



HAL
open science

Relations entre dynamique de production laitière, gestion des réserves corporelles et performances de reproduction chez la chèvre laitière : une approche par modélisation des trajectoires phénotypiques

Nicolas Gafsi

► **To cite this version:**

Nicolas Gafsi. Relations entre dynamique de production laitière, gestion des réserves corporelles et performances de reproduction chez la chèvre laitière : une approche par modélisation des trajectoires phénotypiques. Sciences agricoles. Université Paris-Saclay, 2024. Français. NNT : 2024UPASB027 . tel-04693560

HAL Id: tel-04693560

<https://theses.hal.science/tel-04693560v1>

Submitted on 10 Sep 2024

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.

Relations entre dynamique de production laitière,
gestion des réserves corporelles et performances de
reproduction chez la chèvre laitière : une approche
par modélisation des trajectoires phénotypiques

*Relationships between milk production dynamics, body reserve
management and reproductive performance in dairy goats: a modelling
approach based on phenotypic trajectories*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°581 Agriculture, Alimentation, Biologie,
Environnement et Santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Sciences animales
Graduate School : Biosphera. Référent : Agroparistech

Thèse préparée dans l'UMR **MoSAR** (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech)
sous la direction de **Laurence PUILLET**, Chargée de recherche (ADR),
la co-direction de **Bénédicte GRIMARD**, Professeure
et la co-supervision de **Fabrice BIDAN**, Chef de projet

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 9 juillet 2024, par

Nicolas GAFSI

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Andrew PONTER Professeur, ENVA	Président
Fabienne BLANC Professeure, VetAgroSup	Rapporteur & Examinatrice
Charles-Henri MOULIN ICPEF (HDR), L'Institut Agro Montpellier	Rapporteur & Examineur
Dominique HAZARD Chargé de recherche, INRAE (Centre Occitanie)	Examineur
Julie ARSENAULT Professeure, Université de Montréal (Canada)	Examinatrice

Titre : Relations entre dynamique de production laitière, gestion des réserves corporelles et performances de reproduction chez la chèvre laitière : une approche par modélisation des trajectoires phénotypiques

Mots clés : Chèvre laitière, lactation, réserves corporelles, reproduction, carrière, modélisation

Résumé : Dans un contexte de transition agroécologique et face aux aléas climatiques de plus en plus fréquents, les systèmes caprins laitiers font face à de nombreux enjeux techniques et socio-économiques. Ils doivent être capables d'élever des chèvres robustes, capables de produire et de se reproduire dans des environnements potentiellement perturbés. Cependant en France, la durée de vie productive moyenne d'une chèvre reste faible. L'élaboration de pratiques de conduite d'élevage et de sélection génétique qui améliorent la robustesse et la longévité des chèvres implique de prendre en compte les interactions entre fonctions biologiques ainsi que leur évolution temporelle, à l'échelle de la lactation et de la carrière. Cette vision multivariée et dynamique est indispensable pour comprendre comment s'élaborent la robustesse et la diversité des carrières. L'objectif de cette thèse est d'utiliser une approche de modélisation des trajectoires phénotypiques de production laitière (PL), de note d'état corporel (NEC) et de poids vif (PV) pour comprendre les interactions entre lactation, gestion des réserves corporelles et reproduction. Les données issues de deux stations expérimentales caprines, recueillies entre 1996 et 2020, ont été utilisées pour caractériser la diversité des trajectoires de PL, PV et de NEC à l'échelle d'une lactation et explorer l'existence d'associations entre ces trajectoires, reflets des fonctions de lactation et de gestion des réserves corporelles. L'échelle de la carrière a été abordée par l'étude de l'enchaînement des trajectoires au travers des parités et par les relations avec les performances de reproduction, à travers

la réussite à l'insémination artificielle (IA). Enfin, pour mettre en perspective et évaluer les conséquences de la diversité des profils de trajectoires phénotypiques et des performances de reproduction associées à l'échelle du système d'élevage, un modèle existant de démographie du troupeau a été utilisé. Les résultats ont montré qu'il existait une diversité de types de trajectoires phénotypiques de PL, PV et de NEC à l'échelle d'une lactation et qu'il n'existait pas d'associations fortes entre les types de trajectoires, suggérant une diversité de stratégies de partition d'énergie entre les différentes fonctions biologiques. Sur plusieurs lactations, il existe une répétabilité d'appartenance à certains types de trajectoires. Concernant la reproduction, les chèvres présentant la persistance la plus élevée ont significativement moins de chances de réussir à l'IA que des chèvres présentant une persistance de lactation faible. Pour le PV, seule la dynamique de reprise de poids autour de l'IA a eu un effet sur la réussite à l'IA. Pour la NEC, c'est le niveau minimal atteint pendant la lactation qui a eu un effet sur la réussite à l'IA. Les approches par simulation ont montré qu'une baisse de fertilité à l'IA n'a pas d'effets majeurs sur la distribution des mises-bas. Ce travail propose une méthodologie originale de traitement des données phénotypiques dynamiques et pourrait permettre à terme d'apporter des références pour la conduite conjointe de l'alimentation et de la reproduction des troupeaux caprins laitiers.

Title : Relationships between milk production dynamics, body reserve management and reproductive performance in dairy goats: a modelling approach based on phenotypic trajectories

Keywords : Dairy goat, lactation, body reserves, reproduction, lifetime, modelling

Abstract : In a context of agro-ecological transition and increasingly frequent climatic hazards, goat systems in France are facing several technical and socio-economic challenges. Goat farming systems need to breed robust goats capable of producing and reproducing in potentially disturbed environments. However, in France, the average productive lifetime of a goat is short. Implementing herd management strategies and genetic selection to improve the longevity and robustness of dairy goats imply to consider the interactions between the different biological functions and their dynamic change at the lactation and lifetime scales. This multivariate and dynamic view is crucial to understand robustness and diversity of lifetime productive trajectories. The objective of this thesis is to use a modelling approach of phenotypic trajectories of milk yield (MY), body condition score (BCS) and body weight (BW) to understand the relationships between lactation, body reserves and reproduction. Data from two goat experimental stations in France collected between 1996 and 2020 were used to characterize the diversity of phenotypic curves of MY, BW, and BCS throughout lactation and explore the associations between these different phenotypic curves, reflecting lactation and body reserves management. Lifetime scale was studied by analyzing the sequence of phenotypic trajectories over parities and the relationships with reproductive success, in particular for

artificial insemination (AI). Finally, we used an existing herd demography model to put into perspective and assess the consequences of the diversity of phenotypic trajectories at the herd scale and the corresponding reproductive performance. Results showed a diversity of phenotypic trajectories for MY, BW, and BCS at the lactation level and no strong associations between the different trajectories, suggesting a diversity of strategies for energy partitions between the different biological functions. Over several lactations, there was a repeatability of phenotypic trajectories membership across parities. Regarding reproductive performance, goats with the highest MY persistency were significantly less likely to succeed at AI than goats with low MY persistency. For BW, only the dynamics of repletion around AI influenced success at AI. For BCS, it was the minimum level reached during lactation that influenced AI success. Simulation approaches showed that a drop in fertility at AI had no major effect on the distribution of kidding. This work proposes an original methodological approach for phenotypic time-series data and opens perspective to provide technical references for feeding and reproductive management of dairy goat herds.

