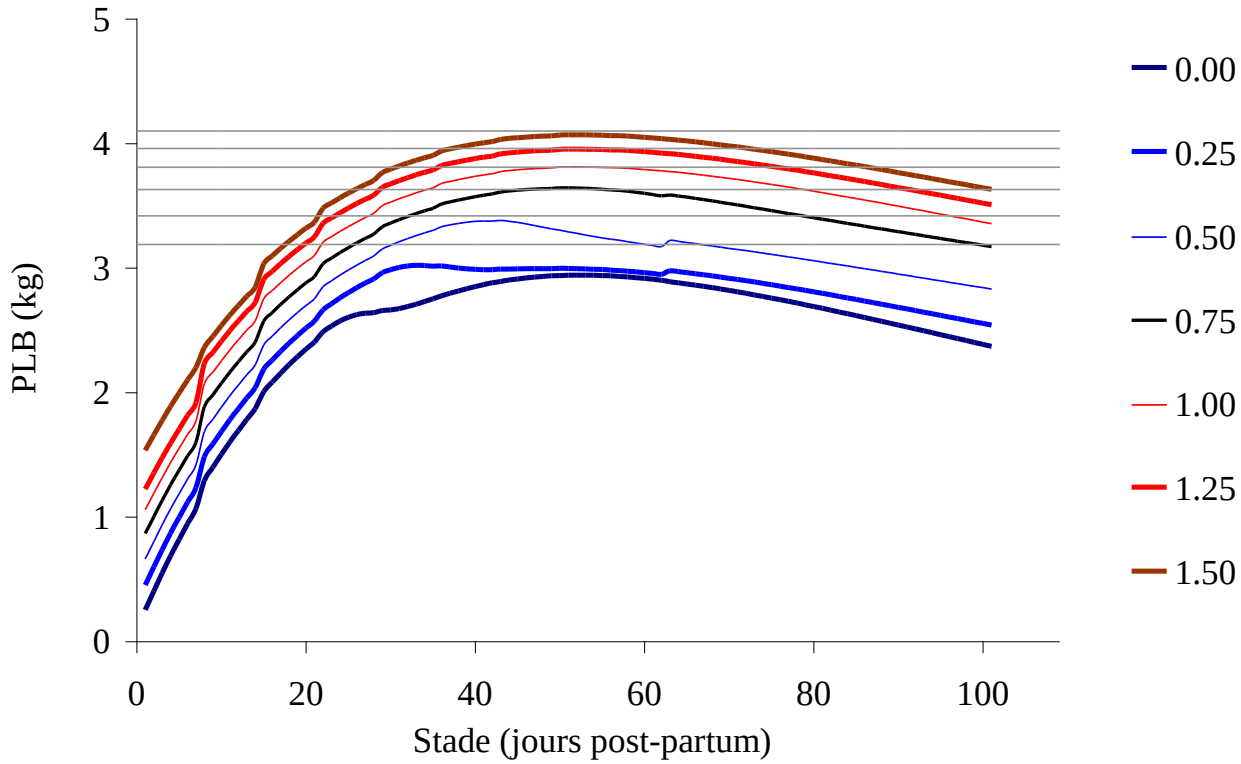


Figure 16 Dynamiques de production laitière brute (PLB) simulées en début de lactation pour une chèvre de 65 kg avec un potentiel laitier de 4 kg alimentée avec des quantités de concentré variant de 0 à 1.5 kg/j. Les 6 lignes grises correspondent aux réponses marginales à 6 niveaux d'apport de concentrés (de 0.25 kg à 1.5 kg) proposées par Sauvant et al. (2007) dans les tables de recommandations INRA. Ces réponses marginales ont été ajoutées au niveau de production maximum prédit par le modèle pour une ration sans aliment concentré (soit 2.94 kg de lait brut).

3.3.2 Confrontation aux courbes individuelles du troupeau expérimental de l'UMR PNA

La Figure 17 représente les dynamiques simulées pour trois niveaux de poids vif mature (60, 70 et 80 kg) à l'échelle de 4 cycles de gestation-lactation. Ces dynamiques sont positionnées par rapport à 59 courbes individuelles obtenues sur le troupeau expérimental de l'UMR PNA. La Figure 18 présente les dynamiques simulées pour trois niveaux de potentiel laitier (3, 4 et 5 kg) à l'échelle de 4 cycles de gestation-lactation. Ces dynamiques sont également positionnées par rapport aux 59 courbes individuelles obtenues sur le troupeau expérimental de l'UMR PNA. Cette comparaison qualitative permet de vérifier la cohérence des simulations du modèle pour une gamme de variation de poids vif et de production laitière.

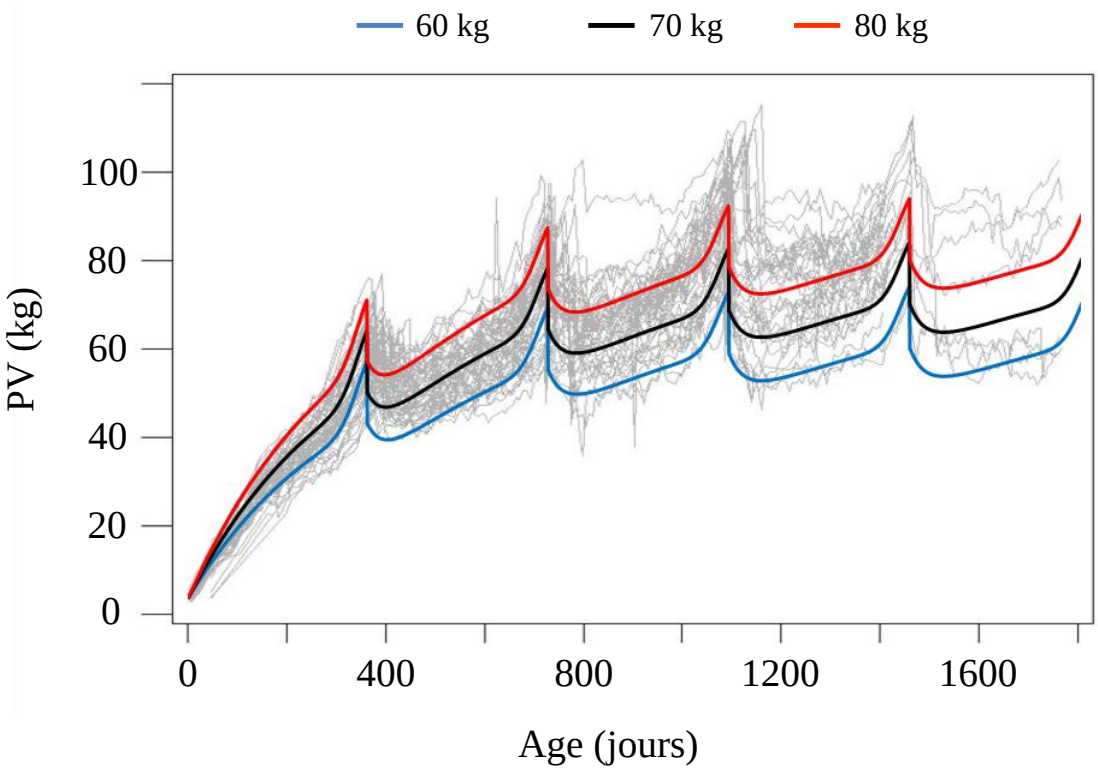


Figure 17 Courbes potentielles de poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de poids vif mature. Les données en fond de graphiques correspondent à 59 courbes de chèvres du troupeau expérimental de l'UMR PNA ayant réalisé trois ou quatre lactations complètes.

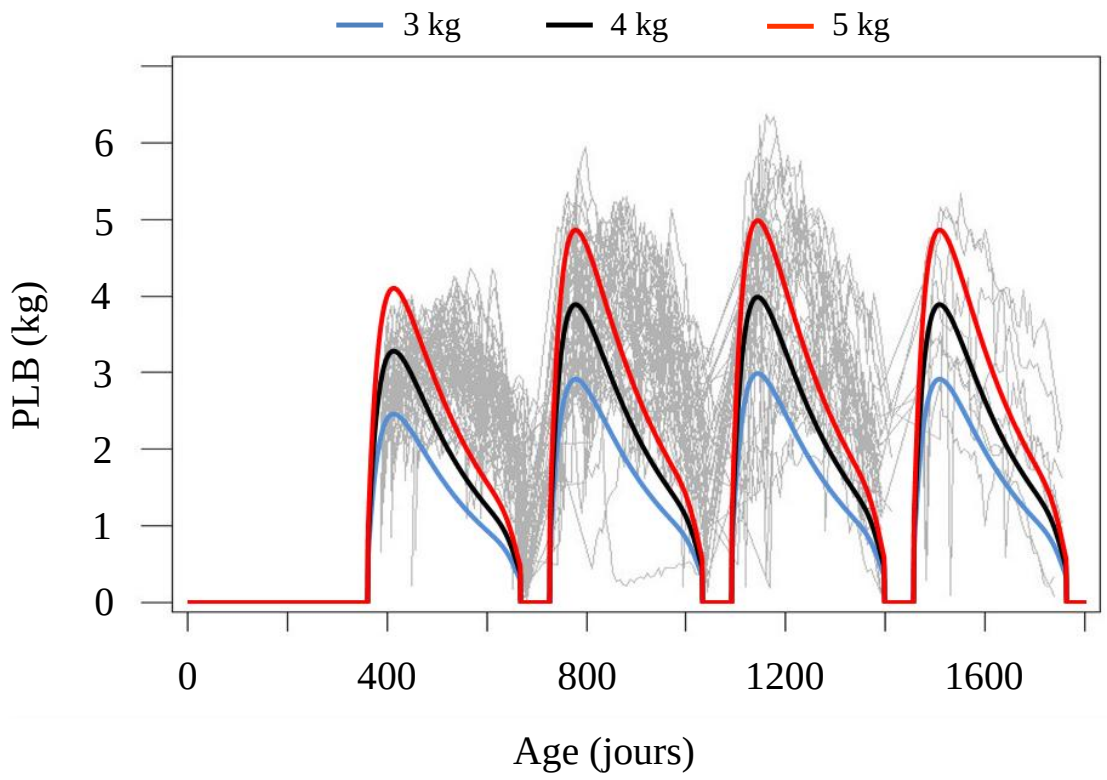


Figure 18 Courbes potentielles de productions laitières brutes (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiel laitier (production laitière au pic de la troisième lactation). Les données en fond de graphiques correspondent à 59 courbes de chèvres du troupeau expérimental de l'UMR PNA ayant réalisé trois ou quatre lactations complètes.

3.3.3 Niveaux de potentiel laitier et d'apports d'aliment concentré

Le niveau de potentiel égal à 4 kg a été testé avec un plan d'alimentation découpé en trois séquences sur la lactation (1 mois, 5 mois et 4 mois) et pour trois niveaux d'apport d'aliment concentré : un niveau satisfaisant les besoins, un niveau équivalent à 10% au dessus des besoins et un niveau équivalent à 10% en dessous des besoins. Le niveau de potentiel égal à 3 a été testé avec un niveau d'apport satisfaisant et un niveau d'apport 10 % au dessus des besoins. Le niveau de potentiel égal à 5 kg a été testé avec un niveau d'apport satisfaisant et un niveau d'apport 10 % en dessous des besoins. La Figure 19 présente les effets de ces différentes combinaisons sur la production laitière et la Figure 20 sur le poids vif. Bien que les réponses soient globalement cohérentes, les dynamiques de production laitières traduisent la très forte réactivité du modèle à des variations d'énergie. Les ruptures brutales de production correspondent aux changements de ration. Ces ruptures peuvent également correspondre à des changements de condition sur les coefficients de partition de l'énergie. Ces coefficients sont déterminés par un ensemble de conditions touchant à la fois aux valeurs potentielles d'énergie de mobilisation et de reconstitution et également à la proportion de

réserves corporelles par rapport au poids vif vide. Les changements liés à la réalisation des conditions sont à l'origine de changement brusque d'orientation de l'énergie ingérée ce qui donne lieu à des ruptures dans les dynamiques biologiques.

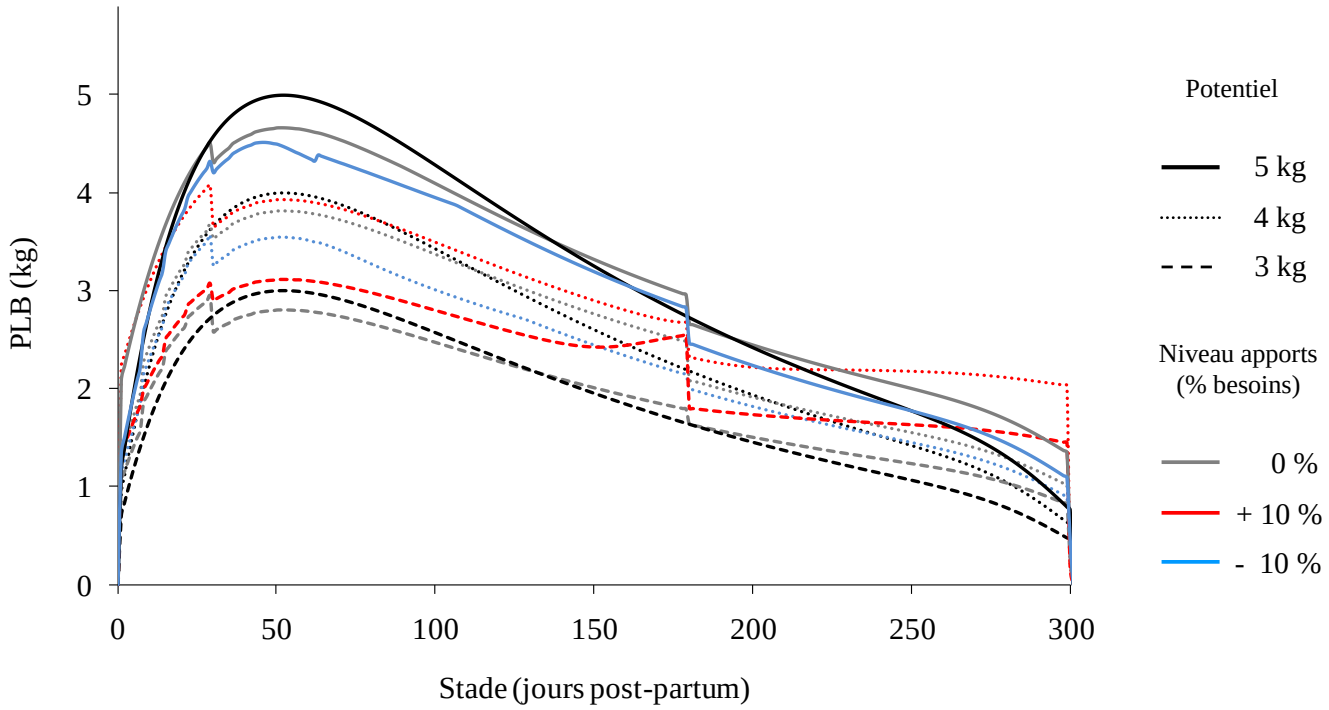


Figure 19 Evaluation des réponses de la production laitière brute (PLB) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiels (3, 4 et 5 kg de lait potentiel au pic de la 3ème lactation) combinés à trois niveaux d'alimentation (-10%, 0% et +10% des besoins).

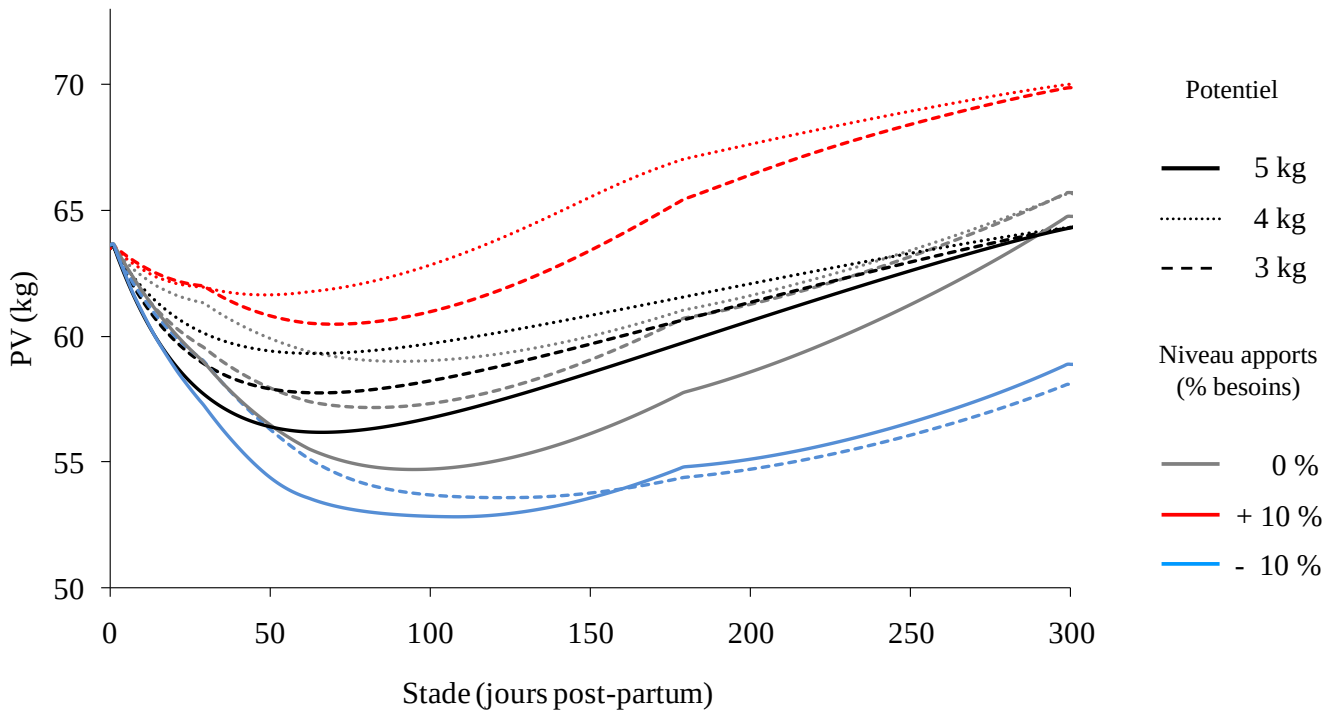


Figure 20 Evaluation des réponses du poids vif (PV) simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiels (3, 4 et 5 kg de lait potentiel au pic de la 3ème lactation) combinés à trois niveaux d'alimentation (-10%, 0% et +10% des besoins).

3.3.4 Confrontation des dynamiques d'évolution des réserves corporelles aux données de la littérature

Le développement du modèle a mobilisé les travaux conduits sur l'évolution des réserves corporelles chez la chèvre afin de fixer les bornes des fonctions théoriques modulant la partition d'énergie. Ces travaux ont été remobilisés afin de voir si le modèle simulait des trajectoires d'évolution des réserves cohérentes par rapport à l'espace défini par les données de la littérature. Le modèle a été utilisé pour simuler les réponses du poids vif d'une chèvre de potentiel 4 kg à trois niveaux d'apports : un premier niveau correspondant aux besoins d'une chèvre de potentiel égal à 3 kg, un second niveau correspondant à une chèvre à 4 kg et un niveau correspondant à une chèvre à 5 kg. Ces trois niveaux permettent de simuler les dynamiques de poids vif dans trois situations d'alimentation contrastées. Les résultats sont présentés sur la Figure 21. L'évolution du pourcentage de réserves corporelles simulé dans les trois situations se positionne de façon cohérente dans l'espace de points issus des données expérimentales. Les dynamiques associées à une suralimentation ou à une sous-alimentation se retrouvent dans les zones extrêmes définies par les points expérimentaux. Le modèle simule donc des dynamiques d'utilisation des réserves cohérentes dans des contextes nutritionnels variés.

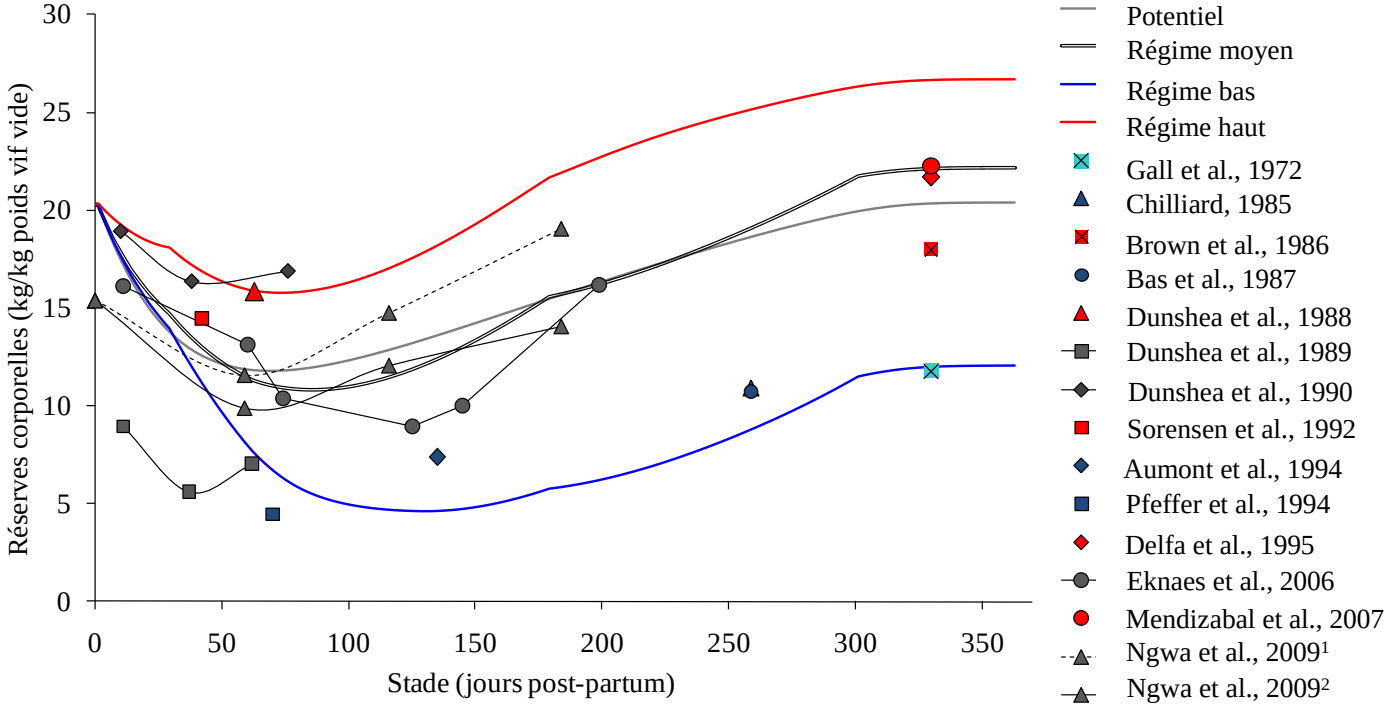


Figure 21 Comparaison des données de la littérature avec l'évolution de la proportion de réserves corporelles simulées par le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux d'apports d'aliment concentré. Régime moyen = ration pour une chèvre produisant 4 kg de lait au pic de la 3ème lactation ; régime bas = ration pour une chèvre produisant 3 kg de lait au pic ; régime haut = ration pour une chèvre produisant 5 kg de lait au pic de la 3ème lactation. Les données de la littérature utilisées sont présentées dans l'annexe 2.

3.3.5 Conduite en lactation longue

L'évaluation du modèle a finalement consisté à tester son aptitude à simuler la production d'une chèvre maintenue en lactation longue. Les femelles conduites en lactation longue sont généralement laissées dans le lot des les femelles gestantes. Au moment des mises-bas des autres chèvres, elles repassent sur une ration de début de lactation ce qui relance leur production. Cette stratégie d'alimentation a été simulée avec le modèle de chèvre laitière pour trois niveaux de potentiels (2.5, 3.5 et 4.5 kg). Ces niveaux ont été choisis afin de permettre de comparer qualitativement les productions simulées avec 9 courbes individuelles de chèvres en lactation longue, récupérées dans les données du Contrôle Laitier d'un groupe d'éleveurs adhérents à la Coopérative Laitière de la Sèvre. Ces courbes ont été incorporées en fond de graphique (Figure 22). Les dynamiques du poids vif des lactations longues simulées ainsi que les dynamiques de poids vif de deux lactations standards sont présentées sur la Figure 23. Le modèle simule correctement la relance de la production qui est uniquement basée dans le modèle par un effet de l'alimentation. Cette relance est associée à un accroissement du poids vif et à une absence de mobilisation. Ainsi au terme de la période de lactation longue, les poids vif simulés sont supérieurs aux poids vif qui auraient correspondus à deux lactations standards (6.8, 7.7 et 8.5 kg pour les potentiels 2.5, 3.5 et 4.5 kg). La production simulée pour la lactation longue atteint 973 kg, 1318 kg et 1676 kg sur 671 jours de lactation pour les niveaux de potentiels égaux à 2.5 kg, 3.5 kg et 4.5 kg. Les productions simulées pour les mêmes niveaux de potentiels sur deux lactations standards de 300 jours atteindraient 974 kg, 1321 kg, 1666 kg. Ainsi, les productions d'une chèvre en lactation longue et d'une chèvre effectuant deux lactations standards sont équivalentes. Ce résultat est cohérent avec des données de terrain (Chastin, 2001). Les données simulées ont finalement été comparées qualitativement avec les résultats obtenus par Salama *et al.* (2008). L'allure des courbes est discutable mais globalement le modèle simule une production satisfaisante (Figure 24). Il est difficile d'évaluer plus en avant la qualité des simulations de lactations longues étant donné qu'aucune étude n'est susceptible de fournir des données sur l'évolution du poids vif pour une femelle en lactation longue.

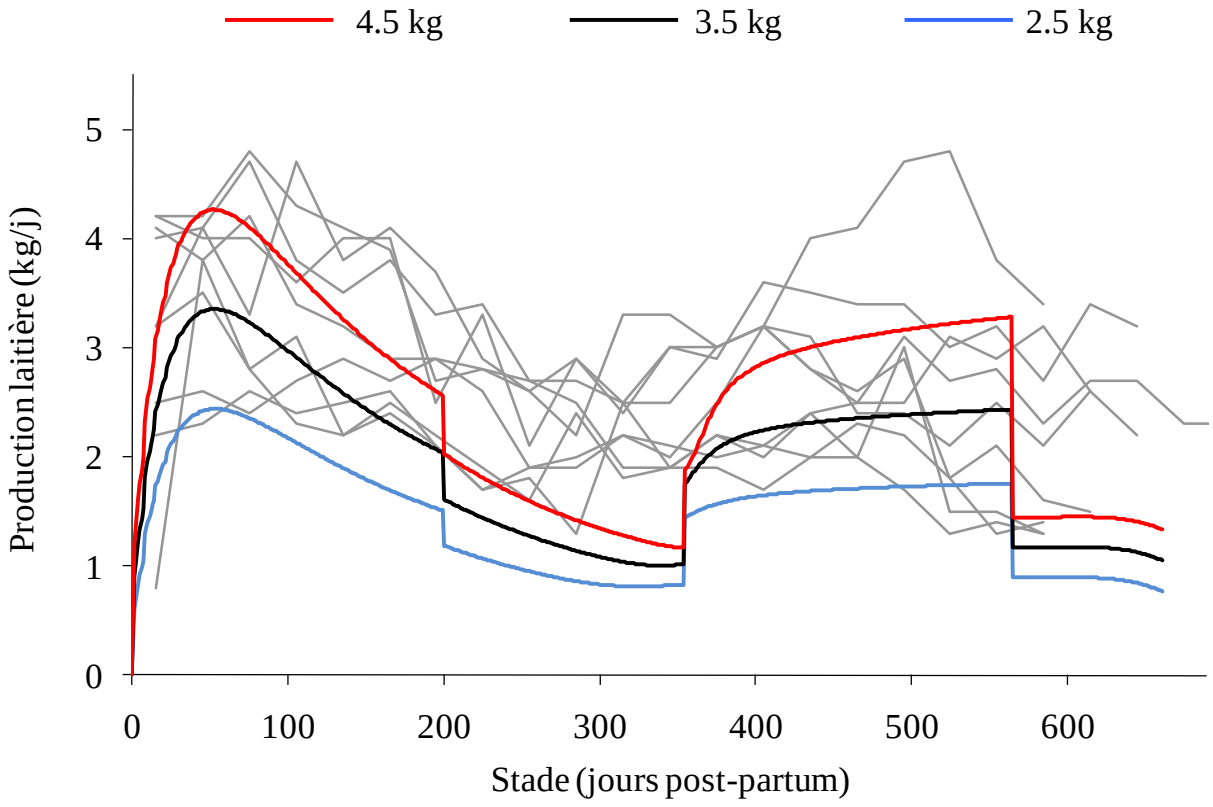


Figure 22 Courbes de productions laitières simulées par le modèle de chèvre laitière dans le cas d'une conduite en lactation longue sur 670 jours pour trois niveaux de potentiels (2.5, 3.5 et 4.5 kg). Le fond du graphique correspond à 9 courbes individuelles de production issues du Contrôle Laitier.

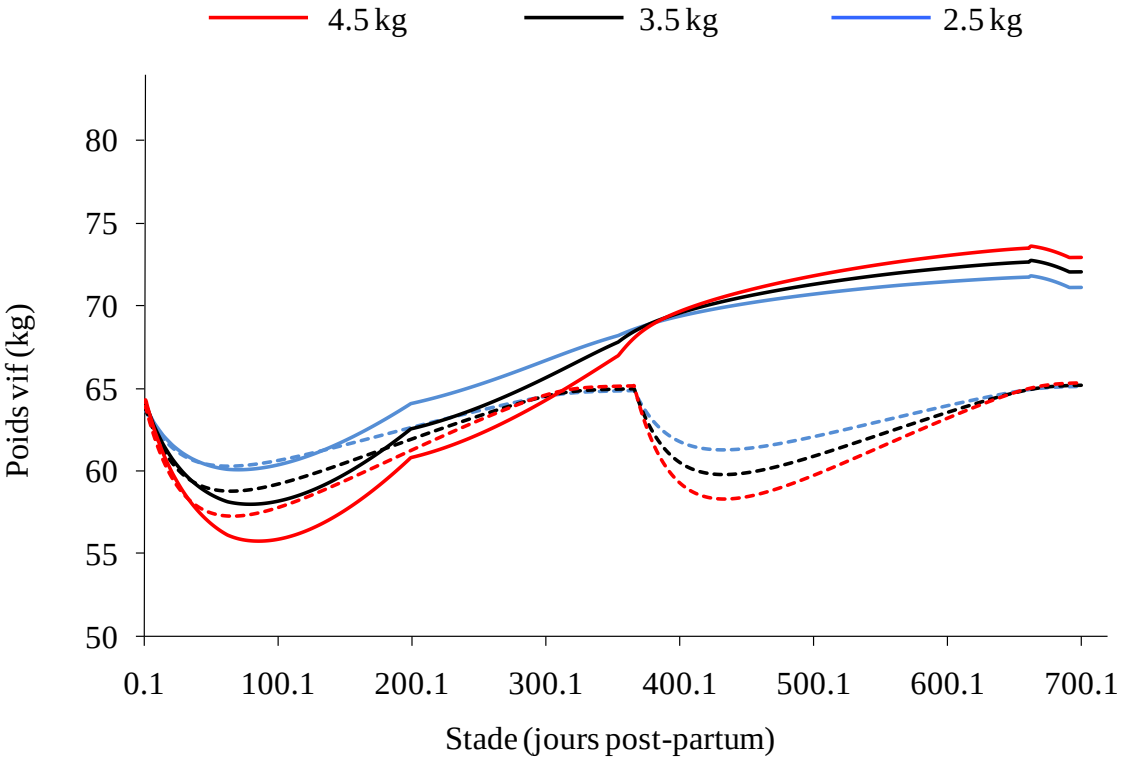


Figure 23 Courbes de poids vifs simulés par le modèle de chèvre laitière dans le cas d'une conduite en lactation longue sur 670 jours (traits pleins) et d'une conduite standard en deux lactations (traits pointillés) pour trois niveaux de potentiel laitier (2.5, 3.5 et 4.5 kg).

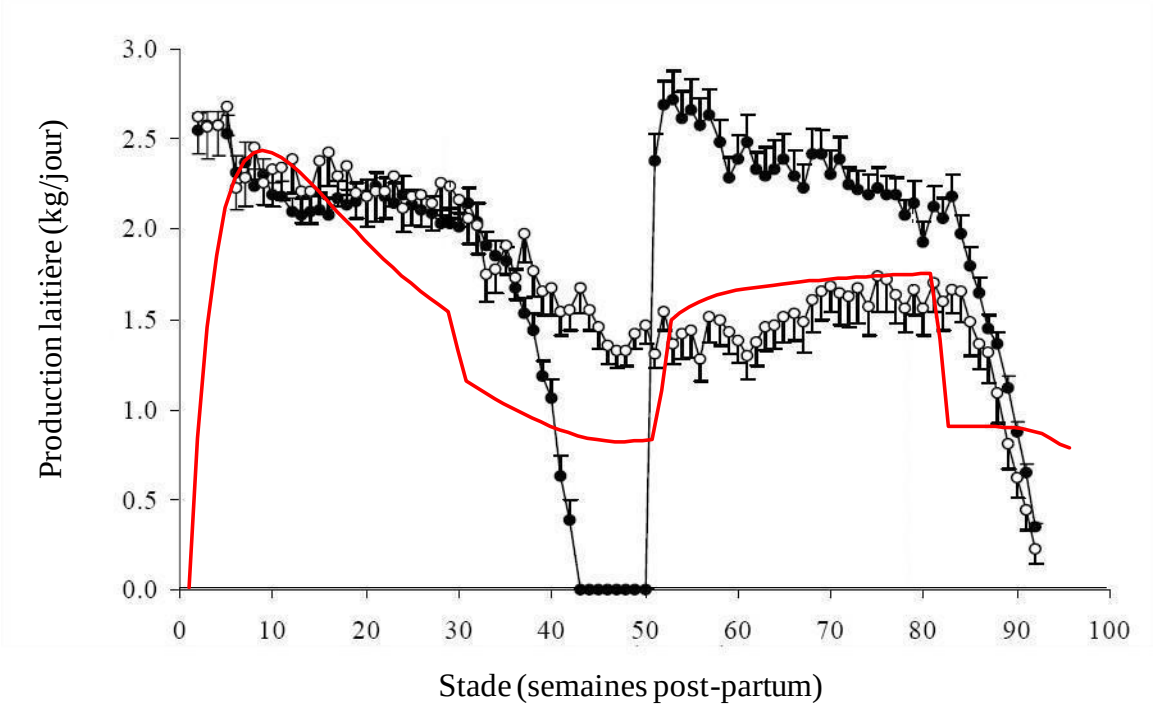


Figure 24 Comparaison de la production laitière simulée par le modèle de chèvre laitière pour une femelle conduite en lactation longue avec les données de l'étude de Salama et al. (2005) incorporées en fond de graphique. Simulation pour un potentiel de production laitière de 2.5 kg/j au pic de la 3ème lactation.

3.4 Conclusion

Le modèle de chèvre laitière simule les dynamiques du poids vif et de la production laitière au cours de la vie productive en intégrant trois sources de variation des réponses biologiques. Les compartiments du sous-système régulateur permettent de représenter l'expression temporelle des priorités relatives des fonctions physiologiques. Les effets du potentiel de production sont représentés lors de la transmission des priorités au sous-système opérant par deux paramètres génétiques, le potentiel laitier et le poids vif mature. Enfin, le sous-système opérant représente la réponse à une variation des apports alimentaires grâce à un système de coefficients de partition qui dépendent de l'état physiologique de la femelle. Ces trois sources de variation ont été conçues et formalisées de façon simple dans le modèle. L'évaluation a révélé un comportement du modèle globalement cohérent et satisfaisant par rapport à l'enjeu de simplicité. L'évaluation a également révélé des limites du modèle quant au réalisme des dynamiques simulées. Il sera nécessaire de conduire une analyse de sensibilité plus exhaustive du modèle, notamment par rapport aux coefficients de partition du différentiel d'énergie, ainsi qu'une étape de validation externe. Cette étape de validation externe nécessite de disposer de données sur l'ingestion. Les expérimentations en cours sur le troupeau expérimental de l'UMR PNA pourront fournir ces données.

4 Références bibliographiques

Aregheore EM, Chibanga COC et Lungu JCN, 1992. Effect of plane of nutrition on body weight and birth weight of pregnant Gwembe Valley goats in Zambia. Small Ruminant Research 9, 201-208.

Bauman DE et CurrieWB, 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. Journal of Dairy Science 63, 1514-1529.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y, 2008. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In : L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 73-94.

Blanchard D et Sauvant D, 1974. Effect of gestation on the course of lactation. France, Institut Technique de l'Elevage Ovin et Caprin: Journées d'étude sur l'alimentation de la chèvre laitière, 76-87.

Bocquier F, Leboeuf B, Rouel J et Chilliard Y, 1998. Effet de l'alimentation et des facteurs d'élevage sur les performances de reproduction de chevrettes Alpines. INRA Productions Animales 11, 311-320.

Bouloc N, 1991. Analyse de la forme de la courbe de lactation. Application à l'étude des modalités d'allègement du contrôle laitier et de prévision précoce de la production dans l'espèce caprine. Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France.

Brody S, 1938. Relation between heat increment of gestation and birth weight. In Missouri Agric. Exp. Stn. Res. Bull. No 238. University of Missouri, Columbia.1-28.

Broster WH et Broster VJ, 1984. Reviews of the progress of dairy science: long term effects of plane of nutrition on the performance of the dairy cow. Journal of Dairy research 51, 149-196.

Chilliard Y, 1985. Métabolisme du tissu adipeux, lipogenèse mammaire et activités lipoprotéine-lipasiques chez la chèvre au cours du cycle gestation-lactation. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France.

Chilliard Y, 1987. Revue bibliographique : variations quantitatives et métabolisme des lipides dans les tissus adipeux et le foie au cours du cycle gestation-lactation. 2ème partie : chez la brebis et la vache. Reproduction Nutrition Développement 27 (2A), 327-398.

Chilliard Y, 1992. Physiological constraints to milk production: factors which determine nutrient partitioning, lactation persistency and mobilization of body reserves. World Review of Animal Production 21, 20-25.

Chilliard Y, Ferlay A, Faulconnier Y, Bonnet M, Roule J et Bocquier F, 2000. Adipose tissue metabolism and its role in adaptation to undernutrition in ruminants. Proceedings of the Nutrition Society 59, 127-134.

Clutton-Brock TH, Albon SD et Guinness FE, 1989. Fitness costs of gestation and lactation in wild mammals. Nature 337 (19), 260-262.

Coulon JB, Perochon L et Lescourret F, 1995. Modelling the effect of the stage of pregnancy on dairy cows' milk yield. Animal Science 60, 401-408.

Dillon P, Berry DP, Evans RD, Buckley F et Horan B, 2006. Consequences of genetic selection for increased milk production in European seasonal pasture based systems of milk production. Livestock Science 99, 141-158.

Economides S et Louca A, 1981. The effects of the quantity and quality of feed on the performance of pregnant and lactating goats. Nutrition and systems of goat feeding. Volume 1: Nutrition et systèmes d'alimentation de la chèvre, 319-326.

Faverdin P, Delaby L et Delagarde R, 2007. L'ingestion d'aliments oar les vaches laitières et sa prévision au cours de la lactation. INRA Productions Animales 20, 151-162.

Friggens NC, 2003. Body lipid reserves and the reproductive cycle: towards a better understanding. Livestock production Science 83, 219-236.

Friggens NC, Ingvarsten KL et Emmans GC, 2004. Prediction of body lipid change in pregnancy and lactation. Journal of Dairy Science 87, 988-1000.

Friggens NC et Newbold JR, 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87-97.

Friggens NC, Berg, P, Theilgaard P, Korsgaard IR, Ingvarsten KL, Lovendhal P et Jensen J, 2009. Breed and parity effects on energy balance profiles through lactation: evidence of genetically driven body energy change. Journal of Dairy Science 90, 5291-5305.

Geisler PA et Neal H, 1979. A model for the effects of energy nutrition on the pregnant ewe. Animal Production 29, 357-369.

Goetsch AL, Detweiler G, Sahlu T, Puchala R et Dawson LJ, 2001. Dairy goat performance with different dietary concentrate levels in late lactation. Small Ruminant Research 41, 117-125.

Hayden TJ, Thomas CR et Forsyth IA, 1979. Effect of number of young born (litter size) on milk yield of goats: role for placental lactogen. Journal of Dairy Science 62, 53-57.

Hoch T et Agabriel J, 2004. A mechanistic dynamic model to estimate beef cattle growth and body composition : 1. Model description. Agricultural Systems 81, 1-15.

Kennedy GG, 1953. The role of depot fat in the hypothalamic control of food intake in the rat. Proceedings of the Royal Society of London Series B – Biological Sciences 140 (901), 578-592.

Koong LJ, Garrett WN et Rattray PV, 1975. A description of the dynamics of fetal growth in sheep. Journal of Animal Science 41, 1065-1068.

Luo J, Goetsch AL, Sahlu T, Nsahlai IV, Johnson ZB, Moore JE, Galyean ML, Owens FN et Ferrell CL, 2004. Prediction of metabolizable energy requirements for maintenance and gain of preweaning, growing and mature goats. Small Ruminant Research 53, 231-252.

Malher X, Beaudeau F, Poupin B, Falaise G et Losdat J, 1999. Réforme et renouvellement dans les grands troupeaux laitiers caprins de l'Ouest de la France. INRA Productions Animales 12, 123-133.

Martin O, 2009. Modélisation systémique des performances des femelles de ruminants. Application au cas de la vache laitière. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, France.

Martin O et Sauvant D, 2002. Metaanalysis of Input/Output kinetics in lactating dairy cows. Journal of Dairy Science 85, 3363-3381.

Mellado M, Valdez R, Lara LM et Garcia JE, 2004. Risk factors involved in conception, abortion and kidding rate of goats under extensive conditions. Small Ruminant Research 55, 191-198.

Oftedal OT, 2000. Use of maternal reserves as a lactation strategy in large mammals. Proceedings of the Nutrition Society 59, 99-106.

Palsson H, 1955. Conformation and body composition. In: Progress in the physiology of farm animals. Hammond J (Ed.). Butterworths Scientific Publications, Andover, United Kingdom. 430-542.

Pond CM, 1984. Physiological and ecological importance of energy storage in the evolution of lactation: evidence for a common pattern of anatomical organization of adipose tissue in mammals. Symposium of the Zoological Society of London 51, 1-32.

Robbins CT et Robbins BL, 1979. Fetal and neonatal growth patterns and maternal reproductive effort in ungulates and sub-ungulates. The American Naturalist 114, 101-116.

Robelin J, 1990. Modèle de calcul du croît journalier de lipides et de protéines chez les bovins. Reproduction Nutrition Développement 30, Suppl. 2, 245-246.

Sahlu T, Hart SP, Le-Trong T, Jia Z, Dawson L, Gipson T et Teh TH, 1995. Influence of prepartum protein and energy concentrations for dairy goats during pregnancy and early lactation. Journal of Dairy Science 78, 378-387.

Salama AAK, Caja G, Such X, Casals R et Albanell E, 2005. Effect of pregnancy and extended lactation on milk production in dairy goats milked once daily. Journal of Dairy Science 88, 3894-3904.

Sauvant D and Morand-Fehr P, 1978. La capacité d'ingestion de la chèvre laitière. In: Advances in goat production. Morand-Fehr P, Sauvant D and De Simiane M (Eds). Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, INAPG, Paris. 42.

Sauvant D, 1981. Alimentation énergétique des caprins. In : Nutrition and systems of goat feeding. Eds: Morand-Fehr P., Bourbouze A. et de Simiane M. Volume 1. ITOVIC INRA, 55-79.

Sauvant D et Morand-Fehr P, 1991. Energy requirements and allowances of adult goats. In: Goat Nutrition. EAAP Publication n°46. Morand-Fehr P (Ed.). Pudoc, Wageningen, the Netherlands. 61-72.

Sauvant D, 1994. Modelling homeostatic and homeorhetic regulations in lactating animals. Livestock Production Science 39, 105-113.

Sauvant D, 1999. Le concept de lois de réponses multiples aux regimes, trait d'union entre les domains techniques et économiques de l'élevage. 6èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, France. 11-17.

Sauvant D et Giger-Reverdin S, 2006. Metaanalysis of multiple responses of dairy goat to diet concentrate content. Journal of Dairy Science, 84 (Suppl 1), 261.

Sauvant D, Giger-Reverdin S et Meshy F, 2007. Alimentation des caprins. In: Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quae, Versailles, France. 137-148.

Sibanda LM, Ndlovu LR et Bryant MJ, 1997. Effects of feeding varying amount of a grain/forage diet during late gestation and lactation on the performance of Matabele goats. Journal of Agricultural Science, Cambridge 128, 469-477.

Sibanda LM, Ndlovu LR et Bryant MJ, 1999. Effects of a low plane of nutrition during pregnancy and lactation on the performance of Matebele does and their kids. Small Ruminant Research 32, 243-250.

Strandberg E, 2009. The role of environmental sensitivity and plasticity in breeding for robustness: lessons from evolutionary genetics. In: Klopcic M, Reents R, Philipsson J, Kuipers A (Eds.). Breeding for robustness in cattle. EAAP Publication, Wageningen, the Netherlands. 17-33.

Vernon RG, Clegg RA et Flint DJ, 1981. Metabolism of sheep adipose tissue during pregnancy and lactation. Biochemical Journal 200, 307-314.

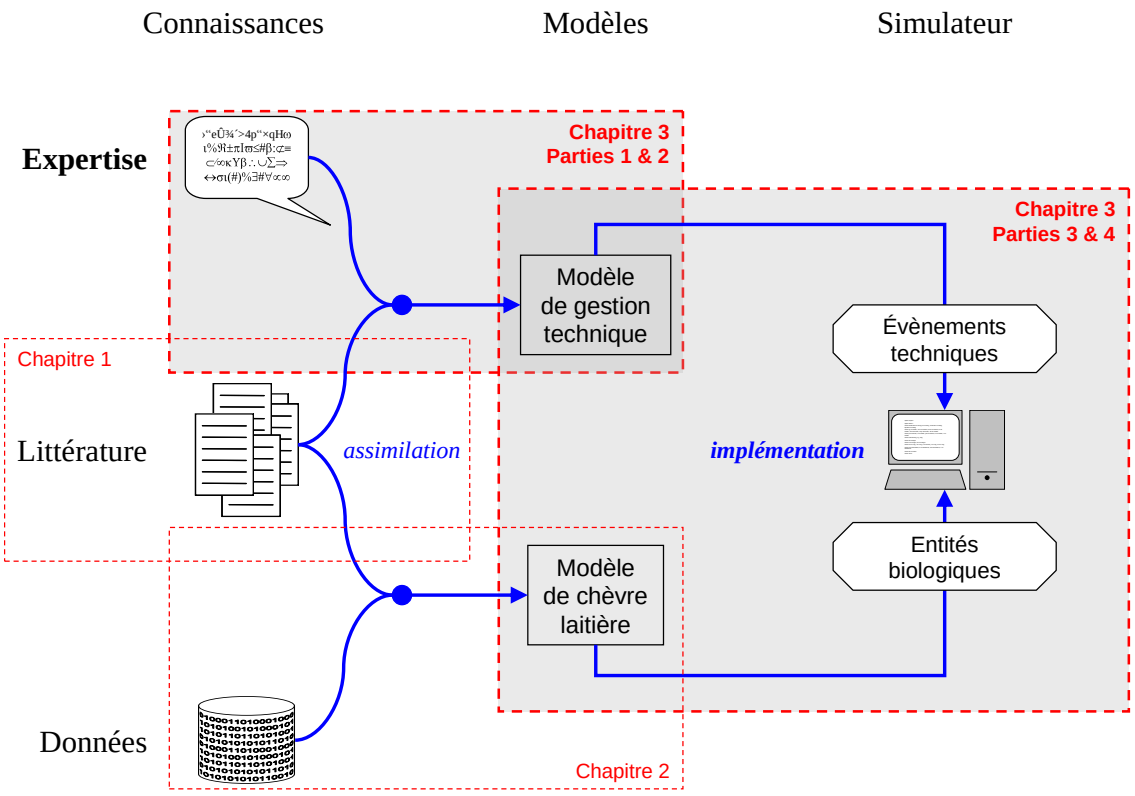
Wallace JM, 2000. Nutrient partitioning during pregnancy: adverse gestational outcome in overnourished adolescent dams. Proceedings of the Nutrition Society 59, 107-117.

Chapitre III SIGHMA, Simulation of Goat Herd Management

Les forces extérieures qui transforment le point en ligne peuvent être de nature très différente.

La diversité des lignes dépend du nombre de ces forces et de leurs combinaisons.

Vassily Kandinsky



Ce chapitre présente le développement du système décisionnel, l'implémentation du simulateur et son utilisation. Un modèle conceptuel résulte d'une simplification et d'une formalisation du système réel en fonction des objectifs à atteindre et de l'état des connaissances (Coquillard et Hill, 1997[1]). Ainsi son élaboration repose sur deux étapes : d'une part l'analyse du système réel, les élevages caprins laitiers de Poitou-Charentes, présentée dans la **première partie du chapitre** et d'autre part l'élaboration du modèle conceptuel de gestion technique du troupeau, présentée dans la **deuxième partie du chapitre**. Le développement du simulateur a consisté à implémenter et connecter le modèle conceptuel de gestion avec les modèles de chèvres laitières. La description du simulateur ainsi que son évaluation sont présentées dans la **troisième partie de ce chapitre** sous forme d'une publication soumise à la revue Animal. L'utilisation de SIGHMA pour simuler 3 plans d'expériences conçus pour explorer l'effet des pratiques d'alimentation et de reproduction sur la variabilité individuelle est présentée dans la **quatrième partie du chapitre** sous forme d'une publication en préparation.

[1] Coquillard P et Hill D, 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Masson, Paris. 273p.

1 Analyse du système réel : la gestion du troupeau caprin dans un système laitier intensif

L'analyse du système réel s'est appuyée sur la gestion technique des troupeaux caprins laitiers de Poitou-Charentes. L'objectif est de dégager les grandes stratégies de conduite des troupeaux caprins laitiers et d'analyser la relation entre ces stratégies et les projets des éleveurs. Nous nous sommes intéressés aux pratiques de conduite de la reproduction et de l'alimentation ainsi qu'aux pratiques de renouvellement et d'allotement. Les pratiques de conduite sanitaire ainsi que les pratiques d'exploitation et de transformation des produits ne sont pas prises en compte car elles jouent peu dans ces systèmes intensifs où les chevreaux ne sont pas engraissés et la production laitière entièrement livrée à l'aval. L'analyse du système réel a mobilisé trois types de ressources : les documents de synthèse des organismes de recherche-développement de la région, les données[2] d'un groupe de 19 éleveurs adhérents à la coopérative laitière de la Sèvre (**CLS**) et suivis par le Bureau Technique de Promotion Laitière (**BTPL**) et la consultation d'un comité technique constitué d'experts de la filière (K. Boissard et E. Bruneteau, UEICP Rouillé ; H. Coutineau, LEGTA Melle ; F. Jénot, FRESYCA ; B. Leboeuf, UEICP Rouillé et M. Talbot, TED Charentes). Le comité technique a été sollicité pour caractériser la diversité des projets des éleveurs laitiers ainsi que pour identifier les pratiques de conduite spécifiques mises en œuvre au sein de chaque projet.