Ce projet de thèse a été financé par l'Institut de l'Elevage dans le cadre d'une convention CIFRE avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) (convention n°2020/1547). Cette thèse a été réalisée au sein de l'UMR MoSAR. Cette thèse s'inscrit également dans le cadre des travaux menés par une Unité Mixte Technologique Système Caprins Durables De Demain (UMT SC3D).



REMERCIEMENTS

J'arrive au terme de ces trois belles années de thèse sur les interactions entre fonctions biologiques chez la chèvre. Tout cela n'aurait pas été possible si Barbara Fança ne m'avait pas donné cette offre de thèse à la fin de mon stage de fin d'études et donc je l'en remercie très chaleureusement. Je la remercie elle et Louise Chantepie de m'avoir aidé à préparer mon entretien de thèse. Je me souviens encore du coup de fil de Laurence reçu à mon retour à Toulouse qui m'annonçait que j'étais le candidat retenu à l'issue des entretiens pour la thèse, j'étais super heureux ce jour-là.

Je remercie tout d'abord mon jury de thèse : Fabienne Blanc, Charles-Henri Moulin, Andrew Ponter, Dominique Hazard et Julie Arsenault pour avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse.

Je remercie très chaleureusement mes encadrants de thèse : Laurence Puillet, Bénédicte Grimard et Fabrice Bidan de m'avoir fait confiance pour mener à bien cette thèse.

Merci à toi Laurence pour ta bienveillance, ta disponibilité et ton soutien dans les moments les moins sympas de la thèse. Merci pour ces séances de brainstorming très fructueuses qui m'ont énormément servi à construire ce projet sur trois ans. Je te remercie de m'avoir appris l'utilité du package dplyr sous R qui m'a sauvé plus d'une fois.

Durant cette thèse, j'ai appris à regarder les données dans tous les sens et ça, c'est grâce à toi Fabrice, merci de m'avoir poussé à aller plus loin. Je te remercie pour ta bienveillance, ta disponibilité et ton soutien. J'ai beaucoup apprécié les moments passés à Beaucauzé.

Bénédicte, je tenais également sincèrement à vous remercier pour votre investissement, nos échanges très intéressants, votre réactivité et votre disponibilité malgré votre emploi du temps chargé ! C'est aussi grâce à vous que je peux poursuivre dans une carrière d'enseignement et de recherche je vous en suis très reconnaissant.

Je remercie très chaleureusement Olivier Martin pour son investissement important durant ma thèse. Olivier, au cours de la thèse tu as pris de plus en plus de place dans mon encadrement et j'ai énormément apprécié nos interactions, c'est grâce à toi que j'ai pu manipuler PLM, UWM et développer des compétences d'ajustements de modèles non linéaires et j'ai adoré ça ! Merci de ta disponibilité et de ta réactivité dans nos échanges.

Au sein du laboratoire MoSAR, je souhaiterais remercier sincèrement Alexandra Eymard et Loïc Sourgens pour leur aide lorsque j'avais des questions sur le fonctionnement de la chèvrerie de Grignon ou plus largement sur les données. Je souhaiterais également remercier Christelle Loncke de m'avoir donné l'opportunité d'intervenir auprès des Master 1 pour me tester à l'enseignement. Je remercie Nicolas Friggens pour m'avoir accordé de son temps pour lui présenter mes travaux et d'échanger avec lui. Enfin, je souhaiterais remercier plus largement toutes les personnes de MoSAR avec qui j'ai pu interagir au cours de pauses café.

Je remercie les membres de mon « comité opérationnel » : Marie-Pierre Jacqueroūd, Olivier Martin, Bénédicte Grimard ; merci à tous pour vos conseils lors de nos points d'avancement mensuels qui m'ont aidé à progresser tout au long de la thèse.

Je remercie mon comité de thèse : Bertrand Bluet, Sandrine Fréret et Amandine Lurette ; merci à vous pour vos conseils et vos remarques très pertinentes qui m'ont aidé à réfléchir sur ma stratégie de recherche et qui m'ont poussé à aller visiter des élevages caprins.

Au sein de IDELE, je remercie Claire Boyer de m'avoir accordé de son temps pour me fournir des données relatives à la ferme du Pradel et diverses informations sur le fonctionnement de la ferme. J'en profite pour remercier Alain Pommaret qui a répondu à mes questions sur la conduite du troupeau. Je souhaite remercier Maxime Legris, pour ses conseils, ses appuis statistiques et son investissement dans le suivi de ma thèse. Enfin, je souhaiterais remercier tout le service « Productions Laitières » pour m'avoir bien intégré à l'équipe.

Trois années de thèses, ce sont aussi des rencontres je tiens à remercier les doctorants, postdocs et stagiaires du laboratoire présents ou passés pour ces bons moments passés après le travail ! Merci à vous Jérémy, Paul, Marcelo, Sihem, Aurore, Laurine.

Paul on s'est retrouvé parfois à croiser peu de monde au laboratoire, merci d'avoir été là pour nos pauses de 10 h 30 et 16 h 30, ça faisait du bien !

Jérémy même si tu étais sur un autre site c'était très agréable de se voir en dehors, j'ai bien apprécié nos petites séances cinéma Marvel, à refaire !

Je tiens aussi à remercier mes amis de Clermont-Ferrand « les p'tits gros » : Clément, Laurine, Marion, P-A. Merci à vous pour ces soirées jeux sur Gartic phones, ça faisait du bien de rigoler ! Merci à toi P-A, pour nos sorties chez « il était un burger » notre QG rue Mouffetard, je note qu'on doit s'en faire un bientôt. Merci à toi Clément de m'envoyer des vidéos drôles sur Instagram ça illumine mes journées !

Je tiens également à remercier une bonne amie qui vit au Québec, Noémie merci de ton soutien même outre Atlantique, j'étais content de t'avoir revue l'année dernière ça m'a permis de te présenter ce que je faisais en thèse !

Merci à tous mes autres amis qui m'ont demandé de près ou de loin : « Alors cette thèse ? ».

Je remercie également certains membres de ma famille pour leurs appels et soutien : Alya, Dado, Athar, Souha merci pour tout !

Enfin , je termine ces remerciements par les plus importants, mes parents : merci Papa et Maman de m'avoir encouragé à faire une thèse, je n'en serai pas là sans vous.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	5
Table des matières	8
Liste des tables	12
Liste des figures	14
Liste des abréviations	18
Valorisations scientifiques	20
Introduction générale	21
I. Chapitre 1 : État de l’art	25
1. La filière caprine en France	25
1.1. Organisation de la filière caprine en France.....	25
1.2. La production laitière caprine en France.....	25
1.3. Des systèmes caprins diversifiés	27
1.4. Une collecte de lait saisonnée.....	28
2. Accroître la longévité des chèvres pour assurer la durabilité des systèmes caprins	30
2.1. Un constat : une baisse de la durée de vie productive des chèvres en France.....	30
2.2. En France, qu’est-ce qui différencie les systèmes à longévité élevée et faible ?.....	31
2.3. Qu’est ce qui met fin à la carrière d’une chèvre ? Principales causes de réforme	32
2.4. Quels leviers pour améliorer la longévité des chèvres ?.....	32
3. Pour mieux comprendre la construction de la carrière, il est important de considérer les interactions qui existent entre les différentes fonctions biologiques	47
3.1. Les réserves corporelles un outil essentiel du pilotage du troupeau caprin pour assurer une reproduction efficace	48
3.2. La production laitière, une fonction essentielle à assurer dans les systèmes caprins	54
3.3. Le niveau et la dynamique de la production laitière et des réserves corporelles sont importants à considérer pour caractériser les performances de reproduction : importance de la caractérisation des trajectoires phénotypiques à l’échelle de la lactation.....	56
II. Chapitre 2 : Caractérisation de la diversité des trajectoires phénotypiques chez la chèvre	59
1. Introduction du chapitre	59
2. Article n°1: Diversity of performance patterns in dairy goats: multi-scale analysis of the lactation curves of milk yield, body condition score and body weight	59
Abstract	60
Introduction	60
Material and methods	62
Ethics approval	62
Datasets.....	62
Models of individual phenotypic lactation curves.....	64
Fitting convergence	66
Synthetic indicators to describe fitted individual phenotypic lactation curves	67
Statistical analysis.....	68

Results	69
Goodness-of-fit	69
Phenotypic lactation curves characterization	69
Diversity of phenotypic curves at lactation scale	80
Diversity of phenotypic lactation curves at lifetime scale	84
Discussion	88
MY curves	88
Lactation curves of BW	89
Lactation curves of BCS	89
A great diversity of associations among biological functions	90
A methodology to analyze trade-off between phenotypic curves with heterogeneous data frequency ...	92
Further development and potential use of on-farm record for managing animal	92
Conclusion	93
Appendices	94
Acknowledgements	94
Data, scripts, code, and supplementary information availability	94
Conflict of interest disclosure	94
Funding	94
3. Conclusion du chapitre	95
III. Chapitre 3 : Relations entre trajectoires phénotypiques de Production Laitière, Note d'Etat Corporel et Poids Vif et réussite à la reproduction	97
1. Introduction du chapitre	97
2. Article n°2: Exploring how milk production, body weight and body condition dynamics affect reproductive success after artificial insemination in dairy goats	97
Abstract	98
Implications	98
Introduction	99
Material and Methods	100
Data and reproductive management	100
A three-level analysis of reproductive success	101
Assessment of the reproductive success	105
Assessment of heat stress	105
Statistical analysis	105
Results	107
Description of goats according to dataset used	107
Relationship between AI success and clusters of phenotypic lactation curves.....	108
Relationship between AI success and synthetic indicators of phenotypic lactation curves.....	109
Relationship between AI success and model parameters of phenotypic lactation curves	110
Discussion	112
Factors usually known to affect AI success.....	112
Milk production	113
Body condition score	114
Body weight	114
What is the best information to assess AI success?	115
Conclusion	115

Ethics approval.....	116
Data and model availability statement.....	116
Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process	116
Author ORCIDs	116
Declaration of interest.....	116
Acknowledgements	116
Financial support statement	116
3. Conclusion du chapitre	117
IV. Chapitre 4 : Un modèle de simulation de démographie du troupeau caprin qui valorise les trajectoires phénotypiques.....	119
1. Introduction du chapitre.....	119
2. Description du simulateur	120
3. Validation du simulateur avec les données de la station expérimentale caprine MoSAR..	131
4. Comparaison de deux plans d'expérience : Effet de la diversité des trajectoires de PL sur les performances de reproduction	135
5. Analyse de sensibilité pour simuler un étalement des mises-bas.....	140
6. Conclusion du chapitre	141
V. Chapitre 5 : Discussion générale et perspectives.....	148
1. Les résultats de la thèse apportent un potentiel applicatif sur le terrain pour les élevages caprins.....	150
1.1. Apports sur la caractérisation des priorités entre fonctions biologiques chez la chèvre	150
1.2. Apports pour la sélection génétique	150
1.3. Apports pour la conduite du troupeau	151
2. Valorisation de deux bases de données de stations expérimentales caprines en France sur une longue période	152
2.1. Des données fréquentes qui permettent de bien décrire les dynamiques de production laitière et de mobilisation des réserves corporelles	152
2.2. Des performances de reproduction précises, mais uniquement sur les résultats à l'insémination artificielle.....	153
2.3. Des résultats qui reposent sur deux stations expérimentales caprines en France	153
2.4. ... et qui nécessitent des données complémentaires pour mieux caractériser les interactions entre fonctions biologiques.....	154
3. Développement d'une chaîne d'analyse pour caractériser une dynamique de phénotypes	155
3.1. Des modèles adaptés à une hétérogénéité des fréquences pour établir les dynamiques de phénotypes.....	155
3.2. Pour analyser cette dynamique, des indicateurs synthétiques ont été choisis	156
3.3. Les méthodes statistiques pour analyser la diversité des trajectoires phénotypiques	156
3.4. Un modèle troupeau intégrant l'information sur les trajectoires modélisées.....	157
4. À l'issue de la thèse : Quelles sont les perspectives de recherches ?.....	158
Conclusion générale.....	161
Références.....	163
Annexes.....	181

1. Annexe 1 : Appendices supplémentaires du chapitre 2	181
Supplementary online appendix	181
Appendix A. Models of phenotypic trajectories	181
Milk yield	181
Body weight	185
Body condition score	192
Appendix B. Complementary results for the phenotypic trajectories characterization	194
Distribution of goats by breed and farm for milk yield clusters	194
Distribution of goats by breed and farm for body weight clusters	195
Distribution of goats by breed, farm and parity for body condition score clusters	196
Appendix C. Complementary results for the phenotypic trajectories associations	198
Association between milk yield and lumbar BCS trajectories	198
Association between milk yield and sternal BCS trajectories	199
Association between body weight and lumbar BCS trajectories	201
2. Annexe 2 : Matériels et Méthodes supplémentaire du chapitre 3	204
Supplementary material: Exploring how milk production, body weight and body condition dynamics affect reproductive success after artificial insemination in dairy goats	204
3. Annexe 3 : Résumé des communications orales en congrès scientifiques	211