1.1 Pratiques de reproduction

1.1.1 Organisation des mises-bas et projet de production

Sous nos latitudes, les variations photopériodiques sont en partie responsables de la saisonnalité de l'activité sexuelle de l'espèce caprine. L'ovulation et les chaleurs se produisent à l'automne, en jours courts décroissants (Chemineau *et al.*, 1992). A l'inverse, les jours longs croissants inhibent l'activité sexuelle et induisent un anoestrus saisonnier. Ce rythme naturel de

[2] Dans un premier temps, un groupe de 19 éleveurs adhérents à la Coopérative Laitière de la Sèvre a été identifié grâce au BTPL. Le suivi des troupeaux a permis d'obtenir les distributions de mises-bas pour 2 campagnes et la coopérative laitière a fourni les données de livraisons de lait. Dans un deuxième temps, grâce à l'UEICP de Rouillé, les données individuelles de la base nationale du Contrôle Laitier (production laitière, qualité du lait, reproduction) ont été récupérées sur une période de 10 ans. Le BTPL a ensuite permis d'obtenir les données de suivi technico-économique des éleveurs sur la même période de 10 ans et la CLS a permis d'obtenir les données de livraisons de lait. La structuration de l'ensemble de ces données est en cours.

reproduction entraîne des mises-bas au printemps lorsque la disponibilité des ressources alimentaires est maximale. Les traitements hormonaux, photopériodiques ou l'effet mâle permettent d'induire des chaleurs (voire même d'induire une cyclicité dans le cas des traitements photopériodiques) et de réaliser une mise à la reproduction en dehors de la période naturelle d'activité sexuelle. Ainsi, trois périodes de reproduction sont classiquement distinguées par rapport à la physiologie de la chèvre (Chemineau *et al.*, 1992, Bossis, 2006) :

- la mise à la reproduction entre le 15 juin et le 15 août (pour des mises-bas après le 15 novembre) est dite en avance de saison ;
- la mise à la reproduction après le 15 août (pour des mises-bas après le 15 janvier) est dite en saison ;
- la mise à la reproduction entre le 15 mars et le 15 juin (pour des mises-bas du 15 août au 15 novembre) est dite à contre-saison.

Les spécificités physiologiques de l'espèce caprine entraînent une saisonnalité de la production laitière, centrée sur le printemps et le début d'été. La filière a cherché à maîtriser la saisonnalité afin de garantir la régularité des transformations industrielles (Bossis *et al.*, 2008b). La maîtrise technique du désaisonnement ainsi que l'incitation des laiteries à produire du lait d'hiver ont permis de diminuer la saisonnalité de la production notamment en Poitou-Charentes où l'orientation de la production est industrielle.

Il existe une relation entre le choix d'un profil de livraison de lait et la mise en œuvre d'une organisation de la reproduction. La Figure 25 présente la répartition des mises-bas en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (systèmes majoritairement fromagers) et en région Poitou-Charentes (systèmes majoritairement laitiers) d'après les résultats du Contrôle Laitier 2008. La région Poitou-Charentes présente une proportion de mises-bas à contre-saison (37% sur le second semestre) nettement plus importante que la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (7% sur le second semestre).

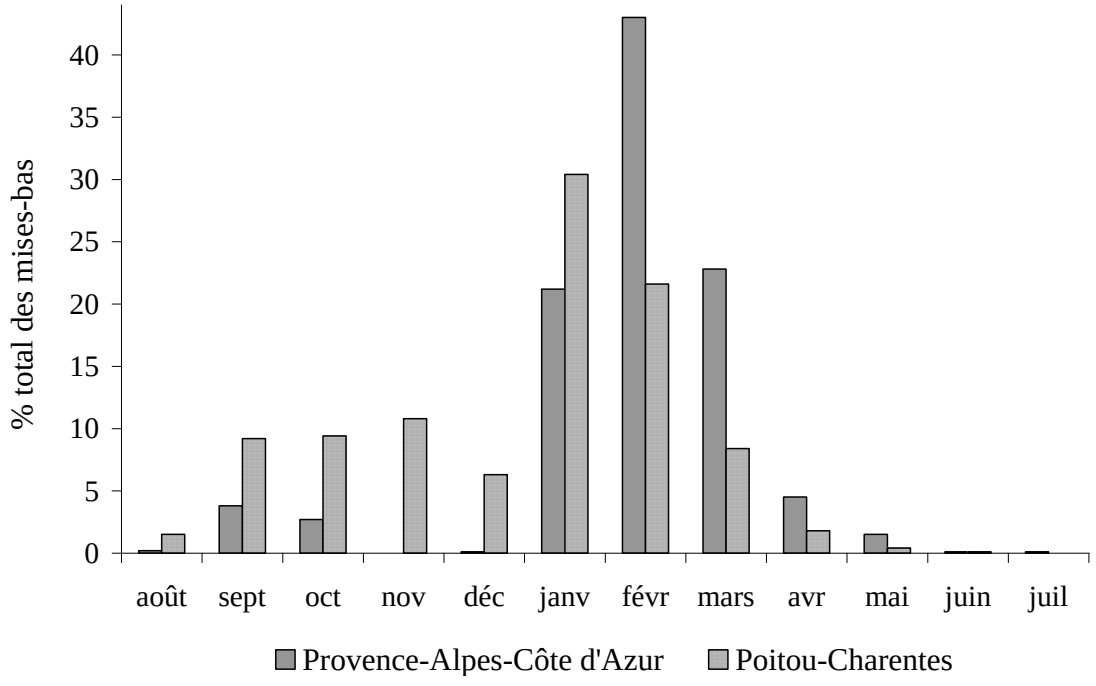


Figure 25 Répartition mensuelle des mises bas dans les régions Poitou-Charentes et Provence-Alpes-Côte d'Azur (d'après les données du Contrôle Laitier, 2008).

La possibilité de désaisonner les mises-bas génère potentiellement trois profils de courbes de production du troupeau:

- Centré sur la production de lait à contre-saison ;
- Centré sur la production de lait en saison ;
- Régulier sur l'année.

L'étude des pratiques de reproduction a permis de déterminer la représentativité de ces profils de production ainsi que les formes d'organisation de la reproduction qui permettent la réalisation de ces profils. L'analyse de la répartition des mises-bas sur une campagne laitière (définie par le Contrôle Laitier entre le mois août de l'année n-1 et le mois de juillet de l'année n) a mobilisé trois sources de données : i) les résultats des suivis technico-économiques du BTPL (Bureau Technique de Promotion Laitière) sur deux campagnes (Losdat et Simon, 2006 et 2007) pour 19 adhérents de la CLS ; ii) les résultats de l'étude Agrotransfert Caprin « Mise en lot » de 2002 dans 49 élevages de Poitou-Charentes (Gateff, 2002) et iii) les cas-types de l'Institut de l'Elevage (2008a) basés sur le réseau d'Elevages caprins Poitou-Charentes et Pays de la Loire (45 élevages).

Afin d'homogénéiser les données des différentes études, nous avons utilisé le pourcentage de mises-bas sur le second semestre (MBA, mises-bas automne), seul indicateur présent dans les trois études. Les mises-bas correspondent à des saillies en contre-saison sexuelle (février à juillet). La Figure 26 montre trois stratégies d'organisation de la reproduction:

- Une stratégie basée sur une reproduction en saison sexuelle (S) et donnant lieu à une faible valeur de MBA ($0 \leq MBA \leq 30\%$) ;
- Une stratégie basée sur une reproduction en contre-saison sexuelle (CS) et donnant lieu à une forte valeur de MBA ($70 \leq MBA \leq 100\%$) ;
- Une stratégie basée sur deux périodes de reproduction (2L) en saison et à contre saison et donnant lieu à des valeurs intermédiaires de MBA ($30 < MBA < 70\%$).

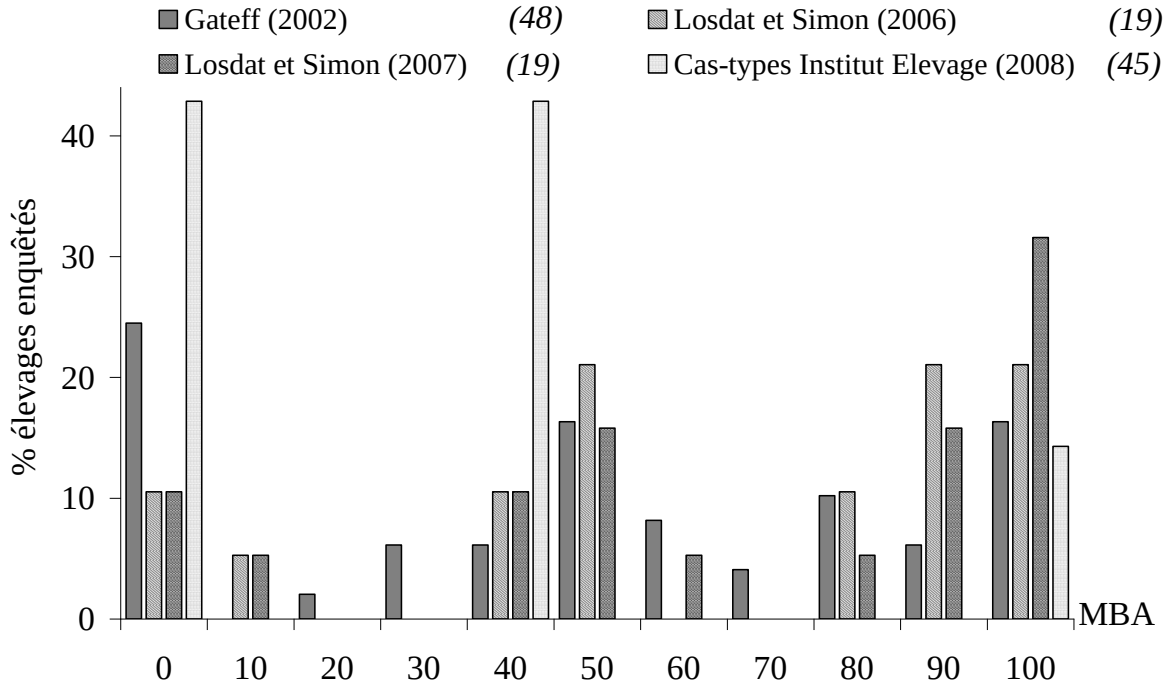
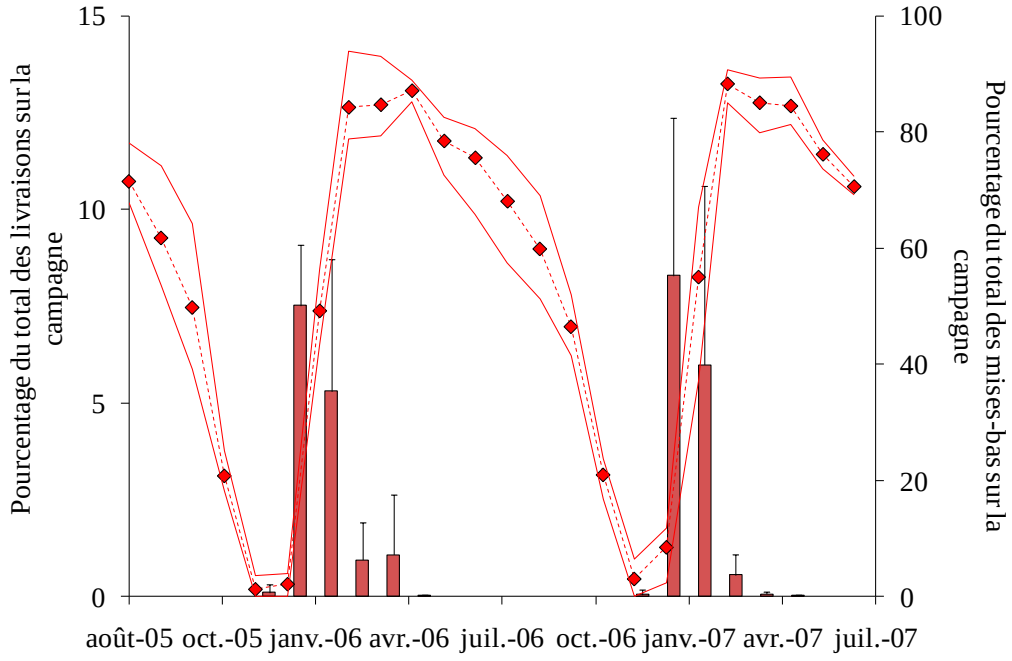


Figure 26 Répartition des élevages en fonction du pourcentage de mises-bas d'automne (MBA) sur le second semestre (données de 4 enquêtes en région Poitou-Charentes ; le nombre d'élevages est précisé entre parenthèses).

Les données de livraisons de lait des adhérents de la CLS ont permis d'approfondir la relation entre les stratégies d'organisation de la reproduction et les courbes de production associées. Les éleveurs ont été codés sur la base de leur valeur de MBA dans les trois catégories de stratégies de reproduction identifiées précédemment (S, CS et 2L). Trois formes de courbes de livraisons sont discriminées sur la base de la variable MBA. Ces formes ont été caractérisées par le coefficient moyen de variation des livraisons sur les deux campagnes

laitières. Les troupeaux dont la période de reproduction est en saison ont le plus fort coefficient de variation des livraisons de lait (Figure 27a). Ils sont suivis par les troupeaux dont la reproduction se fait à contre-saison (Figure 27b) et enfin par les troupeaux dont la reproduction se fait en saison et à contre-saison (Figure 27c). Les troupeaux dont la reproduction est en saison ont un coefficient de variation élevé car une seule période de reproduction est organisée et les troupeaux sont généralement taris en hiver. Les troupeaux dont la reproduction est à contre-saison ont une valeur intermédiaire de CV, plus faible que les troupeaux se reproduisant en saison. Ces troupeaux mettent en place une période de reproduction en saison (lutte de rattrapage). Ainsi, le profil de production est moins saisonné. Enfin les troupeaux dont la reproduction est en saison et à contre-saison ont la valeur de CV la plus faible. Ces troupeaux mettent en place deux périodes principales de reproduction ce qui génère un profil de livraison régulier.

Nombre d'élevages = 3 *0 ≤ MBA ≤ 30 %* *CV = 56.3 ± 3.5 %* (a)



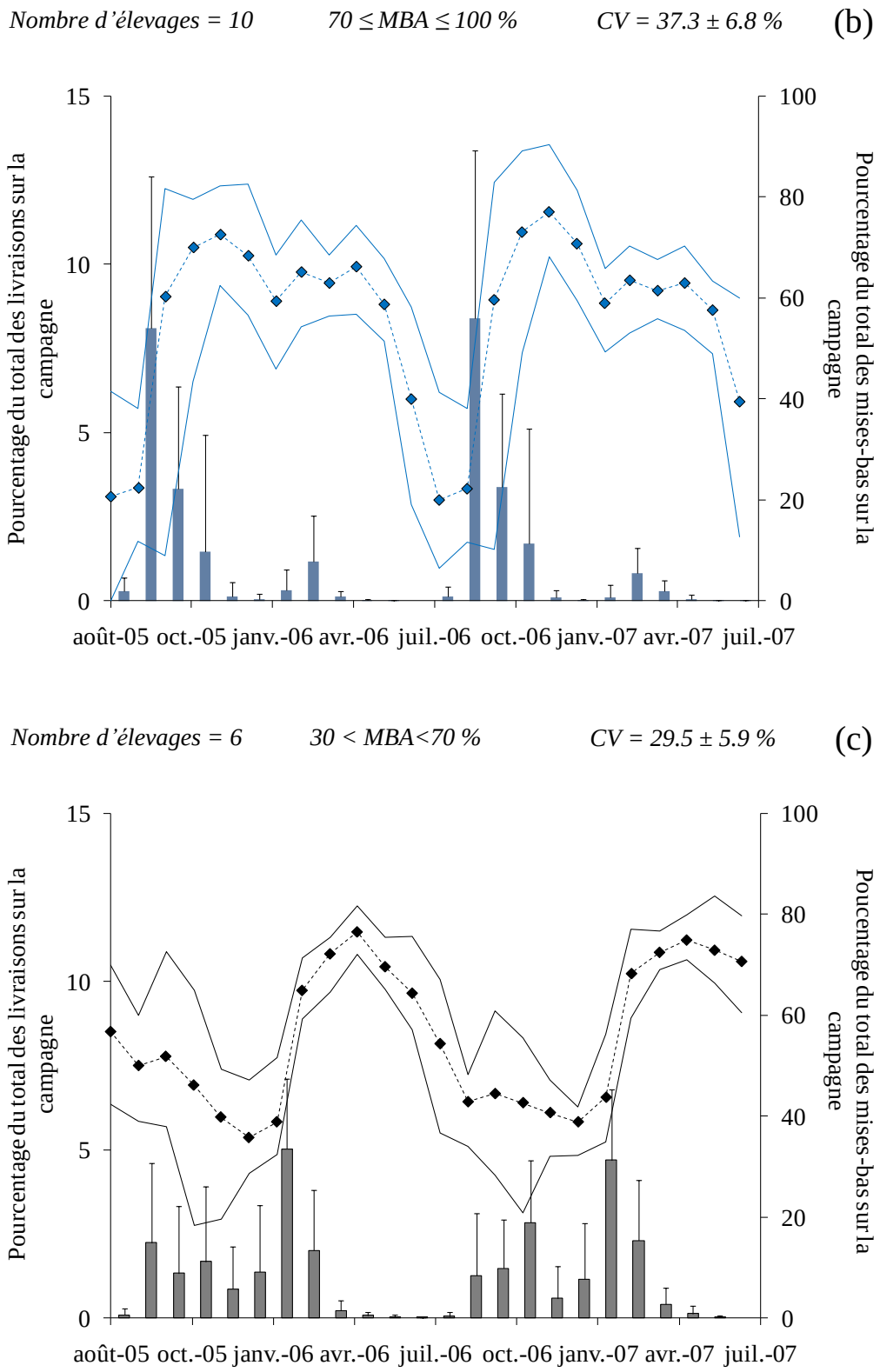


Figure 27 Répartition mensuelle des mises bas (diagramme) et des livraisons de lait (les symboles correspondent aux valeurs moyennes et l'enveloppe aux valeurs minimum et maximum) pour les adhérents de la coopérative laitière Sèvre et Belle (d'après les données de Losdat et Simon, 2006 ; 2007) qui organisent la reproduction en saison (a), à contre-saison (b) et sur deux périodes (c). Les livraisons sont exprimées en pourcentage du total sur la campagne afin de gommer les écarts liés au niveau de production. MBA : pourcentage de mise-bas d'automne sur le second semestre ; CV : coefficient de variation des livraisons de lait sur la campagne (écart-type des livraisons/moyenne des livraisons, en %).

Les données de reproduction des troupeaux ont permis de voir la stabilité interannuelle des périodes de reproduction au sein d'un élevage (Figure 28). Les trois formes d'organisation de la reproduction ainsi identifiées ont été présentées au comité technique qui a confirmé que ces trois formes étaient les plus représentatives de l'organisation de la reproduction en Poitou-Charentes. Les discussions avec le comité technique ont pointés l'existence de formes d'organisation de la reproduction alternatives. Cependant, elles constituent le plus souvent des adaptations à la marge des formes principales (arrêt complet ou non de la traite; positionnement de la lutte en avance de saison plutôt qu'en saison). Les cas concrets de stratégies de reproduction proposés par Bossis (2006) corroborent également ces trois formes. Cet auteur présente toutefois une forme d'organisation supplémentaire: l'organisation de mises-bas tardives, actuellement étudiée par l'Institut de l'Elevage (Bossis *et al.*, 2008a). Les mises-bas tardives se déroulent entre avril et juin et elles permettent de décaler la production de lait sur l'hiver pour profiter du paiement différentiel du lait par les laiteries. Ce projet n'a pas été retenu car d'après le comité technique, il est encore difficile de cerner si ces mises-bas tardives sont souhaitées par l'éleveur afin de maitriser sa courbe de production ou si elles sont subies et témoignent d'une mauvaise gestion de la reproduction en saison.

Les trois projets retenus ont servi de grille de lecture dans la suite de l'analyse du système réel afin d'identifier si des pratiques de conduite spécifiques étaient mises en place au sein de chaque projet.

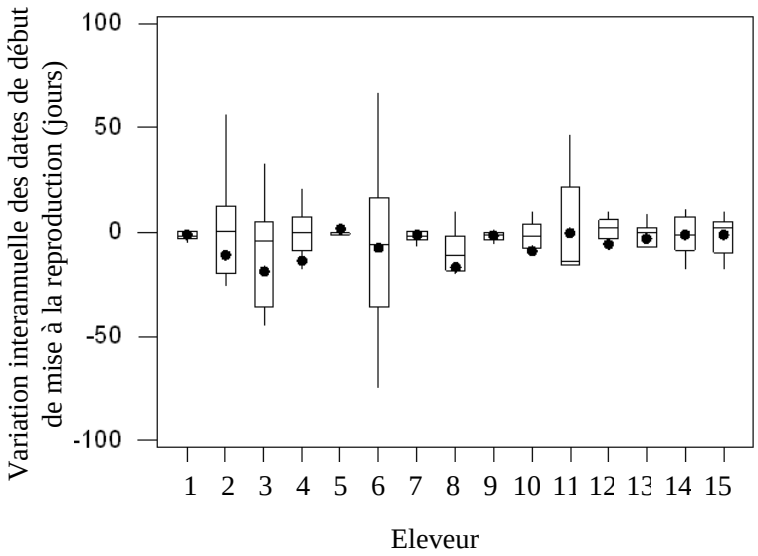


Figure 28 Variation interannuelle moyenne (minimum 8 ans) de 15 éleveurs adhérents à la Coopérative Laitière de la Sèvre pour lesquels les données de reproduction ont fait l'objet d'une extraction de la base de données du Contrôle Laitier.

1.1.2 Techniques de mise à la reproduction et gestion des échecs de reproduction

1.1.2.1 Choix des techniques en fonction de la saison de reproduction et du type de femelle

La saisonnalité de l'espèce caprine, la volonté de grouper les mises-bas ou de pratiquer l'insémination artificielle impliquent l'utilisation de différentes combinaisons de techniques de mises à la reproduction. Le comité technique a été sollicité afin d'identifier les principales combinaisons ainsi que leur utilisation en fonction des types de projets de production. Les combinaisons de techniques suivantes ont été dégagées :

- saillie naturelle sans synchronisation hormonale
- saillie naturelle avec synchronisation hormonale
- insémination artificielle (IA) avec synchronisation hormonale
- traitement lumineux et saillie naturelle
- traitement lumineux et IA après synchronisation hormonale

L'effet mâle est une technique d'induction des chaleurs qui est assez peu utilisée. Cependant, elle devrait être amenée à se développer étant donnée la remise en question des traitements hormonaux. La durée des saillies naturelles se raisonne en nombre de cycles de 21 jours. Une lutte de 2 ou 3 cycles correspond à une reproduction groupée.

Dans le cadre d'un projet saison, la saillie naturelle est la technique de mise à la reproduction la plus utilisée. Lorsque l'IA est pratiquée, elle est utilisée sur environ 30% des femelles, principalement les multipares. Dans le cadre d'un projet contre-saison, le lot principal est lutté naturellement après synchronisation (lumière et traitement hormonal). L'IA est peu pratiquée à cette période. Le lot de rattrapage est en saillie naturelle. Dans le cadre d'un projet régulier, l'IA est réservée au lot en saison et aux multipares. Les relations entre projets de production et utilisation de techniques de mise à la reproduction établies avec le comité technique sont confirmées par les données de Bossis (1995) présentées sur la Figure 29. L'utilisation de l'IA concerne environ 30% des femelles, tous projets confondus (Gateff, 2002; données adhérents CLS). La sélection d'une femelle pour être inséminée est basée sur ses qualités laitières, sa fertilité, l'absence de lactation longue et sa parenté.

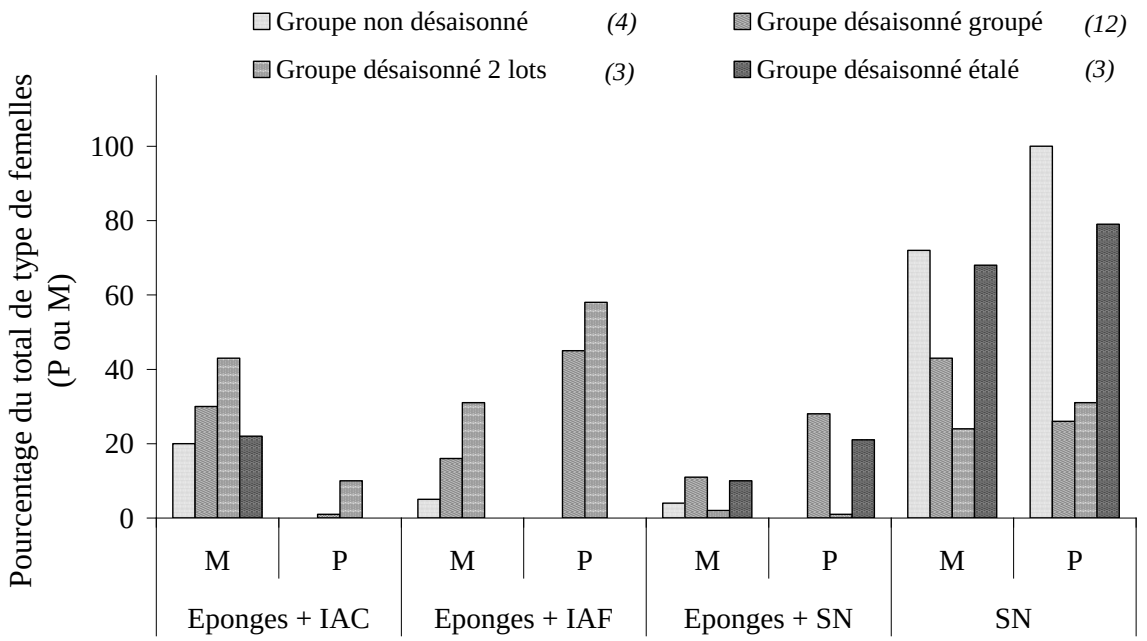


Figure 29 Répartition de l'utilisation des techniques de mise à la reproduction en fonction du type de femelles (M : multipares ; P : primipares) au sein des groupes d'éleveurs identifiés par Bossis (1995) sur la base de leurs choix de stratégie de reproduction. SN : saillie naturelle ; IAC : insémination artificielle en semence congelée ; IAF : insémination artificielle en semence fraîche ; Eponges : synchronisation hormonale des chaleurs.

1.1.2.2 Taux de mise-bas

Les résultats de reproduction des chèvres des éleveurs de la CLS entre 1998 à 2008 sont présentés dans le Tableau 9. En saillie naturelle, les résultats obtenus en saison sont toujours les plus élevés. Pour l'IA, le type de traitement (hormones, lumière, lumière et mélatonine) n'influence pas le pourcentage de mises-bas. L'IA est ici principalement utilisée à contre-saison du fait de la forte proportion d'éleveurs pratiquant le désaisonnement dans le groupe. Les résultats de reproduction obtenus pour les éleveurs de la CLS sont cohérents avec ceux de la littérature (Tableau 10).

Tableau 9 Effectifs et résultats de reproduction des chèvres (n = 33604) de 19 élevages sur la période 1998-2008 en fonction de la saison et du type de reproduction. Le nombre total de chèvres inséminées est de 11337, soit 34 % de l'effectif total.

Reproduction		Lutte[1]		Mise-bas[2]	
Saison	Technique	Effectif	%	Effectif	%
Avance saison	IA	1154	10.2	591	51.2
	SN	3901	17.5	2675	68.6
Contre-saison	IA	9504	83.8	5559	58.5
	SN	15018	67.4	11558	77.0
Saison	IA	679	6.0	420	61.9
	SN	3348	15.0	2615	78.1

[1]le pourcentage est exprimé par rapport au total des chèvres luttées avec une technique donnée
[2]le pourcentage est exprimé par rapport aux effectifs luttés sur la même saison avec la même technique

Tableau 10 Données de la littérature sur les résultats de reproduction en insémination artificielle (IA) et saillie naturelle (SN) à différentes périodes de reproduction.

Référence	Type femelle	Période	Technique	Taux de mise-bas (%)
Bruneteau et Leboeuf, 2008	Multipare	Saison sexuelle	IA	56
			SN	89
Gateff et al., 2003	Nullipare	Contre-saison sexuelle	SN	67
			IA	32-42
Chemineau et al., 1999	Multipare	Contre-saison sexuelle	SN	76.8
			IA	61.2 – 69.5

1.1.2.3 Gestion des échecs de reproduction

Le diagnostic de gestation par échographie abdominale conduit à une détection précoce du statut gestant des chèvres (dès le 30ème jour de gestation). Cette pratique permet de gérer les retours d'IA, les dates de tarissement et de minimiser les pertes économiques en réformant rapidement les femelles infertiles. Dans le groupe d'adhérents à la CLS, le diagnostic de gestation est systématiquement pratiqué. Les échecs de reproduction peuvent donner lieu à des réformes, à des changements de lots ou à mise en lactation longue des femelles. La consultation du comité technique a permis d'identifier les règles de gestion des échecs de reproduction en fonction des projets de production (Tableau 11). Dans le cadre d'un projet saison, la réforme sur infertilité est assez stricte étant donné que le taux de réussite de la reproduction est élevé. Dans le cadre des projets contre-saison et régulier, la gestion de l'infertilité s'appuie sur les mouvements de femelles entre les périodes de reproduction. Les nullipares n'ont en revanche qu'une seule opportunité de rattrapage afin qu'elles ne démarrent pas leur première reproduction trop tard. La conduite en lactation longue est un levier important par rapport aux mouvements de femelles et elle concerne une proportion non négligeable des effectifs des troupeaux (Tableau 12). Cette pratique est assez spécifique des systèmes caprins. La femelle en lactation longue n'est pas tarie et ne fait pas de mise-bas pendant au moins 2 ans. Elle produit du lait pendant 600 jours minimum. Cette pratique de conduite se développe dans les systèmes bovins laitiers où elle correspond plutôt à un allongement de la durée standard de 300 jours de lactation (Grossman et Koops, 2003). En caprin, une femelle en lactation longue peut rester 3 ou 4 ans sans se reproduire. Deux types de lactations longues sont distingués (Chambre d'Agirculture des Deux-Sèvres, 2009 ; Bossis, 1995) :

- la lactation longue dite « subie » : les chèvres qui ont échoué à la reproduction ne sont pas taries et restent en production jusqu'à la session de reproduction suivante ;

- la lactation longue dite « choisie » : les chèvres ne sont délibérément pas mises à la reproduction afin de les recaler sur une période de reproduction donnée.

Tableau 11 Règles de gestion des chèvres multipares et nullipares dans les trois projets de production identifiés dans les élevages de Poitou-Charentes.

		Multipares	Nullipares
Projet saison		Réforme stricte sur infertilité[1]	Réforme[2]
Projet contre-saison	Lot principal	Rattrapage pour toutes les femelles	
	Lot rattrapage	Lactation longue pour rejoindre le lot principal	Réforme
Projet régulier	Lot saison	Passage dans l'autre lot	1 rattrapage et ensuite réforme
	Lot contre-saison	Passage dans l'autre lot	1 rattrapage et ensuite réforme

[1]éventuellement si les résultats de fertilité sont mauvais, prolongement de la lutte ou lactation longue ou baisse d'effectifs
[2]sauf si chevrette issue d'IA

Tableau 12 Pourcentage de chèvres conduites en lactation longue dans les études de Bossis (1995), Gendron et Reveau (1994) et Gateff (2002).

Source	Nombre d'élevages enquêtés	% chèvres conduites en lactation longue
Gendron et Reveau (1994)	14	12
Bossis (1995)	23	11
Gateff (2002)	49	5

Historiquement, la pratique des lactations longues s'est développée parallèlement à la mise en place de techniques de désaisonnement. En effet, le passage d'une période de mises-bas en février-mars à septembre-octobre peut prendre plusieurs années. Il n'est pas possible de remettre les chèvres ayant mis bas en hiver à la reproduction au printemps car l'intervalle mise-bas saillie est trop court et le niveau élevé de production entraîne des problèmes d'infertilité. Les lactations longues sont devenues une solution à ce problème. Les femelles ayant mis bas en hiver sont maintenues en lactation jusqu'au printemps de la campagne suivante et mises en lutte à contre-saison. A l'heure actuelle, les lactations longues choisies tendent à se développer pour les raisons suivantes (Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2009) :

- simplification du travail associée aux mises-bas, dans un contexte de valorisation bouchère des chevreaux médiocre ;

- limitation des pertes économiques associées à la période de tarissement ;

- conservation de bonnes chèvres non-gestantes, diminution des frais vétérinaires et des problèmes sanitaires liés aux mises-bas.

Un autre indicateur du développement de cette pratique de conduite est sa mention explicite dans la récente réactualisation des cas types de l'Institut de l'Elevage (2008a). La Figure 30 présente la répartition mensuelle des mois de mise-bas des chèvres en lactation longue au moment des enquêtes dans l'étude de Gateff (2002). Ces chèvres représentent 5% de l'échantillon. Près des trois quarts proviennent de mises-bas de saison. Ce résultat n'est pas imputable aux élevages avec mises-bas en saison qui ne représentent que 24% de l'échantillon. En revanche ce résultat illustre le rôle de la lactation longue pour gérer les femelles vides et recaler les périodes de mises-bas dans des élevages pratiquant le désaisonnement (76% de l'échantillon). En effet, la période de reproduction à contre-saison a une fertilité moins bonne qu'en saison. Ceci a deux conséquences. Tout d'abord, le rattrapage des chèvres vides à l'automne implique une MB en saison puis une lactation longue pour être recalée avec le lot principal lutté au printemps. Ensuite, dans le cas où les deux lots de mises-bas sont d'importance équivalente, le changement de lot systématique des chèvres vides du printemps vers l'automne implique une dérive des effectifs : le lot d'automne se retrouve avec beaucoup plus d'effectifs que celui de printemps étant donné que la fertilité au printemps est moins bonne qu'à l'automne. Ainsi certaines chèvres ne sont pas mises à la reproduction à l'automne et maintenues en lactation longue pour rejoindre le lot lutté au printemps. Ces deux aspects expliquent la forte proportion de chèvres en lactation longue issues de mises-bas de saison.

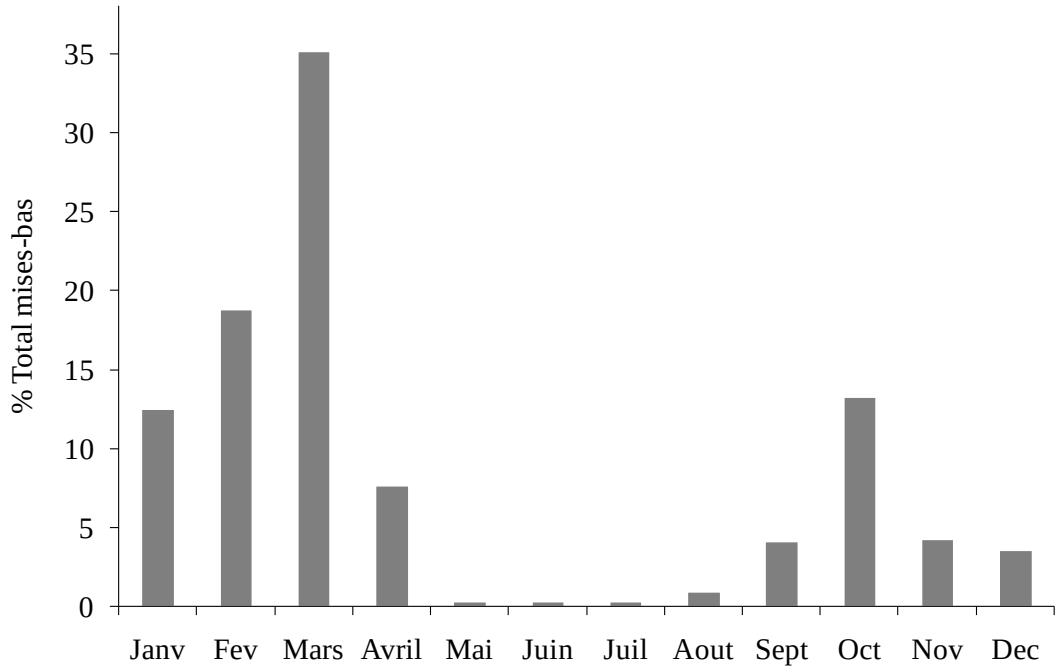


Figure 30 Répartition mensuelle des mises-bas ayant donné lieu à une lactation longue dans les 48 élevages de l'étude de Gateff (2002).

1.2 Pratiques d'allotement

La principale source d'information sur les pratiques d'allotement est l'étude Agrotransfert « Mise en lots » (Gateff, 2002) basée sur 49 enquêtes en exploitation. Cette étude visait à obtenir une hiérarchie à dire d'éleveur des critères d'allotement. Quatre critères majeurs de mise en lot ont été identifiés : les périodes de mise bas, l'IA, les primipares et les lactations longues. Tous ces critères sont liés à la conduite de la reproduction. Le critère « alimentation » n'est jamais cité comme critère prioritaire. En termes de nombre de lots, il ressort de cette étude que 39% des élevages mettent en place 4 lots, 20% 3 lots et 30% 5 lots ou plus. L'étude ne précise pas à quoi correspondent les lots. 61% des lots ont entre 40 et 60 femelles en production. La taille des lots dépend principalement des contraintes de bâtiments et de taille de salle de traite (50 places en général). La contrainte associée à la taille de la salle de traite a été confirmée par le comité technique. Le ré-allotement ainsi que la gestion du tarissement sont raisonnés par rapport à la taille de la salle de traite. A titre d'exemple, les chèvres en lactations longues sont regroupées uniquement si elles sont en nombre suffisant pour remplir la salle de traite. Le cas échéant, elles restent avec le lot dans lequel elles ont été luttées.

1.3 Pratiques de renouvellement

1.3.1 Politique d'effectifs

Les troupeaux caprins de Poitou-Charentes sont de grandes tailles (211 chèvres en moyenne sur la région ; 139 en moyenne sur la France, Institut de l'Elevage, 2009a). L'évolution des effectifs dépend de l'équilibre des taux de renouvellement et de réforme. Le Tableau 13 présente les taux de réforme et de renouvellement dans différentes études conduites sur la région. Le taux de renouvellement indiqué par Gateff (2002) n'est pas calculé mais obtenu à dire d'éleveurs. La légère supériorité du taux de renouvellement par rapport au taux de réforme traduit une tendance à l'augmentation modérée des effectifs, confirmée par la récente étude sur les résultats de 2007 des élevages du socle national (Institut de l'Elevage, 2009b). La gestion des effectifs conduit à un renouvellement rapide des chèvres, avec un rang moyen de lactation au Contrôle Laitier de 2.7 (Institut Elevage, 2008b). Cette valeur à l'échelle nationale est confirmée en Poitou-Charentes par l'étude de Malher *et al.* (2001) où le rang médian de lactation est égal à 2.66, le rang maximum étant seulement de 3.91.

Tableau 13 Taux de réforme et de renouvellement dans quatre études sur la région Poitou-Charentes. Le taux de renouvellement correspond au nombre de chevrettes élevées sur le nombre de chèvres présentes et le taux de réforme correspond au nombre de chèvres sorties sur le nombre de chèvres présentes.

Source	Nombre d'élevages	Taux réforme	Taux de renouvellement
Malher et al. (2001)[1]	23	25.2	31.7
Malher et al. (2001)[2]	20	26.7	37.4
Losdat et Simon (2006)	20	22.0	30.0
Losdat et Simon (2007)	20	21.0	31.0
Gateff (2002)	48	-	36.7

[1]données recueillies sur la période 1991-1993.
[2] données recueilles sur la période 1994-1996.

1.3.2 Composition du troupeau

Du point de vue du choix de la race, les Alpines et Saanen dominent nettement. D'après Gateff (2002), sur les 49 élevages étudiés, 20 sont en race Alpine, 21 en Saanen et 8 sont mixtes. Les données de Losdat et Simon (2006, 2007) indiquent que sur 20 adhérents, un seul possède un troupeau mixte. Par rapport à l'origine des femelles de renouvellement, Malher *et al.* (1999) montrent que 85% des éleveurs ont recours à l'auto renouvellement et non à des achats extérieurs. Les critères de recrutement des chevrettes de renouvellement parmi les chevrettes nées sur l'exploitation n'ont pas fait l'objet d'étude spécifique. Cependant, les cas concrets de Bossis (2006) précisent que dans les conduites avec mises-bas à contre-saison, les chevrettes sont conservées sur les premières mises-bas. Cette pratique correspond à la volonté

des éleveurs de garder les filles de mères ayant été fécondées précocement pendant la période de lutte. La fécondation précoce est associée à une meilleure aptitude au désaisonnement et à une meilleure fertilité. L'équilibre des effectifs est réalisé en ajustant le nombre de réformes volontaires au nombre de décès et de chevrettes conservées (source : comité technique).

1.3.3 Causes de réforme

Les réformes peuvent être involontaires (mortalité, problème sanitaire) ou volontaires (décision de l'éleveur). Les réformes volontaires impliquent un critère ou une combinaison de critères permettant la prise de décision. La Figure 31 présente la décomposition du taux de réforme en fonction des causes de réforme volontaire et involontaire les résultats de Malher *et al.* (2001) sur les grands troupeaux de Poitou-Charentes. Les causes de réforme involontaire représentent environ 40% des sorties de chèvres du troupeau et les causes volontaires (infertilité, production et âge) représentent 60%.

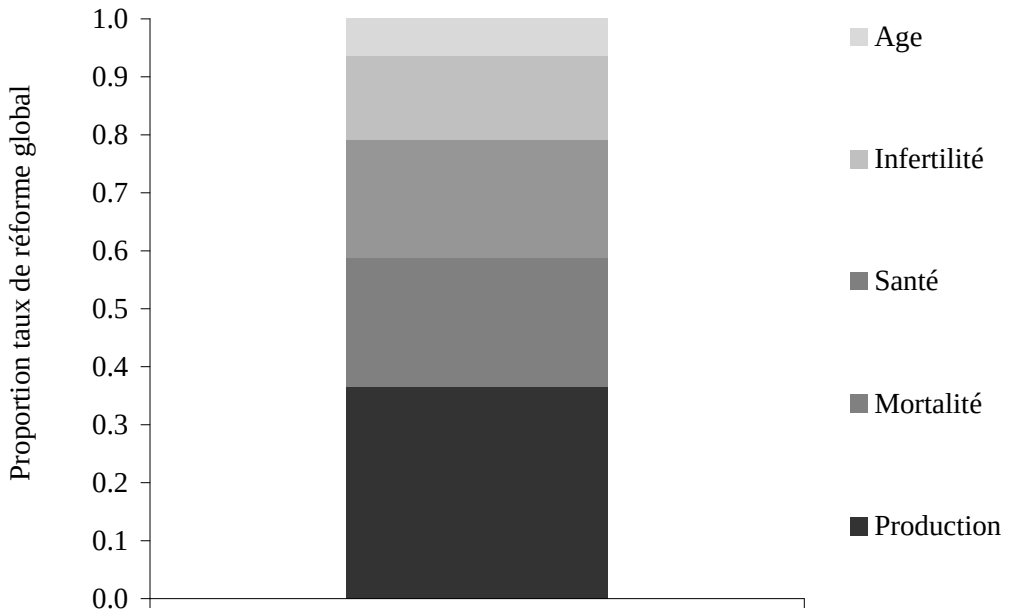


Figure 31 Décomposition du taux réforme (nombre de chèvres sorties/nombre de chèvres présentes pendant la campagne) en fonction des causes de réforme identifiées (d'après les données de Malher et al., 2001).

1.4 Pratiques d'alimentation

1.4.1 Systèmes alimentaires

Les systèmes d'alimentation sont assez diversifiés dans les systèmes intensifs de l'Ouest français. Plusieurs types de classification existent mais toutes reposent sur la nature et la

proportion des différents fourrages constitutifs de la ration. La représentativité des systèmes a été évaluée sur la base de différentes études des organismes de recherche développement (Tableau 14). Ces études présentaient différents types de classification des systèmes alimentaires (de 4 à 12 systèmes distingués). Les types de système ont été regroupés en 4 classes :

- ensilage maïs;
- foin (déshydratés < 150kg/chèvre/an);
- foin et déshydratés (déshydratés > 150kg/chèvre/an);
- autres (pâturage, enrubannage, ensilage d'herbe, affouragement en vert).

Tableau 14 Description des ressources mobilisées pour l'analyse des systèmes alimentaires.

Référence	Année	Nombre d'élevages	Zone géographique	Nombre de systèmes identifiés
Leclerc	2000	595	Centre-Ouest	9
Gateff	2002	48	Poitou-Charentes	12
Bossis	2003	38	Poitou-Charentes et Pays de la Loire	4
Bessonnet	2006	185	Centre-Ouest	6
Réseau National	2007	190	Centre-Ouest	6

La Figure 32 présente la distribution des élevages enquêtés dans chacune des classes. Les enquêtes réalisées s'étalent sur presque dix ans et permettent ainsi d'avoir une idée de la dynamique d'évolution des systèmes d'alimentation. Le système « ensilage de maïs » a régressé de même que les systèmes « autres » qui regroupent en fait des systèmes basés sur les fourrages verts ou humides. A l'inverse, les systèmes basés sur une ration sèche (foin et déshydratés) ont progressé. Cette tendance correspond à la dynamique d'agrandissement des troupeaux et de simplification du travail en élevage (Jénot, 2002). L'apparition du système « paille et déshydratés » dans la réactualisation des cas types de l'Institut de l'Elevage est caractéristique de cette tendance. Ce modèle hors sol est plébiscité par certaines laiteries mais est cependant remis en cause en raison de la forte dépendance aux achats extérieurs qu'il induit.

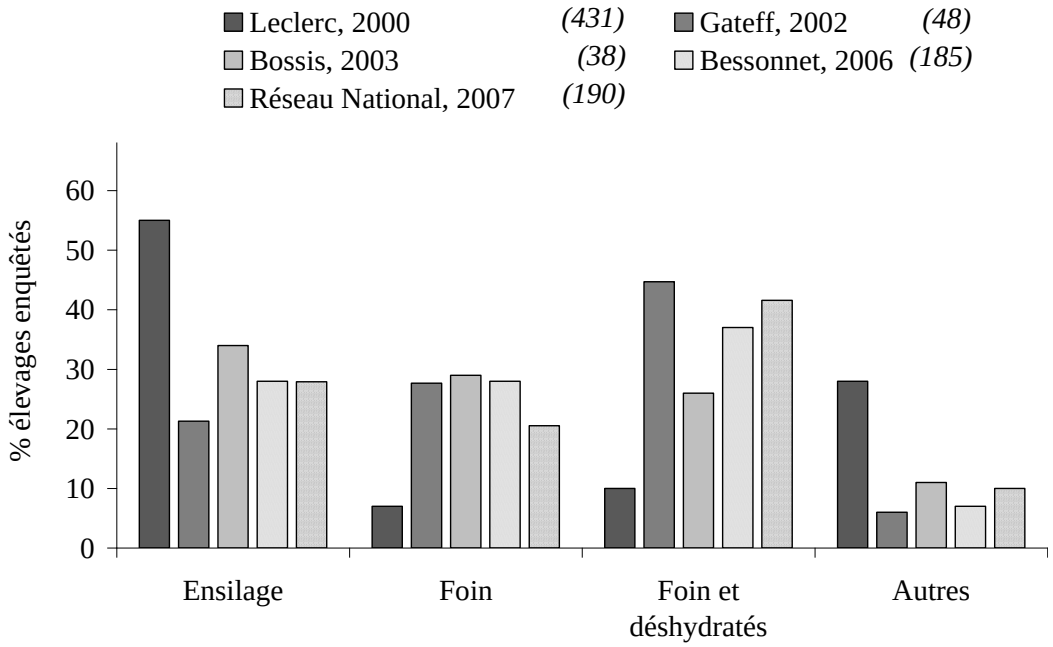


Figure 32 Représentativité des types de systèmes alimentaires d'après les résultats de Leclerc (2000), Bossis (2003), Gateff (2002), Bessonnet (2006) et du réseau national (2007). Le nombre d'élevages enquêtés est précisé entre parenthèses.

1.4.2 Adaptation de la ration pendant la campagne et entre les lots

L'étude de Gateff (2002) indique que 34% des éleveurs ne modifient pas les apports alimentaires pendant la campagne. Pour ceux qui réalisent des modifications, les principaux motifs de changement des apports alimentaires sont le stade de lactation (46% des éleveurs) et la qualité des fourrages (18% des éleveurs). Les modifications peuvent être une diminution des apports (23% des éleveurs) ou une modification variable (43% des éleveurs). La réponse « variable » est à interpréter prudemment. Gateff (2002) suggère que la question n'aurait pas été correctement posée et aurait engendré de la confusion pour l'éleveur (confusion entre un changement ponctuel et un changement à l'échelle de la campagne). D'après le comité technique, la ration est adaptée au moment du tarissement, de la période de reproduction (baisse des matières azotées) et juste après la mise-bas (augmentation progressive des quantités de concentrés). Le découpage serait apparemment rarement plus fin. Les lactations longues ne font pas l'objet de conduite spécifique de l'alimentation. L'étude de Gateff (2002) s'est intéressée aux différences de rations entre lots. Pour 30% des éleveurs, il n'y pas de modification de l'alimentation entre les lots. Ce résultat confirme la forte liaison entre reproduction et critère d'allotement. Pour 23% des éleveurs, le lot de primipares est rationné différemment et enfin pour 30% des éleveurs les lots sont différenciés par leur niveau de production. Globalement, l'absence d'adaptation des apports alimentaires au cours de la campagne est une tendance des éleveurs laitiers intensifs. Les différents acteurs du

développement encouragent à une meilleure maitrise du rationnement pour une meilleure maitrise des charges alimentaires, pesant toujours lourdement dans les charges opérationnelles. Une matérialisation de ce manque d'optimisation des systèmes alimentaires est la forte variabilité des résultats technico-économiques entre systèmes d'alimentation. L'augmentation du prix des matières premières a relancé le débat sur l'optimisation des rations, sujet récemment évoqué par la profession (Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2008).

1.4.3 Combinaison entre système alimentation et stratégie de reproduction

Aucune étude ne s'est attachée à la question des combinaisons de pratiques de reproduction et d'alimentation. D'après le comité technique, cette question doit s'envisager à l'échelle de l'exploitation. A titre d'exemple, les systèmes basés sur l'ensilage maïs sont souvent associés avec des bovins. Ces derniers mettant bas à l'automne, les chèvres sont calées sur des mises-bas de printemps afin de répartir le travail sur l'année. C'est donc le type de système d'exploitation, associant bovins et caprins, qui détermine le lien entre le système d'alimentation et la stratégie de reproduction du troupeau caprin.