LISTE DES TABLES

Tableau I.1 Principales régions caprines en France (GEB-Institut de l'Élevage, 2023).	25
Table II.1 Lactation selection criteria for milk yield, body weight and body condition score records with parity and breed distribution for dataset 1 and 2.....	63
Table II.2 Description of the set of synthetic indicators used to describe fitted individual phenotypic curve for milk yield (MY), body weight (BW) and body condition score (BCS).	67
Table II.3 Detailed description of cluster names for MY, BW and BCS. The upper script letter describes the phenotype (Y: milk yield; W: body weight; LU: lumbar BCS and ST: sternal BCS). The superscript describes if the cluster is for primiparous (p) or multiparous (m) goats. The subscript describes the key feature of the cluster (letter for level and plus or minus sign for dynamics).	70
Table II.4 Statistical description of synthetic indicators for MY clusters in primiparous goats.....	72
Table II.5 Statistical description of synthetic indicators for MY clusters in multiparous goats.....	73
Table II.6 Statistical description of synthetic indicators for BW clusters in primiparous goats.	75
Table II.7 Statistical description of synthetic indicators for BW clusters in multiparous goats.....	76
Table II.8 Statistical description of synthetic indicators for lumbar BCS clusters in goats.	78
Table II.9 Statistical description synthetic indicators for sternal BCS clusters in goats.....	79
Table II.10 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to MY and BW clusters (see section 2 for clustering methodology).	80
Table II.11 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to MY and BW clusters (see section 2 for clustering methodology).	81
Table II.12 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BW and sternal BCS clusters (see section 2 for clustering methodology).	82
Tableau II.13 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to BW and BCS sternal clusters (see section 2 for clustering methodology).	82
Table II.14 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BCS lumbar and BCS sternal clusters (see section 2 for clustering methodology).	83
Table II.15 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to lumbar and sternal BCS clusters (see section 2 for clustering methodology).	84
Table III.1 Models used to fit raw data to obtain phenotypic curves of MY, BW and BCS for the whole lactation.....	102
Table III.2 Individual goat characteristics according to dataset used.....	107
Table III.3 Relationship between adjustment variables, phenotypic lactation curves, and AI success in primiparous dairy goats (n=309 lactations).	108
Table III.4 Relationship between adjustment variables, phenotypic lactation curves, and AI success in multiparous dairy goats (n=329 lactations).	109
Table III.5 Relationship between adjustment variables, synthetic indicators, and AI success in dairy goats (n=1359 lactations).	110
Table III.6 Relationship between adjustment variables, MY parameters, and AI success in dairy goats (n=1731 lactations).....	111
Table III.7 Relationship between adjustment variables, sternal BCS parameters, and AI success in dairy goats (n=795 lactations).	112
Tableau IV.1 Illustration de la table des probabilités de réussite en insémination artificielle (IA) et en saillies naturelles (SN) en du numéro de cluster de PL.	123
Tableau IV.2 Illustration de la table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation n +1.....	123

Tableau IV.3 Exemple de la table d'évènements rencontrés pour chaque animal au cours d'une simulation.....	126
Tableau IV.4 Exemple de la table de production laitière individuelle.....	127
Tableau IV.5 Exemple de la table de composition du troupeau par classes d'âge.....	128
Tableau IV.6 Exemple de la table de composition du troupeau par parité.....	128
Tableau IV.7 Exemple de la table de composition du troupeau par classe de statut physiologique.....	129
Tableau IV.8 Exemple de la table des ventes de lait et d'animaux.....	129
Tableau IV.9 Table des probabilités de réussite en insémination artificielle (IA) et en saillies naturelles (SN) en fonction du numéro de cluster de PL réellement observé sur le troupeau MoSAR.....	133
Tableau IV.10 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation n +1 réellement observées à Grignon.....	134
Tableau IV.11 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation n +1 pour le scénario cluster faible persistance : primipares uniquement constituées du cluster C2 ($Y^{P_{L-}}$).....	138
Tableau IV.12 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation n+1 pour le scénario cluster forte persistance : primipares uniquement constituées du cluster C1 ($Y^{P_{L+}}$).....	139
Tableau IV.13 Liste des variables individuelles contenues dans HERDMATRIX.....	142
Tableau IV.14 Série d'événements manipulés par le simulateur.....	145
Tableau IV.15 Variables de planning.....	146
Table II.16 Distribution of goats by breed and farm within MY clusters in primiparous goats.....	194
Table II.17 Distribution of goats by breed and farm within MY clusters in multiparous goats.....	194
Table II.18 Distribution of goats by breed and farm within BW clusters in primiparous goats.....	195
Table II.19 Distribution of goats by breed and farm within BW clusters in multiparous goats.....	195
Table II.20 Distribution of goats by breed and farm within lumbar BCS clusters.....	196
Table II.21 Distribution of goats by breed and farm within sternal BCS clusters.....	196
Table II.22 Distribution of goats by parity within lumbar BCS clusters.....	197
Table II.23 Distribution of goats by parity within sternal BCS clusters.....	197
Table II.24 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous goats affected to MY and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	198
Table II.25 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous goats affected to MY and BCS lumbar profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	199
Table II.26 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous goats affected to MY and sternal BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	200
Tableau II.27 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to MY and BCS sternal profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	201
Table II.28 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BW and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	202
Table II.29 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to BW and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).....	203
Table III.8 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and phenotypic lactation curves of MY, BW and BCS_S in goats (n=638).....	204
Table III.9 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and synthetic indicators of MY and BW in goats (n=1359).....	205
Table III.10 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and model parameters of MY in goats (n=1731).....	208
Table III.11 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and model parameters of sternal BCS in goats (n=795).....	210