1.5 Conclusions sur l'analyse du système réel

Le projet de production des éleveurs caprins correspond à la courbe de production laitière du troupeau. Le choix d'un projet de production se traduit stratégiquement par le choix d'une forme d'organisation des MB. Trois projets de production correspondant à trois formes d'organisation de la reproduction ont été retenus : i) un projet « saison » (S) où la courbe de livraison du troupeau est très saisonnée et centrée sur le printemps avec une période de reproduction en saison ; ii) un projet « contre-saison » (CS) : la courbe de livraison est saisonnée et centrée sur l'automne avec une période de reproduction principale à contre-saison et une période de rattrapage en saison et iii) un projet « régulier » (R) : la courbe de livraison est régulière sur l'année avec deux périodes de reproduction principales, une en saison et une à contre-saison. Le choix d'une courbe de livraisons de lait structure fortement les choix de conduite depuis l'organisation des périodes de reproduction jusqu'aux règles de gestion des échecs de reproduction ou des règles de mise en lot. La saisonnalité de l'espèce caprine renforce cette structuration puisque le choix d'une reproduction à contre-saison implique l'utilisation de techniques spécifiques en lien avec le désaisonnement de l'activité sexuelle des femelles. Le choix des techniques repose également sur le type de femelles (nullipares ou multipares) ainsi que sur la volonté de pratiquer l'IA. Les résultats de reproduction varient en fonction des combinaisons de techniques et de la période de reproduction donnant lieu à

différents modes de gestion des échecs de reproduction. La gestion par lots est un levier essentiel dans la mise en œuvre de la stratégie de reproduction. La conduite en lactation longue représente une source de flexibilité en autorisant les mouvements de femelles entre lots. Du point de la gestion des effectifs, les troupeaux tendent à s'agrandir. L'analyse des pratiques de renouvellement a permis de caractériser les flux d'entrées et de sorties des femelles sur le plan qualitatif (choix des femelles) et sur le plan quantitatif (effectifs de femelles). Le renouvellement est assuré en interne. L'alimentation reflète en partie la tendance à l'agrandissement ou du moins le fait que les troupeaux soient de grandes tailles : elle est principalement basée sur l'utilisation de rations sèches. Certains éléments mériteraient d'être approfondi comme par exemple les déterminants des changements de ration au cours de la campagne ou encore les règles de sélection des femelles de renouvellement.

1.6 Références bibliographiques

Bessonnet S, 2006. Présentation des travaux du réseau régional d'élevage caprin. Synthèse des différents travaux. Colloque caprin, Niort, 5 mai 2006.

Bossis N, 1995. Réseau « Reproduction » Premiers résultats. Institut de l'Elevage, 16p

Bossis N, 2003. L'autonomie alimentaire en élevage caprin. Résultats du réseau d'élevages caprins Poitou-Charentes et Pays de la Loire. Institut de l'Elevage, 4p.

Bossis N, 2006. Stratégies de reproduction, 5 cas concrets en région Centre. Institut de l'Elevage.

Bossis N, Guinamard C, Caramelle-Holtz E et De Cremoux R, 2008a. Les mises bas tardives, un nouvel itinéraire pour gérer la saisonnalité : incidences techniques et économiques. Institut de l'Elevage, Compte rendu n°120855005. 43p.

Bossis N, Guinamard C, Caramelle-Holtz E et De Cremoux R, 2008b. Institut de l'Elevage, 2008a. Maitrise de la saisonnalité. Produire du lait au bon moment pour répondre aux attentes des entreprises et des éleveurs. Institut de l'Elevage, Compte rendu 12 08 55 016. 45p.

Chemineau P, Malpaux B, Guérin Y, Maurice F, Daveau A et Pelletier J, 1992. Lumière et mélatonine pour la maîtrise de la reproduction des ovins et des caprins. Annales de Zooetchnie 41, 247-261.

Chemineau P, Baril G, Leboeuf B, Maurel MC, Roy F, Pellicer-Rubio M, Malpaux B et Cognie Y, 1999. Implications des récents progrès en physiologie de la reproduction de l'espèce caprine. INRA Productions Animales 12, 135-146.

Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2008. Augmentation du coût alimentaire en élevage caprin : comprendre la conjoncture et les impacts économiques pour optimiser les systèmes alimentaires caprins. Colloque caprin, Niort, 28 avril 2008.

Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2009. Les lactations longues en élevages caprins. Une perspective d'avenir ? Colloque caprin, Niort, 7 mai 2009.

Gateff S, 2002. Gestion des lots en élevage caprin, les stratégies des éleveurs. Quelques pistes pour réduire l'hétérogénéité. Document de travail, Agrotransfert Poitou-Charentes, 52p.

Gateff S et Sauvant D, 2003. Mise en lots en élevage caprin et gestion de l'hétérogénéité du troupeau. 10èmes Rencontres Recherch Ruminants, Paris, France.

Gendron P et Reveau A, 1994. La conduite des chèvres en lactation longue. Chambre d'agriculture de Charente, 26p.

Grossman M et Koops WJ, 2003. Modeling extended lactation curves of dairy cattle: a biological basis for the multiphasic approach. Journal of Dairy Science 88, 988-998.

Institut de l'Elevage, 2008a. Actualisation des systèmes caprins en Poitou-Charentes et Pays de la Loire. Dossier de synthèse 2007.

Institut de l'Elevage, 2008b. Résultats de Contrôle Laitier. Espèce caprine. 2008. 16p.

Institut de l'Elevage, 2009a. Chiffres clés 2009. Production caprine lait et viande.

Institut de l'Elevage, 2009b. Résultats 2007 des exploitations caprines laitières et fromagères. Contexte national et synthèse des données des réseaux d'élevage et d'appui technique. Collection Résultats Annuels. 24p.

Jenot F, 2002. Le travail en élevage caprin. 14ème Colloque en production caprine, Niort.

Leclerc MC, 2000. Goat feeding systems in Centre Ouest (France): effects on milk yield and composition. 7th International Conference on Goats, France, Tours, 15-21 May 2000.

Losdat J et Simon S, 2006. Optichèvre, résultats 2006. Groupe P8006. BTPL et Coopérative Sèvre et Belle. 9p.

Losdat J et Simon S, 2007. Optichèvre, résultats 2007. Groupe P8006. BTPL et Coopérative Sèvre et Belle. 9p.

Malher X, Beaudeau F, Poupin B, Falaise G et Losdat J, 1999. Réforme et renouvellement dans les grands troupeaux laitiers caprins de l'Ouest de la France. Inra Productions Animales, 12 (2), 123-133.

Malher X, Seegers H et Beaudeau F, 2001. Culling and mortality in large dairy goat herds managed under intensive conditions in western France. Livestock Production Science 71, 75-86.

2 Modèle conceptuel de gestion technique du troupeau caprin laitier

L'objectif du modèle conceptuel est de proposer un cadre de représentation de la gestion technique du troupeau caprin laitier afin d'intégrer les éléments clés du système réel, identifiés dans la partie précédente. Nous avons représenté la gestion technique du troupeau caprin comme le résultat d'un processus de décision déclinant un projet d'élevage en opérations techniques sur le troupeau. La prise en compte du processus de décision permet d'assurer in fine la cohérence entre les opérations techniques ainsi que la généricité du modèle par rapport à la représentation de différents projets de production. Le processus décisionnel s'appuie sur trois niveaux d'abstraction :

- Le projet d'élevage, décliné en projet de production et projet de composition ;
- La configuration du troupeau en entités de gestion reflétant les choix stratégiques relatifs à l'organisation de la production et du renouvellement ;
- La gestion des lots fonctionnels par des motifs élémentaires de gestion formalisant la planification et le pilotage des opérations techniques.

2.1 Du projet d'élevage à la configuration du troupeau en lots fonctionnels

Le projet d'élevage se décompose en projet de production et projet de composition (Cournut, 2001). Le projet de production est représenté par un volume laitier et une répartition temporelle de ce volume. Trois projets de production sont représentés dans le modèle:

- Le projet saison (S) où la production laitière est très saisonnée et centrée sur le printemps ;
- Le projet contre-saison (CS) où la production laitière est saisonnée et centrée sur l'automne ;
- Le projet régulier (R) où la production est régulièrement répartie sur l'année.

Le projet de composition est représenté par une composante quantitative (effectif du troupeau et politique d'effectifs) et par une composante qualitative (règles de sélection et de réformes des femelles). Nous considérons une stabilité des effectifs ainsi qu'une stabilité des potentiels laitiers dans le troupeau. La diffusion du progrès génétique et les choix relatifs au plan de croisement génétique ne sont pas représentés.

La mise en œuvre du projet de production et du projet de composition implique un premier niveau de décision organisationnel. Il s'agit de la configuration du troupeau en entités de gestion autonomes, supports du raisonnement technique de l'éleveur. La configuration est un concept issu des sciences de gestion, utilisé dans les travaux sur les systèmes fourragers (revue dans Coléno et Duru, 2005). Il a été proposé afin d'étendre le concept de modèle d'action (Aubry 1998), conçu pour l'analyse de la gestion technique d'une sole en grande culture. La configuration traduit les choix stratégiques d'allocation des ressources productives (ici les femelles laitières) afin de réaliser un projet de production. La configuration implique donc de définir le nombre d'entités, leur composition et leurs coordination. Dans un premier temps, elle repose sur la définition des collectifs d'animaux au sein du troupeau en relation avec les projets de production et de composition. Ce premier niveau de représentation est illustré sur la Figure 33. Il traduit un ensemble d'hypothèses communes aux systèmes caprins laitiers : absence d'atelier d'engraissement des produits nés, auto-renouvellement, ajustement de l'équilibre entrées-sorties via les effectifs réformés volontairement.

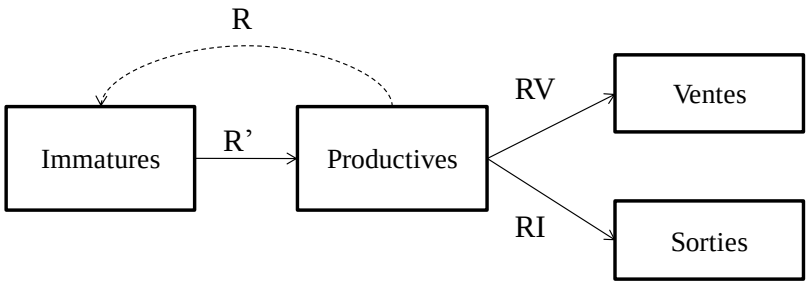


Figure 33 Représentation des collectifs d'animaux dans le modèle conceptuel de gestion du troupeau caprin. R : effectif de femelles immatures conservées pour le renouvellement ; R' : effectif de femelles immatures intégrées dans l'entité de femelles productives ; RV : effectifs de femelles productives réformées volontairement ; RI : effectif de femelles productives réformées involontairement. La stabilité des effectifs se traduit par : R'=RV + RI. Les réformes volontaires sont utilisées comme variable d'ajustement pour garantir l'équilibre des entrées-sorties : RV = R' –RI.

Dans un deuxième temps, la configuration repose sur l'organisation des collectifs de femelles immatures et productives en entités de gestion, support des décisions techniques. Les

entités de gestion structurant les collectifs de femelles sont les lots fonctionnels. Nous définissons le lot fonctionnel comme un ensemble renouvelé de femelles pilotées par les mêmes règles de décisions techniques. Ces décisions organisent un type de trajectoire productive au sein du lot fonctionnel. Cette trajectoire a une fonction spécifique par rapport au projet d'élevage. Le lot fonctionnel est donc un concept qui formalise le type de trajectoire biologique individuelle que l'éleveur souhaite faire réaliser à ses femelles. C'est un concept dont la spécification repose sur la définition de la trajectoire associée et de son rôle par rapport aux composantes du projet de l'éleveur. Dans le cas d'un lot fonctionnel de femelles adultes, la trajectoire souhaitée est définie par une période de mise-bas alors que dans le cas d'un lot fonctionnel de femelles immatures, la trajectoire souhaitée correspond à l'atteinte d'un poids vif à un âge donné. Les lots fonctionnels de femelles immatures formalisent les choix stratégiques relatifs à la réalisation du projet de composition, alors que les lots fonctionnels de femelles productives formalisent les choix stratégiques relatifs à la réalisation du projet de production. Le concept de lot fonctionnel est suffisamment générique pour traduire les trois projets de production identifiés dans l'analyse du système réel (Figure 34, Figure **35** et Figure **36**).

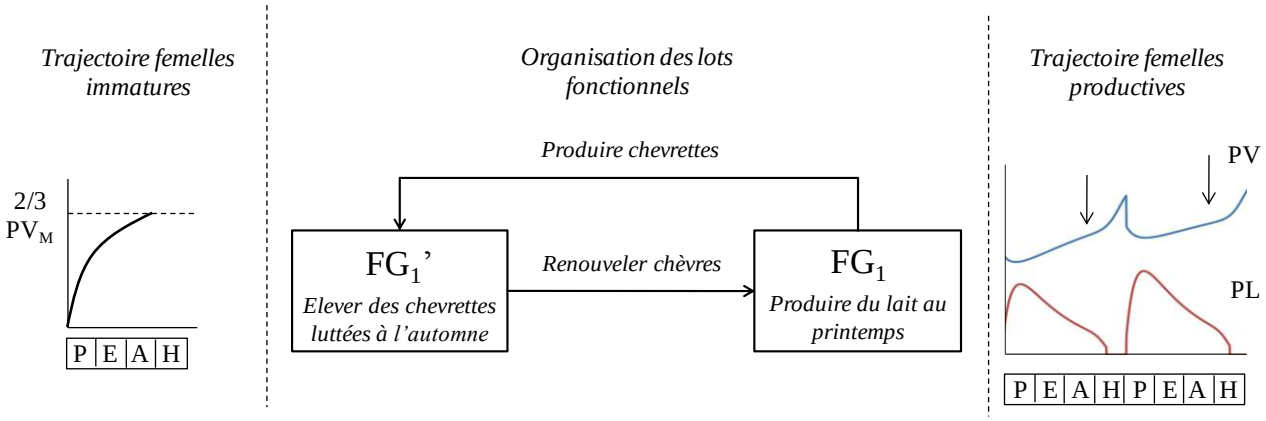


Figure 34 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «saison ». Les courbes de poids vif (PV) et de production laitière (PL) sont illustratives. A : automne ; E : été ; FG : lot fonctionnel de femelles productives ; FG' lot fonctionnel de femelles immatures; H : hiverP : printemps ; PV_M : poids vif à maturité.

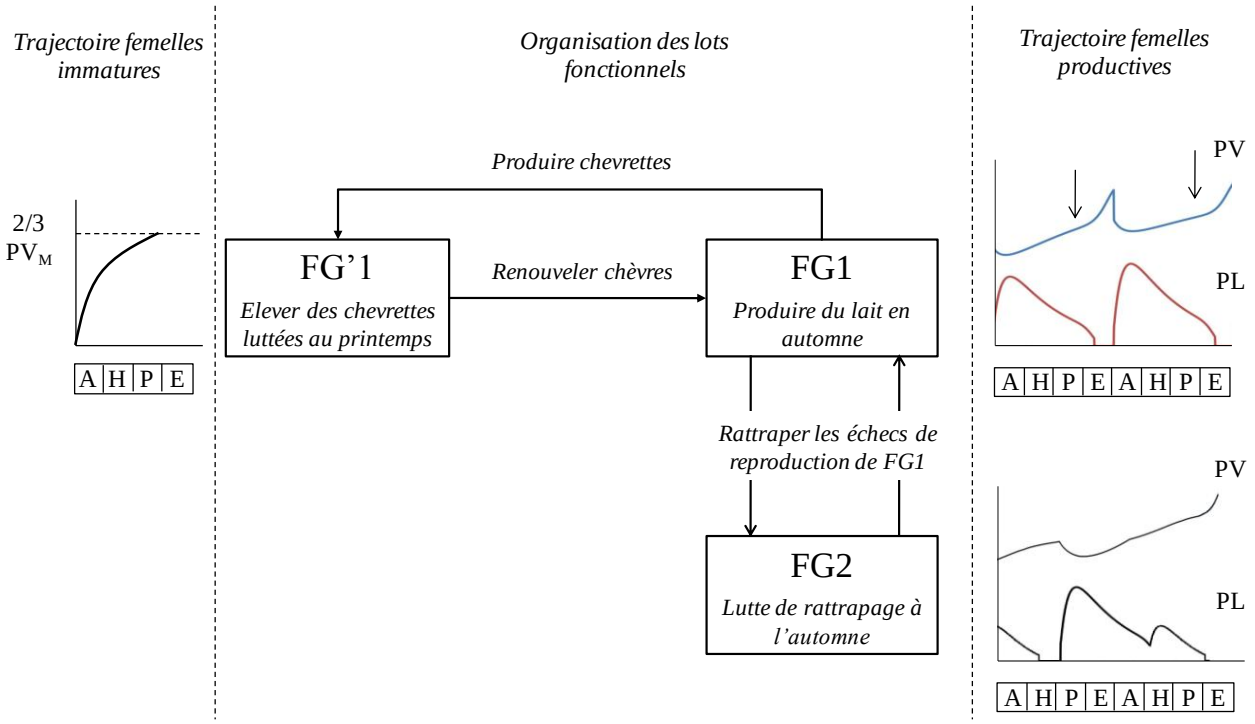


Figure 35 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «contre-saison». Les courbes de poids vif (PV) et de production laitière (PL) sont illustratives. A : automne ; E : été ; FG : lot fonctionnel de femelles productives ; FG' lot fonctionnel de femelles immatures; H : hiverP : printemps ; PV_M : poids vif à maturité.

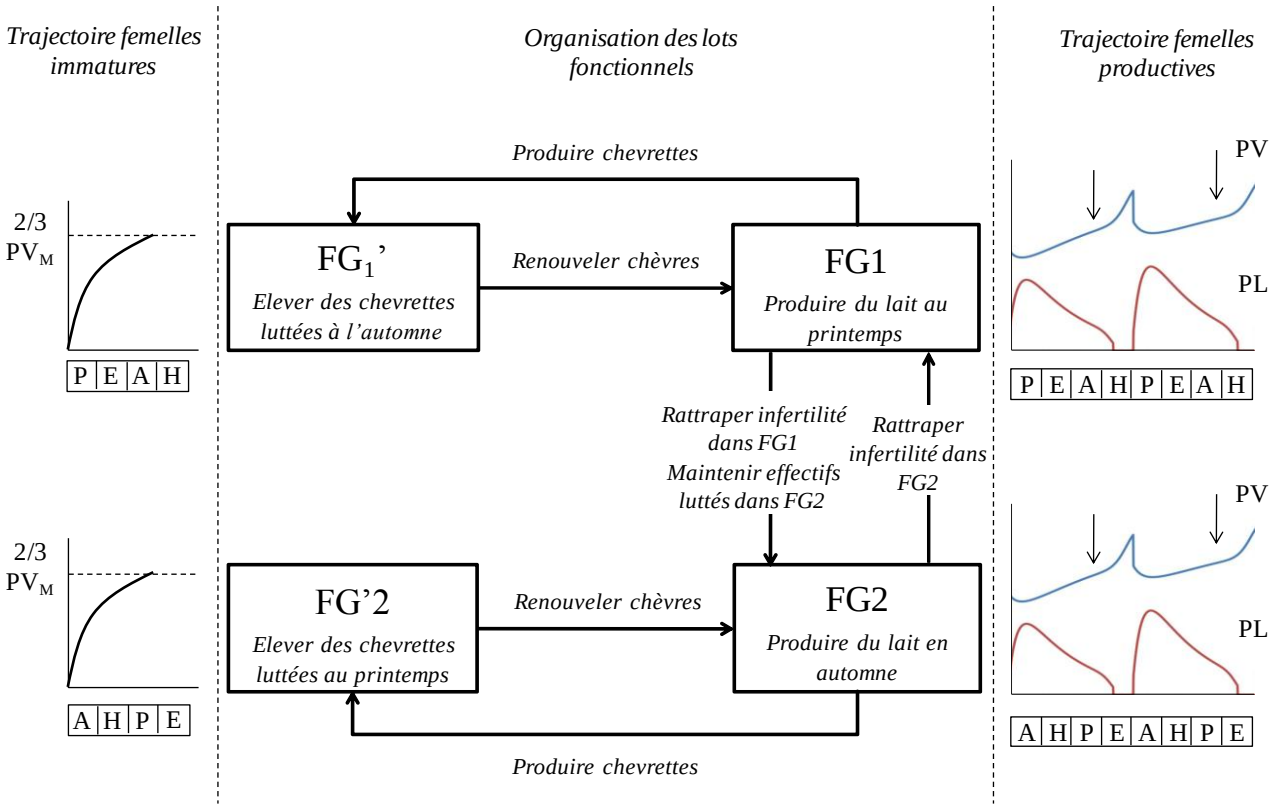


Figure 36 Organisation du troupeau en lots fonctionnels dans le cadre d'un projet de production «régulier». Les courbes de poids vif (PV) et de production laitière (PL) sont illustratives. A : automne ; E : été ; FG : lot fonctionnel de femelles productives ; FG' lot fonctionnel de femelles immatures; H : hiverP : printemps ; PV_M : poids vif à maturité.

La configuration du troupeau en lots fonctionnels intègre également des notions de régulations pour la réalisation du projet de production. Elle traduit les choix de l'éleveur par rapport au rattrapage des trajectoires déviant de l'objectif associé au lot. La régulation des déviations passe par la mise en place de lots spécifiques ou par des règles de coordination entre lots. Dans le cadre du projet «contre-saison», la mise en place du lot de rattrapage permet de rattraper les échecs de reproduction (Figure 35). Dans le cadre du projet «régulier», cette fonction est assurée par les mouvements de femelles entre les lots correspondant aux périodes principales de reproduction (Figure 36). Ces différents éléments de régulation sont permis par la conduite des femelles en lactation longue. La configuration du troupeau en lots fonctionnels est une représentation opérationnelle pour rendre compte de cette pratique, envisagée comme une option flexible de conduite. La configuration du troupeau en lots fonctionnels est également une représentation opérationnelle pour rendre compte du fonctionnement d'ateliers d'engraissement. Les lots fonctionnels seraient alors définis par rapport à des trajectoires de croissance maîtrisées via l'alimentation. Chaque lot correspondrait à un type de finition des produits.

La coordination entre l'organisation de la production et du renouvellement est représentée par la définition des relations entre lots fonctionnels. Les lots de femelles productives produisent les individus qui alimentent les lots de femelles immatures. Les lots de femelles immatures fournissent les individus qui renouvellent les lots de femelles productives. A titre d'exemple, dans le projet « contre-saison », seul le lot fonctionnel correspondant à une mise-bas à contre- saison fournit les femelles de renouvellement. Cette représentation traduit le fait que l'éleveur souhaite renouveler son troupeau avec des femelles présentant une bonne fertilité à contre-saison.

2.2 Planification et pilotage des opérations techniques au sein des lots fonctionnels : motif élémentaire de gestion

Le second niveau de décision du modèle conceptuel formalise la gestion temporelle des lots fonctionnels. La formalisation du fonctionnement dynamique du lot fonctionnel s'appuie sur le concept de motif élémentaire de gestion. Nous définissons ce concept comme la séquence minimale d'opérations techniques nécessaire à la réalisation d'un cycle de production, cycle gestation-lactation dans notre cas, au sein d'un lot fonctionnel. La trajectoire à long terme associée au lot fonctionnel repose sur une succession de cycles de production.

Dans le cas d'un troupeau laitier en rythme de croisière, les motifs élémentaires de gestion se succèdent à un rythme annuel avec une mise à la reproduction par an au sein d'un lot. L'analyse du système réel a montré la stabilité temporelle des dates de démarrage de la mise à la reproduction. La coordination des motifs de gestion ne fait donc pas l'objet de choix stratégiques de l'éleveur. Le motif de gestion démarre avec la période de mise à la reproduction qui est le déclencheur des cycles de gestation-lactation. La mise à la reproduction permet l'intégration des chevrettes de renouvellement. Afin de réaliser l'ajustement entre les entrées (début du motif de gestion) et les sorties de femelles (réformes involontaires en cours de campagne) assurant le renouvellement du lot fonctionnel, nous avons considéré que le motif de gestion s'achève avec une session de réforme volontaire ajustant des effectifs. Le nombre de réformes volontaires correspond à l'effectif de chevrettes moins l'effectif de femelles réformées involontairement depuis le début de la reproduction.

Le motif élémentaire de gestion regroupe la planification et le pilotage des opérations techniques qui mettent en œuvre la trajectoire visée par l'éleveur pour le lot fonctionnel. La planification correspond à un plan prévisionnel organisant chronologiquement les opérations techniques et les positionnant dans un calendrier. Le pilotage correspond à la formulation des conditions et des modalités d'exécution des opérations techniques. La planification et le pilotage traduisent la stratégie de l'éleveur par rapport à la gestion de la reproduction, de l'alimentation et du renouvellement (Tableau 15). La planification des stratégies de renouvellement et de reproduction est une entrée du modèle et n'évolue donc pas au cours du temps. Ce choix est en partie lié au lien entre le calage temporel des opérations et le déroulement des cycles des femelles. Par exemple, le diagnostic de gestation intervient à une date fixe par rapport à la fin de la lutte pour des questions de seuil de détection des gestations. Les modalités d'exécution des opérations dépendent des choix de l'éleveur et sont des entrées du modèle.

Tableau 15 Opérations techniques relatives aux stratégies de conduite de la reproduction, du renouvellement et de l'alimentation du troupeau considérées dans le modèle.

Stratégie	Opération	Modalités
Renouvellement	Intégration chevrettes	Intégration de femelles issues d'autres lots fonctionnels
Reproduction	Constitution des sous-lots de lutte	3 sous-lots : - Nullipares - Multipares mises à l'IA sur critère de production laitière - Multipares en lutte libre
Reproduction	Reproduction des sous-lots	Taux de réussite représentatifs d'une technique de

		synchronisation et de saillie
Reproduction	Diagnostic de gestation	
Reproduction	Gestion des chèvres gestantes	Date de tarissement positionnée 60 jours avant la mise-bas
Reproduction	Gestion des chèvres non gestantes	Règles de décision sur l'orientation des femelles non-gestantes : - Réforme sur infertilité - Maintien en lactation longue systématique - Maintien en lactation longue sur critère individuel de production
Reproduction	Tarissement	
Renouvellement	Conservation chevrettes renouvellement	
Renouvellement	Réforme volontaire	Critères individuels : valeurs seuils de rang de lactation et de production laitière
Alimentation	Changement de ration i	Fonction de la séquence et de l'animal pilote

La représentation de la stratégie d'alimentation s'appuie sur les concepts d'analyse fonctionnelle de l'alimentation proposés par Guérin et Bellon (1989). La stratégie d'alimentation correspond à une succession de séquences alimentaires sur la campagne de production. Une séquence alimentaire est une période pendant laquelle un niveau de besoins des animaux, représenté par l'animal pilote, est satisfait par un même type de ressource. Concrètement, les séquences alimentaires sont identifiées en mettant en rapport le découpage de la demande animale sur la campagne et le découpage de l'offre alimentaire sur la campagne. Lorsqu'un type de ressource correspond à un type de besoins, cette correspondance définit une séquence alimentaire. Les bornes temporelles des séquences correspondent aux dates de changement de ration. La planification de l'alimentation repose donc sur le nombre de séquences alimentaires et sur les dates de transition entre séquences. Le pilotage de l'alimentation repose sur des opérations de changement de ration. La ration distribuée dans une séquence donnée dépend de l'animal pilote. Elle est définie par une composition en type d'aliments (quantités et valeurs alimentaires en UFL/kg MS et en UE/kg MS). L'animal pilote représente les besoins d'un animal de référence utilisé pour déterminer les besoins moyens du lot. L'animal pilote est exprimé dans la même unité que le potentiel laitier des individus, *i.e.* en kg de lait au pic de la troisième lactation. Cette homogénéité entre animal pilote et niveau génétique permet de raisonner l'alimentation en termes de taux de couverture des besoins du lot (Figure 37). Par exemple, un animal pilote défini à 5 kg de production pour un lot dont le potentiel moyen est à 4 kg traduit une stratégie d'alimentation qui surestime les besoins du lot.

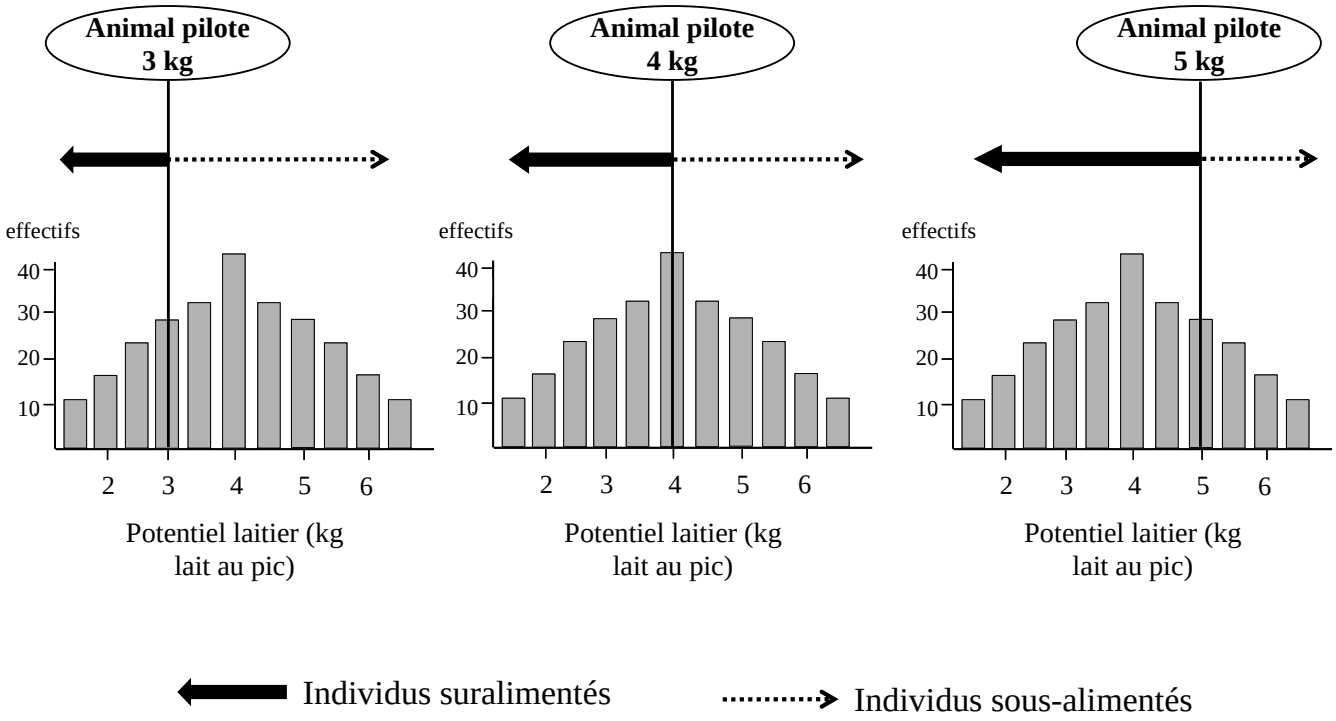


Figure 37 Représentation de trois stratégies d'alimentation du lot en fonction du niveau de production laitière de l'animal pilote (en kg/j de lait au pic de la 3ème lactation). Les stratégies se différencient par la proportion d'individus qui sont sur- ou sous-alimentés. Cette proportion dépend du décalage entre l'animal pilote et le niveau potentiel moyen du lot.

2.3 Conclusion

Le modèle conceptuel de gestion technique du troupeau caprin articule trois niveaux de décision. Les variables d'entrée du modèle définissent le projet d'élevage par un projet de composition (effectif de femelles productrices et taux de renouvellement) et par un projet de production (profil de livraison laitière). La mise en œuvre des composantes du projet d'élevage s'appuie d'abord sur un niveau de décision organisationnel : la configuration du troupeau en lots fonctionnels. La configuration traduit les choix de l'éleveur par rapport à l'organisation de la production et du renouvellement. Les lots fonctionnels traduisent l'organisation des cycles individuels des femelles pour la réalisation du projet d'élevage. Le concept de lot fonctionnel n'est pas limité à la représentation d'une organisation basée sur la reproduction. Il est assez générique pour décrire des ateliers d'engraissement ou d'élevage de reproducteurs où les trajectoires recherchées pour réaliser le projet de production correspondent à des trajectoires de croissance, maîtrisées par les pratiques d'alimentation. Le fonctionnement dynamique du lot fonctionnel s'appuie sur le motif élémentaire de gestion qui correspond à la séquence minimale d'opérations techniques permettant de réaliser un cycle de production au sein du lot fonctionnel.

Les concepts de lot fonctionnel[3] et de motif élémentaire[4] de gestion que nous proposons se distinguent des concepts de lot fonctionnel et de cycle de production de lot (CPL) proposé par Cournut (2001). Dans son modèle de gestion du troupeau ovin, cet auteur formalise le passage du projet aux opérations techniques par un niveau de pilotage stratégique de la production et du renouvellement. Le pilotage stratégique de la production repose sur la configuration et la coordination des CPL. Le CPL est défini comme « *l'ensemble des cycles de production de brebis ayant participé à une même session de lutte* » (Cournut, 2001). Dans notre approche, nous représentons le passage du projet d'élevage aux opérations techniques par un niveau de décision organisationnel. Nous n'avons pas fait intervenir le pilotage stratégique car nous n'avons pas formalisé les fonctions de vigilance et de diagnostic qui fondent ce concept issu des sciences de gestion (Hémidy, 1993). Le concept de CPL est défini par rapport à la participation à une session de lutte. Il est ainsi nécessairement contingent de la reproduction. Le concept de lot fonctionnel piloté par des motifs élémentaires de gestion permet de gagner en généricité en rendant possible la représentation des trois grands types de projets de production identifiés dans les élevages caprins laitiers de Poitou-Charentes ainsi que la conduite en lactation longue. L'organisation du troupeau en lots fonctionnels est donc une représentation opérationnelle pour traduire le lien entre un projet d'élevage et des opérations techniques sur les animaux et intégrer les combinaisons de stratégies d'alimentation et de reproduction.

Le modèle conceptuel de gestion technique a été implémenté informatiquement sous forme d'évènements discrets. Ces évènements fonctionnent sur la base de boucles conditionnelles qui réalisent les actions élémentaires de conduite en fonction des informations des modèles individuels de chèvre laitière. Ainsi, les évènements discrets modifient l'état des modèles individuels au cours du temps. Chaque modèle évolue de façon indépendante en fonction de l'occurrence des évènements. Cette évolution des modèles individuels dans l'espace des évènements formalisant la conduite génère la variabilité des réponses individuelles.

[3] Le lot fonctionnel est défini comme un ensemble renouvelé de femelles pilotées par les mêmes règles de décisions techniques.
[4] Le motif élémentaire de gestion est défini comme la séquence minimale d'opérations techniques nécessaire à la réalisation d'un cycle de production au sein d'un lot fonctionnel.

2.4 Références bibliographiques

Aubry C, Papy F et Capillon A, 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. Agricultural Systems 56, 45-65.

Coléno FC et Duru M, 2005. L'apport de la gestion de production aux sciences agronomiques. Le cas des ressources fourragères. Nature Sciences Sociétés 13, 247-257.

Cournut S, 2001. Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés : simulation à évènements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, France.

Guérin G et Bellon S, 1989. Analysis of the functions of pastoral areas in forage systems in mediterranean region. Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires 16, 147-156.

Hémidy L, Maxime F et Soler LG, 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. Cahiers d'économie et sociologie rurale 28, 92-118.

3 Simulateur du fonctionnement du troupeau caprin

Le modèle conceptuel de gestion du troupeau a été implémenté et connecté avec les modèles individuels. La description du simulateur informatique SIGHMA (Simulation of Goat Herd Management) s'appuie sur une publication acceptée (révisions mineures) dans la revue Animal. L'article reprend les éléments du modèle conceptuel présentés dans la partie précédente, à savoir l'organisation du troupeau en lots fonctionnels pilotés dans le temps par des motifs élémentaires de gestion. L'article présente ensuite la traduction informatique des éléments du modèle conceptuel en évènements discrets ainsi que leur connexion avec les modèles individuels. L'évaluation du modèle avec une analyse de sensibilité sur les principaux paramètres de conduite a montré la cohérence de son comportement. Un exemple d'utilisation du modèle pour simuler un plan d'expérience est finalement présenté dans l'article. Ce plan factoriel a combiné deux niveaux d'apports alimentaires et deux niveaux de potentiel de production moyen du troupeau. Les résultats illustrent la potentialité du modèle comme outil d'exploration du rôle de la variabilité individuelle dans le fonctionnement du troupeau.

An individual-based model simulating goat individual variability and long term herd performance

Puillet L[1,2,3,4†], Martin O[3,4], Sauvant D[3,4] and Tichit M[1,2]

[1] : INRA, UMR1048 Activités Produits Territoires, 16 rue C. Bernard, 75231-F Paris cedex 5

[2] : AgroParisTech, UMR1048 Activités Produits Territoires, 16 rue C. Bernard, 75231-F Paris cedex 5

[3] : INRA, UMR791 Physiologie de la Nutrition et alimentation, 16 rue C. Bernard, 75231-F Paris cedex 5

[4] : AgroParisTech, UMR791 Physiologie de la Nutrition et alimentation, 16 rue C. Bernard, 75231-F Paris cedex 5

[†] Corresponding author: Laurence Puillet. E-mail: Laurence.Puillet@agroparistech.fr

Abstract

Finding ways of increasing the efficiency of production systems is a key issue of sustainability. System efficiency is based on long term individual efficiency which is highly variable and management driven. In order to study the effects of management on herd and individual efficiency, we developed the model SIGHMA (Simulation of Goat Herd Management). This dynamic model is individual-based and represents the interactions between technical operations (relative to replacement, reproduction and feeding) and individual biological processes (performance dynamics based on energy partitioning and genetic scaling). It simulates outputs at herd level (productivity and demography) and at goat level (lifetime performance) over 20 years. A farmer's production project (*i.e.* a targeted milk production pattern) is translated by configuring the herd into female groups reflecting the organization of kidding periods. Each group is managed by a set of discrete events applying decision rules to simulate the carrying out of technical operations. The animal level is represented by a set of individual goat models. Each model simulates a goat's biological dynamics throughout its productive life. It integrates the variability of biological responses driven by genetic parameters (milk production potential and mature body weight), by the effects of regulations on energy partitioning among physiological functions and by responses to diet energy defined by the feeding strategy. SIGHMA was used to set up a factorial experimental design to observe the effects of overfeeding and underfeeding strategies on herd and individuals performances. Our results show that overfeeding led to a herd production increase and a feed cost decrease. However, this apparent increase in efficiency at herd level (as feed cost decreased) was related to goats which had directed energy toward body reserves. Such a process is not efficient as far as feed conversion is concerned. The underfeeding strategy led to production decrease and to a slight feed cost decrease. This apparent increase in efficiency was related to goats which had

mobilised their reserves in order to sustain production. Our results highlight the interest of using SIGHMA to study the underlying processes affecting herd performance and analyse the role of individual variability regarding herd response to management. It opens perspectives to further quantifying the link between individual variability, herd performance and management and thus deepening our understanding of livestock farming systems.

Key words: simulation; herd; management; individual variability; dairy goat

Implications

This individual-based herd model, representing dynamic interactions between management and individual biological processes, opens new perspectives in the field of livestock farming systems. It provides a tool to study the effect of different management options on individual variability and to analyze its link with herd performance. This work includes: i) a conceptual framework of herd management, linking farmer's production project, management entities and technical operations; ii) a representation of individual performance throughout female productive life, based on energy partitioning and its control by the genetic potential and the homeorhetic regulations.

3.1 Introduction

Increasing concern for the sustainability of livestock farming systems highlights the need to find new ways of reducing costs and increasing efficiency. Efficiency at herd level relies on individual efficiency which is highly dependent on animal ability to convert feed into products (*e.g.* dry matter intake per kg of milk). A main feature of individual efficiency is its variability, mainly due to the variability of genetic potential and to the variability of nutrient partitioning, under the control of genetic potential and regulations (Bauman, 1985; Friggens and Newbold, 2007). In addition to biological variability, individual responses are also modulated by management. In small ruminants, management is often implemented on groups of individuals with different characteristics (*e.g.* production potential, weight, physiological status). Due to these differences, state transitions of individuals in response to management are variable and asynchronous. Both difference in nutrient partitioning and management explain why the group response is different from the average animal response (Pomar *et al.*, 2003, Villalba *et al.*, 2006). By enabling the capture of the variability emerging from complex interactions between biological processes and management, simulation models are promising tools for evaluating the effect of management strategies on the trade-off between production level and production cost.

Most simulation models represent a herd as a group of individuals the performance of which is based on the performance of an average animal. They merge knowledge on animal physiology in order to predict the performance of genotypes under different environments (*e.g.* Sanders and Cartwright, 1979 for sheep; Blackburn and Cartwright, 1987 for beef cattle; Bosman *et al.*, 1997 for meat goats). Nutrient partitioning is performed with priority rules based on an *a priori* fixed hierarchy among functions. By considering herd as groups with the same attributes, these models limit the representation of individual variability.

Individual-based models have overcome this limitation as each individual state changes over time independently from others according to management events (Congleton, 1984; Sorensen *et al.*, 1992; Tess and Kolstad, 2000). Nutrient partitioning is, however, still based on a fixed hierarchy among functions. Furthermore, the representation of management ignores the decision-making process and includes only driving variables inducing reproductive cycles. The decisional process is formalized in several individual-based models (Cournut, 2001 for sheep; Ingrand *et al.*, 2002 for indoor housed beef cattle; Romera *et al.*, 2004 for grazing cattle). By

explicitly integrating management entities and individuals, these models make it possible to study the link between management decisions and animal responses throughout their productive life. However, they still do not incorporate the drivers of individual variability. Limits of current herd models are thus twofold: i) a simplified vision of management and ii) a restricted representation of individual variability (by considering an average animal or by neglecting nutrient partitioning). There is thus an urgent need for herd models that explicitly incorporate the drivers of individual variability derived both from the biology of individuals and their responses to feeding and reproductive management designed at the group level. With this objective, we developed the herd model **SIGHMA** (Simulation of Goat Herd Management) to simulate the dynamical effects of feeding, reproductive and replacement management on individual biological responses. SIGHMA is applied to intensive dairy goat herds in Poitou-Charentes (West of France). In this paper, we first describe the general model structure, then present a sensitivity analysis to assess the coherence of model behaviour and finally run a factorial experimental design to study how overfeeding and underfeeding strategies affect herd performance in terms of milk production and feed conversion efficiency and how these feeding strategies modulate individual variability within the herd.

3.2 The dairy goat herd management model SIGHMA

3.2.1 General framework

SIGHMA is made up of two interacting components, a management sub-model and an animal sub-model. The animal sub-model formalizes dairy goat productive life from birth to herd exit. It simulates intake, milk production and body weight changes throughout a succession of productive cycles in response to reproductive and feeding management. Individual variability is thus an output of simulation instead of being an input generated by probability distributions. A management sub-model accounts for the decision-making process. It translates a farmer’s production project into technical operations on goats with a rule-based approach. In dairy production, a farmer’s production project corresponds to a targeted herd milk production pattern. The latter is driven by the organization of kidding periods. We represent this first decision level by the concept of functional groups (**FG**) which divides the herd into management entities, *i.e.* groups of individuals, to achieve the farmer’s project. Each entity is managed by the same set of reproductive, feeding and replacement decision rules leading to technical operations. The temporal link between individuals and decision rules is ensured through an elementary management pattern (**EMP**) which formalizes the planning and

the chronological execution of operations in a functional group. The elementary management pattern is implemented with a set of discrete events formalizing technical decision rules and operations on individuals (Modelmaker 3.0 software, Cherwell Ltd, 2000).

3.2.1.1 Herd management entities.

A FG is a group of females managed by the same set of technical decision rules. These rules drive the female biology to achieve a production pattern fitting a farmer's production project. Two types of FG are considered (Figure 38): groups including immature females (from birth to first mating, denoted $FG_i^{'}$ and those made of productive females (from first mating to herd exit, denoted FG_i). The number and size of FG and $FG^{'}$ reflect farmer's production and replacement strategy. Flows of females between FG represent female movements due to either infertility management (*i.e.* providing another mating opportunity) or maintenance of a targeted proportion of goats in each FG. These movements enable goats to produce milk for more than one year (*i.e.* achieving an extended lactation). FG generates female exits, denoted E, corresponding to involuntary culling due to death or health problems and sales, denoted S, corresponding to voluntary culling. Herd size management is based on the following assumptions: i) the herd size between years is constant and with a stable number of goats at mating; ii) replacement is achieved with does born in the herd and iii) replacement determines culling. Involuntary culling being simulated as a stochastic phenomenon, the flow of voluntary culling is used to buffer herd size variation and achieve the desired number of females at mating. Figure 38 illustrates this first conceptual level of herd representation in the case of a regular milk production project achieved with two kidding periods. For the three main production projects observed in Poitou-Charentes (French Livestock Institute, 2008a), Table 16 details herd organization into FG as well as the related individual production pattern for each FG. It shows that formalizing herd management with FG gives flexibility for representing different production projects.

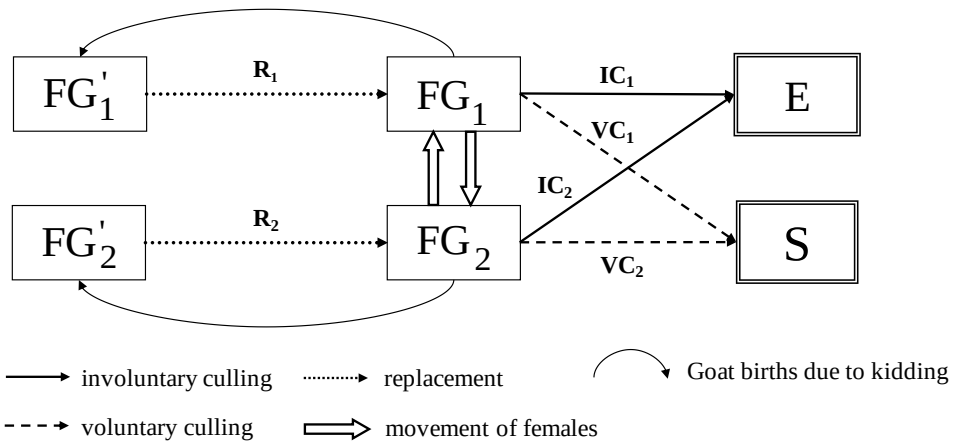


Figure 38 Functional groups (FG) of goats as basic management entities of the herd for a regular milk production project. FG_1 : goats managed to kid in season; FG_2: goats managed to kid out-of-season; FG'_1: does reared to replace goats in FG_1; FG'_2: does reared to replace goats in FG_2. E: exit ; S :sale; R_i: replacement; IC_i : involuntary culling; VC_i: voluntary culling. Constant herd size is ensured by: $R_1+R_2=IC_1+VC_1+IC_2+VC_2$. As replacement determines culling and involuntary culling is a random process, constant herd size is achieved by adjusting voluntary culling in each FG : $VC_i=R_i-IC_i$.

Table 16 Herd configuration into functional groups (FG) for the three main farmers' production projects in Poitou-Charentes.

Production project	Number of FG	Role of FG	Individual production pattern associated to FG	Relationship with other FG
Milk production during natural season	2	FG_1: milk production in natural season	FG_1: kidding in natural season	Producing does for FG'_1
		FG'_1: rearing replacement does mated in season	FG'_1: achieving 2/3 of mature weight at 7 months	Replacing goats in FG_1
Milk production during out-of-season	3	FG_1: milk production out-of-season	FG_1: kidding out-of-season	Producing does for FG'_1
		FG_2: catching up reproductive failure of FG_1	FG_2: kidding out-of-season followed by an extended lactation to enter FG_1 at mating	Catching up reproductive failure in FG_1
		FG'_1: rearing replacement does mated out-of-season	FG'_1: achieving 2/3 of mature weight at 7 months	Replacing goats in FG_1
Regular milk production	4	FG_1: milk production in natural season	FG_1: kidding in natural season	Catching up reproductive failure and maintaining target size in FG_2
		FG_2: milk production out-of-season	FG_2: kidding out-of-season	Catching up reproductive failure in FG_1
		FG'_1: rearing replacement does mated in season	FG'_1: achieving 2/3 of mature weight at 7 months	Replacing goats in FG_1
		FG'_2: rearing replacement does mated out-of-season	FG'_2: achieving 2/3 of mature weight at 7 months	Replacing goats in FG_2

3.2.1.2 Temporal management of functional groups.

An elementary management pattern is the minimal sequence of technical operations that organizes a female production pattern in a FG. The succession of EMP throughout time ensures the operation of the FG. As a temporal unit of management, EMP is formalized by a plan of dates and a chronological succession of technical operations relative to feeding, reproductive and replacement strategies. Feeding strategy corresponds to the combination of a number of feeding steps chronologically organized within the feeding sequence. Each step is defined by temporal bounds and by a reference animal (Guérin and Bellon, 1989). The reference animal is defined as a virtual goat the requirement of which is used to determine diet composition. The reference animal is expressed as a value of production potential, defined as the milk production (in kg) at the peak of the third lactation. Modulating the level of the reference animal in relation to the whole group production potential distribution makes it possible to vary the proportion of individuals which are fed or not to requirements. The reproductive strategy corresponds to the succession of mating period, pregnancy diagnosis, pregnant and non-pregnant goat management along with drying off. The mating period is defined by its length and mating techniques. Non-pregnant goat management defines the decision rules for culling or maintaining non-pregnant goats in extended lactation. Replacement strategy combines: i) the number of does kept for replacement from kids born into the herd; ii) their integration into a FG of mature goats at mating and iii) the number of goats culled according to production and lactation number criteria.

3.2.2 Management sub-model: a planned set of discrete events formalizing decision rules and technical operations

Dates in the management plan implement the chronological succession of events related to reproductive, replacement and feeding strategies and ensure their coordination. The relationships between the plan and events are illustrated in Figure 39 and a more detailed description can be found in the supplementary online (appendix A). Key points in the plan are the starting date of the mating period and the date for voluntary culling. These dates are user defined and are used to compute other dates. For instance, the date for pregnancy diagnosis depends on the starting date of the mating period and its length. Similarly, the middle of the kidding period, derived from the mating period, is used as a time reference to determine the starting date of the second step in the feeding sequence. The management strategies are defined

by the rules and the operation specifications implemented in each event. The events comprised in an elementary management pattern are described in Table 17.

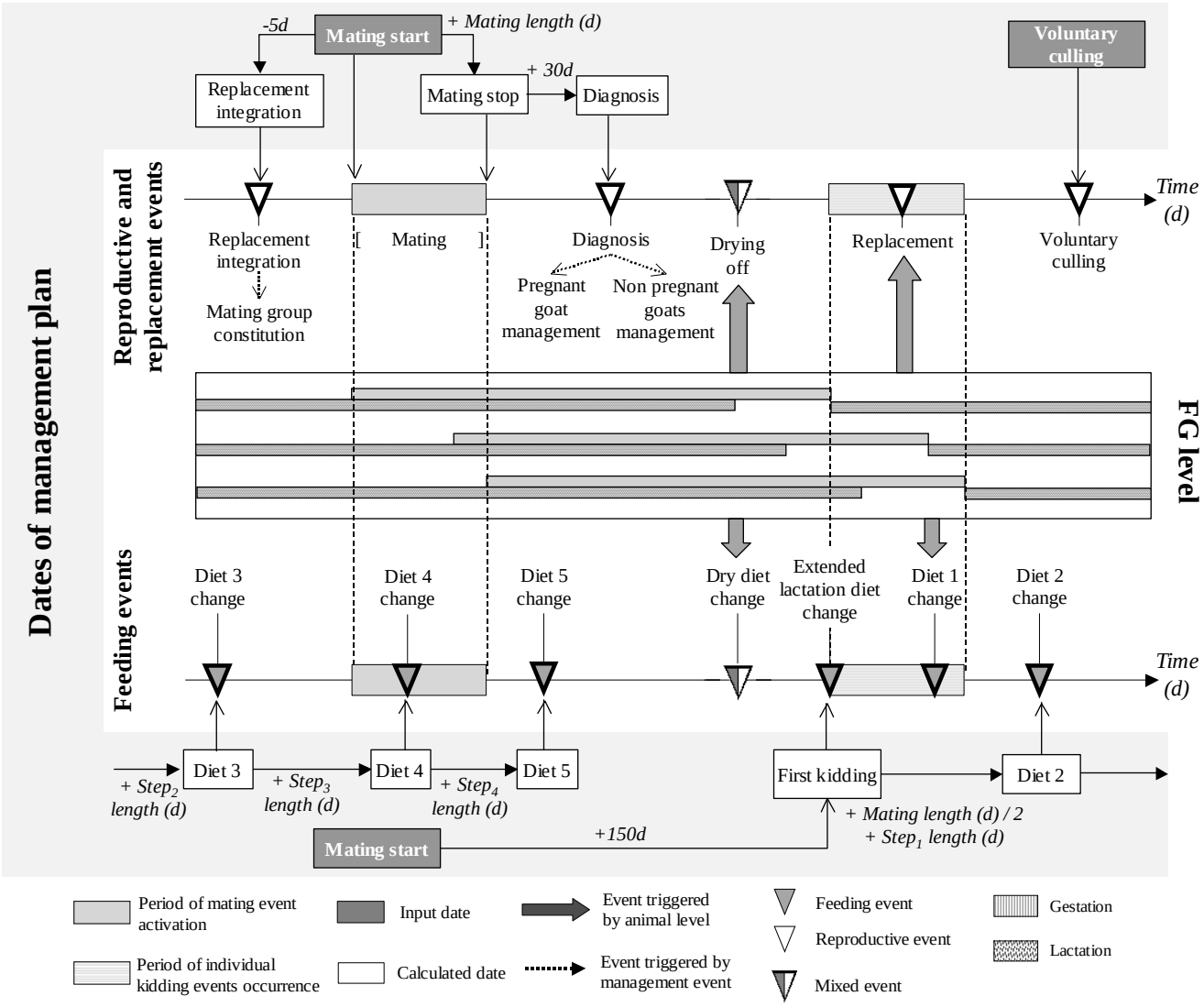


Figure 39 Chronological succession of events traducing the implementation of feeding, reproductive and replacement strategies within an elementary management pattern ensuring the operation of a functional group (FG). $Step_j$ length corresponds to the time during which diet j is distributed to the functional group.

Table 17 Description of the events which occurred in the elementary management pattern of a functional group. For input parameters, the range of values used in simulations is mentioned into brackets.

Events	Description	Input parameters
Mating group constitution	Assigns each goat to a mating group (MG_i) depending on a set of criteria.	Three groups are considered as default setting: MG_1 corresponds to replacement goats (LN=0); MG_2 corresponds to AI goats (LN>0; POT>1.5kg) and MG_3 corresponds to goats naturally mated (LN>0; not being in MG_2).
Mating	Performs the mating process during mating length (*ML*). For each goat, conception is triggered by a random parameter defining its breeding success (*BreedSuc*) relative to the mating techniques used in the mating group.	*ML* (63-126 days) *BreedSuc* (70-90% of kidding rate)
Diagnosis	Computes kidding date for each pregnant goat and triggers Pregnant goat management and non-pregnant goat management events.	
Pregnant goat management	Calculates the drying off date of each pregnant according to their kidding date (i.e. 60 days before kidding).	
Non-pregnant goat management	Applies the decision rules defined by *NPreg Option* to manage non-pregnant goats. Non-pregnant replacement goats are always culled.	If *NPreg Option* =1, all non-pregnant goats are culled If *NPreg Option* = 2, low producing goats are culled and other non-pregnant goats are maintained in extended lactation If *NPreg Option* = 3, all non-pregnant goats are maintained in extended lactation.
Drying off	Stops milk production	
Replacement	Keeps the required number of does during kidding period when enough kids are born. The number of does kept depends on *ReplacOption* which allows for variation around the targeted number of does to be kept.	*ReplacOption* (80-90 does)
Replacement integration	Introduces replacement does with productive goats just before mating period.	
Voluntary culling	Leads to a first group of goats culled for production (*ThreshProd*) and lactation number criteria (*ThreshLN*) and to a second group of goats culled for lactation number only (LN>5).	ThreshProd *(none-POTmean)* *ThreshLN* (3-5)
Dry diet change	Change the diet according to the composition defined by the reference animal[1] (*RA*)	*RA* (3-5 kg)
Extended lactation diet change	Change the diet for the goats in extended. The diet is the same as for goats which just kidded. The diet composition is defined by the reference animal[1] (*RA*)	*RA* (3-5 kg)
Diet i change (i∈[1, number of feeding steps])	Change the diet according to the composition defined by the reference animal[1] (*RA*). Diet change time is defined by the number of feeding steps (*FeedStep*) and the length of each step	FeedStep (*1-5 steps)* *RA* (3-5 kg)

LN: lactation number; POT: milk production potential, expressed in kg of milk at the peak of the third lactation; POTmean: mean value of herd genetic production potential.
[1]: the reference animal is expressed as the production potential (kg of milk at peak of third lactation) of the virtual goat the requirement of which is used to define the diet.

3.2.3 Animal sub-model: a set of compartmental models formalizing individual variability

The representation of individuals was directed by the need to incorporate the determinants of biological response variability. Each individual is represented by a mechanistic animal model based on a compartmental structure (Puillet *et al.*, 2008). Compartments represent body weight, gravid uterus and milk production. They simulate flows of energy and material associated to physiological functions of growth, pregnancy, lactation and utilisation of body reserves. The milk production potential (expressed as the milk production in kg at the peak of the third lactation) and the mature body weight are key input parameters of each goat model. At goat birth, they are stochastically triggered in Gaussian distributions, thus reflecting in-herd genetic variability. The model explicitly integrates a regulating system which represents the homeorhetic control of physiological functions throughout the succession of reproductive cycles (Sauvant, 1994). This type of regulation ensures the coordination between biological functions in order to support a given physiological state (Bauman and Currie, 1980). It determines priorities among functions which drive energy allocation and thus biological responses. Two modalities of model operation can be defined: i) a pull modality where energy intake is an output of the model and ii) a push modality where intake is an input linked to the distributed diet (see appendix B of the online supplementary for the whole group of model equations). The push modality incorporates INRA principles of fill units and forage/concentrate substitution rate (Sauvant *et al.*, 2007) and simulates actual energy intake. Substitution rate involves concentrate and *ad libitum* forage only, dehydrated and fixed forage assumably eaten first. This actual energy intake is compared to the potential energy intake defined by the production potential expression. It determines a differential of energy which is diverted between body reserves (mobilization and reconstitution) and milk production. Body reserves act as a buffer for energy partitioning. Energy diversion among functions is achieved with a set of partitioning coefficients. These coefficients are calculated according to the relative priorities among physiological functions and the level of body reserves. Modulation by priorities enables coefficients to be dynamic through the succession of reproductive cycles. Modulation by body reserves introduces a memory effect relating to previous feeding strategies. Indeed, the level of body reserves at a given time reflects the cumulative effect of previous feeding strategies.

Concerning reproductive aspects, goats are fertilized during mating period depending on the probability defined by management techniques. Once gestation is initiated, kidding occurs 150 days after conception. Finally, a daily random process is used to simulate the occurrence of death or health problems. The threshold used to simulate occurrence of death depends on age and lactation number (Malher *et al.*, 2001). We considered that both death and health problems led to a goat's exit.

The biological operation of the goat model, based on its potential and regulation expression, and its interaction with the elementary management pattern processing generates individual variability which is thus an output of SIGHMA. Figure 40 presents the different possible states of a goat model during one elementary management pattern processing. This range of possible states is to be projected throughout time by the succession of elementary management patterns within the functional group.

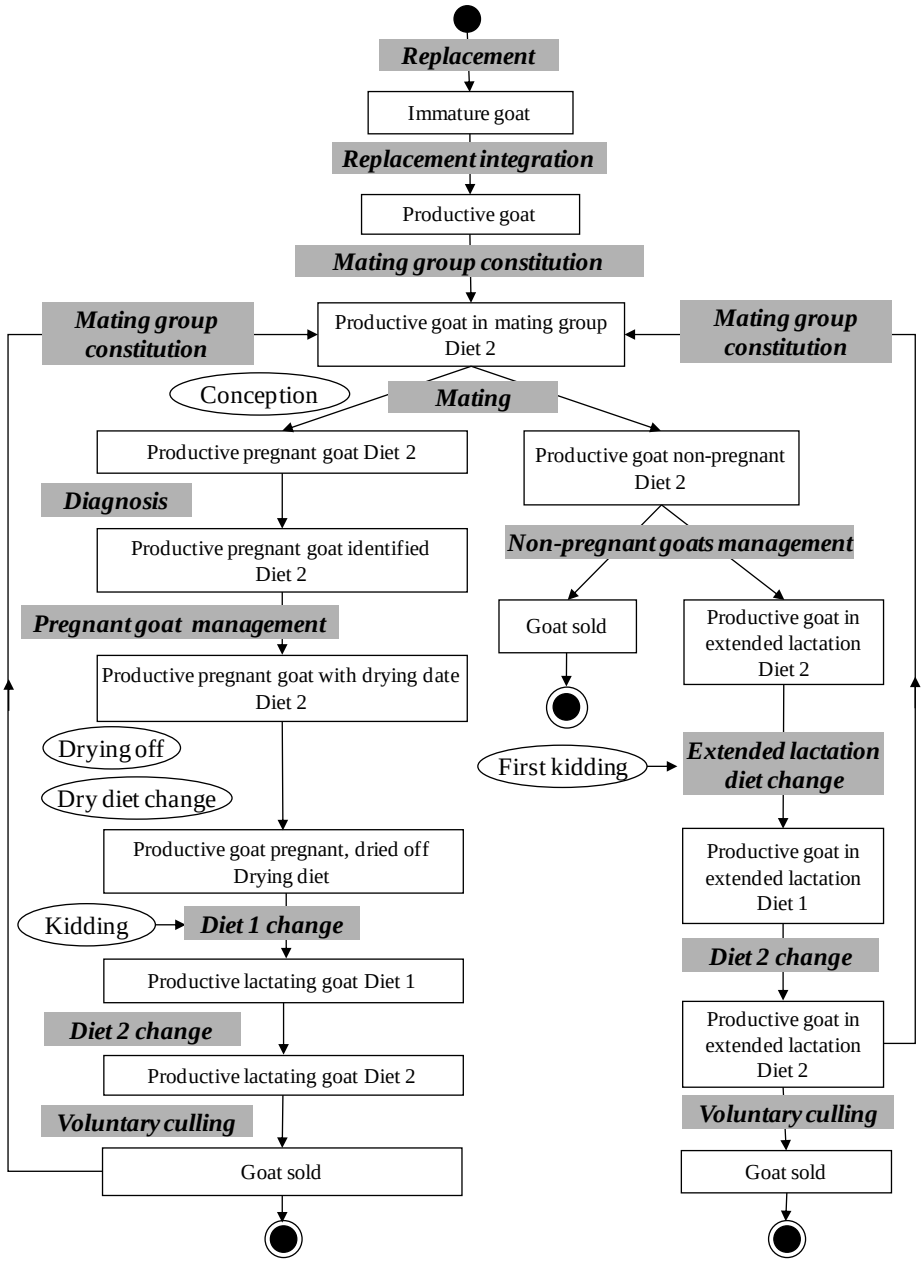


Figure 40 State transition diagram of a goat during the elementary management pattern operation. Management events are represented by grey boxes. Events triggered by animal sub-models are represented by ellipses. Mortality, not represented here, can happen at each time step. This example represents a simple feeding strategy with only two different diets throughout lactation. Diet 0 is the drying diet. Diet 1 is distributed during early lactation and diet 2 during mid and late lactation.

3.2.4 Outputs and simulations

SIGHMA produces output at individual, group and herd levels. Simulations are run over 20 years on a daily basis. Model outputs are synthesised over the last 10 years of simulation. As the model incorporates stochastic processes for simulating conception, involuntary culling and production potential assignment at birth, it is necessary to run replications for a definite simulation. After using a re-sampling procedure on a set of 100 replications, we determined

that 15 replications were sufficient to reduce variance and stabilize the means of simulated outputs. Output at herd level, such as the total number of goats present, pregnant goats, lactating goats or dead goats, are recorded in each functional group on a daily basis. Total milk production and feed consumption for each type of feedstuff (forage, dehydrate and concentrate) within each functional group are also recorded daily. When some key events occur, such as culling session or non-pregnant management, numbers of infertile culled goats, extended lactation goats or voluntary culled goats are calculated. For each type of record, values in each functional group are summed up to derive total herd output. Several indicators are computed to analyse: i) herd demography including reproductive performance (kidding rate), replacement and culling rates; ii) production performance in terms of milk production and feed consumption and iii) herd efficiency. Herd feeding efficiency indicators synthesize the conversion of dry matter (**DM**) into milk at the individual and herd levels. It corresponds to the quantity of total DM required to produce1 kg of milk. It can be decomposed into forage DM, dehydrated and concentrate DM. To balance the difference between consumed quantities (mainly forage being consumed) and between prices (concentrate being more expensive), we calculated milk feed cost (in €/kg of milk) on the basis of 0.06 euros for 1kg of forage DM, 0.26 euros for 1kg of dehydrated DM and 0.30 euros for 1 kg of concentrate (French Livestock Institute, 2008b). These values are used to analyse the herd's ability to convert DM into milk.

At the individual level, the model records the values of key variables throughout a goat's lifespan: dates of events such as kidding or drying off and the corresponding body weight, variables relative to production (potential, days in milk, milk production) and feed consumption (forage, concentrate and dehydrate). Goats retained for analysis were born and culled within the last 10 years of simulation.

SIGHMA was run for a season project with a functional group of 300 goats at mating and with an objective of 90 does for replacement. Mating season started on August 15th. Feeding values of feedstuff and feeding sequences are presented in Table 18 and Table **19**. Two types of simulations were combined. Firstly, the model was evaluated through a sensitivity analysis on the main parameters (Table 20). For each parameter, three contrasted levels were determined (H: high; M: medium; L: low). Sensitivity analysis comprised 19 simulations: a reference simulation corresponding to default settings (all parameters fixed at M level) and 18 simulations corresponding to H and L levels of each parameter (all others being fixed at M level). Secondly, the model was used to simulate a factorial experimental design with two

levels of mean herd production potential (L: 4kg and H: 5kg) and two levels of reference animal (L: 4kg and H: 5kg). It generated four treatments denoted: L-L (low potential combined with low feeding level), L-H (low potential combined with high feeding level), H-L (high potential combined with low feeding level) and H-H (high potential combined with high feeding level). Treatment L-L is used as a control to test an overfeeding strategy (L-H) whereas treatment H-H is used as a control to test underfeeding strategy (H-L). This second set of simulations was aimed at illustrating SIGHMA potential to disentangle the relative effects of different management options on herd performance and how these options modulate the individual variability underlying herd performance.

Table 18 Feeding values of diet feedstuffs

	UFL/kg of DM	UEL/kg of DM
Ryegrass hay	0.74	1.05
Alfalfa hay	0.67	1.03
Dehydrate	0.7	0.95
Concentrate	1.1	*

UFL : Unité Fourragère Lait (French milk unit of net energy equivalent to 1.7 Mcal) ; UE : Unité Encombrement Lait (French unit of fill effect and intake capacity equal to 1 for a reference herbage)

Table 19 Concentrate (kg of dry matter) for each feeding sequence and reference animal

Number of feeding steps	5			3			2		
Reference Animal	3	4	5	3	4	5	3	4	5
Diet 1	0.90	1.20	1.70	1.10	1.30	1.90	0.70	1.00	1.30
Diet 2	0.70	1.10	1.30	0.60	1.00	1.20	0.35	0.50	0.65
Diet 3	0.55	0.80	1.10	0.45	0.55	0.80	NA	NA	NA
Diet 4	0.45	0.65	0.80	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Diet 5	0.35	0.50	0.60	NA	NA	NA	NA	NA	NA

The reference animal is expressed in terms of goat production potential (kg of milk at peak of third lactation). The number of feeding steps (Diet i for $i \in [1,5]$) defines the feeding strategy. All feeding strategies have the same drying diet (in kg of dry matter): 0.5 kg of ray-grass hay, 0.2 kg of dehydrate and alfalfa hay *ad libitum*. For a given reference animal, feeding strategies lead to the same quantities distributed over 10 lactation months (2 months corresponding to drying off diet).

Table 20 Parameterisation of sensitivity analysis for SIGHMA evaluation

Type of factor	Factor	Levels		
		High	Medium	Low
Herd genetic level	POTmean	5	4	3
	POTsd	1	0.5	0.25
Feeding management	Number of feeding steps	5 (2 months for each sequence)	3 (1 month; 5 months and 4 months)	2 (7 months and 3 months)
	RA	5	4	3
Reproductive management	ML (days)	63	84	126
	Breeding success	Parameterized for KR around 95%	Parameterized for KR around 85%	Parameterized for KR around 75%
	NPregOption	Culling	Extended lactation if goat potential > POTmean and LN<5; otherwise culling	Extended lactation

Replacement management	ReplacOption	High mean value of ReplacSize and low sd	High mean value of ReplacSize and high sd	Low mean value of ReplacSize with low sd
	Culling criteria	ThreshProd = POTmean ThreshLN = 3	ThreshProd = POTmean ThreshLN =4	ThreshProd = none ThreshLN = 5

POTmean and POTsd: mean and standard deviation values of Gaussian distribution defining goat production potential at birth; KR: kidding rate; LN: lactation number; RA: reference animal expressed in kg of milk production at peak of 3rd lactation; ML: mating length; ReplacSize: number of does kept for replacement; ThreshProd: production criteria for voluntary culling; ThreshLN: lactation number criteria for voluntary culling.

3.3 Results

3.3.1 Sensitivity analysis

The results of sensitivity analysis are summarised in Table 21. As expected, the number of mated goats was not affected by any factors confirming the role of this variable as the numeric reference for constant herd size. For other goat categories, the model showed coherent behaviour: the number of does was affected only by the replacement option; the lactating and kidding goats were affected mainly by the reproductive management; the goats culled for infertility and in extended lactation responded strongly to reproductive management factors. Concerning productive outputs, the herd milk production was mainly affected by feeding management with the reference animal level having the highest impact either positive or negative. To a lesser extent, the herd genetic potential and the reproductive management modified the herd milk production with the same magnitude. The effect of the herd genetic potential was logically reported on the milk production per goat whereas the effect of reproductive management factors affected mainly the number of lactating goats. Concerning the herd DM consumption, the same effects were observed as for milk production. Nevertheless, the herd genetic potential affected only the forage DM intake whereas feeding management modified the concentrate DM intake. Finally, the herd efficiency (DM/kg of MY) was mainly affected by the feeding management and to a lesser extent by the genetic potential. The same effects were observed on the herd milk feed costs with an even lower difference between the genetic and the feeding management.

Table 21 Results of model sensitivity analysis. All values are expressed in % of the reference simulation (all parameters equal to medium level) and encoded depending on the value of the deviation from reference simulation: "- -": deviation above -10%; "-": deviation between -2 and -10%; "0": deviation between -2 and 2%; "+": deviation between 2 and 10%; "++": deviation above 10%. MY: milk yield; DM: dry matter; DMF: dry matter of forage; DMC: dry matter of concentrate.

Type of factor	Factor	Level	Mated goats	Lactating goats[1]	Herd MY (kg)	Herd DM (kg)	Herd DMF (kg)	Herd DMC (kg)	Goat MY (kg)	Goat DM (kg)	Goat DMF (kg)	Goat DMC (kg)	DM/MY (kg/kg)	DMF/MY (kg/kg)	DMC/MY (kg/kg)	Feed Cost (€/kg)
	Reference		387	267	244761	259061	129215	88065	916	970	484	330	1.06	0.53	0.36	0.18
Herd genetic potential	Mean Potential	H	0	0	+	+	+	0	+	+	+	0	-	0	-	-
		L	0	0	-	-	-	0	-	-	-	0	0	-	+	+
	Sd Potential	H	0	0	-	-	-	0	-	-	-	0	0	-	+	-
		L	0	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	-	0
Feeding management	Feeding steps	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		L	0	0	0	0	0	-	0	0	0	-	0	+	0	0
	Reference Animal	H	0	0	++	+	--	++	++	+	--	++	--	--	+	-
		L	0	0	--	-	++	--	--	-	++	--	++	++	--	0
Reproductive management	Mating length	H	0	+	+	+	0	+	+	0	-	+	0	-	0	0
		L	0	-	-	-	0	-	0	0	0	-	0	+	0	0
	Breeding success	H	0	+	+	+	+	+	0	0	0	+	0	-	0	0
		L	0	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
	Non pregnant goat management	H	0	-	-	-	-	-	0	0	+	0	+	+	0	0
		L	0	+	+	+	0	+	0	0	-	0	-	-	0	0
Replacement management	Replacement	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		L	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
	Culling	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

[1] the number of lactating goats corresponds to the mean number of lactating goats over the dairy year

3.3.2 Factorial experimental design

The herd milk production (**HMP**, mean ± sd in kg/year) and the herd milk feed cost (**HFC**, mean ± sd in €/kg of milk) over 10 years are presented in Figure 41. The number of lactating goats was equivalent in all treatments. HMP was higher for L-H than for L-L (L-H: 299439 ± 1941 kg/year; L-L: 244761 ± 1992 kg/year) and HFC was lower for L-H than for L-L (L-H: 0.175 ± 0.0002 €/kg of milk; L-L: 0.184 ± 0.0005 €/kg of milk). Compared to the control treatment, the overfeeding strategy led to a production increase associated with a milk feed cost decrease. This result indicates that the production increase was large enough to compensate the extra consumption of concentrate. HMP was lower for H-L than for H-H (H-L: 265721 kg/year ± 1540; H-H: 306743 kg/year ± 2296) and HFC was slightly lower (H-L: 0.170 €/kg of milk ± 0.0003; H-H: 0.172 €/kg of milk ± 0.0003). Compared to the control treatment, the underfeeding strategy led to a production decrease and a slight decrease of feed cost. This result indicates that the decrease of feed consumption was large enough to compensate the production decrease.

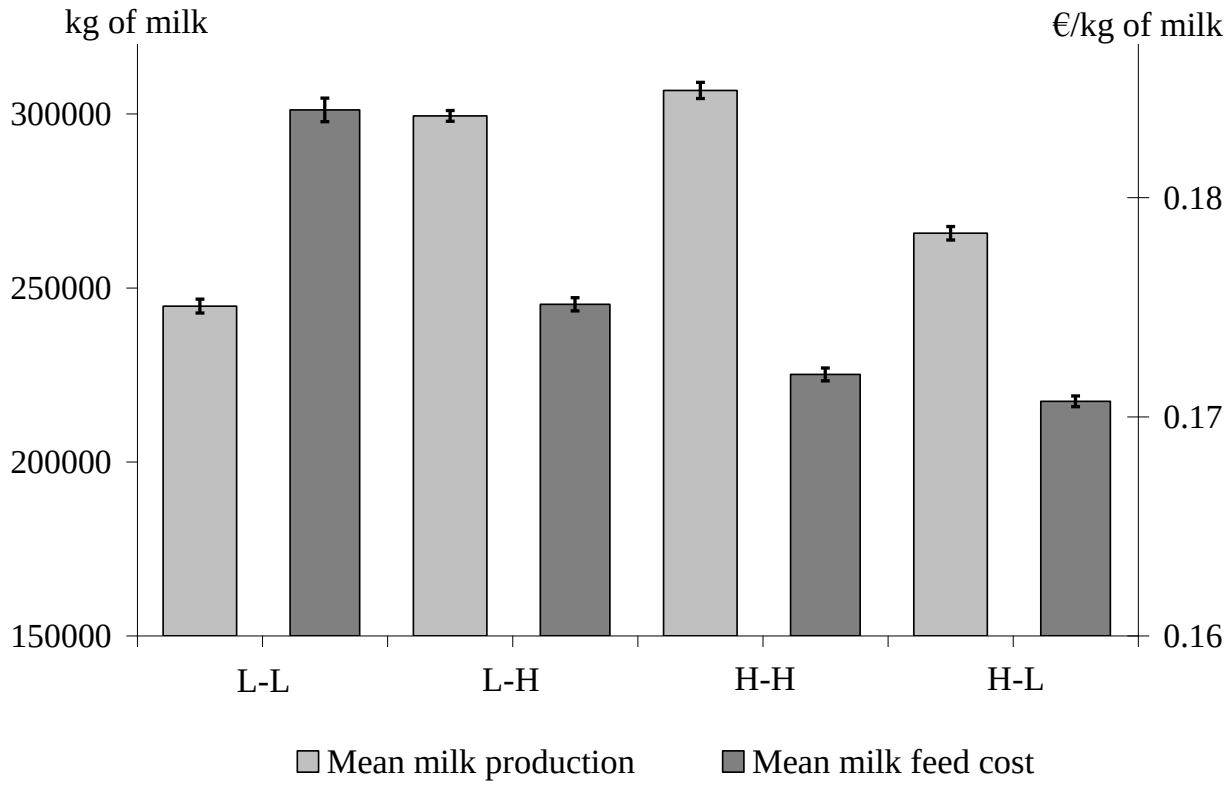


Figure 41 Model simulations of herd production (mean value over the last 10 years, ± standard error over 15 replications) and efficiency (mean milk feed cost over the last 10 years, ± standard error over 15 replications) in a 2 x 2 factorial arrangement with mean genetic potential (H: 5 kg; L: 4 kg) and reference animal (H: 5 kg; L: 4 kg). Treatments are denoted: L-L, L-H, H-H and H-L, where L-L and H-H are used as a control to test overfeeding and underfeeding strategy.

3.3.3 Exploring individual variability underlying herd performance

A further step in analysing the relative effects of factors within experimental design was to study the individual variability behind herd performance. Model simulations were analysed to quantify this variability and to establish goat profiles in terms of milk production and milk feed cost. Level plot representation (Figure 42) was used to study the distribution of goats in the space defined by their average lifetime milk production (kg of MY/day of lactation) and their average lifetime efficiency (milk feed cost in euros/kg). For all the simulated treatments, goats were distributed along an axis from low potential and high feed cost to high potential and low feed costs. This global trend traduces the economy of scale due to maintenance cost dilution associated with increased productivity. SIGHMA, however, simulated the variability around this global trend. Compared to the L-L treatment, the distribution of the L-H treatment is an area of higher production and lower feed cost. Compared to the H-H treatment, the distribution of the H-L treatment is in an area of lower production and lower feed cost. These results are coherent with the effects observed at herd level: overfeeding led to an increase in production and a decrease in feed cost whereas underfeeding led to decreases in both production and feed cost.

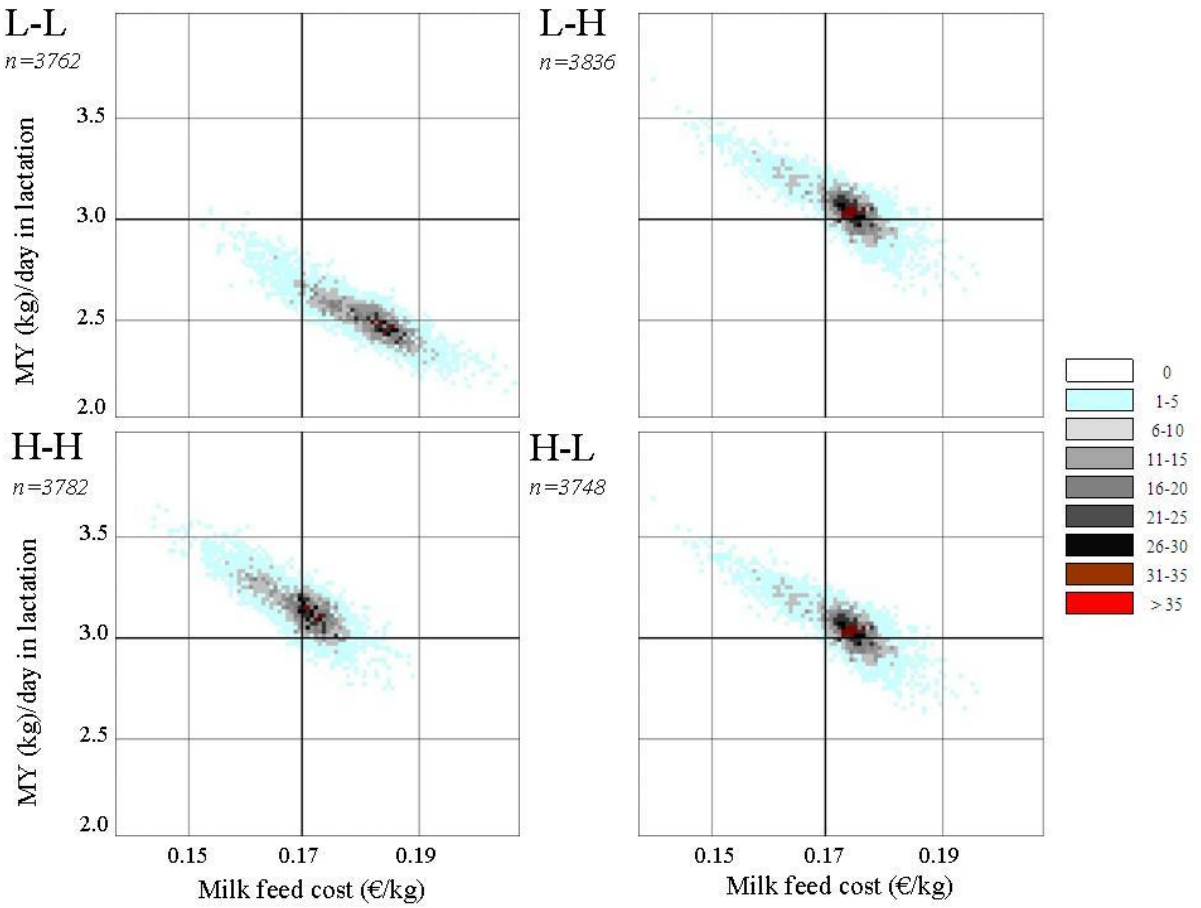


Figure 42 The level plot of milk production (MP in kg of milk/day of lactation) and efficiency (milk feed cost in €/kg) over goat productive lives simulated by the model for four treatments following a 2x2 factorial plan with genetic herd level (H: 5 kg; L: 4 kg) and feeding management represented by reference animal (H: 5 kg; L: 4 kg). Treatments are denoted: L-L, L-H, H-H and H-L where L-L and H-H are used as a control to test overfeeding and underfeeding strategy. The square grid was obtained with 100 classes for each variable. Each grid unit was coloured depending on the number of goats at intersection of production-efficiency classes.

To further understand biological processes underlying herd and goat productive life performance, model simulations were analysed regarding goat second lactations. Level plot was also used to represent individual distribution in terms of total milk production (in kg) throughout the second lactation and the difference (in kg) between body weight and potential body weight at 90 days of lactation (Figure 43). Including this last variable made it possible to assess whether a goat had gained or lost weight compared to its genetically driven body reserves change (Friggens and Newbold, 2007).

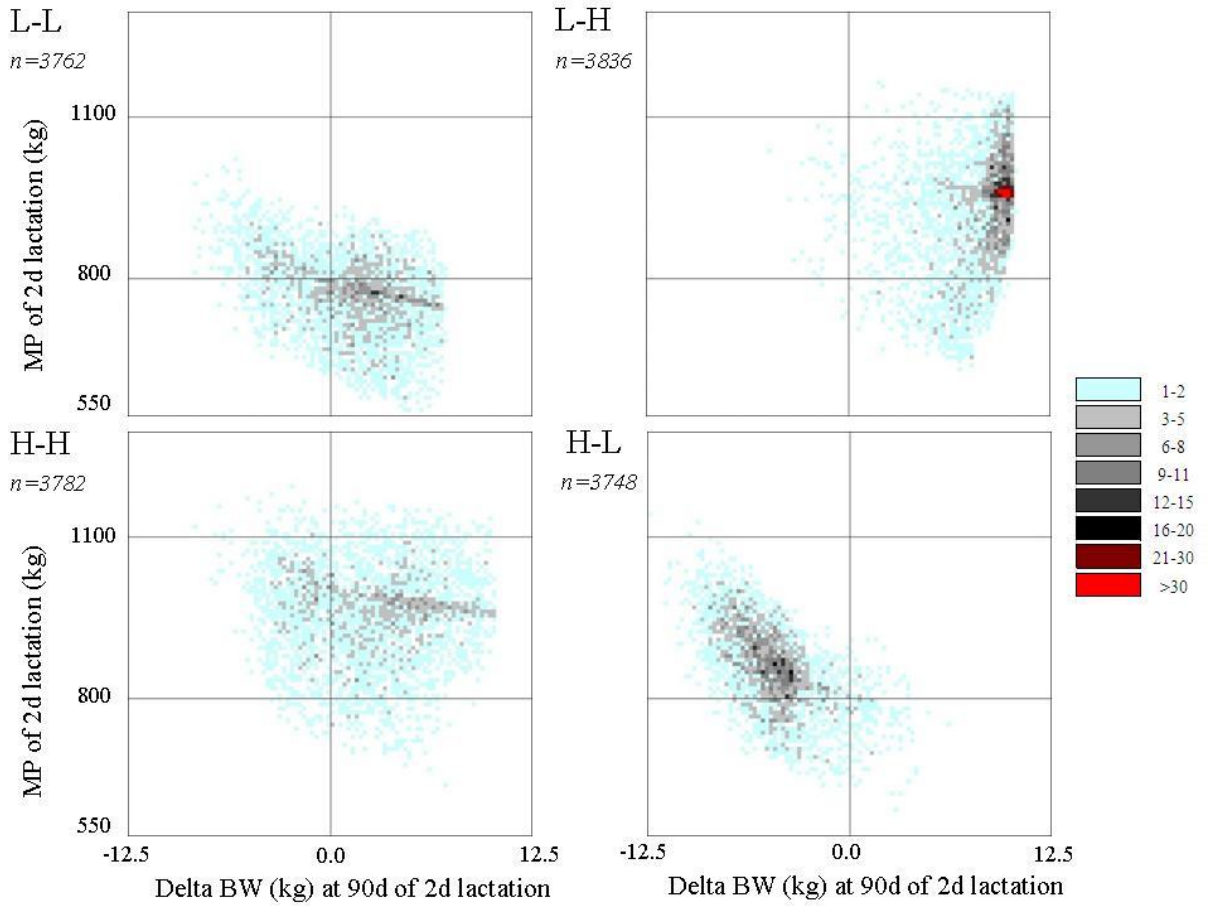


Figure 43 The level plot of milk production (MP on lactation 2, in kg) and differential of body weight between simulated and potential (deltaBW, in kg) over productive life of goats simulated by the model for four treatments following a 2x2 factorial plan with genetic herd level (H: 5 kg; L: 4 kg) and feeding management represented by reference animal (H: 5 kg; L:4 kg). Treatments are denoted: L-L, L-H, H-H and H-L, where L-L and H-H are used as a control to test overfeeding and underfeeding strategy. The square grid was obtained with 100 classes for each variable. Each grid unit was coloured depending on the number of goats at intersection of production-body weight differential classes.

The distribution of the two control treatments, L-L and H-H, had similar shapes with goats homogeneously distributed. This result illustrates that when the feeding level matches the genetic potential, individual variability is fully expressed. Distribution of the H-H treatment was higher along the Y axis than that of L-L, traducing the difference of genetic potential between the two control treatments. Compared to the L-L treatment, L-H led to a contrasted distribution with goats mainly located in the right area of the level plot. The overfeeding strategy led to goats gaining weight compared to their genetic potential. This result indicates that energy was directed toward body reserves, and as far as efficiency is concerned, this effect can be considered as a waste of energy. At herd level, we observed that overfeeding led to decreased feed cost. The production increase was large enough to hide the waste of energy at the individual level. Compared to the H-H treatment, H-L led to a contrasted distribution

with goats mainly in the left area of the level plot. The underfeeding strategy led to goats losing weight compared to their genetic potential. This result shows that their production relied on energy obtained from their body reserves. At herd level, underfeeding led to a slight decrease in feed cost. In spite of the fact that we observed a concurrent decrease in production, we believe that this decrease in feed cots was due to goats using energy from their body reserves.

3.4 Discussion

The herd model SIGHMA predicts herd and goat performance based on the dynamical interactions between management and individual biological responses. We used SIGHMA to study the effects of contrasted feeding management on herd performance and characterized how these different levels of performance were obtained from individuals.

3.4.1 Simulation results

Results of sensitivity analysis showed that SIGHMA has coherent behaviour and can be used to test various combinations of management choices. Using SIGHMA to simulate factorial designs makes it possible to disentangle the relative effects of management and genetic potential on production and efficiency at both the herd and individual levels. Studying the efficiency of feed conversion into milk is possible because the model incorporates energy partitioning at the individual level. Such was not the case with previous models which focused on reproduction and ignored feeding (*e.g.* Cournut, 2001; Oltenacu *et al.*, 1980) or represented animal performance with a pull approach (Congleton, 1984). In addition, the dynamic representation of energy partitioning (depending on goat physiological state and body reserve level) makes it possible to express individual variability which is not the case with models based on fixed rules of energy partitioning (*e.g.* Sorensen *et al.* 1992; Tess and Kolstad, 2000). The expression of individual variability at the scale of a lifetime is a key element in understanding the underlying mechanisms behind efficiency. Despite integrating the major source of individual variability, we represented goat's milk response to the quantity of concentrate with the same rules for all individuals. We did not take into account either the effects of the transition period between two diets on milk production or the delayed effect of a feeding sequence on the following one. However, to implement such refinements in the animal sub-model, further experimental trials, explicitly focused on individual variability, are needed.

Results of the factorial design showed that overfeeding led to a production increase associated to a feed cost decrease at herd level. This apparent increase in efficiency (as feed cost decreased) should be moderated by viewing individual results. At the individual level, the overfeeding strategy was detrimental to efficiency as goats had directed energy toward body reserves. Conversely, underfeeding led to a production decrease and a slight decrease in feed cost. This apparent increase in efficiency was due to goats sustaining production by increasing their reserves mobilization which could lead to reproductive and health problems detrimental to herd performance. These results point out the role of individual variability in understanding how the global production is obtained. They illustrate SIGHMA potential to understand how productive responses are translated from individual to population level in response to management. Population responses have previously been studied over short time spans (Pomar *et al.*, 2003 for growing pigs; Villalba *et al.*, 2006 for beef cattle) but not at the scale of dairy female productive life. This level is increasingly pointed out as being relevant to evaluating management effects in livestock production (Peyraud *et al.*, 2009, Martel *et al.*, 2008; Cournut and Dedieu, 2004; Gibon *et al.*, 1999). The role of lifetime performance variability relative to a farmer's production project and herd performance was qualitatively explored by Tichit *et al.* (2004; 2008). These authors showed that there is no one-way relationship between lifetime performance variability, the level of constraint weighing on the livestock system and the type of production project. Tolerating, even seeking, in-herd diversity can help buffer variations in the environment or reinforce herd adaptability to a project which is demanding from a biological viewpoint (Guimaraes *et al.*, 2009). SIGHMA thus opens promising perspectives in quantifying the role of lifetime performance variability under different management options.

3.4.2 Modelling approach

Several authors point out the need to pay more attention to decision-making processes in simulation models in order to improve models as decision support systems (McCown, 2002; Garcia *et al.*, 2005; Woodward *et al.*, 2008). Others advocate the development of models linking farmers' decisions with the biological behaviour of females in the long term (Tichit *et al.*, 2004; 2008). SIGHMA brings evidence about the interest of such an approach linking a decisional sub-model with a biological sub-model which takes into account inherent regulations for different physiological functions. The crux of the matter was to articulate these two approaches so as to take account of both the biological responses due to the effects of

technical operations and, at the same time, the adaptation of such technical decisions on the basis of indicators of animal responses. The SIGHMA conceptual framework of herd management is based on an organization into functional groups operating through time with elementary management patterns. These conceptual levels ensure: i) the coherence between a farmer's project, strategy and technical operations on goats; ii) the flexibility to represent different production projects and iii) the coherence between reproductive and feeding strategies. The translation of a farmer's project into a herd organization in functional groups is close to the conceptual framework developed for grazing systems (Coléno and Duru, 2005; Martin *et al.*, 2008). In these approaches, the first step in management representation is production system configuration. Configuring implies defining resource allocation and organizing production activities in order to satisfy production objectives. The output of this process is the definition of the functional production unit which is a concept similar to our functional groups. These production units are targeted by technical decisions implementing planning and technical operation execution. Both of these elements are integrated in the elementary management pattern. Our approach remains mainly pre-scheduled reflecting that farming activities are recurrent and cyclical in nature (Aubry *et al.*, 1998). SIGHMA does not integrate rules for management adjustment in case of external perturbation as is the case in recent models (Chardon *et al.*, 2007; Vayssières *et al.*, 2009; Martin *et al.*, 2009). Such models are however based on a pull approach of the animal component which limits the representation of individual variability. Extending SIGHMA by integrating a generic representation of decision-making processes (Martin-Clouaire and Rellier, 2003) would make it possible to study adaptive management (Darnhofer, 2009). It would open promising perspectives to fully explore the regulating properties of livestock systems based on both the biological and management components.

To our knowledge, SIGHMA is the first individual-based herd model that incorporates both the feeding and reproductive strategies. Key parameters of these strategies are user defined and make it possible to simulate a wide range of management options. In particular, SIGHMA will be used to test different temporal management strategies of feeding and reproduction. Notably, it could be interesting to combine the staggering of physiological states with different temporal feeding plans in order to find out which feeding plans are best in line with reproductive management. Moreover, SIGHMA will be used to test a scenario of extreme management simplification where the herd is managed as one group with a one step feeding sequence throughout lactation and extended lactation for all non-pregnant goats.

Today, farmers are paying increasing attention to this type of management in order to solve the problem of work overload in intensive large herds.

3.5 Conclusion

The development and application of SIGHMA have proved its ability to generate individual variability in response to herd management. It enables the user to evaluate the effects of feeding and reproductive management in terms of herd production level and production efficiency. By taking into account the underlying individual biological processes, SIGHMA can be used to study how individual variability is modulated by management and how it can explain performance at the herd level. The next step in our study will be to enlarge our findings by studying individual variability expression under different management strategies.

Acknowledgement

The authors are grateful to N. Bossis (Institut Elevage), B. Leboeuf (INRA), F. Jénot (Fresyca), H. Coutineau (LEGTA Melle), A. Panelle and J. Losdat (BTPL) and for their precious contribution to the management sub-model development. They also thank the staff of UMR PNA and UMR SAD-APT. This study was supported by a grant from the Poitou-Charentes region of France, the INRA PHASE and SAD departments and by a financial support of “ANR – Agence Nationale de la Recherche – The French National Research Agency” under the “Programme Agriculture et Développement Durable”, project “ANR-05-PADD-02-04”.

References

Aubry C, Papy F and Capillon A 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. Agricultural Systems 56, 45-65.

Bauman DE 1985. Sources of variation and prospects for improvement of productive efficiency in the dairy cow: a review. Journal of Animal Science 60, 583-592.

Bauman DE and Currie WB, 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. Journal of Dairy Science 63, 1514-1529.

Blackburn HD and Cartwright TC 1987. Description and validation of the Texas A&M sheep simulation model. Journal of Animal Science 65, 373-386.

Bosman HG, Ayantunde AA, Steenstra FA and Udo HMJ 1997. A simulation model to assess productivity of goat production in the tropics. Agricultural Systems 54, 539-576.

Coléno FC and Duru M 2005. L'apport de la gestion de production aux sciences agronomiques. Le cas des ressources fourragères. Nature Sciences Sociétés 13, 247-257.

Chardon X, Rigolot C, Baratte C, Le Gall A, Espagnol S, Martin-Clouaire R, Relllier JP, Raison C, Poupa J-C and Faverdin P 2007. MELODIE : a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in integrated dairy and pig farms. In MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation., Melbourne, Australia.

Congleton WR, Jr, 1984. Dynamic model for combined simulation of dairy management strategies. Journal of Dairy Science 67, 644-660.

Cournut S 2001. Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés: simulation à évènements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans. PhD, Claude Bernard Lyon I Univ.

Cournut S and Dedieu B, 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. Animal Research 53, 383-403.

Darnhofer I, 2009. Strategies of family farms to strengthen their resilience. 8th International Conference of the European Society for Ecological Economics, June 2009, Ljubljana, Slovenia.

French Livestock Institute 2008a. Les systèmes caprins en Poitou-Charentes et Pays de la Loire. Dossier de synthèse 2007. 7 nouveaux cas types. 48p.

French Livestock Institute 2008b. Hausse du prix des aliments, des pistes pour alléger les charges. 8p.

Friggens NC and Newbold JR 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87-97.

Garcia F, Guerrin F, Martin-Clouaire R and Relllier JP 2005. The human side of agricultural production management - the missing focus in simulation approaches. In MODSIM, Melbourne, Australia, pp. 203-209.

Gibon A, Sibbald AR, Flamant JC, Lhoste P, Revilla R, Rubino R and Sorensen JT 1999. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. Livestock Production Science 61, 121-137.

Guérin G and Bellon S 1989. Analysis of the functions of pastoral areas in forage systems in mediterranean region. Etudes et Recherches sur les systèmes agraires 16, 147-156.

Guimaraes VP, Tedeshi LO and Rodrigues MT 2009. Development of a mathematical model to study the impact of production and management policies on the herd dynamics and profitability of dairy goats. Agricultural Systems 101, 186-196.

Ingrand S, Dedieu B, Agabriel J and Perochon L 2002. Representation of the beef cattle herd functioning according to the combination of rearing rules: a modelling approach. 9emes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, 4-5 decembre 2002, 61-64.

Malher X, Seegers H and Beaudeau F 2001. Culling and mortality in large dairy goat herds managed under intensive conditions in western France. Livestock Production Science 71, 75-86.

Martel G, Dedieu B and Dourmad JY 2008. Simulation of sow herd dynamics with emphasis on performance and distribution of periodic task events. Journal of Agricultural Science 146, 365-380.

Martin G, Duru M, Martin-Clouaire R, Relllier JP, Theau JP, Therond O and Hossard L 2008. Towards a simulation-based study of grassland and animal management in livestock farming systems. In iEMSs Fourth Biennial Meeting, Barcelona, Catalonia, pp. 783-791.

Martin G, Hossard L, Theau JP, Therond O, Josien E, Cruz P, Relllier JP, Martin-Clouaire R and Duru M 2009. Characterizing potential flexibility in grassland use. Apllication to the French Aubrac area. Agronomy for Sustainable Development 29, 381-390.

Martin-Clouaire R and Relllier JP 2003. A conceptualization of farm management strategies. In Proceedings of EFITA Conference, Debrecen, Hungary.

McCown RL 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. Agricultural Systems 74, 179-220.

Oltenacu PA, Milligan RA, Rounsaville TR and Foote RH 1980. Modelling reproduction in a herd of dairy cattle. Agricultural Systems 5, 193-205.

Peyraud JL, Le Gall A, Delaby L, Faverdin P, Brunschwig P and Caillaud D 2009. Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières demain? Fourrages 197, 47-70.

Pomar C, Kyriazakis I, Emmans GC and Knap PW 2003. Modelling stochasticity : dealing with populations rather than individual pigs. Journal of Animal Science 81, 178-186.

Puillet L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2008. Simple representation of physiological regulations in a model of lactating female : application to the dairy goat. Animal 2, 235-246.

Romera AJ, Morris ST, Hodgson J, Stirling WD and Woodward SJR 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. Computers and Electronics in Agriculture 42, 67-86.

Sanders JO and Cartwright TC 1979. A general cattle production systems model. I: Structure of the model. Agricultural Systems 4, 217-227.

Sauvant D 1994. Modelling homeostatic and homeorhetic regulations in lactating animals. Livestock Production Science 39,105-113.

Sauvant D, Giger-Reverdin S, Meschy F 2007. Alimentation des Caprins. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins, pp 137-148, Editions Quae, Versailles.

Sorensen JT, Kristensen ES and Thysen I 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. Agricultural Systems 39, 177-200.

Tess MW and Kolstad BW 2000. Simulation of cow-calf production systems in a range environment: I. Model development. Journal of Animal Science 78, 1159-1169.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J and Dedieu B 2004. Analyser la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices : intérêts pour modéliser le fonctionnement du troupeau en élevage allaitant. INRA Productions Animales 17, 123-132.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J and Dedieu B 2008. Capacités d'adaptation du troupeau: la diversité des trajectoires productives est-elle un atout? In L'élevage en mouvement.

Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores (eds B Dedieu, E Chia, B Leclerc, CH Moulin and M Tichit), pp. 119-133, Editions Quae, Versailles, France.

Vayssières J, Guerrin F, Paillat JM and Lecomte P 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I – Whole-farm dynamic model. Agricultural Systems 101, 128-138.

Villalba D, Casasus I, Sanz A, Bernues A, Estany J and Revilla R 2006. Stochastic simulation of mountain beef cattle systems. Agricultural Systems 89, 414-434.

Woodward SJR, Romera AJ, Beskow WB and Lovatt SJ 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: review and synthesis. New Zealand Journal of Agricultural Research 51, 235-252.

4 Introduire l'efficacité dans l'analyse de la variabilité des carrières individuelles : une clé pour le diagnostic de la conduite du troupeau.

Résumé

L'analyse de la variabilité des carrières est un outil puissant de diagnostic des pratiques de conduite du troupeau. Bien que l'efficacité soit un aspect clé de la performance, les études existantes sur la variabilité des carrières n'ont pas intégré ce critère. L'objectif de cet article est d'analyser les effets de différentes options de conduite du troupeau sur la variabilité des carrières en intégrant des critères relatifs à l'efficacité alimentaire. Un simulateur du fonctionnement du troupeau caprin laitier a été utilisé dans trois plans d'expériences qui ont testé les effets du niveau des apports alimentaires, du degré de segmentation du plan d'alimentation et du niveau du potentiel de production moyen du troupeau. Les résultats ont montré que la variabilité des carrières se structure autour d'un axe représentant la longévité et la productivité et d'un axe représentant la construction de l'efficacité alimentaire liée à l'apport de concentré. La variabilité intra-conduite s'exprime au niveau de la longévité et de la productivité. La variabilité inter-conduites s'exprime au niveau de la construction de l'efficacité alimentaire. La combinaison du niveau des apports alimentaires et du potentiel de production influence fortement la construction de l'efficacité alimentaire individuelle. Des efficacités alimentaires similaires peuvent être obtenues avec différentes combinaisons d'options de conduite. Cependant, ces combinaisons sollicitent des bases biologiques différentes et conduisent à des proportions contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production moyen. Nos résultats ont par exemple montré que la suralimentation interagissait avec le degré de segmentation du plan d'alimentation : une segmentation fine du plan génère une faible proportion d'individus à l'équilibre alors qu'une ration unique génère une forte proportion d'individus à l'équilibre. Au niveau du troupeau, le niveau des apports alimentaires et le potentiel génétique du troupeau ont des effets marqués sur la production et l'efficacité par un mécanisme de dilution des coûts fixes de production, c'est à dire le besoin d'entretien. Les options de conduite peuvent conduire à des niveaux de production et d'efficacité alimentaire similaires à l'échelle du troupeau mais impliquer des

proportions très contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production. Ces résultats montrent que l'analyse de la variabilité individuelle sur la base de critères relatifs à l'efficacité du processus de production permet d'approfondir le diagnostic de la conduite du troupeau. Le simulateur ouvre des perspectives intéressantes pour étudier si la variabilité individuelle est un atout pour les performances du troupeau, notamment dans un environnement fluctuant.