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 Axes de travaux menés dans le cadre de l'Unité Mixte Technologique Systèmes Caprins Durables De Demain (UMT SC3D).	24
Figure I.1 Production laitière caprine en France en 2023 (Institut de l'Élevage,2024).....	26
Figure I.2 Répartition des chèvres en fonction des races au contrôle laitier 2022, 233 461 lactations contrôlées (Adapté des résultats du contrôle laitier 2022).	27
Figure I.3 Évolution mensuelle de la collecte de lait de chèvre sur les périodes 2021-2023 (Institut de l'élevage, 2024).	29
Figure I.4 Prix moyen payé du lait de chèvre en France (Institut de l'élevage, 2024).	29
Figure I.5 Part des saisons de mises-bas des élevages sur les 10 dernières années issue des bases de données du contrôle laitier (Bidan, communication personnelle).	30
Figure I.6 Représentation schématique des différents évènements physiologiques durant le cycle sexuel chez la chèvre (Fatet et al.,2011).	37
Figure I.7 Courbes de lactation des différentes lactations longues (LL) selon leur durée (en pointillé : 252 913 LL 486-851 jours ; 49 256 LL 852- 1 215 jours ; 26 236 LL) et une lactation standard (trait plein : 3 330 638 lactations ≤ 485 jours) entre 2010-2019 (D'après Bidan et al. (2022).	40
Figure I.8 Fertilité à l'IA par race (2014 à 2022, Institut de l'élevage-Capgènes, 2022).	42
Figure I.9 Fertilité à l'IA par rang de lactation sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).....	43
Figure I.10 Fertilité à l'IA en fonction de l'intervalle MB-IA sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).....	44
Figure I.11 Fertilité à l'IA en fonction de l'échec à l'insémination artificielle (IA) l'année précédente sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).....	45
Figure I.12 Comparaison des différences dans la mise à la reproduction illustré par des courbes de lactation chez la chèvre laitière (a) (adapté de Sauvant et al. (2012) et chez la vache laitière (b) (adapté de López et al. (2015).....	47
Figure II.1 Example of daily milk records fitted using the model proposed by Ben Abdelkrim et al. (2021a) with empty white circles representing raw data, black bold lines representing the unperturbed lactation model (ULM), thin black lines representing the perturbed lactation model (PLM), and grey dotted lines representing the theoretical Wood model. The ULM trajectory was summarized with synthetic indicators: MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250}-MY_{150})/MY_{150}$ x100.	64
Figure II.2 Example of monthly sternal body condition records fitted using the model proposed by Grossman et al. (1999) with empty white circles representing raw data, black straight lines representing the fitted curve. This fitted curve was summarized with synthetic indicators: BCS_{S_k} = sternal BCS at kidding; $BCS_{S_{min}}$ = minimum sternal BCS; $BCS_{S_{210}}$ = sternal BCS at 210 days; $Dep_speed_{S_k \rightarrow 30}$: sternal BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; $Rep_speed_{S_{180} \rightarrow 210}$: sternal BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$	65
Figure II.3 Example of daily body weight records fitted using the model proposed by Martin and Ben Abdelkrim, (2019) with empty white circles representing raw data, black straight lines representing the fitted trajectory. This fitted trajectory was summarized with synthetic indicators: BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30}$: Body weight depletion speed between kidding and 30 days = $(BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210}$: Body weight repletion speed between 180 and 210 days = $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$	66

Figure II.4 PCA and clusters of milk yield synthetic indicators in primiparous (a) and multiparous (b) goats with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines representing a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; $SumMY$ = sum of daily milk yield values over 250 days; $Peak\ time$ = time of the highest milk yield value; $Persistence = (MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$; Y^p_{L+} = Low milk yield and high persistency cluster for primiparous; Y^p_{L-} = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_{H+} = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y^m_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y^m_{H+} = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous). 71

Figure II.5 PCA and clusters of body weight synthetic indicators in primiparous (a) and multiparous (b) goats with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30}$: Body weight depletion speed between kidding and 30 days = $(BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210}$: Body weight repletion speed between 180 and 210 days = $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$; W^p_{L-} = Low body weight and low depletion cluster in primiparous; W^p_{H+} = High body weight and high depletion cluster in primiparous; W^p_{H-} = High body weight and low depletion cluster in primiparous; W^m_{L-} = Low body weight and low depletion cluster in multiparous; W^m_{H+} = High body weight and high depletion cluster in multiparous; W^m_{H-} = High body weight and low depletion cluster in multiparous). 74

Figure II.6 PCA and clusters of lumbar (a) and sternal (b) body condition score synthetic indicators with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (BCS_{L_k} = lumbar BCS at kidding; $BCS_{L_{min}}$ = minimum lumbar BCS; $BCS_{L_{210}}$ = lumbar BCS at 210 days; $Dep_speed_{L_{k \rightarrow 30}}$: lumbar BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{L_{30}} - BCS_{L_k}) / 30$; $Rep_speed_{L_{180 \rightarrow 210}}$: lumbar BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{L_{210}} - BCS_{L_{180}}) / 30$; BCS_{S_k} = sternal BCS at kidding; $BCS_{S_{min}}$ = minimum sternal BCS; $BCS_{S_{210}}$ = sternal BCS at 210 days; $Dep_speed_{S_{k \rightarrow 30}}$: sternal BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; $Rep_speed_{S_{180 \rightarrow 210}}$: sternal BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$; LU_{M+} = Medium lumbar body condition score and depletion cluster; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion cluster; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster). 77

Figure II.7 Barplots displaying the frequency of goats affected to a MY cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3, (c) parity 3 and 4 (Y^p_{L+} = Low milk yield and high persistency cluster for primiparous; Y^p_{L-} = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_{H+} = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y^m_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y^m_{H+} = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous). 85

Figure II.8 Barplots displaying the frequency of goats affected to a BW cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3, (c) parity 3 and 4 (W^p_{L-} = Low body weight and low depletion cluster; W^p_{H+} = High body weight and high depletion cluster; W^p_{H-} = High body weight and low depletion cluster; W^m_{L-} = Low body weight and low depletion cluster; W^m_{H+} = High body weight and high depletion cluster; W^m_{H-} = High body weight and low depletion cluster). 86

Figure II.9 Barplots displaying the frequency of goats affected to a sternal BCS cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3 and (c) parity 3 and 4 (ST_{M+} = Medium sternal body condition score

and depletion profile; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion profile). 87

Figure III.1 Scheme that represented the whole methodology used in the paper with: (1) the different steps used to characterize phenotypic lactation curves of milk yield (MY), body weight (BW), and body condition score (BCS), and (2) the different steps used to investigate artificial insemination (AI) success with different levels of detail. To characterize phenotypic lactation curves three steps were used. The first step was to fit the raw data with models adapted to the recording frequency (monthly, weekly, daily) to obtain phenotypic lactation curves : MY was fitted with the perturbed lactation model (PLM) (updated version Martin, 2023), BW was fitted with two models : the unperturbed weight model (UWM) (Martin and Ben Abdelkrim, 2019), and the Grossman et al. (1999) model, BCS was fitted with the Grossman et al. (1999) model. In the second step, MY, BW and BCS curves were then summarized into synthetic indicators with level and dynamic indicators : MY : $SumMY$ = sum of daily milk yield values over 250 days; MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistence = $(MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$; BW : BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30} = (BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210} = (BW_{210} - BW_{180}) / 30$; BCS : BCS_{S_k} = Sternal BCS at kidding; $BCS_{S_{min}}$ = Minimum sternal BCS; $BCS_{S_{210}}$ = Sternal BCS at 210 days; $Dep_speed_{S_k \rightarrow 30} = (BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; $Rep_speed_{S_{180 \rightarrow 210}} = (BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$. In the final step principal component analysis (PCA) and agglomerative hierarchical clustering (AHC) were performed on synthetic indicators separately for MY, BW and BCS curves to obtain clusters of phenotypic lactation curves. 103