Mots clés : variabilité individuelle, efficacité, stratégie d'alimentation, simulation, troupeau caprin

4.1 Introduction

L'analyse de la variabilité des carrières individuelles au sein d'un troupeau est un outil puissant de diagnostic des pratiques de conduite. D'une part, la carrière décrit les performances à long terme des animaux et leur aptitude à s'adapter à un environnement d'élevage (Landais, 1987 ; Gibon, 1994) et d'autre part, la variabilité est une propriété clé du fonctionnement des systèmes biologiques. Elle est à la base de la construction de la réponse globale du système et de la capacité du système à s'adapter à un environnement fluctuant (Yachi et Loreau, 1999). L'intérêt de l'analyse de la variabilité des carrières pour le diagnostic et la conception de conduites innovantes a déjà été souligné par différents auteurs. La complémentarité des trajectoires de reproduction de deux espèces d'un troupeau mixte renforce la viabilité du troupeau en environnement contraignant et fluctuant (Tichit *et al.*, 2004). Dans les différents travaux sur le sujet, la carrière est définie par des indicateurs de production, d'enchainement des mises-bas ou de participation à des sessions de lutte (Lasseur and Landais, 1992 ; Cournut et Dedieu, 2004). Seule l'approche développée par Coulon *et al.* (1993, 1995) a introduit des indicateurs du fonctionnement biologique des animaux (poids vif, pathologies) mais sans les relier précisément aux pratiques. Ainsi, les indicateurs liés à l'efficacité du processus de production ont été largement ignorés dans les travaux sur les carrières. Pourtant, l'efficacité du processus de production est une composante essentielle de la performance d'un troupeau (Vandehaar, 1998) et la carrière est un niveau d'analyse pertinent de l'efficacité individuelle (Peyraud *et al.*, 2009).

La recherche d'efficacité est au cœur des problématiques d'évaluation et de conception de systèmes autonomes et économes du point de vue alimentaire. Ceci est d'autant plus important dans le contexte des élevages laitiers où la maitrise des coûts de production est fortement conditionnée par la maitrise des charges d'alimentation. Plusieurs leviers

d'amélioration de l'efficacité individuelle existent. Ces leviers reposent sur le principe de dilution du coût fixe de production, le besoin d'entretien, soit par une augmentation du niveau de production obtenue par le progrès génétique ou par le niveau d'apport d'aliment concentré (Vandehaar, 1998), soit par une diminution du nombre de jours improductifs (Lormore et Galligan, 2001). A notre connaissance, il n'existe pas de travaux ayant comparé l'effet de ces différents leviers sur la variabilité des réponses individuelles en intégrant une notion d'efficacité sur le long terme.

L'objectif de cet article est d'approfondir le diagnostic de pratiques de conduite i) en intégrant dans la description de la carrière des critères liés à l'efficacité de processus de production et ii) en comparant les effets liés à la conduite de l'alimentation et de la reproduction et au potentiel de production moyen du troupeau sur la variabilité des carrières. Nous avons cherché à identifier si les différentes options de conduite sollicitaient les mêmes bases biologiques. L'évaluation des effets des pratiques de conduite s'est appuyée sur l'utilisation de SIGHMA, un simulateur individu-centré du fonctionnement de troupeau, développé dans le contexte des systèmes caprins laitiers intensifs de l'ouest de la France (Puillet *et al.*, soumis). La première partie de l'article décrit brièvement le simulateur et son utilisation dans le cadre de trois plans d'expériences. La deuxième partie présente les résultats des simulations au niveau des carrières individuelles et des performances du troupeau. L'intérêt de l'incorporation de nouveaux critères d'évaluation des carrières ainsi que de l'analyse des effets des pratiques aux différents niveaux d'organisation du troupeau sont discutés dans une troisième partie.

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Description du simulateur

L'évaluation des effets des pratiques sur les performances du troupeau et des individus a reposé sur l'utilisation du simulateur SIGHMA. Cet outil combine un sous-système décisionnel et un sous-système biotechnique. Le sous-système décisionnel représente le projet d'élevage qui structure le troupeau en lots fonctionnels. Un lot fonctionnel est défini comme un ensemble renouvelé de femelles soumis au même corps de règles de décision et d'opérations techniques. Les lots fonctionnels formalisent les entités de gestion de l'éleveur, support de son raisonnement technique. Ils permettent d'assurer la cohérence d'ensemble des différentes opérations techniques de conduite. D'un point de vue dynamique, le fonctionnement du lot fonctionnel repose sur l'enchaînement de motifs élémentaires de

gestion. Un motif élémentaire de gestion correspond à la séquence minimale d'opérations techniques permettant de réaliser un cycle de gestation-lactation au sein d'un lot fonctionnel. Ce motif traduit la planification et le pilotage des opérations techniques à l'échelle d'une année de production. Les opérations techniques sont traduites informatiquement par des évènements discrets. Ces évènements incorporent les règles de décision et les actions sur le sous-système biotechnique. Ils permettent de représenter la stratégie de l'éleveur par rapport à la reproduction et l'alimentation. La stratégie d'alimentation combine le choix d'un animal pilote et d'un plan de rationnement. L'animal pilote représente le niveau d'apports alimentaires du lot. Il traduit le niveau de besoins satisfait par la ration distribuée au lot. Il est exprimé dans la même unité que le potentiel laitier d'un individu, à savoir la production laitière (en kg) au pic de la troisième lactation. Cette homogénéité d'unité permet d'appréhender facilement le décalage entre le niveau d'apports alimentaires du lot et le niveau génétique moyen du lot.

Le sous-système biotechnique est composé d'un ensemble de modèles individuels de chèvres laitières. Chaque modèle simule les dynamiques biologiques de poids vif et de production laitière de l'individu depuis sa naissance jusqu'à sa sortie du troupeau. Ces dynamiques sont déterminées par le potentiel laitier, les priorités relatives entre fonctions physiologiques (croissance, gestation, lactation et gestion des réserves) et les réponses à l'énergie ingérée en fonction des pratiques d'alimentation et de reproduction. Les réponses aux variations d'apports énergétiques s'appuient en partie sur les lois de réponses proposées par l'INRA (Sauvant *et al.*, 2007) ainsi que sur une partition dynamique de l'énergie entre les fonctions physiologiques.

Le sous-système décisionnel interagit avec le sous-système biotechnique au travers de l'alimentation qui détermine la quantité et la qualité des aliments distribués, de la reproduction qui détermine le rythme des cycles individuels et du renouvellement qui détermine le temps de séjour de l'individu dans le troupeau. Le sous-système biotechnique produit les informations nécessaires aux règles de décision relatives aux opérations techniques de conduite dans le sous-système décisionnel. Les informations peuvent être prises au niveau du lot ou de l'individu. La variabilité du déroulement des cycles biologiques individuels est ainsi générée par le fonctionnement indépendant de chaque modèle de chèvre dans un espace d'évènements de conduite relatifs à différents niveaux d'organisation du troupeau

Le simulateur fonctionne sur 20 ans et nécessite 15 réplications[5] par simulation. L'existence de processus stochastiques dans le simulateur (reproduction, mortalité) implique de répéter les simulations afin de stabiliser la variance des sorties (Coquillard et Hill, 1997). Les sorties des simulations comportent des variables agrégées à l'échelle du troupeau (production laitière, consommation des différents types d'aliments, démographie) ainsi que des variables caractérisant la carrière de chaque individu dans le troupeau.

4.2.2 Utilisation du simulateur pour trois plans d'expérience

Trois plans d'expériences ont été conçus pour tester différentes options de conduite sur l'efficacité d'un troupeau de 300 chèvres luttées en saison. Les informations relatives au paramétrage des plans d'expérience[6] sont récapitulées dans le Tableau 22. L'objectif du premier plan d'expérience était de générer des taux de couverture des besoins variables sur la base d'un décalage entre le niveau des apports alimentaires et le niveau des besoins. Ce plan d'expérience a testé deux niveaux de potentiel laitier moyen du troupeau (L : 4 kg et H : 5 kg) et deux niveaux d'animal pilote (L : 4 kg et H : 5 kg). Les différentes modalités de traitements ont été numérotées: S_1 (L-L) ; S_2 (H-L) ; S_3 (L-H) et S_4 (H-H). L'objectif du second plan d'expérience était de produire un décalage entre l'évolution dynamique des besoins, générée par l'étalement de la période de reproduction, et l'évolution dynamique des apports, générée par le découpage du plan d'alimentation. Ce second plan a testé deux niveaux d'étalement de la période de reproduction (H : 126 jours ; L : 63 jours) et deux niveaux de découpage du plan d'alimentation (H : 5 séquences ; L : 2 séquences) pour un animal pilote et un niveau de potentiel moyen du troupeau égaux à 4 kg. Les différentes modalités de traitements ont été numérotées: S_5 (H-L) ; S_6 (H-H) ; S_7 (L-L) ; S_8 (L-H). Enfin, le troisième plan d'expérience a testé une conduite simplifiée du troupeau. La gestion des échecs de reproduction est souple en maintenant les femelles en lactation longue jusqu'à la prochaine opportunité de reproduction. Le plan d'alimentation repose sur une ration unique sur la lactation. Ce plan a testé deux niveaux d'étalement de la reproduction (H : 126 jours ; L : 63 jours) et trois niveaux d'animal pilote (L : 3 kg, M : 4 kg et H : 5 kg) pour un niveau de potentiel moyen du troupeau égal à 4 kg. Les différentes modalités de traitements ont été numérotées : S_9 (H-M) ; S_{10} (H-H) ; S_{11} (H-L); S_{12} (L-M) ; S_{13} (L-H) ; S_{14} (L-L). Dans les trois plans d'expérience, la reproduction

[5] Les réplications sont définies par Coquillard et Hill (1997, p50) comme plusieurs expériences de simulation alimentées avec des nombres aléatoires différents et non corrélés avec ceux des précédents expériences.
[6] Afin de faciliter la lecture des résultats, les caractéristiques des différentes simulations sont présentées sur l'annexe mobile.

a été paramétrée pour obtenir un bon niveau de réussite qui soit équivalent dans les différentes simulations. Ainsi, les effectifs de femelles en lactation sont comparables entre les simulations ce qui permet d'étudier uniquement les différences liées aux individus.

Tableau 22 Paramétrage des 14 simulations réalisées dans le cadre de trois plans d'expériences avec le simulateur.

N° simulation	N° Plan	Potentiel moyen (kg)	Animal pilote (kg)	Nombre de séquences alimentaires	Durée de la période de reproduction (jours)	Gestion échecs de reproduction
1	1	4	4	3	84	Stricte[1]
2	1	5	4	3	84	Stricte
3	1	4	5	3	84	Stricte
4	1	5	5	3	84	Stricte
5	2	4	4	2	126	Stricte
6	2	4	4	5	126	Stricte
7	2	4	4	2	63	Stricte
8	2	4	4	5	63	Stricte
9	3	4	4	1	126	Souple[2]
10	3	4	5	1	126	Souple
11	3	4	3	1	126	Souple
12	3	4	4	1	63	Souple
13	3	4	5	1	63	Souple
14	3	4	3	1	63	Souple

[1] : la gestion stricte des échecs de reproduction correspond à un maintien en lactation longue des chèvres infertiles les plus productives et une réforme des chèvres infertiles les moins productives.
[2] : la gestion souple des échecs de reproduction correspond à un maintien systématique des chèvres infertiles en lactation longue.

4.2.3 Analyse des sorties

Les 14 simulations issues de ces trois plans d'expériences ont généré 76659 carrières complètes de plus de deux lactations sur les 10 dernières années de simulation. Compte tenu de la masse de données engendrées, l'interprétation de celles ci a reposé sur des approches statistiques descriptives multivariées qui permettent un traitement et une structuration rapide de grands ensembles de données ainsi qu'une interprétation graphique assez simple. Une analyse en composantes principales (Procfactor, SAS) a été réalisée sur 17 variables individuelles pour explorer la structuration de la variabilité simulée. Parmi ces variables, les consommations de matière sèche (MS) à l'échelle de la carrière ont permis de calculer les indices de consommation des individus pour le fourrage et l'aliment concentré. Ces indices ont permis le calcul du coût alimentaire (en €) du kg de lait produit à l'échelle de la carrière sur la base des prix moyens des matières (0.06 €/kg de MS fourrage ; 0.23 €/kg de MS déshydratés et 0.30 €/kg de MS concentrés ; Institut de l'Elevage, 2008). Un indicateur du poids vif ($dBWlac_2$) généré par le modèle a été incorporé dans l'analyse. Cet indicateur représente la différence entre le poids vif réel de l'individu et son poids vif potentiel, *i.e.*

déterminé par l'expression de son potentiel de production, à 90 jours de la deuxième lactation (Figure 44). Il est ainsi possible de déterminer si un individu a moins mobilisé que ce que lui impose son potentiel ($dBWlac_2 > 0$; Figure 44a) ou si à l'inverse, l'individu a mobilisé au delà de ce que lui impose son potentiel ($dBWlac_2 < 0$; Figure 44b). Le poids vif est relevé à 90 jours pour être sûr de capter la chute de poids vif de toutes les femelles simulées, et plus particulièrement les plus productives qui mobilisent sur une plus grande période. A l'échelle du troupeau, les performances moyennes sur 10 ans (production laitière brute, efficacité alimentaire en kg MS/kg lait brut) sont calculées pour chaque réplication puis moyennées pour les 15 réplications de chaque simulation.

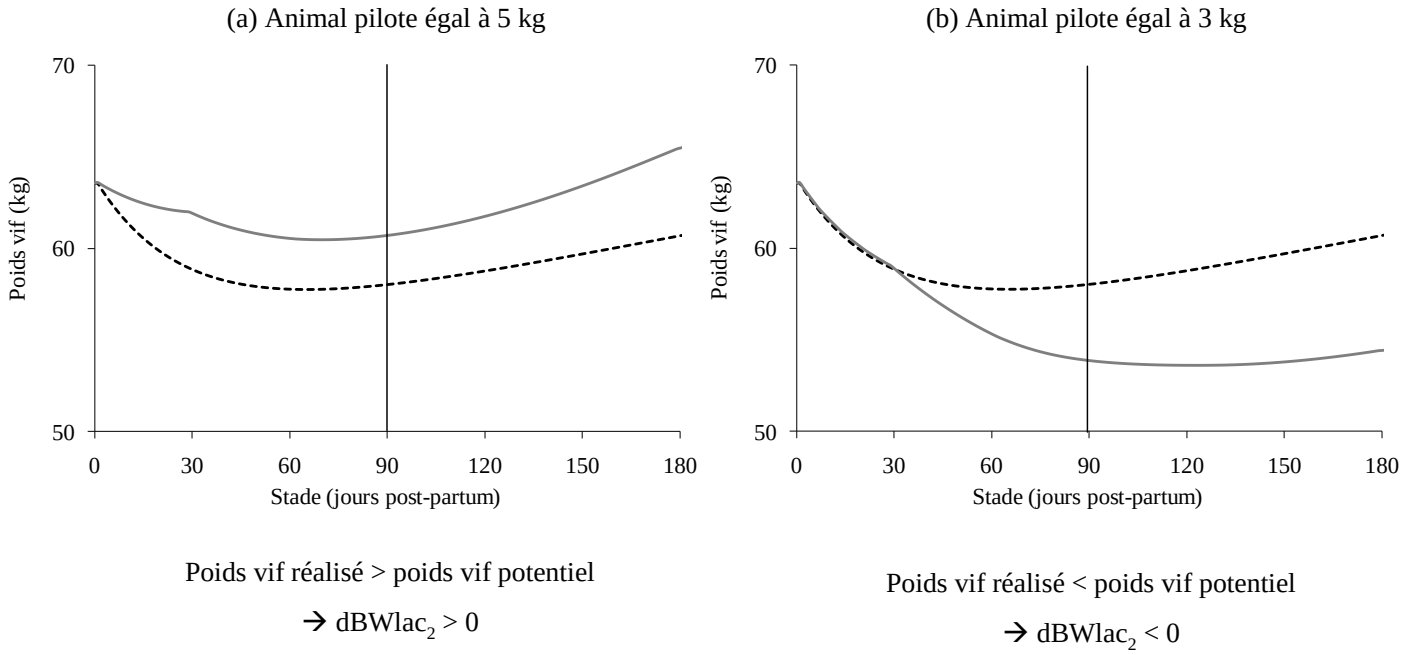


Figure 44 Illustration du calcul de la variable dBWlac2 pour une chèvre de potentiel de production égal à 4 kg (pic de production laitière atteint en troisième lactation) alimentée avec deux niveaux d'animal pilote (exprimé dans la même unité que le potentiel de production) : a) animal pilote égal à 5 kg et b) animal pilote à 3 kg. Les courbes noires représentent la dynamique du poids vif correspondant à l'expression du potentiel de production de la femelle. Les courbes grises représentent les dynamiques du poids vif réalisées avec une ration dont le niveau est basé sur un animal pilote égal à 5 kg (a) et un animal pilote à 3 kg (b).

4.3 Résultats

4.3.1 Caractérisation de la variabilité des carrières individuelles

Les résultats de l'ACP des 17 variables individuelles sont présentés dans la Figure 45. Les deux premiers axes de l'analyse structurent fortement la variabilité des individus. En particulier, l'axe 1 est dominant puisqu'il explique 52% de la variabilité totale. Cet axe représente la productivité et la longévité des carrières. Il oppose des variables de production et

de consommation à l'échelle de la carrière et des variables de durée de vie productive aux variables de coût alimentaire du kg de lait et de temps improductif. L'axe 1 oppose ainsi des carrières courtes et coûteuses à des carrières longues et productives. Il traduit le fait que les coûts d'alimentation sont mieux amortis avec l'allongement de la durée de vie productive. Les carrières longues et productives ne sont que partiellement liées au potentiel laitier (environ 10 % de la variance expliquée). Ce résultat indique que le niveau de potentiel laitier n'est que partiellement lié à la longueur et à la productivité d'une carrière. La carrière d'un individu est plus le résultat de l'expression de son potentiel sous l'effet des pratiques, que celui d'un niveau intrinsèque de potentiel de production. L'axe 2 explique 19% de la variance totale. Cet axe représente le mode de construction de l'efficacité alimentaire. Il oppose les indices de consommation de matière sèche totale et fourragère à l'indice de consommation de concentré et à la variable $dBWlac_2$. Sur cet axe, la variable $dBWlac_2$ est liée très positivement à l'indice de consommation de concentré. Ce résultat indique que plus le processus de production implique l'utilisation de concentré plus le poids vif réalisé à 90 jours de lactation est au dessus du potentiel. Ce résultat est logique compte tenu des lois de réponses aux apports de concentrés. L'opposition des indices de consommation de matière sèche totale et fourragère à l'indice de consommation de matière sèche de concentré traduit la substitution fourrage-concentré. Ainsi, l'axe 2 oppose deux modes contrastés de construction de l'efficacité alimentaire. D'une part, une efficacité basée sur l'utilisation d'une quantité importante de matière sèche par kg de lait, principalement fourragère, et une mobilisation accrue des réserves par rapport à la mobilisation liée au potentiel de production. D'autre part, une efficacité basée sur l'utilisation d'une quantité moindre de matière sèche par kg de lait, avec une quantité importante d'aliment concentré et une moindre mobilisation des réserves par rapport à la mobilisation liée au potentiel de production Il est intéressant de noter que le coût alimentaire du kg de lait, qui est indépendant de l'axe 2, n'est donc pas lié au mode de construction de l'efficacité. Ceci suggère qu'un même coût alimentaire peut être obtenu avec modes de construction de l'efficacité différents.

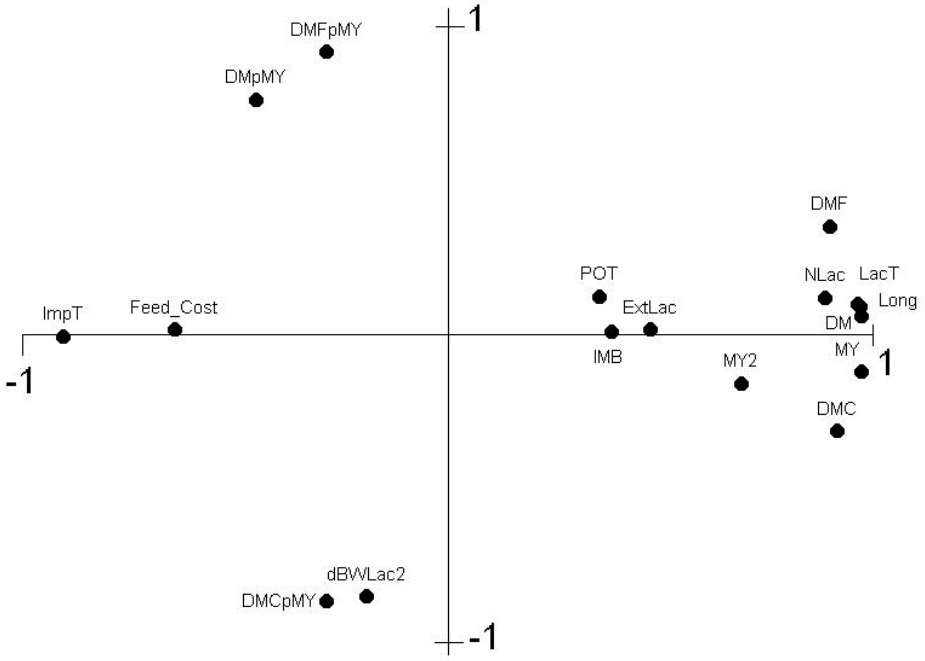


Figure 45 Positionnement des 17 variables individuelles en fonction de leurs coordonnées sur les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales. Ces variables caractérisent la carrière des 76 569 individus générés dans les trois plans d'expériences. ImpT : temps improductif (rapport en pourcentage du nombre total de jours de vie et du nombre de jours sans production) ; Feed Cost : coût alimentaire du lait (en euros/kg de lait) ; DMpMY : kg de matière sèche par kg de lait ; DMFpMY : kg de matière sèche fourragère par kg de lait ; DMCpMY : kg de matière sèche concentré par kg de lait ; dBWlac2 : différence en kg entre le poids vif réalisé et le poids vif génétique en début de deuxième lactation ; POT : potentiel laitier (kg de lait au pic de lactation); IMB : intervalle entre mises bas en jours ; ExtLac : nombre total de lactations longues sur la carrière ; MY2 : production laitière sur la deuxième lactation ; DM : consommation totale (kg) de matière sèche ; DMC : consommation totale (kg) de matière sèche concentré ; DMF : consommation totale (kg) de matière sèche fourragère ; MY : production laitière totale (kg) ; NLac : nombre total de lactations ; LacT : nombre total de jours en lactation ; Long : nombre total de jours de vie.

4.3.2 Effets des options de conduite sur la variabilité des carrières individuelles

Le Tableau 23 récapitule les moyennes des variables individuelles pour les 14 simulations. La Figure 46 représente la projection des individus dans le plan défini par les deux premières composantes de l'analyse. Les options de conduite ont été codées par couleur en fonction de la stratégie d'alimentation. La variabilité individuelle intra-conduite s'exprime le long de l'axe 1. Quelque que soit l'option de conduite considérée, la variabilité des individus en termes de durée et de productivité de leur carrière est importante et ne semble pas dépendre de la position sur l'axe 2. En effet, les pratiques de reproduction et de renouvellement ont un impact fort sur le temps de séjour de l'individu dans le troupeau ainsi que sur son rythme de production. Ces pratiques varient très peu dans les plans d'expérience simulés qui ont généré

des niveaux similaires de variabilité sur l'axe 1. Les simulations du plan n°3, paramétrées avec une gestion souple des échecs de reproduction, n'ont pas eu d'effet sur la longévité des femelles car le nombre de femelles échouant à la reproduction reste faible ce qui limite les effets sur la longévité (Tableau 23, environ 100 jours de différence sur la longévité). Ce résultat est donc lié au paramétrage de la reproduction qui dans tous les cas vise un bon niveau de réussite (environ 85% de taux de mise-bas). Ce choix était nécessaire pour maintenir des effectifs en production comparables. La variabilité inter-conduite s'exprime le long de l'axe 2 : les plans d'expérience génèrent des modes de construction de l'efficacité contrastés. L'indépendance des axes 1 et 2 est à nuancer pour les femelles réalisant des carrières courtes et qui obtiennent des indices de consommation élevés. La faible durée de vie productive est associée avec une faible efficacité car ces individus n'ont pas amorti la consommation d'aliments pendant leur phase d'élevage.

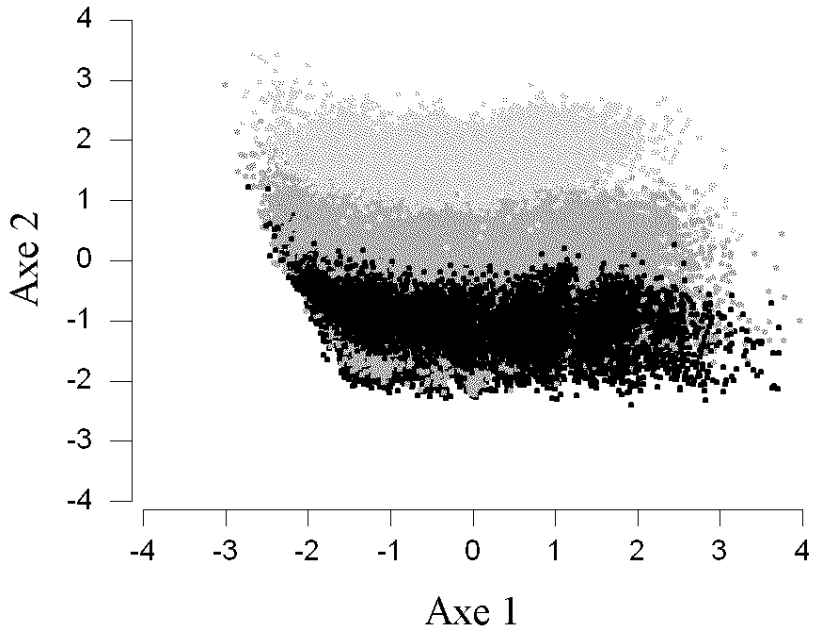


Figure 46 Positionnement des individus générés par les trois plans d'expériences dans le plan défini par les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales. Les points bleus correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est négative (sous-alimentation) ; les points gris et noir correspondent à une des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est nulle et les points rouge correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est positive (suralimentation).

Tableau 23 Moyennes des variables individuelles simulées dans les 14 simulations. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.

N° simulation	N	Production laitière sur la carrière (kg)		Production laitière par jour de lactation (kg/j)		$dBWLac_2$ (kg)		IC[1] de MS[2] totale (kg/kg de lait)		IC de MS d'aliment concentré (kg/kg de lait)		IC de MS fourragère (kg/kg de lait)		Nombre total de lactation		Coût alimentaire (€ / kg de lait)		Longévité (jours)	
1	4888	2954	-1451	2.5	-0.14	1	-3.2	1.01	-0.06	0.37	-0.02	0.46	-0.05	4	-1.6	0.184	-0.009	1723	-635
2	4864	3282	-1601	2.7	-0.17	-4.6	-2.5	0.95	-0.06	0.33	-0.02	0.46	-0.04	4	-1.7	0.169	-0.009	1736	-652
3	4891	3666	-1792	3	-0.14	7.4	-2.8	0.87	-0.06	0.4	-0.02	0.33	-0.05	4.1	-1.6	0.176	-0.008	1750	-649
4	4880	3751	-1833	3.1	-0.14	2.1	-3.7	0.87	-0.05	0.39	-0.02	0.34	-0.04	4	-1.6	0.172	-0.007	1740	-647
5	5431	3011	-1409	2.5	-0.14	-0.5	-2.7	1.02	-0.07	0.36	-0.02	0.48	-0.06	4.1	-1.6	0.184	-0.009	1765	-620
6	5405	3034	-1406	2.5	-0.14	1.1	-3.2	1.01	-0.07	0.37	-0.02	0.47	-0.06	4.1	-1.6	0.185	-0.009	1761	-609
7	5546	2965	-1355	2.4	-0.14	-0.7	-2.8	1.02	-0.06	0.36	-0.02	0.48	-0.05	4.2	-1.6	0.183	-0.01	1750	-602
8	5643	2952	-1360	2.5	-0.14	0.7	-3.3	1.02	-0.06	0.37	-0.02	0.47	-0.05	4.1	-1.6	0.184	-0.01	1736	-601
9	5785	3213	-1294	2.4	-0.12	-1.9	-2.3	1.02	-0.06	0.35	-0.02	0.49	-0.06	4.3	-1.4	0.18	-0.009	1862	-565
10	5746	3812	-1533	2.9	-0.1	1.9	-2.3	0.89	-0.06	0.38	-0.01	0.36	-0.05	4.3	-1.4	0.175	-0.007	1872	-569
11	5862	2753	-1106	2.1	-0.17	-6.2	-2	1.14	-0.08	0.29	-0.02	0.65	-0.06	4.3	-1.4	0.179	-0.013	1871	-571
12	5904	3220	-1284	2.5	-0.12	-1.9	-2.3	1.01	-0.06	0.35	-0.02	0.49	-0.05	4.3	-1.4	0.179	-0.009	1860	-563
13	5887	3785	-1519	2.9	-0.1	1.7	-2.3	0.89	-0.06	0.38	-0.01	0.36	-0.04	4.3	-1.4	0.175	-0.007	1859	-568
14	5837	2770	-1101	2.1	-0.17	-6.2	-1.9	1.13	-0.08	0.29	-0.02	0.63	-0.05	4.3	-1.4	0.177	-0.013	1863	-560

[1] IC : indice de consommation

[2] MS : matière sèche

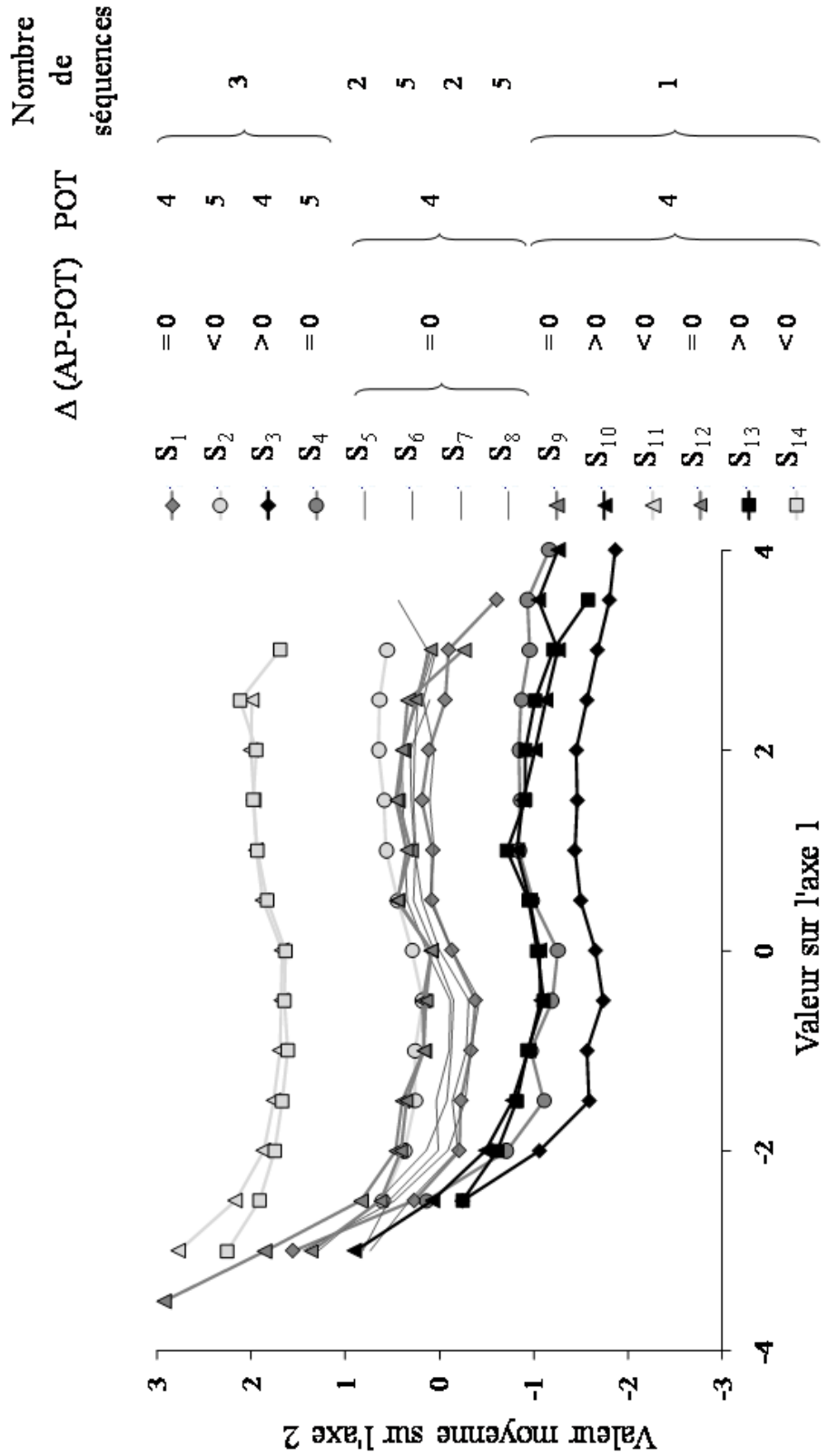


Figure 47 Projection de la moyenne des coordonnées des individus sur l'axe 2 en fonction de la valeur sur l'axe 1 pour les 14 simulations. Les points en gris clair correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le potentiel de production moyen du troupeau est négative (sous-alimentation); les points en gris foncé correspondent à une des simulations où la différence entre l'animal pilote et le potentiel de production moyen du troupeau est nulle et les points en noir correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le potentiel de production moyen du troupeau est positive (suralimentation). AP : animal pilote ; POT : potentiel de production laitier (en kg de lait au pic de la troisième lactation). Le niveau des apports alimentaires est exprimé par le décalage entre le potentiel de production moyen du troupeau et le niveau de l'animal pilote (Δ(AP-POT)).

Afin d'étudier plus en détail leur effet sur la variabilité individuelle, les nuages de points de chaque simulation ont été résumés en calculant la moyenne des coordonnées des individus sur l'axe 2 en fonction des valeurs sur l'axe 1 (Figure 47). Pour compléter l'information apporté par la variable dBWlac2, les proportions d'individus considérés à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production (*i.e.* dBWlac2 $\in$[-2 ; 2]) ont été calculées pour chaque simulation (Figure 48). Trois groupes de simulations se distinguent par leur position sur l'axe 2 (Figure 47) reflétant la discrimination inter-conduites observée sur la Figure 48.

Le premier groupe, situé dans la partie positive de l'axe 2, comprend les simulations S_{11} et S_{14} où la conduite de l'alimentation sous-alimente les femelles d'un troupeau de potentiel moyen. Ces conduites ont généré des individus dont l'efficacité est basée sur une consommation importante de matière sèche fourragère et sur une mobilisation des réserves au-delà de celle imposée par l'expression du potentiel laitier. Cette mobilisation du poids vif a ainsi conduit à une proportion très faible (inférieure à 10 %) d'individus à l'équilibre (Figure 48).

Le second groupe de simulations a une position intermédiaire sur l'axe 2 (Figure 47). Ce groupe comprend deux types de simulations. Le premier type regroupe les simulations où la conduite de l'alimentation satisfait les besoins du troupeau de potentiel moyen (4 kg). Il s'agit des simulations $S_{5\text{-}8}$ du plan n°2 ainsi que S_1 (plan n°1), S_9 et S_{12} (plan n°3). Ces simulations diffèrent du point de vue du degré de segmentation du plan d'alimentation, de l'étalement de la période de reproduction et de la gestion des échecs de reproduction (Tableau 22). Elles ont généré des individus dont l'efficacité est similaire et une proportion importante d'individus à l'équilibre (Figure 48). Ainsi, l'interaction entre l'étalement des stades et le degré de segmentation du plan d'alimentation n'a pas eu d'effet marqué sur la variabilité des individus. Le second type de simulations positionnées de façon intermédiaire sur l'axe 2 comprend uniquement la simulation S_2. Celle-ci qui correspond à une conduite de l'alimentation qui sous-alimente les femelles dans un troupeau de potentiel élevé (5 kg). Elle a généré des individus dont l'efficacité est similaire à celle des simulations précédentes mais a conduit à une faible proportion d'individus à l'équilibre (Figure 48). S_2 a produit ainsi une efficacité globalement similaire au premier type de simulations car les individus ont compensé en

utilisant leurs réserves de façon plus importante que ce que leur imposait leur potentiel de production.

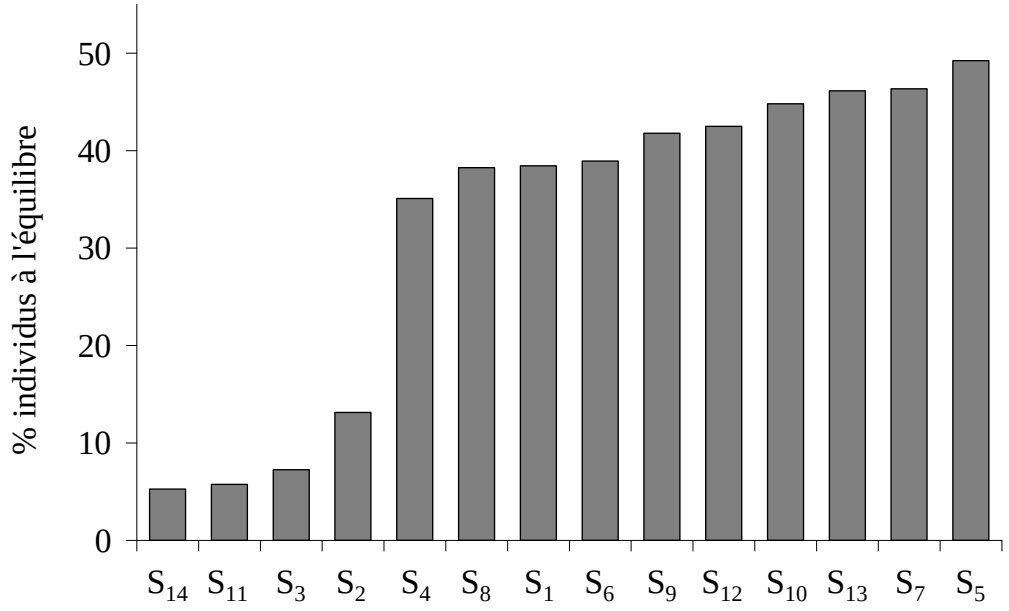


Figure 48 Pourcentage d'individus dont le poids vif est à l'équilibre en début de deuxième lactation pour chacune des 14 simulations. Le poids vif à l'équilibre correspond à une déviation comprise entre - 2 et +2% (déviation entre le poids vif réalisé et le poids vif déterminé par le potentiel laitier).

Le troisième groupe de simulations est plus situé dans la partie négative de l'axe 2. Il s'agit des simulations S_3, S_4, S_{10} et S_{13}. Ces simulations ont généré des individus dont l'efficacité est basée sur une consommation importante de concentré et une moindre utilisation des réserves par rapport à celle liée au potentiel de production. Les simulations S_3, S_{10} et S_{13} correspondent à des conduites où les femelles sont suralimentées. Elles ont généré des proportions d'individus à l'équilibre très contrastées : moins de 10% des individus à l'équilibre pour S_3 et plus de 40% pour S_{10} et S_{13} (Figure 48). Ces proportions d'individus contrastées sont liées à des distributions de $dBWlac_2$ également contrastées (Figure 49). Ce contraste est à relier au degré de segmentation du plan d'alimentation. Dans ces simulations, la suralimentation a été amortie par la distribution d'une ration unique sur la lactation. Celle-ci a généré un décalage entre l'évolution temporelle des besoins des femelles et l'évolution temporelle des apports. Ainsi, à certains moments, même si la ration est globalement conçue au dessus des besoins moyens, les femelles ont pu être sous-alimentées. A la différence des précédentes, la simulation S_4 correspond à une conduite de l'alimentation qui satisfait les besoins d'un troupeau de potentiel élevé (5 kg). Elle conduit à une efficacité similaire aux simulations S_3, S_{10} et S_{13} et à une proportion importante d'individus à l'équilibre (Figure 48). Toutefois la répartition de la variable $dBWlac_2$ présente pour S_4 un étalement beaucoup plus important que

pour S_{10} (Figure 49). La cohérence de l'animal pilote avec le potentiel moyen a conduit à l'expression d'une plus grande variabilité du décalage entre le poids vif potentiel et le poids vif réalisé.

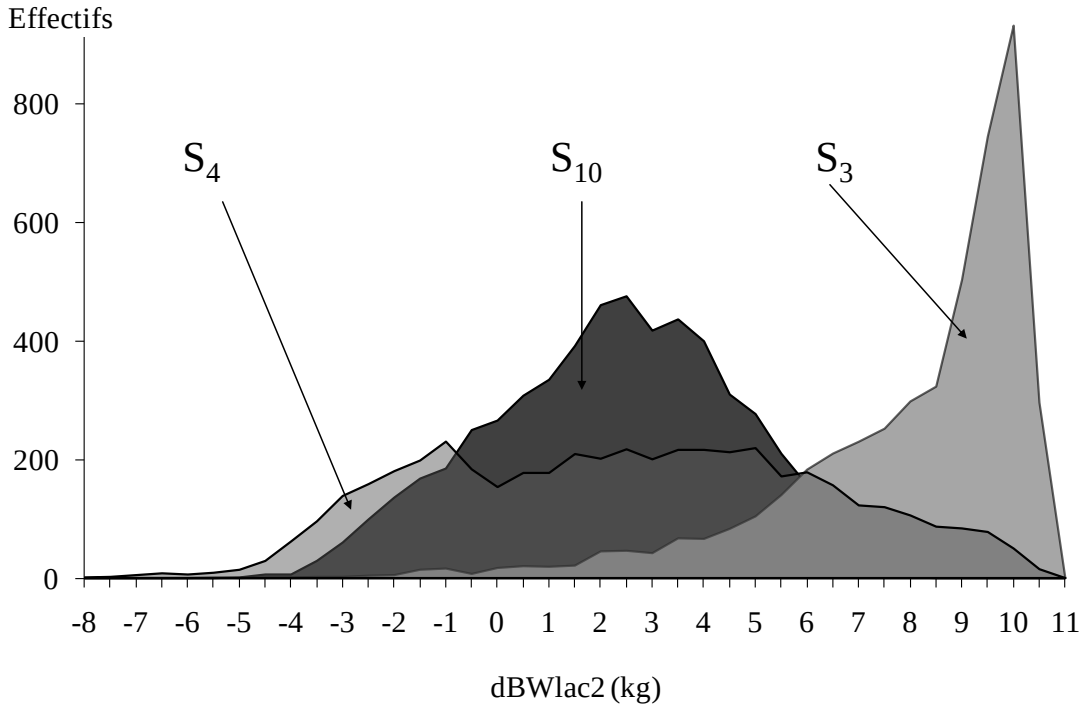


Figure 49 Répartition des individus simulés dans trois contextes de conduite (S_{10}, S_4 et S_3) en fonction de la valeur de la variable $dBWlac_2$ qui représente l'écart (en kg) entre le poids vif réalisé et le poids vif potentiel à 90 jours de la 2ème lactation.

4.3.3 Performances globales du troupeau

La Figure 50 présente la relation entre l'efficacité moyenne (évaluée par l'indice de consommation global en kg de MS par kg de lait) et la production laitière moyenne du troupeau. Plus la production augmente, plus l'indice de consommation baisse, *i.e.* plus l'efficacité alimentaire augmente. Cette tendance globale, qui se retrouve bien au niveau des individus, traduit la dilution des coûts fixes biologiques (besoin d'entretien) par l'augmentation du niveau de production. Les options de conduite qui suralimentent les individus ou qui s'appuient sur un potentiel laitier élevé alimenté au besoin conduisent à la fois à une augmentation de la production et à une augmentation de l'efficacité alimentaire globale.

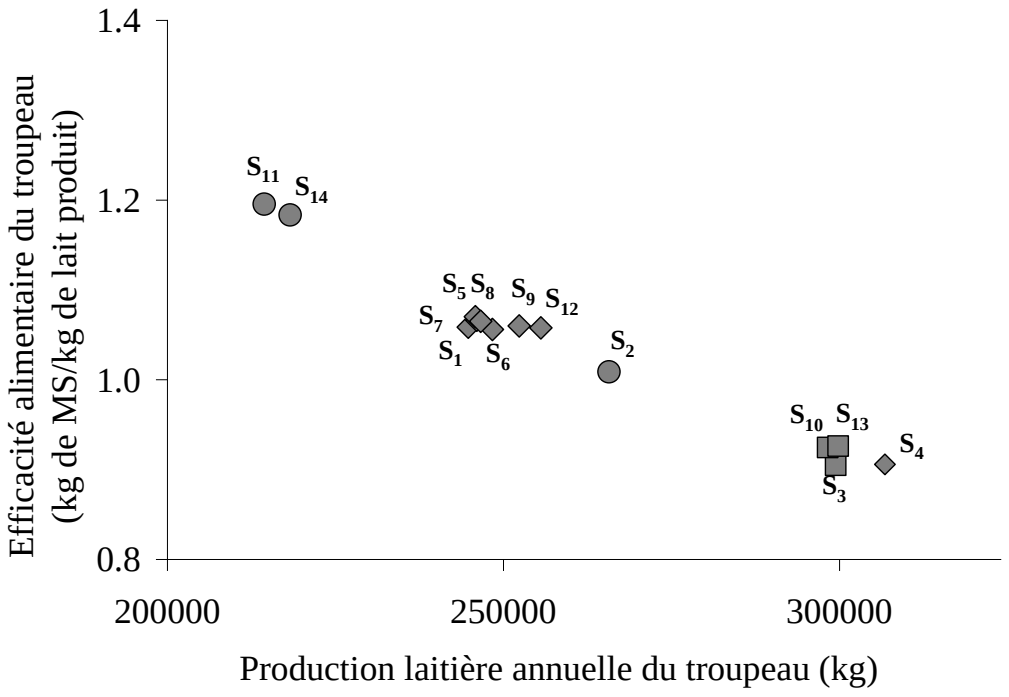


Figure 50 Résultats des 14 simulations à l'échelle du troupeau pour l'efficacité alimentaire du troupeau en fonction de la production laitière annuelle. Les cercles correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est négative (sous-alimentation) ; les losanges correspondent à une des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est nulle et les carrés correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est positive (suralimentation).

La Figure 51 présente la relation entre le coût alimentaire moyen et la production moyenne du troupeau. Plus la production laitière est élevée, plus le coût alimentaire diminue. Deux tendances parallèles d'évolution du coût en fonction de la production apparaissent : l'une correspond aux options de conduite où l'animal pilote est supérieur au potentiel moyen du lot, l'autre correspond aux options de conduite où l'animal pilote est inférieur au potentiel moyen du lot. Ce résultat montre qu'une même production laitière peut être atteinte avec des niveaux de coûts différents. Comme la relation entre l'efficacité de conversion de la matière et la production laitière est linéaire, la quantité totale de matière sèche par kg de lait est équivalente dans les deux situations de coût (puisqu'elles conduisent à la même production). La différence de coût est donc générée par la composition de la matière sèche nécessaire au kg de lait. Quand l'animal pilote est inférieur au potentiel moyen du lot, la matière sèche globale nécessaire au kg de lait contient une forte proportion de fourrages (coût bas). A l'inverse quand il est supérieur ou égal, la matière sèche globale pour produire un kg de lait contient une forte proportion de concentré (coût élevé).

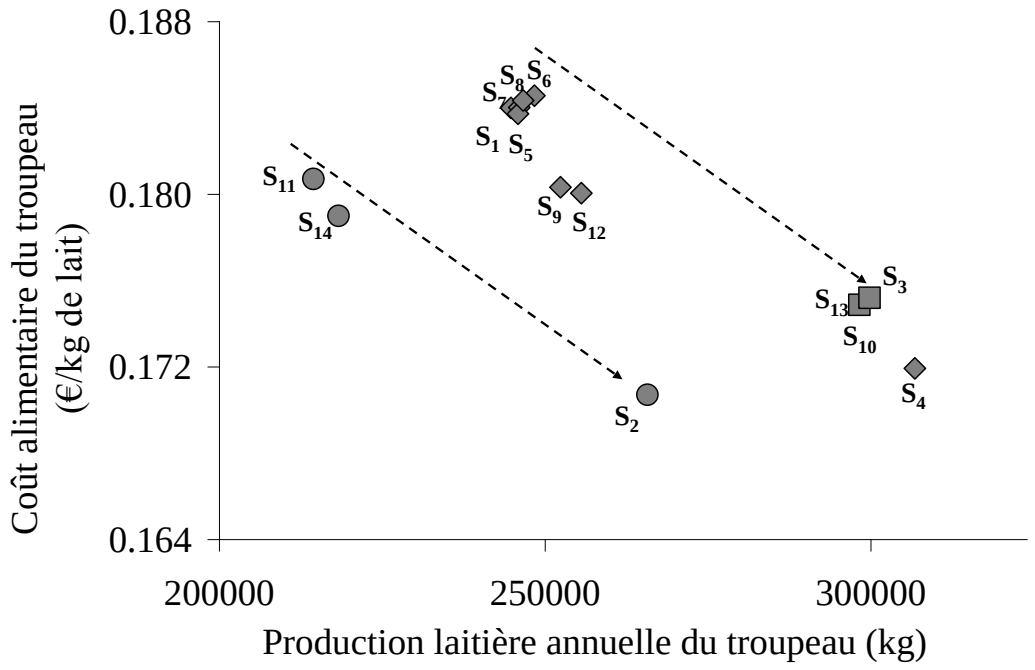


Figure 51 Relation entre le coût alimentaire (en €) du kg de lait produit et la production laitière annuelle du troupeau pour les 14 simulations. Les cercles correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le potentiel de production moyen du troupeau est négative (sous-alimentation) ; les losanges correspondent à une des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est nulle et les carrés correspondent à des simulations où la différence entre l'animal pilote et le niveau génétique moyen du troupeau est positive (suralimentation). Les deux flèches représentent la tendance générale reliant coût et production, à savoir un amortissement des couts fixes de production avec l'augmentation du niveau global.

4.4 Discussion

4.4.1 Résultats des simulations

Le simulateur SIGHMA a mis en évidence l'effet de trois types d'options de conduite sur la variabilité des carrières individuelles : le niveau des apports alimentaires, le degré de segmentation du plan d'alimentation et le niveau génétique moyen du troupeau. La variabilité des carrières se structure autour d'un axe caractérisé par la longévité et la productivité et d'un axe représentant la construction de l'efficacité alimentaire. La variabilité intra-conduite s'exprime sur le premier alors que la variabilité inter-conduites s'exprime sur le second. La combinaison du niveau des apports et du niveau génétique moyen influence fortement la construction de l'efficacité alimentaire individuelle. L'effet du degré de segmentation du plan d'alimentation apparaît seulement dans le cas d'une suralimentation. Des efficacités alimentaires similaires peuvent donc être obtenues avec des combinaisons d'options de conduite très différentes. Cependant, ces combinaisons sollicitent des bases et fonctions

biologiques différentes et conduisent à des proportions contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production. Nos résultats ont montré que la suralimentation interagit avec le degré de segmentation du plan d'alimentation : une segmentation fine du plan limite fortement la proportion d'individus à l'équilibre alors qu'une ration unique permet une forte proportion d'individus à l'équilibre. Nos résultats ont également montré que la sous-alimentation d'un troupeau de potentiel élevé et l'alimentation aux besoins d'un troupeau de potentiel moyen conduisaient à des efficacités alimentaires similaires. Toutefois, dans le cas de la sous-alimentation, l'efficacité est obtenue avec des individus qui sollicitent leurs réserves corporelles au-delà de ce que leur impose leur potentiel de production.

Au niveau du troupeau, le niveau des apports et le niveau génétique moyen ont des effets marqués sur la production et l'efficacité par un mécanisme de dilution des coûts fixes de production. L'introduction du coût alimentaire du kg de lait produit permet de mieux discriminer les effets des options de conduite en introduisant la composition du kg de MS nécessaire à la production d'un kg de lait. La discrimination des options de conduite est également approfondie par l'examen des bases biologiques à l'origine de l'efficacité alimentaire. Les options de conduite peuvent conduire à des niveaux de production et d'efficacité alimentaire similaires à l'échelle du troupeau mais impliquer des proportions très contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production.

Le simulateur offre des perspectives intéressantes pour la conception du rationnement en lot. Les recommandations INRA pour le rationnement des caprins sont basées, comme celle des autres ruminants, sur un principe d'optimisation de la consommation fourragère à l'échelle de l'individu. Le passage à un rationnement en lot réinterroge ce principe. Les résultats du simulateur ont montré que le décalage de l'animal pilote et du niveau génétique moyen du troupeau ainsi que le degré de segmentation du plan d'alimentation influent sur la composition de la matière sèche nécessaire à la production d'un kg de lait. Ce type de résultats pourrait être réinvesti pour enrichir le module de rationnement proposé dans le logiciel INRATION.

4.4.2 Intérêt de la variabilité individuelle pour le diagnostic des pratiques

L'analyse de la variabilité individuelle des carrières permet d'approfondir le diagnostic des pratiques en leur associant un niveau de risque potentiel. La suralimentation d'un troupeau de niveau génétique moyen associée à une segmentation fine du plan d'alimentation présente un niveau de risque plus élevé qu'un même niveau de suralimentation associé avec un plan

d'alimentation simple ou qu'un troupeau de niveau génétique élevé alimenté aux besoins. En effet, cette conduite de l'alimentation implique une très faible proportion d'individus à l'équilibre et une efficacité basée sur une forte consommation de concentré. Ce mode de construction de l'efficacité est risqué d'un point de vue biologique car il repose sur des individus éloignés de leur trajectoire génétiquement déterminée. Cette trajectoire représente l'expression des adaptations naturelles de l'individu qui ont évolué pour maximiser ses chances de succès évolutif (Friggens et Newbold, 2007). Une déviation de cette trajectoire induite par les pratiques peut solliciter des compromis entre les fonctions physiologiques dont les effets seraient négatifs du point de vue des performances (*e.g.* problème d'infertilité ou de santé). Cette construction de l'efficacité est également risquée d'un point de vue économique car elle repose sur l'utilisation d'une matière première chère et volatile. En situation de stabilité des prix, les leviers reposant sur la suralimentation ou sur un potentiel laitier élevé génèrent des performances comparables. En revanche en cas de variation positive des prix, les performances générées par ces deux options de conduite seront affectées différemment étant donné qu'elles ne reposent pas sur le même mode de construction de l'efficacité. Le même raisonnement peut être envisagé avec l'occurrence d'une baisse de l'offre alimentaire. Ce type de perturbation aura, selon les options de conduite, des effets variables sur les performances, car elle va solliciter les capacités d'adaptation d'individus dans des situations différentes d'équilibre biologique. Ces deux exemples illustrent l'importance d'une meilleure compréhension du processus d'élaboration des performances pour pouvoir prédire les réponses d'un troupeau face à des perturbations exogènes. La prédiction des propriétés de résilience et de robustesse des systèmes d'élevage est un des aspects clé de leur durabilité (Darhnofer, 2009). En environnement fluctuant, la productivité d'un système doit s'envisager du point de vue du maintien d'une stabilité inter-temporelle des performances plutôt que sous l'angle d'une moyenne annuelle (Tichit *et al.*, 2004). Les modèles de simulation basés sur la représentation des processus sous jacents de l'élaboration de la performance, tel que SIGHMA, ouvrent des perspectives nouvelles pour évaluer les systèmes d'élevage sous l'angle de la construction temporelle des performances.

Dans l'état actuel de son développement, le simulateur ne permet pas d'appréhender l'ensemble des interactions entre les options de conduite et l'élaboration des réponses biologiques individuelles. Par exemple, le modèle individuel à la base du simulateur n'intègre pas les interactions biologiques entre reproduction et nutrition. L'intégration des effets du niveau des réserves sur les performances reproductives (Mellado *et al.*, 2005) permettrait de

mieux représenter les arrières-effets de l'alimentation sur la longévité des femelles. Des travaux en bovins allaitants ont montré qu'un niveau d'alimentation hivernale bas était relié à un taux plus important de réforme des femelles pour infertilité (travaux de D'Hour et Petit, 1997 cités par Blanc *et al.*, 2004). Ce point mériterait d'être étudié pour les caprins, et en fonction des résultats il serait pertinent d'introduire les arrières-effets de l'alimentation sur la reproduction car ceux-ci moduleraient probablement l'indépendance que nous avons observée entre la longévité et la productivité d'une part et l'efficacité d'autre part (orthogonalité des axes 1 et 2 de l'ACP). Les modes de construction de l'efficacité défavorables aux performances de reproduction conduiraient ainsi à des carrières plus courtes pour cause de réforme sur infertilité. Nos résultats montrent que la longévité et la productivité sont corrélées sur un même axe. Ils se distinguent des travaux portant sur les systèmes petits ruminants allaitants qui ont montré que la longévité et la productivité étaient deux axes indépendants structurant la variabilité individuelle (Lasseur et Landais, 1992 ; Moulin, 1993). Cette différence peut être liée à la spécificité des systèmes laitiers dont la productivité globale à l'échelle de la carrière est positivement reliée à la longévité et négativement reliée au nombre de jours improductifs (*e.g.* Thénard *et al.* 2003).

Une amélioration possible de notre approche repose sur l'introduction d'une variabilité des règles de partition de l'énergie entre les fonctions physiologiques. D'une façon générale, l'objectif d'un plan d'expérience est plutôt de contrôler les sources de variabilité individuelle afin d'avoir plus de puissance sur les effets moyens des traitements expérimentaux. Produire des éléments de connaissances sur la variabilité des lois de réponses individuelles implique de revoir la logique de conception des expérimentations. Celles-ci devraient permettre de mieux intégrer les arrières effets de l'alimentation sur le temps long et devraient considérer l'animal non plus comme un facteur à contrôler mais comme un facteur à étudier. La prise en compte des effets sur un pas de temps long implique un alourdissement des protocoles expérimentaux. Intégrer une variabilité des règles de partition de l'énergie permettrait de représenter différents types fonctionnels de femelles dans le troupeau comme par exemple des femelles ayant tendance à rediriger l'énergie vers le poids vif *versus* des femelles ayant tendance à rediriger l'énergie vers le lait. Il serait alors intéressant de tester si l'existence de plusieurs types de femelles au sein d'un troupeau confère de la flexibilité à la conduite. Cette hypothèse est actuellement explorée en agronomie (Duru *et al.* 2008). Ces travaux ont montré que l'existence de différents types fonctionnels de plantes dans les prairies donne une plus grande souplesse de la conduite du système fourrager. La représentation de types fonctionnels de

femelles permettrait également de tester si la diversité des types renforce l'aptitude du troupeau pour surmonter des perturbations exogènes. Cette hypothèse a été proposée par Gibon (1994) qui a montré que l'adaptation du troupeau à un environnement contraignant repose sur l'existence de plusieurs types fonctionnels de femelles (*i.e.* des types de carrières de reproduction).

L'intérêt de la diversité des carrières pour obtenir un certain niveau de performance ou une performance stable dans le temps reste une question ouverte. La synthèse de Tichit *et al.* (2008) montre que la diversité des carrières joue un rôle important dans la réalisation du projet d'élevage. Toutefois, elle ne montre pas de relation univoque entre niveau de contraintes et diversité des carrières : certaines conduites favorisent une homogénéité des carrières et à l'inverse d'autres favorisent une hétérogénéité des carrières aussi bien en environnement difficile que non limitant. Il est donc essentiel de poursuivre les recherches pour mieux caractériser les situations où la variabilité des performances de reproduction au sein du troupeau ne serait pas un avantage et pourrait nécessiter d'identifier des segments de femelles, cibles de pratiques spécifiques (Lee *et al.*, 2009). Le recours à la simulation du fonctionnement du troupeau représente une perspective prometteuse pour éclairer le débat sur l'intérêt de la variabilité individuelle.

4.5 Conclusion

L'intégration d'indicateurs caractérisant le processus de production pour décrire les carrières individuelles a permis d'approfondir le diagnostic des effets du niveau des apports alimentaires, du degré de segmentation du plan d'alimentation et du niveau génétique du troupeau. Des niveaux d'efficacité similaires peuvent reposer sur des bases biologiques différentes. L'agrégation des performances individuelles au niveau du troupeau peut masquer des différences entre options de conduite du point de vue de l'élaboration de l'efficacité de conversion de la matière sèche en lait. Une des perspectives de ce travail est d'évaluer les performances des différentes options de conduite dans un environnement fluctuant et de voir si les différences au niveau de l'élaboration de l'efficacité sont à l'origine de différences dans la capacité d'adaptation du système troupeau.

4.6 Références

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y, 2004. Amélioration de l'autonomie alimentaire des élevages de ruminants : conséquences sur les fonctions de production et la longévité des femelles. 11èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 155-162.

Coquillard P et Hill D, 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Masson, Paris. 273p.

Coulon JB, Lescourret F, Faye B, Landais E, Troccon JL et Perochon L 1993. A description of LASCAR, a database for studying the productive life of dairy cows. Productions Animales 6, 151-160.

Coulon JB, Perochon L et Lescourret F, 1995. Pattern of milk production and live weight of dairy cows during their successive lactations. Annales de Zootechnie 44, 189-199.

Cournut S et Dedieu B, 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. Animal Research 53, 383-403.

Darnhofer I, 2009. Navigating the dynamics: resilient farms through adaptive management. Proceedings of the 60th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Barcelona, 24-27 August 2009. 289.

D'Hour P et Petit M, 1997. Influence of nutritional environment on reproductive performance of Limousin and Salers cows. In: Proceedings "Suckler cow workers meeting". Pullar D (Ed.), Kirbymoorside, United Kingdom, 15-18 October 1997.

Duru M, Croz P et Magda D, 2008. Conduite des couverts prairiaux : source de flexibilité. In : L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 57-71.

Friggens NC et Newbold JR, 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87-97.

Gibon A, 1994. Landscape preservation objectives and the sheep flock management in Meditarranean moutains. Proceedings of a meeting held within the technical consultation of the FAO-CIHEAM Network on Cooperative Sheep and Goat Research, Thessaloniki, Greece, 19-22 June 1994, 188-193.

Institut de l'Elevage, 2008. Hausse du prix des aliments, des pistes pour alléger les charges. 8p.

Landais E, 1987. Recherches sur les systèmes d'élevage. Questions et perspectives. Document de travail INRA SAD Versailles. Décembre 1987. 75p.

Lasseur J et Landais E, 1992. Mieux valoriser l'information contenue dans les carnets d'agnelages pour évaluer des performances et des carrières de reproduction en élevage ovin-viande. INRA Productions Animales 5, 43-58.

Lee GJ, Atkins KD et Sladek MA, 2009. Heterogeneity of lifetime performance, its components and associations with wool production and liveweight of Merino ewes. Animal Production Science 49, 624-629.

Lormore MJ et Galligan DT, 2001. Economics of atypical lactations. Journal of Dairy Science, 84(E. Suppl.), E212-E215.

Mellado M, Olivares L, Lopez R et Mellado J, 2005. Influence of lactation, liveweight and lipid reserves at mating on reproductive performance of grazing goats. Journal of Animal Veterinary Advances 4, 420-423.

Moulin CH, 1993. Performances animales et pratiques d'élevage en Afrique Sahélienne. La diversité du fonctionnement des troupeaux de petits ruminants dans la communauté rurale de NDiagne (Sénégal). Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France.

Peyraud JL, Le Gall A, Delaby L, Faverdin P, Brunschwig P et Caillaud D 2009. Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières demain? Fourrages 197, 47-70.

Puillet L, Martin O, Sauvant D et Tichit M, accepté. An individual-based model to simulate individual variability and herd long term performance. Animal.

Sauvant D, Giger-Reverdin S et Meschy F, 2007. Alimentation des Caprins. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quae, Versailles, France. 137-148

Thénard V, Trommenschlager JM et Catteau M, 2003. Caractéristiques des carrières laitières chez la vache : étude d'un troupeau expérimental sur dix années. 10èmes Rencontres de la Recherche autour des Ruminants, Paris, 115.

Tichit M, Hubert B, Doyen L et Genin D, 2004. A viability model to assess the sustainability of mixed herds under climatic uncertainty. Animal Research 53, 405-417.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J et Dedieu B, 2008. Capacités d'adaptation du troupeau: la diversité des trajectoires productives est-elle un atout? In : L'élevage en

mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 119-133

Vandehaar MJ, 1998. Efficiency of nutrient use and relationship to profitability on dairy farms. Journal of Dairy Science 81, 272–282.

Yachi S et Loreau M, 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 96, 1463–1468.

Discussion générale

Nous avons produit un simulateur individu-centré du fonctionnement du troupeau caprin laitier intégrant les principaux mécanismes d'élaboration des performances. Le simulateur a été conçu pour **générer la variabilité individuelle**. Il permet donc d'étudier les effets des pratiques de conduite sur la variabilité individuelle et en retour le rôle de cette dernière pour la construction des performances du troupeau. Son développement et son utilisation ont produit deux types de résultats, méthodologiques d'une part et sur le rôle de la variabilité individuelle dans l'élaboration des performances du troupeau en réponse aux pratiques d'autre part.

Une analyse critique des modèles de fonctionnement du troupeau existants a souligné la nécessité d'intégrer le pilotage de la partition de l'énergie entre les fonctions physiologiques afin de représenter à minima les bases biologiques au niveau de l'animal. Les priorités relatives entre fonctions peuvent être formalisées dans un cadre dynamique de façon simple. Nous avons proposé un cadre conceptuel de modèle minimal de chèvre laitière. Ce cadre articule un sous système régulateur et un sous système opérant. Il intègre les principaux déterminants des variations des réponses biologiques liés aux priorités relatives entre fonctions physiologiques, au potentiel de production et aux variations d'apports énergétiques liés à l'alimentation. Par ailleurs, l'analyse critique de la représentation des pratiques de conduite a montré l'importance du lot comme entité de gestion et son rôle dans le raisonnement conjoint de l'alimentation et de la reproduction et nous a conduits à proposer deux concepts clés : le lot fonctionnel et le motif élémentaire de gestion. Leur couplage dans un simulateur troupeau génère la variabilité individuelle.

Le rôle de la variabilité individuelle dans l'élaboration des performances du troupeau en réponse aux pratiques a été précisé par la mise en œuvre de plans d'expériences testant les effets du niveau des apports alimentaires, du degré de segmentation du plan d'alimentation et du niveau génétique moyen du troupeau. Les simulations ont montré que la variabilité des carrières se structurait autour de deux composantes : la longévité et la productivité d'une part et la construction de l'efficacité alimentaire d'autre part, sous l'influence combinée du niveau des apports alimentaires et du potentiel de production moyen du troupeau. Le simulateur a ainsi permis de quantifier les effets relatifs et combinés de différents leviers techniques. Différentes combinaisons de leviers de conduite pouvaient conduire à des efficacités alimentaires similaires en sollicitant des bases biologiques différentes et généraient des proportions contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production.

Ces différences dans l'élaboration de l'efficacité sont à relier avec des différences du niveau de risque associé aux modes de conduite. Au niveau du troupeau, le niveau d'alimentation et le potentiel de production moyen ont des effets très marqués sur la production et l'efficacité en lien avec la dilution des couts fixes de production. L'importance de cet effet de dilution conduit à une faible discrimination de certaines combinaisons de leviers techniques alors que celles-ci génèrent des différences importantes au niveau des individus. Ainsi, le diagnostic de la conduite du troupeau est effectivement enrichi par l'analyse de la variabilité individuelle et par l'intégration d'indicateurs liés à l'efficacité individuelle.

Dans ce chapitre nous discuterons la démarche globale de modélisation. Ensuite, nous proposerons différentes pistes d'améliorations du modèle en distinguant les questions au cœur de ce travail et de futures questions de recherche. Enfin, nous avancerons des pistes de réflexion autour de la contribution de la variabilité individuelle aux questionnements de la zootechnie des systèmes d'élevage.

1 Démarche de modélisation

1.1 Développement du simulateur

Le développement du simulateur SIGHMA a reposé sur l'articulation de différents champs de connaissances et de différentes méthodes de modélisation. Il combine un modèle de gestion technique et un ensemble de modèles de chèvres laitières qui ont été construits sous forme de deux sous-projets comportant chacun une étape de spécifications et de développement ainsi qu'une étape de connexion débouchant sur le simulateur.

1.1.1 Composante biotechnique

La représentation de la composante animale est mécaniste : l'individu est envisagé comme un système régulé réalisant la conversion d'aliments en lait et exploitant la flexibilité permise par l'élasticité ses réserves corporelles. Son fonctionnement est modélisé par une approche compartimentale simple représentant les flux d'énergie à l'origine des principales dynamiques biologiques. Les connaissances issues de la littérature et d'expérimentations analytiques ont été utilisées afin de quantifier les flux d'énergie. Avec le modèle de chèvre, nous proposons une représentation minimale de ce que nous attendons des réponses animales, directement intégrable dans un simulateur troupeau. A la différence des modèles existants dans lesquels l'énergie est allouée aux fonctions selon des règles fixes, notre représentation de l'individu innove en intégrant la formalisation explicite d'un système régulateur, apte à générer une dynamique des priorités relatives des différentes fonctions physiologiques.

1.1.2 Composante décisionnelle

La représentation de la composante décisionnelle s'appuie sur le principe de la simulation à évènements discrets. Les actions sur le troupeau sont représentées par une succession chronologique d'évènements regroupant les conditions et modalités d'exécution des opérations techniques, dans la continuité des simulateurs de Martel *et al.* (2008) et Cournut et Dedieu (2004). Notre originalité réside dans l'organisation du troupeau en lots fonctionnels qui traduisent les choix de l'éleveur dans la mise en œuvre de son projet. Le lot fonctionnel est le support des motifs élémentaires de gestion qui représentent l'organisation temporelle de

la conduite, notamment la combinaison des stratégies de reproduction et d'alimentation. Cette représentation conceptuelle de la gestion du troupeau basée sur des niveaux hiérarchisés d'organisation (individu, lot, troupeau) est essentielle pour formaliser le rôle des pratiques dans la construction de la variabilité individuelle. Notre approche se distingue de celle de Cournut et Dedieu (2004) et de Martel *et al.* (2008) par sa capacité à générer la construction de la variabilité individuelle par les pratiques, formalisées comme un système raisonné au niveau du lot sans nécessiter de base de données pour construire *a priori* la variabilité des réponses biologiques.

Le développement de la composante décisionnelle s'est appuyé sur les avancées conceptuelles de différents domaines de recherche (science de gestion, agronomie, zootechnie) et sur l'analyse du système réel. Cette analyse a été conduite à partir des différents documents de synthèse produits par les organismes de recherche-développement. Elle a également mobilisé l'expertise d'un comité technique composé des acteurs de la filière caprine. Notre approche valorise donc trois sources de connaissance fournies par la littérature scientifique et celles des instituts techniques ainsi que par l'expertise régionale. De ce point de vue, elle se distingue des modèles construits à partir d'enquêtes plus ou moins exhaustives en élevage (Martin *et al.*, 2009 ; Martel *et al.*, 2008) ou encore de ceux développés avec une démarche participative (Vayssières *et al.*, 2009). Ces modèles s'appuient sur des représentations conceptuelles développées dans d'autres disciplines (reprise de l'ontologie des systèmes de production de Martin-Clouaire et Rellier (2003) pour les modèles de Martin, (2009b) et de Vayssières *et al.*, (2009), des modèles biotechniques déjà implémentés (Vayssières *et al.*, 2009) ou une modélisation statistique des réponses animales (Martel *et al.* , 2008). Notre approche représente la décision de façon beaucoup plus planifiée que les modèles basés sur l'ontologie des systèmes de production. Ces modèles se focalisent sur l'adaptation de la décision en fonction de l'état du système alors que nous nous focalisons sur l'interaction entre la décision et les processus biotechniques. En revanche, nous avons identifié le même enjeu de généricité que les auteurs s'appuyant sur l'ontologie et l'avons pris en compte lors du développement du modèle conceptuel de gestion technique. Le simulateur est un prototype dont l'évolution future sera facilitée par ce souci de généricité.

1.2 Utilisation du simulateur pour la recherche

Comprendre le comportement d'un modèle composé de nombreux éléments en interaction repose sur sa manipulation lors de son évaluation interne, puis lors de son utilisation comme

outil de recherche. Le simulateur SIGHMA a été utilisé pour tester des scénarios de modification des leviers de conduite. Nous les avons conçus dans une logique de plans d'expériences qui a été essentielle pour garder une bonne maîtrise et une bonne compréhension du comportement du simulateur. Bien que l'injection de connaissances dans un modèle soit maitrisée par le modélisateur, le comportement final peut émerger des interactions, pas toujours prévisibles, de différents éléments et cette émergence nécessite une phase poussée d'analyse des sorties et de son réalisme. L'analyse de sensibilité du simulateur, réalisée sur 9 paramètres représentatifs de la conduite de l'alimentation (2 paramètres), de la reproduction (3 paramètres) et du renouvellement (2 paramètres) ainsi que sur le potentiel de production du troupeau (2 paramètres) a constitué une étape importante dans l'évaluation du comportement du simulateur. Par ailleurs, l'analyse des sorties pose des questions sur la quantification et la visualisation de la variabilité individuelle. Plus globalement son analyse est un vrai challenge. Compte tenu de la masse de données à traiter, les méthodes d'analyses descriptives, incluant des phases graphiques d'interprétation, nous semble devoir être privilégiées. Outre l'utilisation de techniques statistiques multivariées (*e.g.* analyse en composantes principales), nous avons proposé un principe de cartographie des densités d'individus dans un espace de variables caractérisant la carrière. Ces cartographies ont été utilisées dans une approche descriptive. Les méthodes de statistiques spatiales telles que celles proposées par Bivand *et al.* (2008) permettraient vraisemblablement d'aller plus loin dans la comparaison et la quantification des différences entre les cartographies. De même, les méthodes d'analyse fonctionnelle des données (Ramsay et Silverman, 2001) représentent une ressource intéressante pour valoriser les sorties des dynamiques individuelles. En effet, pour analyser et comparer un grand nombre d'individus entre eux, nous avons synthétisé les dynamiques biologiques avec un nombre réduit d'indicateurs (*e.g.* poids vif à 90 jours de la deuxième lactation). L'analyse fonctionnelle des données permettrait de caractériser ces dynamiques tout en conservant la richesse de l'information liée à l'aspect dynamique des données individuelles. Enfin, l'utilisation du simulateur pour traiter la question de la variabilité individuelle appelle un renouvellement de la conception de l'expérimentation animale. Les plans d'expérience sont encore plutôt conçus pour contrôler la variabilité individuelle, souvent sans l'interpréter, et analyser avec plus de puissance les effets moyens et interactions de traitements. Il conviendrait de réfléchir à des protocoles qui soient plus focalisés sur l'interprétation de la variabilité individuelle. Pour ce faire, deux pistes peuvent être envisagées : d'une part, la mise en place de séquences de différents niveaux de régimes testés sur le long terme pour capter les arrières-effets des périodes de traitement et d'autre

part, la nécessité de considérer le facteur animal comme une source de variabilité à étudier et non plus à contrôler. De tels protocoles permettraient de produire des lois de réponses intégrant la variabilité individuelle mais seraient relativement lourds à mettre en place.

L'utilisation du simulateur pose la question de son support informatique. Le développement du simulateur sous le logiciel Modelmaker a présenté plusieurs avantages. La programmation ne demande pas de compétences informatiques poussées et l'interface conviviale facilite son appropriation. De plus, Modelmaker permet de combiner une modélisation en temps continu, basé sur des flux entre compartiments et l'intégration numérique d'équations différentielles, avec une modélisation en temps discret basée sur des évènements discrets déclenchés par le temps ou des variables internes au modèle. Le développement d'un simulateur individu-centré pose également la question du traitement de la masse de données en sortie de simulation. Dans ce travail, la chaîne de traitements des sorties a mobilisé différents logiciels pour automatiser les calculs (macro Visual basic d'Excel pour générer les fichiers de données dont l'analyse a été menée sous R et SAS). La poursuite du développement du simulateur nécessitera cependant de s'interroger sur le support de programmation par rapport à des questions de portabilité[7], d'interface utilisateur et de vitesse de calcul. Cette question est d'autant plus intéressante à creuser que le simulateur pourrait être utilisé comme une ressource pédagogique pour que les étudiants appréhendent la complexité du fonctionnement d'un troupeau, réfléchissent aux déterminants de certains résultats et remobilisent par la pratique les connaissances acquises (Moulin et Bocquier, 2005).

1.3 Utilisation du simulateur pour le terrain

La constitution d'un comité technique a été une étape essentielle dans la compréhension et la représentation des règles de décision de conduite. Le comité aura également un rôle important dans l'évaluation du simulateur et sera sollicité prochainement sur les résultats de simulation. L'intérêt de l'interaction avec un groupe d'experts a déjà été souligné dans d'autres travaux (Jouven, 2006 ; Chardon, 2008). Au delà de cette organisation structurée du partenariat avec les acteurs de la filière, notre investissement dans les actions régionales d'animation de la filière caprine a également joué un rôle pour faire connaître notre travail.

[7] La portabilité d'un programme informatique désigne sa capacité à fonctionner plus ou moins facilement dans différents environnements d'exécution (http://fr.wiktionary.org/wiki/portabilité)

L'intérêt suscité par le simulateur a permis d'accéder à des données d'élevages très riches qui n'avaient pas été identifiées au départ de la thèse. Les collaborations avec les différents acteurs de la région ont ainsi permis de réunir, pour une dizaine d'élevages sur une période de 10 ans, des données individuelles sur la production et la reproduction et des données sur la production du troupeau et sa conduite. Une partie de ces données a été mobilisée dans l'analyse du système réel (chapitre 3, partie 1). Le travail de nettoyage et d'organisation de ces données dans une base structurée dans la même logique que celles rassemblant les sorties du simulateur est en cours. Cette base représente une perspective très intéressante pour l'évaluation du simulateur et pour la pérennisation du partenariat avec les acteurs de la région Poitou-Charentes.

Une dynamique forte de structuration de la filière caprine est en cours. Le centre INRA de Poitou-Charentes monte actuellement une expérimentation-système[8] autour des caprins (plateforme Patuchev). Ce nouveau type d'expérimentation, en contexte plus réaliste, entend cibler des objets plus complexes, en particulier des objets gérés. Le simulateur SIGHMA pourrait à la fois valoriser des données de plateforme mais également servir à la plateforme pour évaluer *ex ante* certaines options de conduite. Dans cette même logique, la région Poitou-Charentes lance le Biopôle Caprin qui se présente comme un dispositif de décloisonnement et de renforcement des synergies entre les acteurs en amont et en aval de la filière caprine. Le simulateur troupeau a sa place dans ces différentes actions, en particulier parce qu'il représente un outil de dialogue et de travail en commun prometteur. Il pourra aussi s'enrichir de ces démarches. Ces caractéristiques suggèrent qu'un modèle développé comme outil de recherche finalisé, et non comme un outil d'aide à la décision, peut toutefois s'avérer pertinent pour interagir avec les acteurs de terrain autour de la construction de scénarios de gestion et de la discussion de leurs résultats.

[8] L'expérimentation-système est définie comme un test expérimental pluridisciplinaire et pluriannuel (en situation plus ou moins contrôlée) visant à: i) expliciter le pilotage d'un système de production à travers des règles d'action préalablement construites (sur la base de connaissances explicitées ou à dire d'experts) et ii) évaluer l'atteinte ou non d'un ou plusieurs objectifs qui lui ont été assignés à travers une démarche d'évaluation souvent multicritère (d'après Dedieu *et al.*, 2002)

2 Pistes d'améliorations

2.1 Composante biotechnique

2.1.1 Animal

2.1.1.1 Questions de recherche autour de la variabilité individuelle

2.1.1.1.1 Réponses à l'alimentation

Les réponses individuelles à l'alimentation sont un élément clé du simulateur. Une première limite du modèle individuel est l'homogénéité de la loi de réponse de la production laitière brute aux variations d'apports énergétiques. Bien que les réponses aux apports varient en fonction du potentiel laitier, du stade physiologique et du niveau de réserves, les règles de partition de l'énergie entre les fonctions physiologiques sont les mêmes pour tous les individus. Ces règles sont cependant une source importante de variation des réponses individuelles (Friggens et Newbold, 2007). Il serait donc intéressant d'intégrer différentes règles de partition pour explorer plus en avant le rôle de la variabilité dans l'élaboration des performances du troupeau. Ces différentes règles pourraient être intégrées en distinguant des grands types de femelle comme par exemple des femelles ayant tendance à rediriger l'énergie vers le lait *versus* des femelles ayant tendance à rediriger l'énergie vers le poids vif. Une analyse de sensibilité plus exhaustive sur les coefficients de partition de l'énergie dans le modèle individuel serait une première étape vers la représentation de différents types de femelles.

Sur le volet efficacité de conversion alimentaire, le modèle pourrait être amélioré sur plusieurs points. Tout d'abord, il est nécessaire d'envisager de représenter l'élaboration des matières du lait (lactose, protéines et lipides) ainsi que les impacts des variations d'apport énergétique sur ces matières qui traduisent de façon plus complète la conversion des aliments par la femelle. Ces matières conditionnent la composition du lait (taux butyreux et taux protéique) et sont déterminantes pour son paiement. D'autre part, les rôles de l'alimentation azotée, comme outil de pilotage de la lactation et comme moyen de contrôle des rejets azotés ont été ignorés. La même limite peut être évoquée pour d'autres composantes impactant l'environnement (P, CH_4…). Ensuite, les risques d'acidose, liés aux variations d'apports

d'aliment concentré, sont une source de variabilité des performances. Cette question a été traitée et les effets liés à l'acidose ont pu être modélisés de façon prometteuse (Desnoyers *et al.*, 2009). Enfin, l'analyse de l'efficacité pose la question de l'évaluation des équivalents énergétiques et pondéraux des variations de réserves (Sutton et Alderman, 2000), en particulier en début de lactation (Chilliard *et al.*, 1987). Cette période est délicate du point de vue de la quantification des valeurs énergétiques associées aux variations pondérales de réserves corporelles étant donné l'évolution simultanée de l'ingestion, des contenus digestifs et des réserves (mobilisation du tissu adipeux et involution utérine).

2.1.1.1.2 Réserves corporelles et reproduction

Le modèle individuel intègre le rôle des réserves corporelles par rapport au fonctionnement énergétique de l'individu. Le rôle mémoire de ce compartiment physiologique est essentiel dans la détermination des réponses productives (Broster et Broster, 1984). Cet aspect n'a été que partiellement pris en compte dans le modèle individuel. En particulier, celui-ci n'intègre pas la régulation de l'ingestion par le niveau de réserves ce qui explique, par exemple, la forte persistance des effets de l'alimentation sur la dynamique de poids vif à l'échelle de la carrière. Intégrer un contrôle de l'ingestion permettrait d'améliorer la précision des dynamiques de poids vif simulées. Les réserves corporelles méritent également un développement plus poussé en raison de leur rôle sur la fertilité des femelles (Lopez-Gatius *et al.*, 2002 ; Mellado *et al.*, 2005). L'indépendance entre les variables caractérisant la longévité et celles décrivant le mode de construction de l'efficacité alimentaire, mise en évidence par l'analyse en composante principale, est peut être une conséquence de cette absence d'interaction entre nutrition et reproduction. Ces interactions sont pourtant structurantes dans le déroulement des cycles biologiques individuels, notamment par rapport à leur impact sur la longévité (travaux de D'Hour et Petit, 1997 cités par Blanc *et al.*, 2004). Par ailleurs, la formalisation de la reproduction reste assez frustre dans le modèle. La probabilité de fécondation d'une femelle dépend du sous-lot de lutte auquel elle appartient. Cette probabilité reflète l'application d'une technique de reproduction spécifique (*e.g.* IA *versus* lutte naturelle). La représentation de la reproduction pourrait être améliorée dans une première approche en considérant une composante individuelle génétique de la fertilité (au même titre que le potentiel laitier et le poids vif mature) et en intégrant un effet du niveau des réserves sur la fertilité. Les données de l'UMR PNA ainsi que celle de la station expérimentale du Pradel pourraient être combinées pour déterminer une relation empirique entre le niveau des réserves ou la note d'état et la fertilité.

2.1.1.1.3 Carrière

Pour explorer plus avant la variabilité des carrières, deux aspects de la carrière productive mériteraient d'être approfondis. Un premier aspect concerne les connaissances sur les arrières-effets de la phase d'élevage sur la carrière laitière d'une chevrette (aptitude à la reproduction ou à la production laitière). La seule étude disponible en chèvre laitière a porté sur les effets de l'alimentation sur les performances lors de la première mise à la reproduction (Bocquier *et al.*, 1998). A notre connaissance, les effets à long terme de la phase d'élevage sur les performances laitières et reproductrices ultérieures n'ont pas été étudiés. Un deuxième aspect concerne les connaissances sur les lactations longues. Nous avons supposé dans ce travail que les dynamiques de poids vif et de production laitière résultaient uniquement d'un effet de l'alimentation. Cette hypothèse doit être vérifiée. Les études actuelles disponibles sur la lactation longue porte uniquement sur la production laitière (Salama *et al.*, 2005) et à notre connaissance aucune étude n'a porté sur l'évolution du poids vif. Les effets de la lactation longue sur la fertilité ont également été peu étudiés (Gendron et Reveau, 1994). Cette pratique, qui se développe également dans les troupeaux de vaches laitières où la dégradation des performances de reproduction est plus importante que dans les troupeaux de chèvres laitières (Knaus, 2009), amène des questions intéressantes par rapport à sa formalisation en termes de priorités entre fonctions.

2.1.1.2 Questions de recherche futures

La remise en question de l'utilisation des traitements hormonaux pour synchroniser les cycles des femelles implique le recours à des techniques alternatives comme l'effet mâle (Pellicer-Rubio *et al.*, 2009). Le niveau de maitrise et de réussite des techniques alternatives aura un impact sur l'étalement des stades physiologiques et donc sur la variabilité individuelle. Le simulateur ouvre des perspectives intéressantes puisqu'il permet de tester l'interaction entre l'étalement des stades physiologiques et la stratégie d'alimentation. Toutefois, l'exploration de ces nouvelles questions impliquerait de considérer la reproduction de façon plus mécaniste pour intégrer les aspects de cyclicité, de saisonnalité et de synchronisation des cycles. Les travaux de Blanc et Agabriel (2008) sur la modélisation de la reproduction représentent une voie intéressante à examiner. Le simulateur pourrait aussi être utilisé pour explorer plus avant la question de la maîtrise de la reproduction en représentant la diffusion du progrès génétique dans le troupeau et plus particulièrement l'aptitude au désaisonnement. Ces questions sont actuellement étudiées par l'unité expérimentale INRA de Bourges. Enfin, pour traiter des questions autour des aspects sanitaires, les données de

l'AFSSA de Niort sur les mammites ou la paratuberculose permettraient d'intégrer une composante sanitaire, qui pourrait, en première approche, être introduite de façon stochastique. Les dimensions sanitaires sont susceptibles de prendre de l'importance puisqu'à l'heure actuelle les troupeaux tendent à s'agrandir ce qui favorise l'apparition de pathologies.

La démarche de modélisation que nous avons adoptée facilitera l'implémentation des différentes pistes d'amélioration de la composante animale évoquées ci dessus. En effet, la connexion entre le modèle individuel et le modèle de gestion s'opère au niveau des entrées d'aliments et des indicateurs nécessaires à la réalisation des évènements. Dès lors qu'un modèle individuel fonctionne sur la base d'entrée d'aliments et fournit les indicateurs nécessaires aux évènements, il peut être incorporé dans le simulateur. Les modèles animaux basés sur une approche téléonomique (Martin, 2009b) constituent des approches potentiellement intéressantes pour faire évoluer à long terme le simulateur.

2.1.2 Ressources du système d'élevage

Le simulateur fonctionne avec une dynamique et un niveau des ressources alimentaires déterminés uniquement par la stratégie d'alimentation. La dynamique des apports pour le troupeau est donc indépendante d'une dynamique de disponibilités des ressources. L'intégration d'une variabilité sur la composante « ressources alimentaires » permettrait d'étudier comment la variabilité de l'offre alimentaire interagit avec la variabilité des performances individuelles, notamment dans des systèmes avec une part des ressources alimentaires assurées par du pâturage. La variabilité des ressources pourrait être intégrée *a minima* en incluant dans les aliments une ressource « herbe pâturée ou fauchée » dont la qualité serait variable dans le temps. Les tables d'alimentation permettent de faire *a minima* une telle adaptation. Celle-ci permettrait d'intégrer une variation intra-annuelle de la qualité de l'offre fourragère pour étudier les performances de différentes formes d'organisation de la reproduction (nombre de lots et périodes de mises-bas). Cette adaptation permettrait également de simuler des années médiocres d'un point de vue fourrager, *e.g.* foin récolté en mauvaises conditions climatiques, et étudier les effets de cet aléa sur les performances du troupeau et la variabilité des carrières. Ces adaptations centrées sur une composante dynamique de la qualité d'une ressource sont envisageables à moindre coût dans le simulateur. En revanche, formaliser la variabilité de ces mêmes ressources sur le plan quantitatif est difficilement envisageable sans représenter explicitement le parcellaire et son

utilisation par différents lots d'animaux. Ceci constitue clairement le développement à part entière d'un autre simulateur.

2.2 Composante décisionnelle

2.2.1 Questions de recherche autour de la variabilité individuelle

Notre simulateur représente la décision comme un processus très planifié. Dans une perspective d'analyse des réponses du troupeau et de la variabilité individuelle à une perturbation exogène, il est nécessaire d'intégrer *a minima* différentes options d'adaptation des décisions par rapport à une baisse d'effectifs (*e.g.* achat de chevrettes, recours massif aux lactations longues) ou à une baisse de l'offre alimentaire (*e.g.* achats extérieurs ou non). Il serait également intéressant d'envisager un approfondissement du concept d'animal pilote, en envisageant par exemple la possibilité de le modifier en cours de campagne ou encore de le décliner en intégrant en plus de l'individu moyen, par exemple les individus quartiles.

2.2.2 Questions de recherche futures

Pour explorer le rôle de la flexibilité décisionnelle du système, une des perspectives d'amélioration serait le développement d'une plus grande adaptation de la décision en fonction de l'état du système piloté. Les apports de l'ontologie des systèmes de production (Martin-Clouaire et Rellier, 2003) représentent une piste importante et déjà éprouvée (Chardon, 2008 ; Vayssières *et al.*, 2009).

Enfin une dernière voie d'amélioration du simulateur consisterait à enrichir les déterminants du projet d'élevage. Nous avons considéré la dimension productive du projet de l'éleveur et structuré la décision autour de la réalisation d'une courbe de livraison laitière. Les contraintes liées au travail prennent de plus en plus d'importance dans les troupeaux de grande taille et sont une composante à part entière du projet de l'éleveur (Dedieu *et al.*, 2006 ; Martel *et al.*, 2008). Il serait également possible d'enrichir le projet de l'éleveur en intégrant les différentes catégories de surface de l'exploitation qui produisent des ressources alimentaires pour l'atelier d'élevage (Chardon, 2008), ceci permettrait de définir *a priori* les stratégies d'alimentation.

3 Contribution de la variabilité individuelle aux questionnements de la zootechnie des systèmes d'élevage

L'importance de la variabilité individuelle dans les systèmes biologiques n'est pas nouvelle. Cette thématique est au cœur des questionnements en écologie (Réale *et al.*, 2007), en écophysiologie (Williams, 2008) ou en économie évolutive (Rammel et van den Bergh, 2003). La variabilité est vue comme un moyen de comprendre les processus se déroulant aux niveaux d'organisation sous-jacents d'un système mais elle est également vue comme un déterminant majeur des propriétés du système à son niveau le plus agrégé. Dans le champ de la zootechnie des systèmes d'élevage, les réflexions autour de la variabilité individuelle des réponses animales ont été conduites initialement dans le cadre des systèmes d'élevages extensifs (Landais et Balent, 1993). Ces systèmes étaient vus comme : *i*) autonomes et économes ; *ii*) générateurs de diversité des performances et *iii*) basés sur un pilotage « lâche » des cycles biologiques. A l'opposé, les systèmes d'élevage intensifs étaient vus comme des systèmes : *i*) poursuivant un objectif de maximisation des performances techniques de production (végétales comme animales) ; *ii*) générateurs d'homogénéité de performances et *iii*) basés sur un pilotage très fin des cycles biologiques et une artificialisation du milieu d'élevage permettant de s'affranchir des contraintes environnementales.

Différents arguments remettent en cause cette opposition entre élevages intensifs et extensifs. Les attentes sociétales en termes de durabilité des productions animales ont repositionné la maîtrise des coûts au centre des questionnements. Elles interrogent les modèles intensifs dont les coûts de structure sont considérables et fragilisent ces systèmes notamment sur le plan de leur transmissibilité. L'artificialisation du milieu d'élevage et sa capacité à homogénéiser les performances individuelles est un leurre du point de vue de la physiologie, connu depuis longtemps (Bauman, 1985). Cet auteur a montré que deux femelles issues d'un même troupeau, avec le même niveau génétique, le même poids vif et le même niveau d'ingestion peuvent, sur les deux premiers mois post-partum, exprimer des écarts énormes aussi bien en termes de production laitière (216%) que de poids vif (133%). Même en conditions intensives, les animaux expriment des compromis entre fonctions (Friggens et Newbold, 2007). Le déclin des performances reproductives des vaches laitières en lien avec

l'accroissement de leur niveau de production en est une illustration (Knaus, 2009). La question de la robustesse des animaux n'est plus seulement appréhendée par les zootechniciens des systèmes d'élevage, elle intéresse également par les généticiens (Ellen *et al.*, 2009). La vision des systèmes intensifs comme des systèmes appliquant un pilotage fin des cycles est également remise en question par l'agrandissement des troupeaux. Les contraintes liées au travail impliquent moins d'attention portée aux animaux. Cette simplification des pratiques est susceptible de générer une variabilité des contraintes pour les individus. Une synthèse portant sur des systèmes d'élevage très contrastés montre qu'il n'existe pas de lien univoque entre le projet d'élevage, le niveau de contrainte du milieu et la diversité des carrières trajectoires reproductives des individus (Tichit *et al.*, 2008). Des projets intensifs du point de vue des attentes sur le niveau de performances peuvent reposer sur une diversité de trajectoires (Cournut et Dedieu, 2004) ou pas (Ingrand, 1999). A l'inverse des projets extensifs peuvent passer par une homogénéisation des trajectoires, *i.e.* un rythme imposé pour pouvoir surmonter des périodes où les contraintes environnementales sont fortes (Tichit, 1998).

Ces différents éléments positionnent la variabilité individuelle comme une clé de l'analyse des propriétés régulatrices du troupeau et comme un élément de pilotage du système, qu'il soit intensif ou extensif. Dans une perspective appliquée, l'agenda de recherche autour de la variabilité individuelle peut se définir ainsi : comment concevoir des pratiques de conduite modulant la variabilité individuelle de telle sorte qu'elle confère des propriétés de résilience et de stabilité au troupeau ? SIGHMA illustre le potentiel de la modélisation pour explorer cette problématique. Il ouvre quatre grandes pistes de recherche.

→ Anticiper le déroulement des carrières dans un système de conduite pour optimiser l'efficacité individuelle et accroitre la flexibilité de la conduite

Cette question renvoie notamment à la compréhension des arbitrages entre performances court-terme et long-terme et à l'utilisation de ces arbitrages pour ajuster la longévité d'une femelle avec les pratiques de réforme et garantir l'amortissement des phases improductives. Cette question a été à l'origine de travaux sur les carrières (*e.g.* Coulon *et al.*, 1993). La prédiction de la longévité à partir d'indicateurs précoces est également une question des généticiens travaillant sur la sélection de la longévité fonctionnelle (Miglior et Sewalem, 2009). Comprendre les arbitrages entre performances court-terme et long-terme permettrait d'identifier des types fonctionnels de femelles, comme par exemple des femelles précoces

mais vite épuisées *versus* des femelles tardives mais endurantes. L'identification et la gestion de ces types pourraient être une source de flexibilité pour la conduite du troupeau. Une ébauche de cette approche a été proposée par Santucci (1991) et Gibon (1994). Ce dernier suggère notamment que l'existence de différents types fonctionnels de femelles au sein du troupeau traduit une adaptation aux contraintes du milieu montagnard. Une telle approche en termes de types fonctionnels est déjà développée par les agronomes dans le cadre de la gestion des prairies (Duru *et al.*, 2008). Cet auteur montre que les types fonctionnels de plantes donnent de la souplesse en termes d'organisation de la conduite du système fourrager. Cette flexibilité dans l'organisation du système fourrager est une des sources de régulation interne des systèmes d'élevage comme l'ont montré les récents travaux de modélisation d'Andrieu *et al.* (2007) et Martin (2009a). D'autres travaux mettent l'accent sur la composante animale et sa flexibilité comme source de régulation interne du système d'élevage (Blanc *et al.*, 2008) ou sur les régulations permises par les mouvements de femelles entre sessions de mise bas (Cournut et Dedieu, 2004). Faire converger les travaux centrés sur les systèmes fourragers et sur le troupeau rendrait possible la hiérarchisation et la quantification des régulations conférées par la composante animale et végétale du système d'élevage.

→ Valoriser les capacités d'adaptation des femelles pour optimiser l'efficacité d'un plan d'alimentation

L'hypothèse ici est qu'une utilisation durable des ressources alimentaires doit passer par une optimisation de l'efficacité mais que l'efficacité doit être abordée dans une approche multicritère intégrant explicitement les réserves corporelles. La question est alors de comprendre comment utiliser l'aptitude des femelles à mobiliser pour valoriser au mieux l'alimentation en évitant les situations de rupture biologique. Des travaux ont montré que le recours aux aptitudes de mobilisation et reconstitution des individus permet d'améliorer leur efficacité alimentaire (Atti et Bocquier, 1999 ; Ford et Park, 2001). Cette piste autour de la valorisation de l'aptitude des femelles à utiliser leurs réserves doit être envisagée à l'échelle du lot. Ceci demande d'identifier le plan et le niveau de rationnement du lot permettant de valoriser de façon la plus efficace possible la transformation d'aliment en lait. Des travaux centrés sur l'alimentation hivernale des brebis laitières montrent que la mise en lot à partir de critères basés sur le niveau de production laitière permet une économie d'aliment concentré (Bocquier *et al.* 1995). La question de l'économie d'aliment concentré est d'autant plus

importante pour des systèmes intensifs où les animaux sont alimentés à l'auge toute l'année. Cependant, la mise en place de plusieurs lots d'alimentation implique une augmentation des charges de travail. Il se pose alors la question du compromis entre l'allotement qui est une voie d'optimisation de l'utilisation des aliments et les contraintes de travail qui sont susceptibles de déboucher sur une simplification de l'allotement.

→ Accroître les propriétés de résilience d'un troupeau dans un environnement fluctuant

Deux grands types de fluctuations environnementales peuvent être envisagés : les fluctuations liées à la disponibilité ou au prix des ressources alimentaires et les fluctuations générant des variations brusques d'effectifs, tels qu'une baisse de la fertilité ou une augmentation de la mortalité. La vitesse de retour du troupeau au niveau de performances avant la perturbation, *i.e.* sa résilience, s'appuie sur la variabilité des cycles individuels au sein du troupeau. Cette variabilité étant modulée par les pratiques, elle représente ainsi un maillon pour diagnostiquer les pratiques de conduite du point de vue de la résilience qu'elles confèrent aux performances du troupeau. Dans le cas d'une fluctuation liée aux ressources, on peut penser que la résilience du système s'appuiera plutôt sur la variabilité des capacités biologiques d'adaptation des individus. Dans le cas d'une fluctuation liée aux effectifs, la résilience du système s'appuiera plutôt sur la flexibilité de la conduite.

→ Prévoir l'expression d'un génotype dans un environnement d'élevage donné

Prédire l'expression d'un génotype dans un environnement permettrait d'évaluer les stratégies de sélection à long terme. Cette évaluation implique d'être en mesure de prédire les effets des interactions génotype x environnement sur l'expression d'un trait phénotypique, support de la sélection génétique. La question de l'expression d'un génotype dans un environnement d'élevage donné n'est plus seulement une question des généticiens mais également une question de zootechniciens. Le changement de paradigme en nutrition animale implique de proposer non plus des systèmes de conduite qui permettent d'exprimer le potentiel laitier des animaux, mais de disposer d'animaux dont le matériel génétique est cohérent avec le système de conduite (Peyraud *et al.*, 2009).

4 Références bibliographiques

Andrieu N, Poix C, Josien E et Duru M, 2007. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. Computers and Electronics in Agriculture 55, 36-48.

Atti N et Bocquier F, 1999. Adaptation des brebis Barbarine à l'alternance sous-nutrition-réalimentation : effets sur les tissus adipeux. Annales de Zootechnie 48, 189-198.

Bauman DE, 1985. Sources of variation and prospects for improvement of productive efficiency in the dairy cow: a review. Journal of Animal Science 60, 583-592.

Bivand RS, Pebesma EJ et Gómez-Rubio V, 2008. Applied Spatial Data Analysis with R. UseR! Series, Springer, 378 p.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y, 2004. Amélioration de l'autonomie alimentaire des élevages de ruminants : conséquences sur les fonctions de production et la longévité des femelles. 11èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 155-162.

Blanc F et Agabriel J, 2008. Modelling the reproductive efficiency in a beef cow herd: effect of calving date, bull exposure and body condition at calving on the calving-conception interval and calving distribution. Journal of Agricultural Science 146, 143-161.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y, 2008. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In : L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 73-94.