Figure III.2 Clusters of phenotypic lactation curves estimated after principal component analysis and hierarchical clustering analysis on synthetic indicators for milk yield ((a) primiparous, (b) multiparous), body weight((a) primiparous, (b) multiparous) and sternal body condition score ((e) all parities together); (Y^p_L = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_M = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^p_H = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y^m_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y^m_H = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous; W^p_L = Low body weight and low depletion cluster for primiparous; W^p_{H+} = High body weight and high depletion cluster for primiparous; W^p_{H-} = High body weight and low depletion cluster for primiparous; W^m_L = Low body weight and low depletion cluster for multiparous; W^m_{H+} = High body weight and high depletion cluster for multiparous; W^m_{H-} = High body weight and low depletion cluster for multiparous; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster)(Adapted from Gafsi et al.(2024))..... 104

Figure IV.1 Clusters de trajectoires phénotypiques de PL chez les primipares (a) et les multipares (b) : C_1 : Y^p_{L+} = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : Y^p_L = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : Y^p_{M-} = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_4 : Y^p_H = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : Y^m_{M+} = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : Y^m_{M-} = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y^m_H = Production laitière forte et persistance moyenne. 124

Figure IV.2 Sorties du simulateur : (a) graphique d'évolution de la démographie du troupeau par année de simulation en fonction de la classe d'âge ; (b) graphique de la production laitière individuelle simulée à partir des données observées sur le troupeau MoSAR ; (c) graphique de l'évolution de la photopériode, du nombre d'ovulations et de la distribution des mises-bas..... 131

Figure IV.3 Courbe de livraison simulée à partir d'une simulation du troupeau MoSAR sur la période 2005-2025 et courbes de livraisons réelles obtenues sur les campagnes de 2020 à 2023..... 132

Figure IV.4 Exemples de distributions de mises-bas simulées et réelles sur une campagne de production.	132
Figure IV.5 Courbe de livraison simulée à partir d’une simulation des deux scénarios sur la période 2005-2025 : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y^{p_L} (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster $Y^{p_{L+}}$ (forte persistance).	136
Figure IV.6 Variabilité du cumul de production laitière totale vendue sur la période 2005-2025 en fonction des plans de simulations (n =8 simulations) : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y^{p_L} (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster $Y^{p_{L+}}$ (forte persistance).	136
Figure IV.7 Distribution des dates de mises-bas en fonction du plan de simulation : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y^{p_L} (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster $Y^{p_{L+}}$ (forte persistance).	137
Figure IV.8 Distribution des dates de mises-bas en fonction du plan de simulation : gradient croissant de fertilité observé 0,1 (10 % de la fertilité réelle) jusqu’à 0,9 (90 % de la fertilité réelle).	140
Figure IV.9 Graphique d’évolution de la démographie du troupeau par année de simulation en fonction de la classe d’âge dans le cas d’une simulation avec une fertilité égale à 30 % de la fertilité observée à Grignon.	141
Figure V.1 Schéma de synthèse des principaux résultats de la thèse.	149
Figure II.10 Perturbed lactation model. A. Unperturbed lactation model (Y^*) and perturbed lactation model (Y). B. Perturbation model (P) as the product of n individual perturbations ($\pi_i = 1:n$). Illustration with parameters: $u1: 5 = 2, 0.2, 0.004, 225, 50$, $p1: 4(1) = 30, 15, 0.1, 15$, $p1: 4(2) = 60, 20, 0.2, 15$, $p1: 4(3) = 120, 10, 0.2, 5$ and $p1: 4(4) = 160, 2, 0.4, 3$	182
Figure II.11 Body Weight Model. A. Weight model (W) integrating a growth function with phenotypic modulation of reserves (G). B. Gravid uterus weight model before parturition p ($U1$) and before parturition $p + 1$ ($U2$). C. Body reserves depletion/repletion sequence after parturition p ($T1$) and after parturition $p + 1$ ($T2$). Illustration with parameters: $p = 1$, $tp1: 2 = 400, 760$, $tc1: 2 = 250, 610$, $w0: 2 = 4, 7, 4$, $m1: 2 = 60, 70$, $n1: 2 = 60, 50$, $k1: 2 = 0.20, 0.15$, $h1: 2 = 75, 50$	188
Figure II.12 Grossman Model applied to Body Condition Score. Illustration with parameters $BM = 2$, $kE = -0.01$, $kL = 0.004$, $t1 = 50$ and $L = 70$	193

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP = Analyse en Composantes Principales

AGNE = Acides Gras Non Estérifiés

AOP = Appellations d'Origine Protégée

CAH = Classification Ascendante Hiérarchique

eCG = Gonadotrophine chorionique équine

FGA = Acétate de fluorogestone

FSH = Hormone folliculostimulante

GH = Growth Hormone

GMQ = Gain Moyen Quotidien

GnRH = Gonadotropin Releasing Hormone

GRC = Groupe Reproduction Caprine

IA = Insemination Artificielle

IGF-I = Insulin Growth factor I

LH = Hormone Lutéinisante

LL = Lactation Longue

MET = Mortalités Embryonnaires Tardives

NEC = Note d'Etat Corporel

NF-MEP = Non-Fécondations- Mortalités Embryonnaires Précoces

PACA = Provence-Alpes-Côte d'Azur

PGF2 α = Prostaglandines F2 α

PL = Production Laitière

PLM = Perturbed Lactation Model

PMSG = Pregnant Mare Serum Gonadotropin

PV = Poids Vif

SN = Saillies Naturelles

TB = Taux Butyreux

THI = Index température humidité

TP = Taux Protéique

ULM = Unperturbed Lactation Model

UMT = Unité Mixte Technologique

VALORISATIONS SCIENTIFIQUES

Publications scientifiques

Gafsi N., Martin O., Bidan F., Grimard B., Puillet L (2024). Diversity of performance patterns in dairy goats: multi-scale analysis of the lactation curves of milk yield, body condition score and body weight. [10.24072/pcjournal.449](https://doi.org/10.24072/pcjournal.449) Manuscrit publié dans *Peer Community Journal : Animal science*.

Gafsi N., Martin O., Bidan F., Grimard B., Puillet L (2024). Exploring how milk production, body weight and body condition dynamics affect reproductive success after artificial insemination in dairy goats. Manuscrit soumis à *Theriogenology*.

Communications orales lors de congrès internationaux ou nationaux

Gafsi N., Bidan F., Grimard B., Legris M., Martin O., Puillet L (2022). Dynamic interplay between reproduction, milk production, body reserves in Alpine goats. *73rd Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Porto, Portugal*. **Novus Award for the best presentation.**

Gafsi N., Bidan F., Grimard B., Legris M., Martin O., Puillet L (2022). Relations entre réussite à l'IA, dynamique de production laitière, réserves corporelles et stress thermique chez la chèvre laitière de race Alpine. *26^{èmes} Rencontres autour des recherches sur les ruminants (3R 2022)*.