Bocquier F, Guillouet P et Barillet F, 1995. Alimentation hivernale des brebis laitières : intérêts de la mise en lots. INRA Productions Animales 8, 19-28.

Bocquier F, Leboeuf B, Rouel J et Chilliard Y, 1998. Effet de l'alimentation et des facteurs d'élevage sur les performances de reproduction de chevrettes Alpines. INRA Productions Animales 11, 311-320.

Broster WH et Broster VJ, 1984. Reviews of the progress of dairy science: long term effects of plane of nutrition on the performance of the dairy cow. Journal of Dairy research, 51, 149-196.

Chardon X, 2008. Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynmaique de leur fonctionnement et des flux de matière : développement et application du simulateur MELODIE. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, France.

Chilliard Y, Sauvant D, Morand-Fehr P et Delouis C, 1987. Relations entre le bilan énergétique et l'activité métabolique du tissu adipeux de la chèvre au cours de la première moitié de la lactation. Reproduction Nutrition Développement 27, 307-308.

Coulon JB, Lescourret F, Faye B, Landais E, Troccon JL et Pérochon L, 1993. Description de la base de données "LASCAR", un outil pour l'étude des carrières des vaches laitières. INRA Productions Animales 6, 151-160.

Cournut S et Dedieu B, 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. Animal Research 53, 383-403.

Dedieu B, Servière G, Dobremez L, Malderieux S et Cournut S, 2006. Comment appréhender conjointement les changements techniques et les changements du travail en élevage ? Cahiers Agricultures 15, 506-513.

Dedieu B, Louault F, Tournadre H, Benoit M, De Montard FX, Theriez M, Brelurut A, Toporenko G, Pailleux JY, Teuma JB and Lienard G, 2002. Conception de systèmes d'élevage intégrant des preoccupations environnementales: contribution d'une expérimentation système en ovin viande. 9èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, France. 391.

Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Duvaux-Ponter C et Sauvant D, 2009. Modeling of off-feed periods caused by subacute acidosis in intensive lactating ruminants: Application to goats. Journal of Dairy Science 92, 3894-3906.

D'Hour P et Petit M, 1997. Influence of nutritional environment on reproductive performance of Limousin and Salers cows. In: Proceedings "Suckler cow workers meeting". Pullar D (Ed.), Kirbymoorside, United Kingdom, 15-18 October 1997.

Duru M, Cruz P et Magda D, 2008. La conduite des couevrst prairiaux, source de flexibilité. In : L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 57-71.

Ellen ED, Star L, Uitdehaag K et Brom FWA, 2009. Robustness as a breeding goal and its relation with health, welfare and integrity. In: Breeding for robustness in cattle. Klopčič M, Reents R, Philipsson J and Kuipers A (Eds). EAAP Publication, Wageningen, the Netherlands. 45-53.

Ford JA, Jr et Park CS, 2001. Nutritionally directed compensatory growth enhances heifer development and lactation potential. Journal of Dairy Science 84, 1669-1678.

Friggens NC et Newbold JR, 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87-97.

Gendron P et Reveau A, 1994. La conduite des chèvres en lactation longue. Chambre d'agriculture Charente, 26 p.

Gibon A, 1994. Landscape preservation objectives and the sheep flock management in Meditarranean moutains. Proceedings of a meeting held within the technical consultation of the FAO-CIHEAM Network on Cooperative Sheep and Goat Research, Thessaloniki, Greece, 19-22 June 1994, 188-193.

Ingrand S, 1999. Constitution de lots de vaches dans les élevages allaitants : effet de l'hétérogénéité intra-lot des besoins nutritionnels sur le niveau d'ingestion et le comportement alimentaire des vaches charolaises. Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France.

Jouven M, 2006. Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers? Une approche par modélisation des interactions conduite-troupeau-ressources. Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France.

Knaus W, 2009. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. Journal of the Science of Food and Agriculture 89, 1107-1114.

Landais E et Balent G, 1993. Introduction à l'étude des systèmes d'élevage extensif. INRA, Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement 27, 13-35.

Lopez-Gatius F, Yaniz J et Madriles-Helm D, 2002. Effects of body condition score and score change on the reproductive performance of dairy cows: a meta-analysis. Theriogenology 59, 801-812.

Martel G, Dourmad JY et Dedieu B, 2008. Simulation of sow herd dynamics with emphasis on performance and distribution of periodic task events. Journal of Agricultural Science 146, 345-380.

Martin G, 2009a. Analyse et conception de systèmes fourragers flexibles par modélisation systémique et simulation dynamique. Thèse de doctorat, SEVAB, Toulouse, France.

Martin O, 2009b. Modélisation systémique des performances des femelles de ruminants. Application au cas de la vache laitière. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, France.

Martin G, Hossard L, Theau JP, Therond O, Josien E, Cruz P, Relllier JP, Martin-Clouaire R et Duru M, 2009. Characterizing potential flexibility in grassland use. Application to the French Aubrac area. Agronomy for Sustainable Development 29, 381-390.

Martin-Clouaire R and Relllier JP 2003. A conceptualization of farm management strategies. In: Proceedings of EFITA Conference, Debrecen, Hungary.

Mellado M, Olivares L, Lopez R et Mellado J, 2005. Influence of lactation, liveweight and lipid reserves at mating on reproductive performance of grazing goats. Journal of Animal Veterinary Advances 4, 420-423.

Miglior F et Sewalem A, 2009. A review on breeding for functional longevity of dairy cow. In: Breeding for robustness in cattle. Klopčič M, Reents R, Philipsson J and Kuipers A (Eds). EAAP Publication, Wageningen, the Netherlands. 113-127.

Moulin CH et Bocquier F, 2005. Adaptation de l'enseignement supérieur en sciences animales à un monde en mutation : conséquences sur la pédagogie et la transmission des savoirs. 12èmes Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 53-56.

Pellicer-Rubio MT, Ferchaud S, Freret S, Tournadre H, Fatet A, Boulot S, Pavie J, Leboeuf B et Bocquier F, 2009. Les méthodes de maîtrise de la reproduction disponibles chez les mammifères d'élevage et leur intérêt en agriculture biologique. INRA Productions Animales 22, 255-270.

Peyraud JL, Le Gall A, Delaby L, Faverdin P, Brunschwig P et Caillaud D 2009. Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières demain? Fourrages 197, 47-70.

Rammel C et van den Bergh JCJM , 2003. Evolutionary policies for sustainable devleopment: adaptive flexibility and risk minimising. Ecological Economics 47, 121-133.

Ramsay JO et Silverman BW, 2001. Functional Data Analysis. In: International encyclopedia of the social & behavioral sciences. Smelser NJ and Baltes PB (Eds). Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. 5822-5828.

Réale D, Reader SM, Sol D, McDougall PT et Dingemanse NJ, 2007. Integrating animal temperament within ecology and evolution. Biological Reviews 82, 291-318.

Salama AAK, Caja G, Such X, Casals R et Albanell E, 2005. Effect of pregnancy and extended lactation on milk production in dairy goats milked once daily. Journal of Dairy Science 88, 3894-3904.

Santucci P, 1991. Le troupeau et ses propriétés régulatrices, bases de l'élevage extensif. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France.

Sutton JD et Alderman G, 2000. The energy and protein requirements of pregnant and lactating dairy goats. The Agriculture and Food Research Council report. Livestock Production Science 64, 3-8.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J et Dedieu B, 2008. Capacités d'adaptation du troupeau: la diversité des trajectoires productives est-elle un atout? In : L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M (Eds). Editions Quae, Versailles, France. 119-133

Tichit M, 1998. Cheptels multi-espèces et stratégies d'élevage en milieu aride : analyse de la viabilité des systèmes pastoraux camélidés ovins sur les hauts plateaux boliviens. Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France,

Vayssières J, Guerrin F, Paillat JM et Lecomte P, 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I – Whole-farm dynamic model. Agricultural Systems 101, 128-138.

Williams TD, 2008. Individual variation in endocrine systems: moving beyond the "tyranny of the Golden Mean". Philosophical transactions of the Royal Society of Biology 363, 1687-1698.

Conclusion

L'importance croissante des incertitudes pesant sur les **systèmes d'élevage** remet la **variabilité individuelle** à l'agenda scientifique des zootechniciens. Comprendre les effets des pratiques de conduite sur la variabilité des réponses biologiques est un élément clé pour accroitre notre compréhension des propriétés de résilience des systèmes vivants. Le **simulateur du troupeau caprin SIGHMA** développé dans cette thèse contribue à cet objectif en permettant de caractériser et quantifier la variabilité individuelle en réponse aux pratiques de conduite.

L'originalité du simulateur réside dans le couplage entre un **modèle de gestion** et un **modèle biotechnique**. Chaque composante du simulateur a été développée avec le souci d'intégrer les déterminants de la variabilité individuelle. Le modèle de gestion repose sur le niveau du lot, défini de façon fonctionnelle. Ce niveau représente le lien entre un **projet d'élevage** et des **opérations techniques**. Il confère de la généricité au simulateur qui peut simuler différents types de projet. Le lot fonctionnel est le support d'une stratégie d'alimentation et de reproduction, formalisée grâce au concept de « motif élémentaire de gestion ». Il permet de combiner des pratiques globales raisonnées sur la base du lot avec des pratiques différenciées raisonnées sur la base de l'individu. Le modèle de chèvre laitière incorpore les déterminants de la variabilité des réponses biologiques et permet ainsi de simuler le déroulement du cycle biologique des individus. L'ensemble des évolutions de chaque modèle individuel dans l'espace d'évènements relatifs à la conduite fait ainsi de SIGHMA « un **générateur** » de variabilité individuelle.

L'intérêt potentiel de l'**outil** peut être accru en jouant sur les choix de représentation de l'animal et sur la formalisation de la flexibilité décisionnelle. L'enjeu du travail de thèse était de mener jusqu'au bout le couplage de la conduite et des individus. La modélisation étant par nature un processus heuristique, il convient maintenant de réinterroger les représentations des composantes du simulateur.

Malgré ces limites, les résultats des simulations ont montré le potentiel du simulateur pour dissocier et quantifier les effets relatifs de la **conduite de la reproduction et de l'alimentation**. L'intégration d'indicateurs fins du fonctionnement biologique des individus au sein du troupeau ouvre des perspectives pour renouveler le cadre d'analyse des effets des pratiques. L'ensemble des résultats montre que la variabilité individuelle est un maillon essentiel pour la compréhension de l'effet des pratiques et pour la compréhension de l'élaboration des performances au niveau d'organisation supérieur, *i.e.* le troupeau. De

nouveaux développements sont à envisager pour étudier les effets des pratiques de conduite dans un environnement fluctuant et poursuivre ainsi l'exploration du rôle de la variabilité individuelle.

Ces perspectives d'évolution du simulateur permettent d'envisager un ensemble de collaborations scientifiques, tant sur la représentation de la physiologie que la représentation de la décision. Au delà des collaborations nécessaires à l'amélioration du simulateur, les questions théoriques qu'il soulève autour de la variabilité laissent également entrevoir des collaborations interdisciplinaires riches avec des domaines scientifiques comme l'écologie évolutive où la variabilité individuelle est au cœur des questions de recherche.

Annexes

Annexe 1 Analyse statistique des données du troupeau expérimental de l'UMR PNA

1. Objectifs

Le développement du modèle de chèvre laitière a reposé sur l'évaluation des règles de priorités entre fonctions physiologiques à partir de la littérature. Cette approche a été complétée par une analyse des données du troupeau expérimental de l'UMR PNA. L'objectif de cette analyse était d'étudier :

- les relations entre paramètres de la gestation (prolificité et poids de portée) et le niveau de maturité
- les relations entre le poids vif et la production laitière sur le début de lactation et le poids vif et la production laitière en milieu de lactation pour différents niveaux de prolificité et de maturité.

2. Matériels et méthodes

Données

Les données de 426 cycles de gestation lactation de 266 chèvres multipares (+ 7 mois) enregistrées entre 2002 et 2006 ont été utilisées dans l'analyse. Les chèvres étaient de race Alpine ou Saanen et ont été élevées dans des conditions intensives. Les données comprennent des informations sur la race (RA: Saanen = 0 ; Alpine = 1), le rang de lactation (NLAC : 1, 2, 3 et plus), la prolificité (PRO), le poids de portée (PCHV en kg) ainsi que des mesures hebdomadaires de poids vif (PV en kg) et de production laitière (PL en kg). La date de fécondation a été estimée à partir de la date de mise-bas. Le relevé de poids vif le plus proche de cette date de fécondation a été considéré comme le poids vif à la saillie (PV_S). Cette information a été estimée pour 330 cycles. La variable GAINGEST (kg) représente l'augmentation pondérale liée à la croissance et au stockage de réserves pendant la gestation. Elle a été calculée par différence entre le poids vif à la saillie et le poids vif juste après la mise-bas. La lactation a été divisée en deux périodes. La période 1 s'étend de la mise-bas à la 7ème semaine de lactation afin d'étudier la perte de poids vif et l'augmentation de la

production laitière. La période 2 s'étend de la 7ème semaine à la 27ème semaine de lactation afin d'étudier la persistance laitière et la reconstitution des réserves corporelles. La période 2 a été stoppée à la 27ème semaine afin d'exclure les femelles dont le stade de gestation dépassaient 50 jours de gestation. Les moyennes de production laitière ont été calculées pour la période 1 (PL_1) et pour la période 2 (PL_2).

Analyse statistique

Niveau de maturité et paramètres de gestation

Le niveau de maturité a été évalué sur la base du poids vif à la mise-bas (reflétant le format de l'animal) et sur la base du rang de lactation (reflétant l'âge de l'animal). Afin d'analyser les effets du niveau de maturité sur les paramètres de gestation, des tests de chi-deux sur des tables de contingence ont testés les effets de NLAC et RA sur PRO. Les effets de NLAC et PRO sur PCHV ont été testés avec le modèle quadratique suivant

$$PCHV_i = m + NLAC + NLAC^2 + PRO + PRO^2 + (PRO \cdot NLAC) + RA + e_i$$

où m = intercept et e_i = résidu.

Les effets de PCHV, de NLAC et de RA sur GAINGEST ont été testés avec un modèle de variance-covariance (Minitab software, version 12.2, Minitab Inc., 1998).

Poids vif et production laitière

Les cinétiques de PV ont été ajustées sur la période 1 avec le modèle suivant:

$$PV(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$$

où t est le temps en jours. Afin de faciliter les traitements statistiques, a est un paramètre identique pour tous les individus alors que b et c sont ajustés individuellement. Cette procédure d'ajustement a permis d'estimer le PV juste après la mise-bas :

$$PV_{MB} = c,$$

Ainsi que la perte de poids vif sur la période 1, égale à

$$PV_{perte} = PV_{t_{MIN}} - PV_{MB},$$

où

$$t_{MIN} = \frac{-b}{2 \cdot a}.$$

Les cinétiques de PV sur la période 2 ont été ajustées avec le modèle suivant:

$$PV(t) = a \cdot t + b$$

où t est le temps en jours. Cette procédure d'ajustement a permis d'estimer le gain quotidien moyen (GMQ en g/j) sur la période 2. L'effet de PRO a été testé sur les variables de production laitière (PL_1 et PL_2) et de poids vif (PV_{perte} et GMQ) afin d'analyser l'effet différé de la gestation sur la lactation suivante. Les variables PV_{MB} et NLAC ont également été incluses dans l'analyse afin de prendre en compte les différences de maturité entre les individus. Le lien éventuel entre production laitière et poids vif a été testé en incluant PL_1 comme covariable pour l'analyse de PV_{perte} et réciproquement PV_{perte} a été inclus comme covariable dans l'analyse de PL_1. Pour la période 2, deux hypothèses ont été testées: d'une part l'existence d'un lien entre la persistance laitière et la reconstitution des réserves corporelles et d'autre part un effet différé de la période de début de lactation sur la persistance laitière et la reconstitution des réserves corporelles. En conséquence, la variable PL_2 a été analysée avec PV_{perte} et PL_2 comme covariables et la variable GMQ a été analysé avec PV_{perte} et PL_2 comme covariables.

3. Résultats

Interactions entre le niveau de maturité et les paramètres de gestation

Les valeurs de PRO vont de 1 à 5 chevreaux avec 51% de portées doubles et 29% de portées simples par raPCHVort au nombre total de naissances. Les tests de chi-deux ont montré que les primipares avec des tailles de portée plus faibles que les multipares (respectivement 1.8 et 2 ; p-value =0.0021). Les primipares de race Alpine ont des tailles de portées supérieures aux primipares de race Saanen mais l'effet race n'est pas ressorti pour les autres niveaux de rang de lactation.

La variable PCHV est égale en moyenne à 8.02 (± 2.74) kg. La régression suivante a été trouvée, tous les coefficients étant significatifs (n = 423; R^2 = 0.84; RMSE = 1.08 kg) :

$$PCHV = 0.887 \cdot NLAC + 3.39 \cdot PRO - 0.378 \cdot NLAC^2 - 0.327 \cdot PRO^2 + 0.587 \cdot NLAC \cdot PRO + 1.21 \cdot RA$$

L'effet quadratique de PRO et NLAC implique que l'effet de ces paramètres suit une loi des rendements décroissants.

La variable GAINGEST est en moyenne égale à 12.07 (± 6.60) kg. GAINGEST est influencé de façon significative par NLAC (effet niché dans AR), RA et PCHV (Tableau 24) avec une valeur de rmse égale à 5.03 kg. Le gain de poids vif pendant la gestation diminue quand le rang de lactation augmente. Cette diminution est d'autant plus importante chez les primipares que chez les multipares et également plus importante chez la race Saanen que chez la race Alpine. Le poids de portée a un effet négatif sur le gain de poids vif pendant la gestation avec - 0.40 (± 0.11kg) GAINGEST/kg PCHV. Ce résultat suggère que l'effort physiologique de gestation, représenté par le poids de portée PCHV, conduit à un ralentissement de la croissance et/ou de l'anabolisme des réserves corporelles pendant la gestation.

Tableau 24 Effets du rang de lactation, de la race et du poids de portée sur le gain de poids vif pendant la gestation.

	Constante	NLAC(RA)			RA		PCHV	PRO.NL	PCHV.R
Significativité			**		***		**	NS	**
Niveau		1	2	3					
Estimation du coefficient / moyenne issue	15.23	16.6	13.8	9.9	13.5	ALP	-0.405		-0.3
		14.9	9.1	7.5	10.5	SAA			+0.3

NS = $P > 0.05$; * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$; *** = $P < 0.001$; ALP = race Alpine; NLAC = rang de lactation; PCHV = poids de portée (kg) ; RA = race; SAA = race Saanen.

Cinétiques de production laitière et de poids vif

La variable PL_1 est égale à 3395 ± 888) g/j. Elle est influencée par NLAC, PRO, RA et PV_{MB} (Tableau 25, modèle 1). L'effet de NLAC est uniquement lié à une oPCHVosition entre primipares et multipares. PRO a un effet positif sur PL_1 (+ 310 g/j de 1 à 2 chevreaux, p-value< 0.001; + 229 g/j de 2 à 3 chevreaux, NS). Dans le troupeau expérimental, la race Alpine présente une production laitière plus élevée que la race Saanen. NLAC et PV_{MB} ont un effet positif et significatif sur PL_1.

La variable PV_{perte} est égale en moyenne à 6.40 (± 4.83) kg. La moyenne de t_{MIN} (temps d'atteinte du poids vif minimum) est égale à 43.6 (± 17.9) jours de lactation. PV_{MB} et PRO ont un effet sur PV_{perte} (Tableau 25, modèle 2). Un poids vif à la mise important conduit à une

perte de poids vif importante sur le début de lactation (+0.14 kg/kg de PV_{MB}). Il n'y a pas d'influence réciproque entre PL_1 et PV_{perte}.

La variable PL_2 est égale en moyenne à 3438 (± 787) g/j. Elle est influencée par NLAC, PRO et PV_{MB} (Tableau 25, modèle 3). Globalement les effets sur PL_2 sont les mêmes que ceux trouvés sur PL_1. A même poids vif, PL_2 pour les primipares est moins élevée que pour les multipares. PL_2 est significativement plus faible pour une taille de portée de 1 chevreau. Outre ces effets, PL_2 est influencée négativement par PV_{perte} (Tableau 25, modèle 4; - 25.75 g/j de lait par kg de PV_{perte}) et par GMQ (Tableau 25, modèle 5; -6.22 g/j de lait par g/j de GMQ).

La variable GMQ est égale en moyenne à 25.7 (± 35.4) g/j. Elle est influencée par NLAC, PRO, R et PL_2 (Tableau 25, modèle 6). PRO a un effet positif sur GMQ indiquant qu'une chèvre prolifique a tendance à reconstituer plus rapidement ces réserves (+13.82 g/j de GMQ entre 1 et 2 chevreaux, p-value<0.001; + 1.9 g/j entre 2 et 3 chevreaux, p-value<0.05). NLAC a un effet négatif sur GMQ ce qui est probablement à relier avec la compétition exercée par la croissance. GMQ est influencé par RA avec la race Saanen présentant des GMQ plus élevés que la race Alpine, probablement du au fait que la race Saanen a un format plus important que la race Alpine. GMQ est influencé négativement par PL_2 : plus la production laitière est élevée, plus le gain de poids diminue (14 g/j de GMQ pour +1 kg de PL_2/j entre les semaines 7 et 27).

Enfin, PVperte a un effet positif sur GMQ (Tableau 25, modèle 7) ce qui indique que la reconstitution des réserves est d'autant plus importante que les chèvres ont eu une perte de poids vif importante sur le début de lactation (+ 2.77 g/j de GMQ par kg de PV_{perte} ou 0.40 kg de gain de poids vif total entre les semaines 7 et 27).

Tableau 25 Résultats de l'analyse statistique du poids vif et de la production laitière (estimation du coefficient pour les covariables et moyennes issues des moindres carrés pour les facteurs).

		Variables dépendantes						
		PL_1	PV_{perte}	PL_2	PL_2	PL_2	GMQ	GMQ
Model		1	2	3	4	5	6	7
N		426	426	426	426	426	426	426
r^2		0.73	0.81	0.82	0.80	0.76	0.81	0.69
RMSE		762.7	4.4	720.3	712.3	690.5	32.1	29.6
Constant	Value	1707.9	-3.319	2068.4	1982.9	2450.9	74.363	52.437
	Signif.	***	NS	***	***	***	***	***
NLAC	1	3240		3360	3340	3393	32.87	40.45
	2	3644		3675	3677	3663	26.62	25.23
	3	3412		3372	3372	3348	18.5	14.78
	Signif.	***	NS	**	**	***	***	***
PRO	1	3149	6.105	3287	3279	3244	16.42	16.88
	2	3459	6.958	3507	3522	3527	30.24	29.21
	3	3688	5.417	3614	3589	3632	31.33	34.37
	Signif.	***	**	**	**	***	***	***
RA	0	3284					30.76	
	1	3581					21.24	
	Signif.	***	NS	NS	NS	NS	**	NS
PV_{MB}	Coef. Estimate	25.73	0.14	20.90	24.54	17.55		
	Signif.	***	***	***	***	***		
PV_{perte}	Coef. Estimate				-25.749			2.77
	Signif.				***			***
PL_2	Coef. Estimate						-0.014	-0.013
	Signif.						***	***
GMQ	Coef. Estimate					-6.22		
	Signif.					***		

*** = $P < 0.001$; ** = $P < 0.01$; * = $P < 0.05$; NS = $P > 0.05$; Coef. = coefficient; GMQ = estimation du gain de poids vif moyen entre les semaines 7 et 27 (g/j); NLAC = rang de lactation (1:première lactation; 2: seconde lactation; 3: trois lactations ou plus); PL_1 = production laitière moyenne entre les semaines 1 et 7 (g/j); PL_2 = production laitière moyenne entre les semaines 8 et 27); PRO = taille de portée (1: un chevreau; 2: deux chevreaux; 3: trois chevreaux ou plus); PV_{MB} = estimation du poids vif après la mise-bas (kg); PV_{perte} = estimation de la perte de poids vif sur le début de lactation (kg); RA = race (0=Saanen;1=Alpine); Signif. = significativité.

Annexe 2 Données de la littérature sur le niveau des réserves corporelles chez la chèvre

L'objectif du modèle individuel de chèvre laitière était de simuler la dynamique d'évolution du poids vif au cours de la vie productive de la femelle et plus particulièrement la dynamique d'utilisation des réserves corporelles. Cette dynamique est centrale pour la simulation de l'énergie associée à la mobilisation et la reconstitution des réserves ainsi que pour la détermination des coefficients de partition du différentiel d'énergie généré par la ration ingéré. Le pourcentage de réserves corporelles (kg/kg de poids vif vide) module les valeurs des coefficients pour limiter ou amplifier la façon dont le différentiel d'énergie affecte la mobilisation, la reconstitution et la production laitière. Afin d'évaluer une plage de variation réaliste du pourcentage de réserves corporelles chez la chèvre laitière, 14 références de la littérature ont été utilisées. Ces références concernent majoritairement des femelles laitières. Les données sur des animaux mâles ou en croissance n'ont pas été considérées. Les données ont permis d'estimer les bornes des fonctions théoriques X et Z au-delà desquelles les coefficients de partition du différentiel d'énergie pour la mobilisation et la reconstitution sont modulés. Les données ont également été utilisées afin d'évaluer si le modèle de chèvre laitière simulait des dynamiques d'évolution du pourcentage des réserves corporelles réalistes pour les différents niveaux d'apports alimentaires testés au niveau du troupeau. Les données utilisées sont récapitulées dans le Tableau 26. 4 références n'ont pas mesuré le poids vif vide (9 données sur 29). Les 10 autres références ont permis d'estimer que le poids vif vide correspondait à 80 % (± 5 %) du poids vif. 5 références ont mesuré uniquement la quantité de lipides corporels totaux. La relation proposée par Gall *et al.* (1972) a permis d'estimer la quantité de réserves corporelles (RC en kg) à partie de la quantité de lipides corporels (LIP en kg) :

$$RC=-0.42+0.77\cdot LIP$$

Enfin, lorsque la mesure a été effectuée en période de tarissement, le stade physiologique a été considéré égal à 330 jours post-partum.

Tableau 26 Récapitulatif des données sur les réserves corporelles issues de la littérature.

Référence	Race	Age	Effectif	Méthode	Poids vif vide (kg)		Réserves corporelles (kg)		Pourcentage réserves corporelles (kg/kg)	Stade
Gall, 1972	D	P	32	D+C	30.6	Est	1.5	Mes	5.0	70
Chilliard, 1985	A	M	8	D+P	48.1	Mes	5.3	Mes	10.9	259
Brown, 1986	A ; T ; NU	M	15	D+C	49.3	Mes	8.9	Est	18.0	360
Bas, 1987	A	M	8	D+P	49.3	Mes	5.3	Mes	10.7	259
Dunshea, 1988	S	M	17	D+C	37.2	Mes	5.9	Est	15.9	63
Dunshea *et al.*, 1989	S	P	4	T_OH	32.3	Mes	2.9	Est	9.0	11
	S	P	4	T_OH	30.8	Mes	1.7	Est	5.6	37
	S	P	4	T_OH	31.9	Mes	2.2	Est	7.0	62
Dunshea *et al.*, 1990	S	M	10	T_OH	43.2	Mes	8.2	Est	18.9	10
	S	M	10	T_OH	42.3	Mes	6.9	Est	16.4	38
	S	M	10	T_OH	42.9	Mes	7.2	Est	16.9	76
Sorensen, 1992	N	M	41	D+C	35.7	Est	3.0	Est	8.3	135
Aumont 1994	C	M	18	D+P	19.1	Mes	2.3	Mes	11.8	360
Pfeffer, 1994	S	M	4	D+C	35.9	Mes	5.2	Est	14.5	42
Delfa *et al.*, 1995	BC	M	19	D+P	51.1	Mes	11.1	Mes	21.7	360
Eknaes *et al.*, 2006	N	M	12	CT	40.5	Est	7.4	Mes	18.2	11
	N	M	12	CT	35.4	Est	5.2	Mes	14.8	60
	N	M	12	CT	36.8	Est	4.3	Mes	11.7	74
	N	M	12	CT	38.5	Est	3.9	Mes	10.1	125
	N	M	12	CT	37.1	Est	4.2	Mes	11.3	145
	N	M	12	CT	45.8	Est	8.4	Mes	18.2	199
Mendizabal *et al.*, 2007	BC	M	22	D+P	44.2	Est	11.1	Mes	25.1	360
Ngwa, 2009[1,2]	A	M	6	D+C	45.2	Mes	7.0	Mes	15.4	0
Ngwa, 2009[1]	A	M	6	D+C	39.6	Mes	4.6	Mes	11.6	59
Ngwa, 2009[2]	A	M	6	D+C	44.0	Mes	6.5	Mes	14.8	116
	A	M	6	D+C	48.7	Mes	9.3	Mes	19.0	184
	A	M	6	D+C	39.4	Mes	3.9	Mes	9.9	184
	A	M	6	D+C	43.0	Mes	5.2	Mes	12.1	184
	A	M	6	D+C	45.1	Mes	6.3	Mes	14.1	184

[1]1er lot expérimental ; [2]2ème lot expérimental
A = Alpine; BC = Blanca celtibérica; C = Créole; CT = tomographie; D = Deutsch; D+C = dissection et extraction chimique des lipides totaux; D+P = dissection et pesée des tissus; Est = valeur estimée; M = multipare; Mes = valeur mesurée; N = Norvégienne; NU = Anglo-nubian; P = primipare; T = Toggenburg; T_OH = mesure des lipides corporels par dilution d'eau lourde ; S = Saanen .

Références bibliographiques

Aumont G, Poisot F, Saminadin G, Borel H et Alexandre G, 1994. Body condition score and adipose cell size determination for in vivo assessment of body composition and post-mortem predictors of carcass components of Creole goats. Small Ruminant Research 15, 77-85.

Bas P, Chilliard Y, Morand-Fehr P, Rouzeau A et Mandran N, 1987. Composition des principaux tissus adipeux de la chèvre Alpine en fin de lactation. Annales de Zootechnie 36, 361-374.

Brown DL et Taylor SJ, 1986. Deuterium oxide dilution kinetics to predict body composition in dairy goats. Journal of Dairy Science 69, 1151-1155.

Chilliard Y, 1985. Metabolism of adipose tissue, lipogenesis in the mammary gland and lipoprotein lipase activity in the dairy goat during gestation and lactation. Metabolisme du tissu adipeux, lipogenese mammaire et activites lipoproteine-lipasiques chez la chevre au cours du cycle gestation-lactation., xviii + 269pp.

Delfa R, Gonzalez C, Teixeira A, Gosalvez LF et Tor M, 1995. Relationships between body fat depots, carcass composition, live weight and body condition scores in Blanca Celtiberica goats. Options Mediterraneennes. Serie A, Seminaires Mediterraneens, 109-119.

Dunshea FR, Bell AW et Trigg TE, 1988. Relations between plasma non-esterified fatty acid metabolism and body tissue mobilization during chronic undernutrition in goats. British Journal of Nutrition 60, 633-644.

Dunshea FR, Bell AW et Trigg TE, 1989. Relations between plamsa non-esterified fatty acid metabolism and body fat mobilization in primiparous lactating goats. British Journal of Nutrition 62, 51-61.

Dunshea FR, Bell AW et Trigg TE, 1990. Body composition changes in goats during early lactation estimated using a two-pool model of tritiated water kinetics. British Journal of Nutrition 64, 121-131.

Eknaes M, Kolstad K, Volden H et Hove K, 2006. Changes in body reserves and milk quality throughout lactation in dairy goats. Small Ruminant Research 63, 1-11.

Gall C, Frahm K, Graf F et Osterkorn K, 1972. Body conformation and milk production in dairy goats. 1. Estimation of total body fat and total muscle weight by part dissection data. Zeitschrift fur Tierzuchtung und Zuchtungsbiologie 89, 123-128.

Mendizabal JA, Delfa R, Arana A, Eguinoa P et Purroy A, 2007. Lipogenic activity in goats (Blanca celtiberica) with different body condition scores. Small Ruminant Research 67, 285-290.

Ngwa AT, Dawson LJ, Puchala R, Detweiler G, Merkel RC, Wang Z, Tesfai K, Sahlu T, Ferell CL et Goestch AL, 2009. Effects of stage of lactation and dietary forage level on body composition of Alpine dairy goats. Journal of Dairy Science 92, 3374-3385.

Pfeffer E, Windhausen P et Rodehutscord M, 1994. Changes in body composition of dairy goats caused by phosphorus depletion. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 72, 65-70.

Sorensen MT, 1992. In vivo prediction of goat body composition by computer tomography. Animal Production 54, 67-73.

Annexe 3 Détermination des relations entre le potentiel laitier, le rang de lactation et la perte de poids vif dans le modèle de chèvre laitière

1. Effet du rang de lactation sur le potentiel laitier

Le potentiel laitier est défini comme la production laitière maximale atteinte au pic de lactation à l'échelle de la vie productive de la femelle. Les données du Contrôle Laitier (2004 à 2007) ont permis de déterminer que le maximum de production est atteint en troisième lactation. Le potentiel laitier est donc défini comme la production laitière brute en kg atteinte au pic de la troisième lactation. Pour chaque lactation, la valeur du rang module la valeur au pic. Cette modulation est exprimée en proportion du potentiel laitier. Le formalisme mathématique de l'effet du rang de lactation sur le pic de production est basé sur l'équation proposée par Brody (1924) : $Y_N = A \cdot e^{-k_1 \cdot N} - B \cdot e^{-k_2 \cdot N}$ où Y_N représente la production laitière au pic de la $N^{ème}$ lactation. Les données de production du Contrôle laitier (2004 à 2007) par rang de lactation (de 1 à 8 et plus) ont permis de calibrer l'équation précédente (Figure 52). Ainsi la variable $NLAC_{effect}$ est déterminée par l'équation suivante :

$$NLAC_{effect} = 1.26 \cdot e^{-0.058 \cdot NLAC} - 0.92 \cdot e^{-0.92 \cdot NLAC}$$

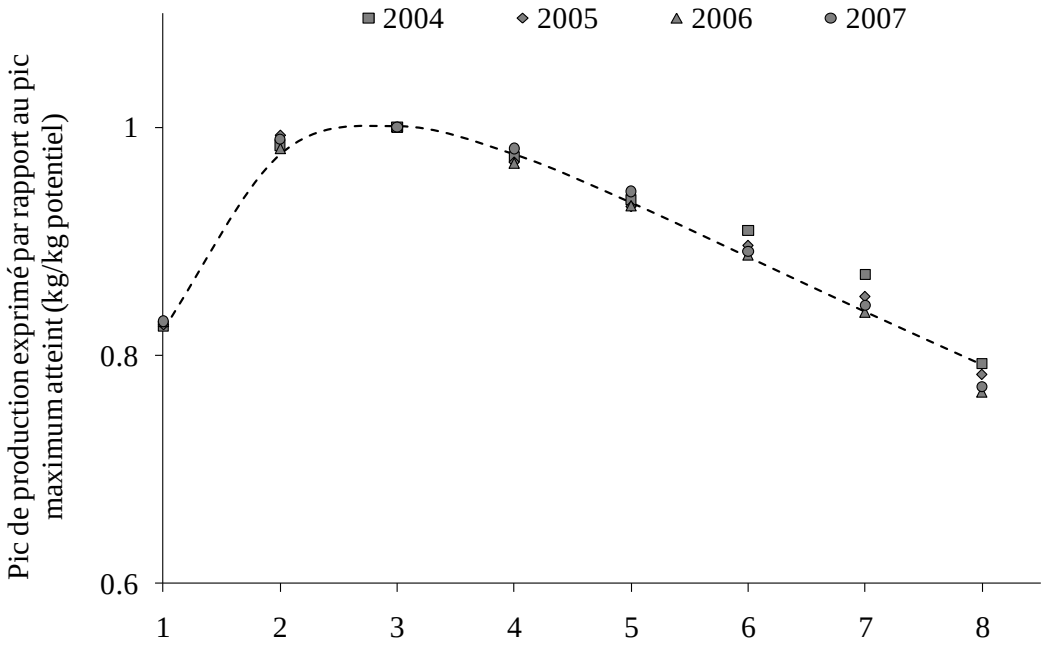


Figure 52 Evolution de la production laitière brute atteinte au pic de lactation en fonction du rang de lactation, exprimée en proportion de la production atteinte au pic de la troisième lactation, pour les données du Contrôle Laitier de 2004 à 2007. Les traits pointillés correspondent à l'équation suivant calibrée sur ces données : $NLAC_{effect}=1.26 \cdot e^{-0.058 \cdot NLAC}-0.92 \cdot e^{-0.92 \cdot NLAC}$.

2. Relation entre perte de poids vif pendant la lactation et le potentiel laitier

Le système régulateur définit l'allure de la dynamique de mobilisation grâce au compartiment C. La variation de poids vif liée à la mobilisation est égale à $C.k_{MB}$ avec k_{MB} le coefficient permettant de faire le changement d'échelle entre C, sans dimension, et le poids vif, en kg. La valeur de k_{MB} est déterminée grâce au potentiel laitier POT afin de formaliser le lien entre l'aptitude à mobiliser et l'aptitude à produire du lait. Afin de déterminer k_{MB}, nous avons ici utilisé les équations issues des données de l'UMR PNA qui ont permis la réactualisation des tables INRA (Sauvant *et al.*, 2007). Ces équations permettent de calculer l'évolution de la production laitière brute et du taux butyreux pour les primipares et les multipares. Les données de l'UMR ont également permis de quantifier la quantité de matière lipidique mobilisée en fonction de la production laitière standard sur les 6 premières semaines de lactation (Sauvant, données non publiées). Ces données sont récapitulées dans le Tableau 27 et ont permis de déduire la relation entre la perte de poids vif (dPV) et le potentiel laitier POT (Figure 53) :

$$dPV=1.65 \cdot POT-0.47$$

Tableau 27 Variables déduites des équations de prédiction des besoins des chèvres laitières (Sauvant *et al.*, 2007).

Production laitière au pic (kg/j)	Production laitière standard au pic (kg)	Matière grasse mobilisée		Perte poids vif (kg)
		kg	UFL	
6	6.34	4.44	24.64	9.478
5	5.29	3.67	20.33	7.820
4	4.23	2.89	16	6.162
3	3.17	2.11	11.71	4.504

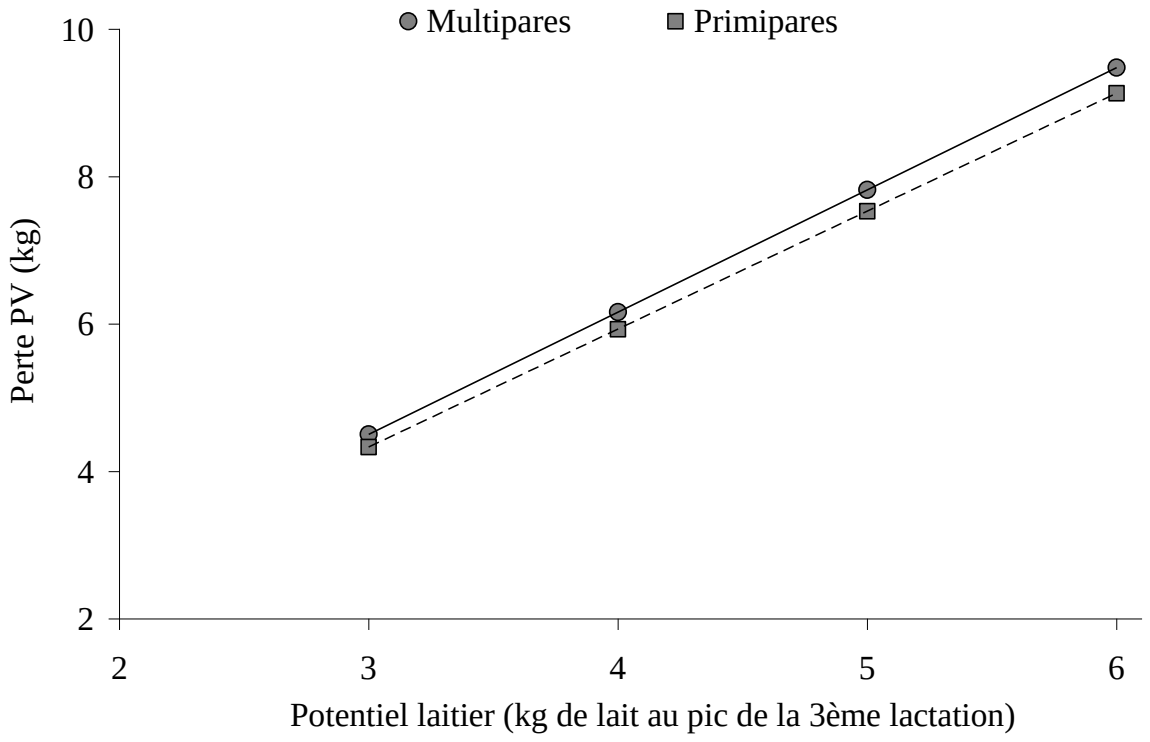


Figure 53 Relation entre la perte de poids vif sur le début de lactation et le potentiel laitier pour les primipares et pour les multipares d'après Sauvant *et al.* (2007) et Sauvant (données non publiées).

La même analyse a été conduite avec les équations dédiées aux primipares permettant de calculer la relation entre perte de poids vif (dPV en kg) et potentiel laitier (POT en kg de lait produit au pic de la troisième lactation) :

$$dPV = 1.60 \cdot POT - 0.47$$

Une analyse de sensibilité ciblée sur les relations entre le moteur de lactation et le flux associé à la mobilisation a permis de déterminer la relation structurelle suivante :

$$dPV = 17.795 \cdot k_{MB}$$

Ainsi pour les multipares :

$$17.795 \cdot k_{MB} = 1.658 \cdot POT - 0.47 .$$

Soit,

$$k_{MB} = 0.09317 \cdot POT - 0.02637 .$$

Pour les primipares, la relation suivante a été obtenue:

$$k_{MB} = 0.0899 \cdot POT - 0.02637 .$$

Le coefficient k_{MB} pour les primipares est égal à environ 96% du coefficient k_{MB} pour les multipares.

Références bibliographiques

Brody S, 1924. The kinetics of senescence. Journal of General Physiology 6, 245-257

Sauvant D, Giger-Reverdin S et Meshy F, 2007. Alimentation des caprins. In: Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Ed. Quae, Versailles, France. 137-148.

Annexe 4 Représentation des régulations physiologiques dans un modèle de femelle laitière : application à la chèvre laitière (Puillet L, Martin O, Tichit M et Sauvant D, 2008)

Animal (2008), **2:2**, pp 235–246 © The Animal Consortium 2008
doi: 10.1017/S1751731107001140

animal

Simple representation of physiological regulations in a model of lactating female: application to the dairy goat

L. Puillet[1,2†], O. Martin[1], M. Tichit[2] and D. Sauvant[1]

[1]*UMR INRA-AgroParisTech PNA, 16 rue C. Bernard, 75231 Paris Cedex 5, France;* [2]*UMR INRA-AgroParisTech SAD-APT, 16 rue C. Bernard, 75231 Paris Cedex 5, France*

(Received 29 May 2007; Accepted 16 October 2007)

A dynamic model of the lactating dairy goat, combining a minimum of mechanistic representations of homeorhetic regulations and a long-term approach, was developed. It describes (i) the main changes in body weight, dry-matter intake, milk production and composition of a dairy goat; (ii) the succession of pregnancy and lactation throughout the productive life; and (iii) the major changes in dynamics induced by the female profile (production potential and body weight at maturity). The model adopts a 'pull' approach including a systematic expression of the production potential and not representing any feed limitation. It involves three sub-systems. The reproductive events sub-system drives the dynamics through time with three major events: service, kidding and drying off. It also accounts for the effect of production potential (kg of milk at the peak of lactation) and lactation number (potential reached at the fourth lactation). The regulating sub-system represents the homeorhetic mechanisms during pregnancy and lactation with two sets of theoretical hormones, one representing gestation and the other lactation. The operating sub-system describes the main physiological flows and the energetic requirements linked to these functions through a compartmental structure. Simulations were run in order to test (i) the behaviour of the model at the scale of the productive life for an average profile of female (60 kg at maturity and 4 kg of milk at peak); (ii) the sensitivity of the simulated dynamics (mainly milk production and body reserves) to the production potential and body weight at maturity; (iii) external validation with comparison of model outputs to data from the experimental flock of Grignon and data from the French milk record organization (French organism in charge of animal recording for dairy farmers). The results at the scale of one productive life show the model simulates a relevant set of dynamics. The sensitivity analysis suggests that the model fairly well simulates the link between a female's ability to produce and mobilise reserves. Finally, external validation confirms the model's ability to simulate a relevant set of physiological dynamics while pointing out some limits of the model (simulation of milk fat and protein content dynamics, for example). The results illustrate the relevance of the model in simulating biological dynamics and confirm the possibility of including minimum representations of homeorhetic regulations with a simple structure. This simplicity gives an opportunity to integrate this basic element in a herd simulator and test interactions between females' regulations and management rules.

Keywords: dairy goats, dynamic models, homeorhetic control, physiological functions

Introduction

Animal organisms are highly controlled complex systems. Species fitness is achieved through homeorhetic regulations (HR) that coordinate changes in the metabolism of tissues necessary to support the various physiological changes of female organisms (Bauman and Currie, 1980). HR thus support both foetal development, to give birth to a new generation, and lactation, to ensure the survival and growth of the offspring. To perform these regulations, the female metabolism must be altered in order to establish a strong milk secretion priority above all other functions. The role of HR is not limited to the realisation of one pregnancy–lactation cycle. HR are also determining factors in the organisation of the successive sequences of physiological changes throughout the productive life. Moreover, HR coordinate animal functions (especially nutrition and reproduction) by changing rules in nutrient partitioning and as a result relative priorities among physiological functions.

Researchers have dealt both with the question of the control of nutrient partitioning and with the representation of HR as a driver of this partition. The different principles

† E-mail: Laurence.Puillet@agroparistech.fr

used to formalise HR in lactating ruminant models were reviewed by Sauvant (1996). Changes in nutrient partitioning are usually represented through changes in theoretical hormones that control the major flows involved in metabolism. These models have a high level of detail, but they ignore the successive gestation–lactation cycles and remain at the scale of a single lactation (Baldwin *et al.*, 1987; Danfaer, 1990). Some herd models (Blackburn and Cartwright, 1987; Sorensen *et al.*, 1992; Tess and Kolstad, 2000) have attempted to integrate controls of nutrient partitioning over a succession of production cycles without representing hormonal effects. These models divide lactation into several phases according to the number of days before or after milk peak. Each phase is associated with an equation of dry-matter intake (DMI) determining energy input and then a set of rules determining energy allocation for each physiological function (maintenance, milk production and body reserves mobilisation). Although these approaches represent changes in functional priorities throughout the productive life of females, they remain inexplicit as to the drivers of these changes.

The objective of this work was to develop a dynamic model of a lactating female, which includes HR through the driving effect of theoretical hormones on the evolution of nutrient partitioning. In this way, the model expresses the production potential ('pull' approach); thus it does not represent any feed limitation. It simulates the changes in milk production, DMI and body weight (BW) throughout the entire productive life of a lactating female. The model combines a minimum of mechanistic representations used in models of lactating female with the long-term approach developed in herd models. This modelling framework is applied to the dairy goat.

Model

Conceptual model

Figure 1 presents the diagram of the conceptual model. Following the approach proposed by Sauvant (1992), the female organism is represented by two interactive sub-models: the operating sub-system (OpS) and the regulating sub-system (RegS). OpS represents the productive functions of the lactating female considered as a converter of feed into milk. RegS stands for the regulations using theoretical hormones. It directly controls the major physiological flows of the OpS. In order to expand the animal model over the productive history of the female, the model incorporates a third sub-system, the reproductive events sub-system (RepS), which coordinates the RegS through discrete reproductive events. The model framework thus combines a dynamic part representing compartments and flows of RegS and OpS and a discrete part for reproductive events. The model is developed on the ModelMaker 4.0 software (Modelkinetix, Oxford, UK), which is a visual modelling environment based on the system dynamics paradigm (Forrester, 1971). System dynamics is based on conceptualising a system in terms of compartments (stocks)

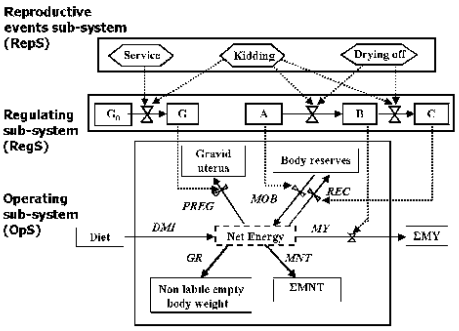


Figure 1 Representation of the model framework. Rectangular forms represent the compartments; dotted arrows represent information flows; triangular forms represents the control points; polygonal forms represent events and full arrows represent the flows of dry-matter intake (DMI, kg/day), pregnancy (PREG, kg/day), growth (GR, kg/day), maintenance (MNT, UFL per day), MY (kg/day), reconstitution (REC, kg/day) and mobilisation (MOB, kg/day). See Table 1 for parameters.

and flows, and provides an intuitive way of modelling with differential equations. Acronyms, variables and parameters used here are listed in Table 1.

Reproductive events sub-system (RepS)

In order to simulate the productive life of a dairy goat female, RepS integrates three events that induce change in its physiological status: service, kidding and drying off. These events are governed by biological or management rules. Breeding service activates the gestation functions, and fertilisation is assumed to occur at each service and systematically lead to a gestation of fixed duration. The latter is followed by kidding, which induces lactation. Finally, drying off stops lactation. This sequence of pregnancy–lactation cycles is repeated throughout a yearly range of time (DI = 365 days). The time $t = 0$ of simulation corresponds to the birth of the dairy goat and the first service occurs at the day DS = 240 days. Durations of pregnancy (DP) and lactation (DL) are fixed at 150 and 270 days, respectively, as shown in Figure 2. RepS controls RegS through two Boolean variables, LACT and GEST. They simply drive the flows of the RegS by taking the values 1 or 0 in function of the physiological status of the female. The simulation of the productive history of a dairy female needs to consider not only the temporal sequence of pregnancy–lactation cycles but also the ageing process. Therefore, at each kidding, a variable 'lactation number' (LN) is increased by one to simulate this process. LN influences milk production and most of the other flows: their values increase until the fourth lactation where the maximum potential is reached and then slightly decrease (see further).

Regulating sub-system (RegS)

In contrast to previous models considering lactation only (Sauvant and Phocas, 1992; Martin and Sauvant, 2007), RegS is based on two sets of meta-hormones controlling,

Table 1 *List of acronyms, parameters and variables used in the model*

Acronym	Function or whole name	Determination
POT	Potential of production (kg of milk yield at peak)	User
BW	Body weight (kg)	User
BW_DEL	Body weight delayed (kg)	BW_DEL(t) = BW ($t-1$) − GU ($t-1$)
BWB	Body weight at birth (kg)	User
BWM	Body weight at maturity (kg)	User
BWS	Body weight at first service (kg)	User
EBW	Empty body weight (kg)	EBW = BW pEBW
DL	Duration of lactation (days)	270
DI	Duration of the interval between 2 events (days)	365
DP	Duration of pregnancy (days)	150
DS	Date of first service (days)	240
E_{MY}	Energy of 1 kg of milk (Mcal)	$E_{MY} = (k_{L1}$ A + (1 − k_{L1}) B) k_{L2} LACT
E_{FCMY}	Energy of 1 kg of fat corrected milk (Mcal)	0.67
E_{GR}	Energy equivalent (Mcal) of 1 kg gain of NLEBW	3.32
E_{GU}	Energy equivalent (Mcal) of 1 kg of GU	1.22
E_M	Energy equivalent (Mcal) of the loss of 1 kg of BR	6.3
E_{MS}	Energy equivalent (Mcal) of 1 kg of DMI	1.5
E_R	Energy equivalent (Mcal) of the gain of 1 kg of BR	6.6
E_{UFL}	Energy equivalent (Mcal) of 1 UFL	1.7
k_{AB}	Fractional rate between A and B	0.05
k_{BC}	Fractional rate between B and C	0.004
k_G	Fractional rate between G_0 and G	0.048
k_{GR}	Equation of the flow GR (days^{-1})	$k_{GR} = -$ ln ((BWS − BWB)/(BWM − BWB))/DS
k_{GU}	Scale change applied to GU	0.05
k_{L0}	Scale change applied to MY	4
k_{L1}	Equation of E_{MY}	0.45
k_{L2}	Scale change applied to E_{MY}	4.4
k_M	Scale change applied to MOB	0.3
k_{R0}	Scale change applied to REC	120
k_{R1}	Buffer for REC	0.00015
LN	Lactation number	LN = LN + 1 at each kidding
pF	Proportion of E_{MY} providing by fat	0.66
pBR	BR proportion	0.20
pDC	DC proportion	4
pEBW	EBW proportion	0.9
pGU	GU proportion	0.15
E_L	Milk energy provided by lactose (Mcal/day)	0.26 E_{MY}
E_{FP}	Milk energy provided by fat and protein (Mcal/day)	$E_{FP} = E_{MY} - E_L$
E_F	Milk energy provided by fat (Mcal/day)	$E_F = E_{FP}$ pF
E_P	Milk energy provided by protein (Mcal/day)	$E_P = E_{FP}$ pP
FY	Yield of fat (g/day)	FY = $E_F/(9.4 \times 10^{-3})$
PY	Yield of protein (g/day)	PY = $E_P/(5.7 \times 10^{-3})$
FC	Fat content (g/kg)	FC = FY/MY
PC	Protein content (g/kg)	PC = PY/MY

Components of the operating sub-system: GU = gravid uterus (kg), NLEBW = non-labile empty body weight (kg), BR = body reserves (kg), DMI = dry matter intake (kg dry matter per day), UFL = unité fourragère lait (French unit of net energy equivalent to 1.7 Mcal), GR = flow of growth (kg NLEBW per day), MY = milk yield (kg/day), MOB = flow of mobilisation (kg BR per day), REC = reconstitution flow (kg BR per day), DC = digestive contents (kg).
A, B, C, G0 and *G* are compartments of the regulating sub-system; LACT and GEST are two Boolean variables of the reproductive events sub-system.

respectively, pregnancy and lactation. Pregnancy is controlled by a two-compartment system, G and G_0 (Figure 3). The flow between G and G_0 generates a positive exponential kinetic used to model the increase of gravid uterus (GU) weight as described by the following equation:

$$\frac{dG}{dt} = k_G\, G\, \text{GEST}. \qquad (1)$$

Concerning lactation, a flow of substance moving through three successive compartments, A, B and C, according to the mass action law generates kinetics with close analogy to the major patterns related to the lactation process (Figure 3). The three compartments are used to represent the three partly concomitant phases of reserves mobilisation (mainly adipose tissue) with A, milk production with B and reconstitution of reserves with C. In early lactation, compartment A decreases

exponentially with time, allowing a maximum effect of a theoretical lactation hormone. The charge of compartment B by the flow from A following by the discharge of B by the flow to C creates a dynamic in B analogous to a lactation curve. The outflow from B is accumulating in C and it creates a dynamic analogous to the pattern of body reserves reconstitution. These kinetics allow the female to accumulate energy in adipose tissue after its energy investment for the offspring through milk production. The following differential equations define the kinetics of A, B and C throughout lactation:

$$\frac{dA}{dt} = -k_{AB}\, A\, \mathrm{LACT}, \tag{2}$$

$$\frac{dB}{dt} = (k_{AB}\, A\, \mathrm{LACT}) - (k_{BC}\, B\, \mathrm{LACT}), \tag{3}$$

$$\frac{dC}{dt} = k_{BC}\, B\, \mathrm{LACT}. \tag{4}$$

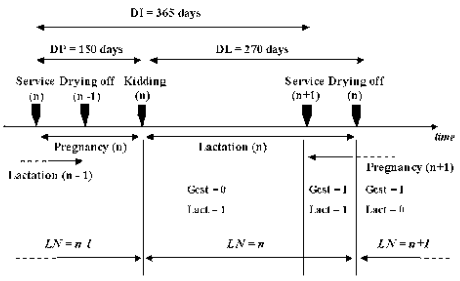


Figure 2 Sequence of two pregnancy–lactation cycles coordinated by the reproductive events sub-system with the Boolean variables GEST and LACT inducing the occurrence of the three considered events (service, kidding and drying off) and the aging process with the lactation number (LN) increased by one. These events occur with a yearly range (DI = 365 days). Durations of pregnancy (DP) and lactation (DL) are assumed to be constant (respectively, 150 and 270 days).

As we first wanted to test the hypothesis of a simple representation of HR, we chose to fix the values of k_{AB} and k_{BC} in order not to have too many parameters to control and to be able to simply introduce production potential.

Operating sub-system (OpS)

The OpS converts dietary energy into flows of energy. Its framework is supported by three compartments (Figure 1): GU, body reserves (BR) and non-labile empty body weight (NLEBW). To model flows of DMI (kg/day), milk yield (MY, kg/day) and BW (kg), virtual compartments are created for available dietary resource (Diet), accumulation of energy of maintenance (SMNT) and milk production (SMY). Moreover, an auxiliary variable, DC, represents the digestive content, which is proportional to DMI (Chilliard *et al.*, 1987). This framework makes it possible to calculate BW according to the equation:

$$\mathrm{BW} = \mathrm{DC} + \mathrm{GU} + \mathrm{BR} + \mathrm{NLEBW}, \tag{5}$$

$$\text{with } \mathrm{DC} = \mathrm{pDC}\,\mathrm{DMI}, \tag{6}$$

$$\mathrm{GU} = k_{\mathrm{GU}}\, \mathrm{pGU}\, \mathrm{GEST}\, \mathrm{EBW}\, \frac{1}{kG}\, e^{k_G t} \tag{7}$$

$$\text{and } \mathrm{EBW} = \mathrm{NLEBW} + \mathrm{BR}. \tag{8}$$

Each compartment has a dynamic evolution and the model thus makes it possible to follow the changes in BW. For GU, at t = kidding the Boolean variable GEST decreases from 1 to 0 and as a result GU immediately drops to zero. This drop is reported on BW. The compartmental framework also simulates the key physiological flows through the body: MY, body reserves mobilisation (MOB in kg of BR per day), body reserves reconstitution (REC in kg of BR per day), pregnancy (PREG in kg of GU per day), growth of NLEBW

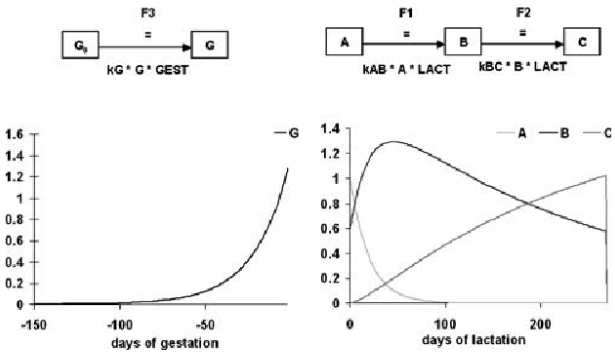


Figure 3 Structure, mathematical formalism and dynamic of the theoretical hormonal effects of pregnancy (left side) and lactation (right side) constituting the RegS. See Table 1 for parameters.

(GR in kg of NLEBW per day) and maintenance (MNT in UFL per day with UFL = unité fourragère lait, the French unit for net energy with 1 UFL = 1.7 Mcal of net energy). The following flows directly involved in lactation and pregnancy are defined by RegS:

$$\mathrm{MOB} = k_{\mathrm{M}}\, A, \tag{9}$$

$$\mathrm{MY} = k_{\mathrm{L0}}\, B, \tag{10}$$

$$\mathrm{REC} = k_{\mathrm{R0}}\, C\, k_{\mathrm{R1}}(\mathrm{BR}_{\max} - \mathrm{BR}) + \frac{\mathrm{pBR}}{\mathrm{pBR}+1}\mathrm{GR}, \tag{11}$$

$$\mathrm{PREG} = k_{\mathrm{GU}}\, G\, \mathrm{pGU}\, \mathrm{EBW}, \tag{12}$$

where k_{M}, k_{L0}, k_{R0}, k_{R1} and k_{GU} parameters change the dimensions between RegS (substance with no unity) and OpS (physiological unit). Concerning BR, changes are driven by REC and MOB. MOB flow is activated only during lactation as it is defined by A. REC flow takes account of both reconstitution during lactation and growth throughout productive life. Indeed, REC is defined by the compartment C of RegS and also by GR. Hence, at the beginning of simulation, BR changes are only due to GR: the size of BR follows the growth of the young female. When kidding occurs, RegS is activated and then BR changes are due to MOB and REC. The reconstitution of BR is limited by a buffer (k_{R1} ($\mathrm{BR}_{\max}$ − BR)). This way, the flow cannot exceed the maximum size of BR, BRmax, equal to pBR × EBW. The MNT and GR flows are calculated on the basis of INRA equations (Sauvant *et al.*, 2007):

$$\mathrm{MNT} = 0.79 + 0.01(\mathrm{BW_DEL} - 60), \tag{13}$$

$$\mathrm{GR} = (\mathrm{BWM} - \mathrm{BWB})\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR})e^{-k_{\mathrm{GR}}t}k_{\mathrm{GR}}, \tag{14}$$

where BWM is the body weight at maturity, BWB is the body weight at birth and pEBW is the average proportion of EBW in total BW at these time points. MNT is calculated with BW_DEL and not with BW as in the INRA equation. BW_DEL is the delayed variable equal to BW − GU with a time step difference of 1 day. This assumption is made to avoid the problem of a circular reference at the beginning of simulation run. The parameter pEBW could seem to be useless because of equation (8), which already defines EBW. In fact, this parameter makes it possible to initialise the model with birth, first service and mature body weight and not with empty body weight at these same time points. NE is a 'zero pool' compartment that maintains the energy balance between flows of inputs and outputs. The physiological flows (material unit per day) are converted in net energy flows (Mcal/day) with the set of parameters E_{M}, E_{UFL}, E_{GR}, E_{GU} and E_{R} expressed in Mcal per material unit (Sauvant *et al.*, 2007). E_{MY} represents the energy output through milk. It raises a specific issue in the sense that the change in energy secretion in milk is fairly different from that of the MY. It is considered that milk energy output has two origins, one driven by the global process of lactation (proportional to B) and the other driven by the reserves mobilisation (proportional to A). Therefore, E_{MY} is calculated according to the equation

$$E_{\mathrm{MY}} = (Ak_{\mathrm{L1}} + B(1 - k_{\mathrm{L1}}))k_{\mathrm{L2}}\,\mathrm{LACT}, \tag{15}$$

where k_{L1} is a parameter that controls the respective influences of A and B while k_{L2} is a converter used to change the scale between RegS and OpS following the same principle as for the other flows.

NE is defined by the following equation:

$$\frac{\mathrm{dNE}}{\mathrm{d}t} = (\mathrm{DMI}\,E_{\mathrm{MS}}) + (\mathrm{MOB}\,E_{\mathrm{M}}) - (\mathrm{MNT}\,E_{\mathrm{UFL}}) - (\mathrm{GR}\,E_{\mathrm{GR}}) - (\mathrm{PREG}\,E_{\mathrm{GU}}) - (E_{\mathrm{MY}}) - (\mathrm{REC}\,E_{R}). \tag{16}$$

For each time step, dNE/dt = 0. Energy inputs (energy from DMI and MOB) are thus equal to outputs (energy of MNT, GR, GU, MY and REC) and therefore:

$$(\mathrm{DMI}\,E_{\mathrm{MS}}) = -(\mathrm{MOB}\,E_{\mathrm{M}}) + (\mathrm{MNT}\,E_{\mathrm{UFL}}) + (\mathrm{GR}\,E_{\mathrm{GR}}) + (\mathrm{PREG}\,E_{\mathrm{GU}}) + E_{\mathrm{MY}} + (\mathrm{REC}\,E_{\mathrm{R}}), \tag{17}$$

where E_{MS} is the parameter converting DMI into Mcal/day and thus represents the energetic concentration of the diet. We assume it remains constant throughout the simulation. Our work is based on the assumption of a pull approach, which means that production pulls intake. Moreover, we consider physiological flows in terms of net energy. Milk production is an energy export and intake is an import, in response to production. In order to express this energy import in terms of dry matter (which is easier to manipulate), we used a parameter to convert energy in dry matter. As our concern is not to test the effect of feed on dairy goat's performances, we choose to set this parameter constant as its role remains to convert units (Mcal in kg of dry matter) and we choose the value of 1.5 Mcal/kg of dry matter because it reflects the value of a good-quality forage as maize silage. Equation (17) makes it possible to calculate DMI, which is an output of the model, governed by the milk production.

The model also simulates milk composition. Energy exported in milk is equal to the sum of energy flows of its three major constituents:

$$E_{\mathrm{MY}} = E_{\mathrm{L}} + E_{\mathrm{F}} + E_{\mathrm{P}}, \tag{18}$$

where E_{L} represents the energy flow of lactose, E_{F} that of fat and E_{P} that of protein in Mcal/day. E_{L} is considered as a constant proportion of E_{MY}, equal to 0.26. Hence, the sum of energy flows of fat and protein (E_{FP}) is equal to:

$$E_{\mathrm{FP}} = E_{\mathrm{MY}} - E_{\mathrm{L}} = 0.74E_{\mathrm{MY}}, \tag{19}$$

E_{FP} is split between E_F and E_P with the parameter pF assuming a constant ratio of energy of milk fat and protein

$$E_F = \mathrm{pF}\, E_{FP}, \tag{20}$$

$$E_P = (1 - \mathrm{pF})E_{FP}. \tag{21}$$

The fat and protein yields (respectively, FY and PY in g/day) are then calculated with the energy concentrations of fat and protein (respectively, equal to 9.4 and 5.7 Mcal/kg):

$$\mathrm{FY} = \mathrm{EF}/(9.4 \times 10^{-3}), \tag{22}$$

$$\mathrm{PY} = \mathrm{EP}/(5.7 \times 10^{-3}). \tag{23}$$

It is thus possible to predict fat content (FC) and protein content (PC) in g/kg of milk:

$$\mathrm{FC} = \frac{\mathrm{FY}}{\mathrm{MY}}, \tag{24}$$

$$\mathrm{PC} = \frac{\mathrm{PY}}{\mathrm{MY}}. \tag{25}$$

The auxiliary variable fat-corrected milk yield (FCMY) is calculated according to the equation:

$$\mathrm{FCMY} = \frac{\mathrm{MY}}{E_{\mathrm{FCMY}}} I, \tag{26}$$

where E_{FCMY} is the energy content in 1 kg of milk with 3.5% of fat content.

The proposed model simulates energy requirements of each physiological function. Moreover, it simulates the dynamic change of these requirements throughout time through the dynamic determination of OpS flows by RegS compartments. As a result, the nutrient partitioning is modified during one sequence of gestation–lactation and changes occur during the breeding cycles due to RepS action.

Effects of production potential and mature body weight

Production potential. The shapes of A, B and C dynamics are determined by the key parameters k_{AB} and k_{BC}. The model produces the effects of production potential (POT) and LN at the level of the lactation curve.

The effect of POT is introduced as an effect on the value of A_0 (corresponding at A for t = date of kidding) according to the following equation:

$$A_0 = 0.1931\ \mathrm{POT}. \tag{27}$$

As a result, when A_0 is equal to 0.1931 POT, the maximum of milk production (MAX(MY)) is equal to POT. Thus, various values of POT can parameterise the model. This way of introducing an effect of production potential is linked to our choice of setting k_{AB} and k_{BC} as constant values: A_0 and maximum of B are thus known. The lactation curve is also modulated by LN. Our assumption is that LN modifies the value of the peak reached during lactation. As for POT, the LN effect is introduced by modifying the value of A_0. At each date of kidding, RepS manages the calculation of A in function of LN. The effect of LN on MAX(MY) for each parity was calculated from the data of Williams (1993), who used a general equation of lactation curve derived from Wood and two equations linking parameters of the lactation equation to LN. These equations were used to provide MY for each lactation, from LN = 1 to 8. The relation between MAX(MY) and LN was then deduced with a polynomial regression. The following relation is introduced in the model:

$$\mathrm{LN_effect} = -0.038\,\mathrm{LN}^2 + 0.326\,\mathrm{LN} + 0.304 \tag{28}$$

with

$$A_0 = 0.1931\ \mathrm{POT\ LN_effect}. \tag{29}$$

For LN = 4, LN_effect = 1 and thus A_0 = 0.1931 POT. So, for the fourth lactation:

$$\mathrm{MAX(MY)} = \mathrm{POT}. \tag{30}$$

To link milk production of the 1st day of lactation to LN_effect, it is considered that, at each kidding, compartment B is filled so that initial milk production is equal to 60% of production at peak:

$$B_0 = 0.6A_0. \tag{31}$$

Body weight. In order to simulate the influence of various adult sizes and breed effect (mainly Saanen and Alpine), a parameterisation of the model in function of the mature body weight is introduced. This is done with the equation of GR, the flow of growth (equation (14)). NLEBW is thus defined as:

$$\mathrm{NLEBW} = (\mathrm{BWM} - \mathrm{BWB})\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR})(1 - \mathrm{e}^{-k_{\mathrm{GR}}t}) + \mathrm{BWB}\,\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR}). \tag{32}$$

The parameter of the growth curve is calculated using the weight at first service (BWS) reached at t = DS. The targeted weight at first service is often a management tool for French goat farmers. Thus

$$\mathrm{NLEBW}_{t=\mathrm{DS}} = \mathrm{BWS}\,\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR}) \tag{33}$$

and

$$\mathrm{NLEBW}_{t=\mathrm{DS}} = (\mathrm{BWM} - \mathrm{BWB})\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR})(1 - \mathrm{e}^{-k_{\mathrm{GR}}\mathrm{DS}}) + \mathrm{BWB}\,\mathrm{pEBW}(1 - \mathrm{pBR}). \tag{34}$$

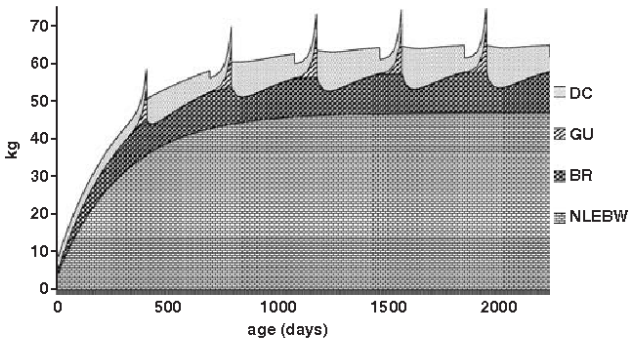


Figure 4 Simulated kinetics in kg/day of digestive contents (DC), gravid uterus (GU), body reserves (BR) and non-labile empty body weight (NLEBW) of a goat weighing 4 kg at birth, reaching 60 kg at maturity and with a production potential (POT) of 4 kg.

These equalities make it possible to calculate k_{GR}:

$$k_{GR} = \left(\frac{-\ln(BWM - BWS)}{BWM - BWB}\right)\frac{1}{DS}. \qquad (35)$$

As several flows are indexed on BW or on a percentage of it, changes of body mature weight alter overall model behaviour.

Data and simulations

The aims of the simulations are threefold: (i) to test model behaviour at the scale of an average dairy goat productive life (internal validation); (ii) to evaluate the effect of POT and BWM on the simulated dynamics of DMI, BW, MY and milk composition; and (iii) to compare these simulated dynamics to external data (external validation). The time step is the day and the simulations are run from birth until the fifth weaning (from day 0 until day 2120). The integration method is Runge–Kutta 4 with a fixed time step. Data used to build and evaluate the model come from several sources. In an initial step, the global patterns of MY, DMI and BW proposed by Morand-Fehr and Sauvant (1988) are used to estimate a first set of values of the RegS parameters (k_G, k_{AB} and k_{BC}) for a whole reproductive cycle. In a second step, to attain higher accuracy for key variables or flows such as DMI or FCMY and adjust parameters of RegS, the model is evaluated against several experimental data sets (Sauvant and Morand-Fehr, 1978) of 72 Alpine goats of the experimental herd of our lab. Finally, in order to challenge the model to external data, simulated data are compared with mean results of the French milk record organization (Bouloc, 1991), the French organism in charge of recording the milk performance of dairy herd (cows and goats) and advising the breeders.

Results

Internal validation

Simulation results were obtained for a female goat weighing 4 kg at birth and reaching, respectively, 37 kg at first service and 60 kg at maturity. Its production potential was 4 kg of milk at the peak of the fourth lactation. The kinetic of NLEBW represented female growth (Figure 4). Body reserves followed a similar pattern, increasing until maturity. The level of body reserves was clearly affected by mobilisation and reconstitution flows due to lactation. GU increased during pregnancy and then decreased suddenly at kidding. The maximal size of GU also increased until maturity because of the PREG equation, which took account of female growth. As expected, there was a quick drop of digestive contents at the dry phase. Because of the 'pull' approach, DMI followed MY and suddenly decreased on the day of drying off. As DC are proportional to DMI (equation (6)) they also decreased suddenly and hence there was a drop in BW at this time point. Concerning lactation, Figure 5 represents the successive production cycles through productive life. The effect of LN is illustrated by the increasing production peak until the fourth lactation (where POT is reached) followed by a slightly less productive fifth lactation. The simulated dynamics were globally realistic (Morand-Fehr and Sauvant, 1988), suggesting an adequate and coherent model structure.

Influence of production potential

Sensitivity analysis was performed to assess how the POT parameter contributes to model output variability in terms of milk production (Figure 6) and body reserves (Figure 7). The model was run repeatedly for a combination of POT values varying from 2 to 6 kg at peak. The maximum value reached at the fourth lactation corresponded to POT. The loss of body reserves during lactation became higher as POT rose. The model assumes that females producing more are also those whose body reserves are most mobilised (Morand-Fehr and Sauvant, 1988). This general pattern suggests that the model fairly well simulates the link between a female's ability to produce and mobilise reserves.

External validation

Figure 8 compares weekly simulated and observed values of MY, FCMY and DMI (Sauvant and Morand-Fehr, 1978).

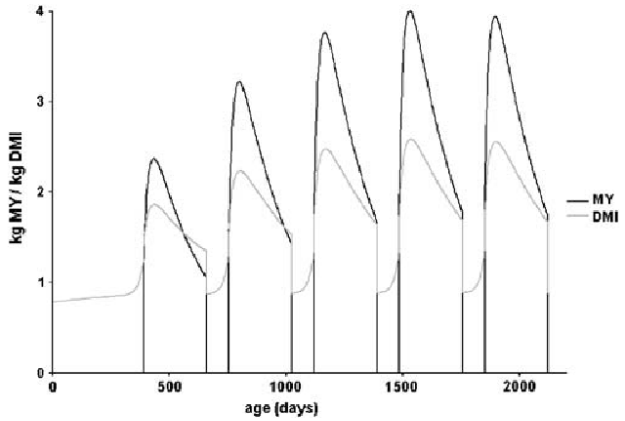


Figure 5 Simulated kinetics in kg/day of milk yield (MY) and dry-matter intake (DMI) of a goat weighing 4 kg at birth, reaching 60 kg at maturity and with a production potential (POT) of 4 kg.

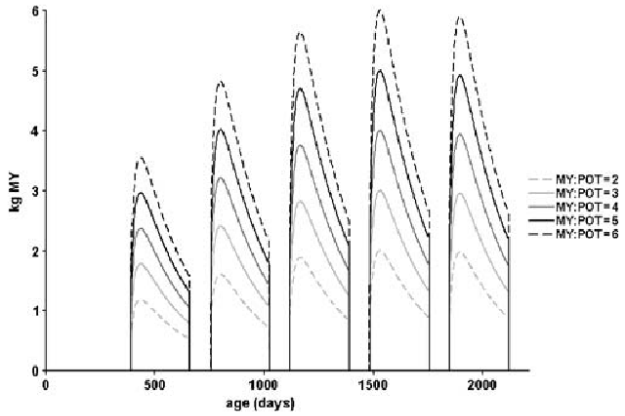


Figure 6 Simulated kinetics in kg/day of milk yield (MY) of a goat weighing 4 kg at birth, reaching 60 kg at maturity and with a production potential (POT) varying from 2 to 6 kg.

Globally, the prediction was satisfying although the simulated MY appeared a bit too low at the onset of lactation. Figure 9 compares simulated and measured MY of 10 1073 multiparous goats and 45 207 primiparous goats of the French milk record organization in 1987 (Bouloc, 1991). As the multiparous goats of the milking control were in average in their 2.5 lactation, the simulated curve presented here was obtained by calculating the average curve between the curves for LN = 2 and LN = 3 simulated by the model. As for Figure 8, the simulated MY was a bit too low at the onset of lactation of multiparous goats (POT = 3.4). For primiparous goats, the simulated kinetic was less satisfying near the peak. Figure 10 compares, for the same source of data, the simulated and observed kinetics of fat and protein yield. For multiparous goats, the simulated decay of protein and, mainly, fat was insufficient, suggesting too low a weight for compartment *A* and probably a variable ratio between fat and protein flows. Figure 11 compares simulated and observed values of milk protein and fat contents, resulting from the kinetics of Figures 9 and 10. For multiparous goats, the simulated milk protein content was too high compared to the milk-fat one. Moreover, simulations did not reveal the increases of MCP and, mainly, MFC during the last weeks of lactation.

Globally, these validation results show that the model can simulate relevant sets of physiological dynamics.

Discussion

This paper develops a dairy female model simulating the range of biological dynamics (DMI, milk production and body weight evolution) throughout its productive life with an

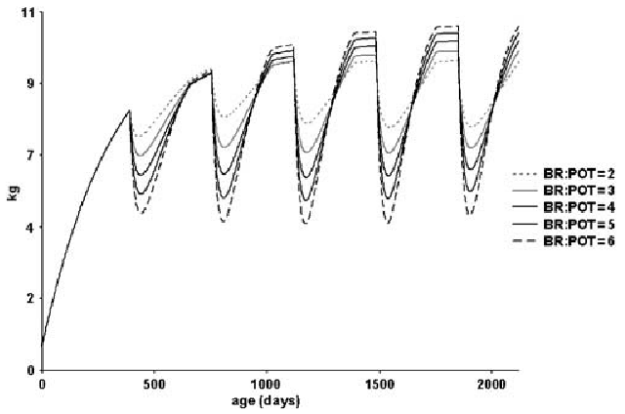


Figure 7 Simulated kinetics in kg/day of body reserves (BR) of a goat weighing 4 kg at birth, reaching 60 kg at maturity and with a production potential (POT) varying from 2 to 6 kg.

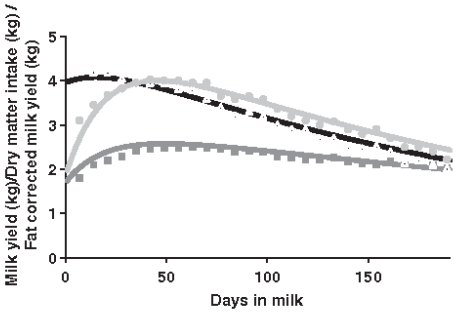


Figure 8 Comparison of simulated milk yield (▬), fat-corrected milk yield (▬) and dry-matter intake (▬) with actual milk yield (■), fat-corrected milk yield (▲) and dry-matter intake (■) from 72 Alpine goats of the experimental flock of Grignon (Sauvant and Morand-Fehr, 1978).

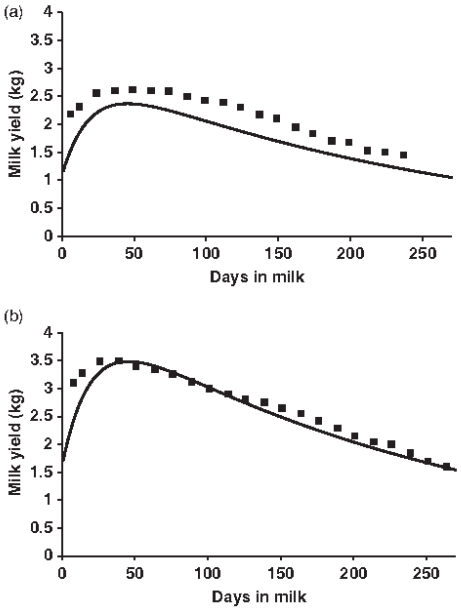


Figure 9 Comparison between simulated milk yield (▬) and data (■) from the French milk record organization (Bouloc, 1991) for (a) goats in first lactation and (b) goats in their 2.5 lactation in average.

explicit integration of the representative homeorhetic controls. Calibration was currently performed on the dairy goat; however, this principle is applicable to any lactating female. It was originally assumed that physiological regulations can be easily formalised using a minimal compartmental structure without detailing physiological mechanisms. The proposed model generates sets of kinetics that are globally relevant even if their levels of accuracy need to be improved on several aspects. Our assumption on the possibility of building a minimal and realistic representation of animal HR was globally confirmed by the results.

Several limits of the current model have to be stressed. An important drawback is the constant shape of the lactation curve. It is known that the shape of the curve is altered by lactation number, season of kidding and feeding strategy (Gipson and Grossman, 1990; Williams, 1993; Montaldo *et al.*, 1997). As a further step in the model development, the effects of the most marked of these factors would have to be integrated. The simulated DMI curve is consistent with the known pattern of intake throughout lactation. In particular, the delay of time between peak MY and maximum DMI is approximately well

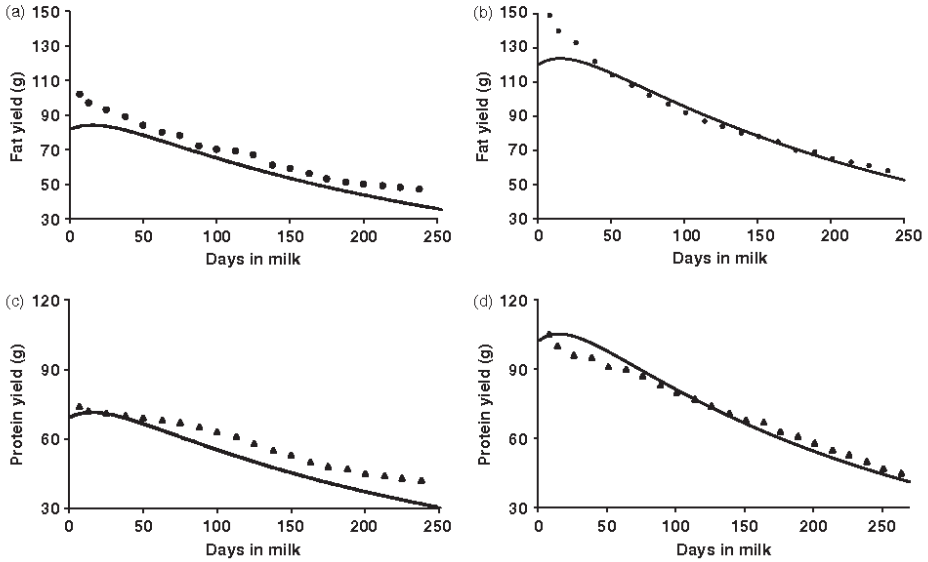


Figure 10 Comparison between simulated fat yield (—) and data (●) from French milk control (Bouloc, 1991) for (a) goats in first lactation and (b) goats in their 2.5 lactation in average and between simulated protein yield (—) and data (▲) from French milk control for (c) goats in first lactation and (d) goats in their 2.5 lactation in average.

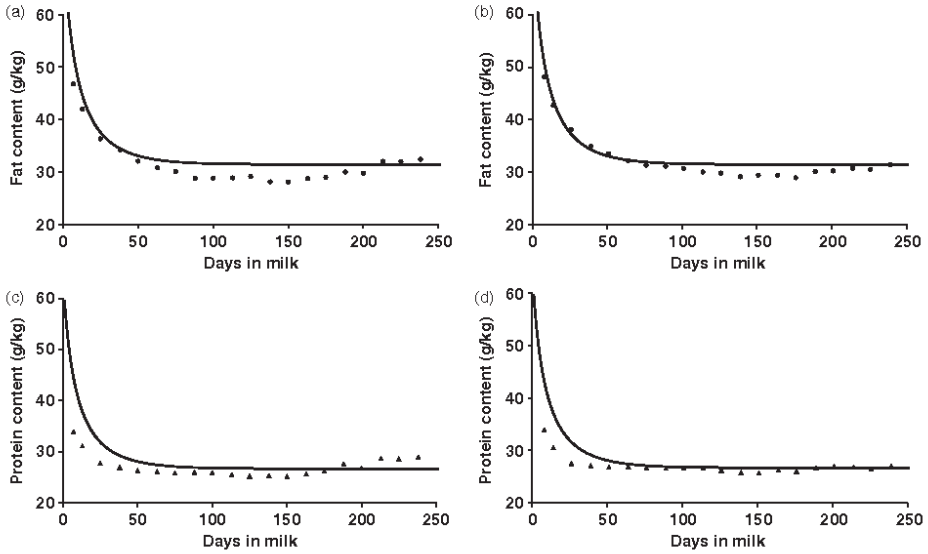


Figure 11 Comparison between simulated fat content (—) and data (●) from French milk record organization (Bouloc, 1991) (a) for goats in first lactation and (b) goats in their 2.5 lactation in average and between simulated protein content (—) and data (▲) from French milk record organization for (c) goats in first lactation and (d) goats in their 2.5 lactation in average.

represented. However, the increasing DMI pattern in late gestation remained unsatisfactory. This result is mainly due to the lack of representation of the regulating system control during the transition period between two successive reproductive cycles. The simulated BW changes during lactation (not presented) are less satisfying. The role of gut contents, which were assumed to be proportional to the DMI level, could be a cause of bias. Due to the model structure itself, strong links exist between *A*, *B* and *C* and therefore among kinetics of body reserves, lactation and intake. However, to achieve better accuracy, it might be necessary to partly dissociate the structure of RegS. Milk composition also requires improvement, a major aspect being the ratio between MFC and MPC, which was assumed to be constant while it is known to decrease throughout lactation (Bouloc, 1991). Another drawback concerns the lack of increase of MFC and MPC at the end of lactation. This result occurs because MFY, MPY and MY are mainly driven by *B* as lactation progresses.

Because reproductive events are driven by HR, which are themselves partly dependent on environmental influences (season, management, etc.), we depart from the Sauvant (1992) approach by adding RepS, thus making it possible to integrate events being governed by both biological and management rules. A prerequisite was to remain as simple as possible in this part, keeping in mind the preparation of further developments toward a herd model in which the current animal model will be the basic element.

At the operating level the current model is much less detailed than mechanistic models of lactating ruminant (Baldwin *et al.*, 1987; Danfaer, 1990; Martin and Sauvant, 2007) as metabolites and key organs are not represented. However, at the regulating level, roughly the same logic of theoretical hormonal actions is used. Fairly similar effects are generated with a simple compartmental framework, for instance, the relationship between *A* and *C* is similar to that used by Martin and Sauvant (2007) for theoretical hormones of catabolism and anabolism. As these models were based on one lactation, HR effects were just represented at this time scale (300 days). We depart from this approach by taking HR effects at the scale of a whole productive life into account. This animal representation incorporating basic regulations throughout its productive life can therefore be easily used for a dynamic herd model.

RegS is built to control physiological dynamics throughout the whole productive life of the goat by interacting with RepS. Even if a long-term dimension of control was present in the herd models of Blackburn and Cartwright (1987), Sorensen *et al.* (1992) or Tess and Kolstad (2000), our modelling approach has the advantage of explicitly incorporating more mechanistic elements to represent kinetic of nutrient partitioning through HR. However, in the current state of the model, interactions among processes of growth, pregnancy and lactation are only driven by HR. Flexibility in these interactions due to environmental factors will be considered in further developments.

In our model, primacy is given to the control of body reserve by RegS throughout lactation. The body reserve is thus a kernel of the model and not an output as in previous approaches, considering the animal or herd level. Body reserves are a fundamental element in the expression of milk production potential and in the connected delay between dynamics of MY and DMI. Several authors have recently emphasised the need to integrate the role of body reserves in the way of conceptualising ruminant feeding systems. Friggens and Newbold (2007) introduce the concept of genetically driven mobilisation. In the revised INRA feeding system, Faverdin *et al.* (2007) take account of a given amount of energy coming from body reserves in the calculation of energy requirements for lactating cows. Thus, they explicitly include kinetics of body reserve mobilisation in their prediction equations of animal requirement. Moreover, Friggens (2003) reviewed the important role of body reserves (size and rate of mobilisation) as indicators of present and future environmental constraints. Such indicators can help to anticipate the consequences of these constraints on the female reproductive performances. Due to this essential role of body reserve dynamic, we have chosen to build a model based on HR and on the expression of production potential. Methodologically, this choice was driven by the need to limit the level of complexity and achieve our objective of minimal regulation representation.

As HR control has an internal origin, the model constitutes a 'pull' approach. Therefore, another major further development could be to build, starting from the present model, a 'push' approach, taking both HS regulations and dietary fill influences into account in order to predict animal responses to environmental and dietary influences. The application of the recent version of the INRA fill unit system and of the response laws to concentrate supply to lactating goat (Sauvant *et al.*, 2007) constitute a simple way of altering the potential through feeding limitations as also proposed for dairy cows by Faverdin *et al.* (2007).

Conclusion

The proposed model describes the potential kinetic of the milk production of a dairy goat, with a minimum of underlying mechanisms of HR. These HR consist of a strong dynamic link among body reserves mobilisation and reconstitution, lactation and DMI. By several aspects, the model is targeted to be integrated as a basic element in a herd simulator. It can easily represent different levels of milk production potential and body weight with a simple structure. It also considers the whole productive life of the dairy goat.

Acknowledgements

This work was carried out with the financial support of the 'ANR- Agence Nationale de la Recherche – The French National Research Agency' under the 'Programme Agriculture et Développement Durable', project 'ANR-05-PADD-0XX, Praiterre'

and with a PhD scholarship provided by INRA (SAD and PHASE departments) and the Poitou-Charentes region.

References

Baldwin RL, France J and Gill M 1987. Metabolism of the lactating cow. I. Animal elements of a mechanistic model. Journal of Dairy Research 54, 77–105.

Bauman DE and Currie WB 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorrhesis. Journal of Dairy Science 63, 1514–1529.

Blackburn HD and Cartwright TC 1987. Description and validation of the Texas A and M sheep simulation model. Journal of Animal Science 65, 373–386.

Bouloc N 1991. Analyse de la forme de la courbe de lactation: application à l'étude des modalités d'allègement du contrôle laitier et de prévision précoce de la production dans l'espèce caprine. PhD thesis, INA Paris Grignon, France.

Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Vérité R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation–lactation. Bulletin Technique du CRVZ de Theix, INRA 70, 117–131.

Danfaer A 1990. A dynamic model of nutrient digestion and metabolism in lactating dairy cows. PhD thesis, National Institute of Animal Science, Foulum, Denmark.

Faverdin P, Delagarde R, Delaby L and Meschy F 2007. Alimentation des vaches laitières. In Alimentation des bovins, ovins et caprins (ed. INRA), pp. 23–55. Editions Quae-INRA, Versailles, France.

Forrester JW 1971. World dynamics. MIT Press Cambridge, Portland, Oregon.

Friggens NC 2003. Body lipid reserves and the reproductive cycle: towards a better understanding. Livestock Production Science 83, 219–236.

Friggens NC and Newbold JR 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Animal 1, 87–97.

Gipson TA and Grossman M 1990. Lactation curves in dairy goats: a review. Small Ruminant Research 3, 383–396.

Martin O and Sauvant D 2007. A dynamic model of dairy cow metabolism. Animal 1, 1143–1166.

Montaldo H, Almanza A and Juarez A 1997. Genetic group, age and season effect on lactation curve shape in goats. Small Ruminant Research 24, 195–202.

Morand-Fehr P and Sauvant D 1988. Alimentation des caprins. In Alimentation des bovins, ovins et caprins (ed. R Jarrige), pp. 281–304. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France.

Sauvant D 1992. Systemic modelling in nutrition. Reproduction, Nutrition, Development 32, 217–230.

Sauvant D 1996. A comparative evaluation of models of lactating ruminant. Annales de Zootechnie 45, 215–235.

Sauvant D and Morand-Fehr P 1978. La capacité d'ingestion de la chèvre laitière. In Advances in goat production (ed. P Morand-Fehr, D Sauvant and M De Simiane), p. 42. Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, INAPG, Paris.

Sauvant D and Phocas F 1992. A mechanistic model to simulate the long term regulation of the dairy cow nutrition. Journal of Dairy Science 75 (Suppl. 1), 168.

Sauvant D, Giger-Reverdin S and Meschy F 2007. Alimentation des caprins. In Alimentation des bovins, ovins et caprins (ed. INRA), pp. 137–148. Editions Quae-INRA, Versailles, France.

Sorensen JT, Kristensen ES and Thysen I 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. Agricultural Systems 39, 177–200.

Tess MW and Kolstad BW 2000. Simulation of a cow-calf production systems in a range environment: I. Model development. Journal of Animal Science 78, 1159–1169.

Williams JC 1993. Influence of farm, parity, season and litter size on the lactation curve parameters of white British dairy goats. Animal Production 57, 99–104.

Sous-système régulateur

Hormones théoriques

A	Anabolisme
C	Catabolisme
L	Lactation
C_0	Compartiment d'accumulation
M	Croissance
G	Gestation

Flux

f_{C0C}	C_0 à C
f_{C0L}	C_0 à L
f_{CL}	C à L
f_{LA}	L à A
f_{AC0}	A à C_0

Contrôles

ON	Statut vivant
LAC	Statut lactation
PREG	Statut gestation
Tl	Temps de lactation (jours)
Tp	Temps de gestation (jours)

Paramètres

k_M	Moteur croissance
GU_i	
GU_a	Moteur gestation
GU_b	
GU_c	
k_{C0C}	
k_{C0L}	Moteur lactation
k_{CL}	
k_{LA}	
k_{GA}	Influence de la gestation sur la lactation
k_{AC0}	Moteur lactation
k_{GC0}	Influence de la gestation sur la lactation

Sous-système opérant

Flux d'énergie

E_{GR}	Croissance
E_{GU}	Utérus gravide
E_{MNT}	Entretien
E_{MBp}	Mobilisation potentielle
E_{STp}	Reconstitution potentielle
E_{MYp}	Energie lait potentielle
E_{INp}	Ingestion potentielle
E_{MB}	Mobilisation
E_{ST}	Reconstitution
E_{MY}	Energie lait

Contrôles

dE	Différentiel d'énergie entre ingestion réelle et ingestion potentielle
k_{MB}	Paramètre reliant perte de poids vif et potentiel de production laitier
TreshDead	Valeur seuil utilisée pour le tirage aléatoire représentant l'occurrence de la réforme involontaire

Coefficients de partition d'énergie

p	Mobilisation potentielle
q	Reconstitution potentielle
r	Energie lait potentielle
p_2	Mobilisation
q_2	Reconstitution
r_2	Energie lait

Fonctions théoriques

X	Modulation du coefficient q
Z	Modulation du coefficient p

Composition du poids vif

BW_p	Poids vif vide potentiel
BW	Poids vif vide
BR	Réserves corporelles
pctBR	Proportion de réserves corporelles
GU	Utérus gravide

Production

MY_p	Production laitière brute potentielle
$FCMY_p$	Production laitière standard potentielle
MY	Production laitière brute
FCMY	Production laitière standard
WKLAC	Semaine de lactation
LL	Durée de lactation
NLAC	Numéro de lactation
$NLAC_{effect}$	Effet du numéro de lactation

Ingestion d'énergie

INTCAP	Capacité d'ingestion
QD_i	Quantité d'aliment i distribuée
QI_i	Quantité d'aliment i ingérée
UE_i	Encombrement aliment i
UF_i	Valeur énergétique de l'aliment i
E_{diet}	Energie nette ration ingérée
E_{MAJ}	Majoration liée aux interactions digestives
EIN_{diet}	Energie ingérée disponible

Paramètres de conversion énergétique

EV_{GU}	Valeur énergétique (Mcal) du gain d'un kg d'utérus gravide
EV_{GR}	Valeur énergétique (Mcal) du gain d'un kg de poids vif en croissance
EV_{MB}	Valeur énergétique (Mcal) de la mobilisation d'un kg de réserves corporelles
EV_{ST}	Valeur énergétique (Mcal) de la reconstitution d'un kg de réserves corporelles
EV_{FCMY}	Valeur énergétique (Mcal) d'un kg de lait standard
EV_{UFL}	Valeur énergétique (Mcal) d'une UFL

Changement d'échelle par rapport au sous-système régulateur

k_{CA}	Changement d'échelle pour la mobilisation et la reconstitution
k_{MY}	Changement d'échelle pour la lactation

Paramètres d'entrée

BW_b	Poids vif à la naissance
BW_m	Poids vif à maturité
POT	Potentiel laitier
LS	Taille de portée
$pctBR_p$	Pourcentage potentiel de réserves corporelles

Paramètres de gestion

ExtLac	Statut lactation longue
NumGoat	Numéro individuel
ME	Numéro d'entité de gestion
MG	Numéro de sous-lot de lutte

Date

DAT_{CON}	Fécondation
DAT_{NXTKID}	Prochaine mise-bas
DAT_{PRVKID}	Précédente mise-bas
DAT_{DRY}	Tarissement

Abréviations

BTPL	Bureau Technique Promotion Laitière
CLS	Coopérative Laitière de la Sèvre
EMP	Elementary Management Pattern
FG	Functional Group
IA	Insémination artificielle
MS	Matière sèche
PNA	Physiologie de la Nutrition et Alimentation
SIGHMA	Simulation of Goat Herd Management
UE	Unité d'Encombrement
UFL	Unité Fourragère Lait
UMR	Unité Mixte de Recherche

Simulation	Potentiel moyen (kg)	Animal pilote (kg)	Nombre de séquences alimentaires	Durée période de reproduction (jours)	Gestion échecs de reproduction
S_1	4	4	3	84	Stricte
S_2	5	4	3	84	Stricte
S_3	4	5	3	84	Stricte
S_4	5	5	3	84	Stricte
S_5	4	4	2	126	Stricte
S_6	4	4	5	126	Stricte
S_7	4	4	2	63	Stricte
S_8	4	4	5	63	Stricte
S_9	4	4	1	126	Souple
S_{10}	4	5	1	126	Souple
S_{11}	4	3	1	126	Souple
S_{12}	4	4	1	63	Souple
S_{13}	4	5	1	63	Souple
S_{14}	4	3	1	63	Souple

Modelling the biological variability in response to management practices. Application to the dairy goat herd.

Within the herd, the animal is the elementary unit at the interface between the biological processes and the management practices. The variability of individual responses is a key element of herd functioning, the role of which remains to be quantified. The objective of this thesis is to study how individual variability is built from the interaction between the biological responses of the females and management practices, and how this variability produces herd performance. With this objective, an individual-based model of dairy goat herd was developed. The model is based on the interaction between a decisional system and a biological system. The biological system is based on a set of individuals each consisting of an individual dairy goat model, simulating body weight and milk production in response to feeding and reproductive management throughout the productive life. Goat responses result from the relative priorities among physiological functions, the production potential and the diet energy changes. The decisional system is based on the technical operations of feeding, reproduction and replacement management. These operations are based on the functional group (group of females managed by the same set of decision rules), management entity which links the farmer's project and the technical operations. Three experimental plans were run to test the effects of the energy level of the diet, the number of steps within the feeding plan and the mean herd production potential. The results showed that individual variability within a management option was characterized by variables related to lifetime length and productivity. Individual variability between management options was characterized by variables related to feed efficiency. The level of diet energy and the mean herd production potential had the strongest effect on individual feed efficiency. Different combinations of management options can lead to the same level of efficiency. However, theses options did not rely on the same biological basis: they led to different proportions of individuals at biological equilibrium compared to their production potential. These differences could lead to different herd adaptive abilities in a fluctuating environment. The model can be used to investigate the role of individual variability on the resilience of herd system.

Keywords: herd, management practices, individual variability, modelling, dairy goat production systems

Modéliser la variabilité biologique en réponse aux pratiques de conduite. Application au troupeau caprin laitier.

Dans le troupeau, l'animal est l'entité élémentaire à l'interface entre processus biologiques et pratiques de conduite. La variabilité des réponses individuelles constitue un processus central du fonctionnement du troupeau dont le rôle reste à quantifier. L'objectif de cette thèse est d'étudier comment la variabilité individuelle se construit à partir des interactions entre les réponses biologiques des femelles et les pratiques de conduite du troupeau et comment en retour, les performances globales du troupeau se construisent à partir de cette variabilité individuelle. Dans ce but, un modèle individu-centré de fonctionnement du troupeau caprin laitier a été développé. Le modèle est basé sur l'interaction entre un système décisionnel et un système biotechnique. Le système biotechnique repose sur la démultiplication d'un modèle individuel de chèvre laitière qui simule le poids vif et la production laitière en réponse aux pratiques d'alimentation et de reproduction au cours de la vie productive de la femelle. Ces réponses biologiques sont pilotées par la dynamique des priorités entre fonctions physiologiques, par le potentiel de production et par les variations d'apports alimentaires (exprimés en énergie). Le système décisionnel représente les opérations techniques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement. Ces opérations sont raisonnées au niveau du lot fonctionnel, entité de gestion qui traduit le lien entre le projet de l'éleveur et la mise en œuvre des opérations techniques. Trois plans d'expériences ont été simulés pour tester les effets du niveau des apports alimentaires, du degré de segmentation du plan d'alimentation et du niveau moyen du potentiel de production du troupeau sur la variabilité individuelle. La variabilité individuelle intra-conduite est caractérisée par des variables de durée et de productivité de la carrière. La variabilité individuelle inter-conduites est caractérisée par les variables relatives à l'efficacité alimentaire. Le niveau des apports alimentaires et le potentiel de production moyen ont des effets combinés sur la construction de l'efficacité alimentaire. Des efficacités similaires peuvent être obtenues avec différentes combinaisons d'options de conduite. Cependant, ces combinaisons ne sollicitent pas les mêmes bases biologiques : elles génèrent des proportions contrastées d'individus à l'équilibre par rapport à leur potentiel de production. Ces différences dans l'élaboration de la performance pourraient conduire à des capacités d'adaptation du troupeau variables dans un environnement fluctuant. Le simulateur permettrait alors d'explorer le rôle de la variabilité individuelle dans la résilience du système troupeau.

Mots-clés : troupeau, pratiques, variabilité individuelle, modélisation, systèmes caprins