Gafsi N., Bidan F., Grimard B., Legris M., Martin O., Puillet L (2023). A good start for a good productive life as a dairy goat. *American Dairy Science Association (ADSA), Ottawa, Canada*.

Harnois Gremmo A., **Gafsi N.**, Bidan F., Martin O., Puillet L (2023). Influence of climatic environmental disturbances on the lactation curve in dairy goats. *74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Lyon, France*.

Posters scientifiques

Gafsi N., Bidan F., Grimard B., Legris M., Martin O., Puillet L (2022). Understanding the dynamic interplay between reproduction, milk production and body reserves in dairy goats : a way to optimize feeding and reproduction management. *Journées de la graduate school Biosphera de l'université Paris-Saclay*.

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui les systèmes d'élevages caprins en France font face à de nombreux **enjeux sociaux** (attractivité du métier d'éleveur, renouvellement des générations, évolutions des pratiques de reproduction vers l'arrêt d'utilisation des hormones (Lurette et al., 2016), **économiques** (charges alimentaires élevées (Bossis et al., 2014) et **environnementaux** (limitations des intrants exogènes, agriculture décarbonée etc.). La transition vers des élevages plus vertueux impose une maîtrise de tous ces enjeux, qui touchent toutes les composantes du système d'élevage, en particulier l'animal qui doit produire de manière efficiente en valorisant la ressource disponible tout en étant capable de se reproduire dans des environnements potentiellement perturbés en émettant le moins de gaz à effet de serre possible sur sa carrière. Une façon d'améliorer l'efficience et la valorisation des ressources est d'allonger la **durée de vie productive** des femelles laitières pour diluer les coûts fixes liés aux phases improductives d'élevage (stade jeune et phases de tarissement). Cependant, depuis une trentaine d'années en France, une baisse globale de la durée de vie productive est observable chez la chèvre laitière. Les chèvres qui sont nées en 1991 produisaient 346 jours de plus que des chèvres nées en 2011 (Palhière et al., 2018). La durée de vie productive moyenne d'une chèvre est ainsi aujourd'hui de 2,7 ans. En effet, de Cremoux et al. (2024) ont montré que 71,4 % des chèvres ne faisaient qu'entre 1 et 3 lactations dans leur carrière.

Les pratiques de réforme dans nos systèmes induisent cette faible durée de vie productive, rendant impossible le maintien de chèvres avec des parités élevées. Les réformes tiennent compte de **sorties volontaires** qui résultent des choix de l'éleveur et de **sorties involontaires** (infertilité, pathologies, mortalités etc.). En filière caprine, la production laitière est la **première cause** de sortie volontaire (34 % des causes de sorties pour les éleveurs enquêtés dans le cadre du casdar RUSTIC (Astruc et al., 2021). La reproduction, est en troisième position (13 % des causes de sorties des éleveurs enquêtés (Astruc et al., 2021). Ces pratiques favorisent des femelles laitières plus **productives et efficientes à court terme**. Elles mettent fin à la carrière d'autres chèvres moins productives en début de carrière mais potentiellement capables d'enchaîner plusieurs cycles de production et donc d'être plus **efficientes à long terme**. L'entrée de nouvelles femelles de remplacement dans le troupeau impose la réforme des femelles les plus âgées (De Vries et Marcondes, 2020 ; Han et al., 2022). Ainsi, pour pouvoir rester dans le troupeau, la femelle laitière doit être capable de produire conformément aux attentes de l'éleveur et de se reproduire sur plusieurs cycles. Sa longévité est ainsi conditionnée par sa robustesse, définie comme: « La capacité, face aux contraintes environnementales, de continuer à faire les différentes choses que l'animal doit faire pour favoriser sa capacité future à se reproduire » (Friggens et al., 2017). Pour comprendre comment s'élabore la **robustesse**, il est donc important de se placer à l'échelle de l'animal, niveau d'organisation où se construisent

les performances au cours de la carrière.

Dans un objectif d'élever et piloter des animaux robustes capables de se reproduire et de durer dans le temps, il est nécessaire d'adopter un point de vue systémique : la chèvre est un système complexe, dans lequel interagissent différentes fonctions biologiques (survie, croissance, gestation, lactation etc.) impliquant des mécanismes de **partition d'énergie entre ces différentes fonctions** (Friggens et al., 2017). Cette partition d'énergie est assurée par un ensemble de régulations physiologiques. Des mécanismes **homéostatiques** interviennent à court terme pour maintenir la stabilité du milieu intérieur (régulation de la température corporelle, de la glycémie etc.). D'autres mécanismes, génétiquement déterminés, agissent à plus long terme (**homéorhèse**) et permettent un ensemble de changements coordonnés du métabolisme pour orienter l'énergie vers un état physiologique particulier (Bauman et Currie, 1980). Ces mécanismes traduisent l'évolution des priorités entre fonctions pour assurer l'enchaînement des cycles reproductifs (Martin et Sauvant, 2010). Les **réserves corporelles** jouent un rôle clé dans la partition d'énergie en assurant un rôle tampon de stockage ou de fourniture d'énergie aux différentes fonctions. La mobilisation des réserves corporelles soutient la **production laitière** en début de lactation. Le niveau et la dynamique des réserves corporelles peuvent avoir des conséquences sur la **reproduction** (Disenhaus et al., 2002; Chagas et al., 2007; Friggens et al., 2010; Cutullic et al., 2012). Lorsque l'environnement est contraignant elles peuvent servir de source d'énergie (Blanc et al., 2006). Elles sont donc un élément central des interactions entre les différentes fonctions biologiques. Ces interactions ont été largement étudiées chez la vache laitière. Elles le sont moins chez la chèvre. **Une meilleure compréhension de ces interactions à l'échelle d'une lactation permettrait pourtant de mieux comprendre l'enchaînement des cycles de production et donc l'élaboration de la carrière** (Dumont et al., 2020).

Pour mieux comprendre les interactions entre lactation, gestion des réserves corporelles et reproduction, et les potentiels **compromis** entre ces fonctions, il est essentiel de prendre en compte l'expression dynamique de l'utilisation des réserves corporelles (Friggens et al., 2017). Avec le développement de l'élevage de précision, il est plus facile d'accéder à des données fréquentes traduisant l'expression des fonctions de lactation (production laitière) et de gestion des réserves corporelles (poids vif, note d'état corporel) au cours d'un cycle de production. En combinant ces données longitudinales avec des modèles mathématiques, il est possible de décrire les trajectoires phénotypiques de production laitière, poids vif et note d'état corporel pour étudier l'expression dynamique des fonctions biologiques. Cette caractérisation des trajectoires phénotypiques permet de comparer les animaux à l'échelle d'un cycle de production et également au cours de l'enchaînement des cycles de production. Il est ainsi possible d'analyser comment une trajectoire en début de vie conditionne les trajectoires suivantes (Puillet et Martin, 2017) et comment se construit la diversité des

carrières individuelles. Cette meilleure compréhension de la **diversité des carrières** est essentielle pour élaborer des conduites d'élevage qui améliorent les performances du troupeau (Tichit et al., 2004). **Ce travail repose sur l'hypothèse que l'analyse de la diversité des trajectoires phénotypiques sur différentes échelles de temps (échelle lactation et carrière) apportera des enseignements sur l'impact de la partition d'énergie entre les différentes fonctions biologiques et permettra de mieux comprendre la diversité des carrières.** L'objectif général de la thèse est de comprendre les interactions entre les fonctions de lactation, de gestion des réserves corporelles et de reproduction par une approche de modélisation des trajectoires phénotypiques. Pour répondre à cet objectif, trois questions de recherche ont été formulées :

- *Quelle est la diversité des trajectoires phénotypiques individuelles de production laitière (PL), de poids vif (PV) et de note d'état corporel (NEC) chez la chèvre à l'échelle d'une lactation et à l'échelle de la carrière ?*
- *Dans quelle mesure ces trajectoires phénotypiques expliquent-elles la variabilité des performances de reproduction chez la chèvre à l'échelle de la lactation ?*
- *Quelles sont les conséquences de la diversité des trajectoires individuelles à l'échelle du troupeau ?*

Ce projet de thèse s'intègre dans le cadre de travaux menés par l'unité mixte technologique systèmes caprins durables de demain (UMT SC3D). Cette UMT regroupe des ingénieurs de l'institut de l'élevage et des ingénieurs et chercheurs INRAE. Elle a pour objectif de fournir aux éleveurs et à tous les membres de la filière caprine les clés pour aller vers des conduites et des systèmes d'élevages durables capables de résister aux aléas futurs. Ma thèse s'inscrit dans **l'axe 3 : des conduites d'élevage innovantes pour répondre aux enjeux de la filière (Figure 0.1).**

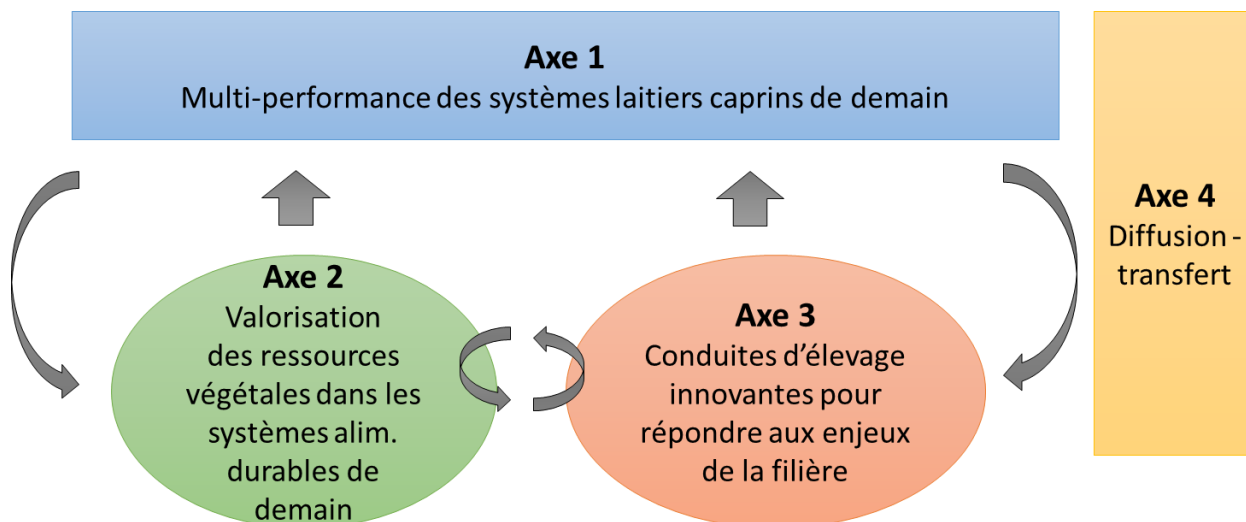


Figure 0.1 Axes de travaux menés dans le cadre de l'Unité Mixte Technologique Systèmes Caprins Durables De Demain (UMT SC3D).

Ce manuscrit s'articule en cinq chapitres. Le **chapitre 1** présente la filière caprine en France, les enjeux autour de la longévité et les connaissances actuelles sur les interactions entre la lactation, la gestion des réserves corporelles et la réussite à la reproduction. Le **chapitre 2** présente, sur la base d'un article scientifique (Gafsi et al., accepté pour publication), l'analyse de la diversité des trajectoires phénotypiques de PL, de PV et de NEC à l'échelle de la lactation et à l'échelle de la carrière. Le **chapitre 3** présente, sur la base d'un article scientifique, (Gafsi et al., soumis) l'analyse des relations entre trajectoires phénotypiques et réussite à la reproduction. Sur la base de ces résultats à l'échelle de la chèvre laitière, le **chapitre 4** aborde les conséquences de la diversité des trajectoires individuelles avec un modèle de démographie du troupeau. Le **chapitre 5** porte sur la discussion générale des principaux résultats de la thèse et des perspectives pour de nouvelles recherches.

I. CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART

1. LA FILIERE CAPRINE EN FRANCE

1.1. Organisation de la filière caprine en France

En France en 2021, 5 280 exploitations professionnelles de plus de 24 reproducteurs caprins lait ont été recensées (GEB-Institut de l'Élevage, 2023). Parmi ces exploitations, 47 % d'entre elles transforment leur lait en fromages à la ferme, 48 % livrent exclusivement leur lait à une laiterie et 5 % sont « mixtes » c'est-à-dire qu'une partie de la production de lait est directement transformée en fromages à la ferme et l'autre partie est livrée à une laiterie (GEB-Institut de l'élevage, 2020). Avec environ 1,15 million de chèvres en France, la région Nouvelle-Aquitaine compte le plus de chèvres en France avec 33 % du cheptel total. Les régions Pays de la Loire, Auvergne Rhône-Alpes et Occitanie cumulent à elles trois 43 % du cheptel total (Tableau I.1). Ces chiffres suggèrent donc la dominance de certaines régions en termes de production de lait.

Tableau I.1 Principales régions caprines en France (GEB-Institut de l'Élevage, 2023).

Exploitations de chèvres	Nombre d'exploitations	% du total	Effectif de chèvres	% du total	Taille moyenne
Nouvelle-Aquitaine	1 566	16 %	386 854	33 %	247
Pays de la Loire	559	6 %	172 829	15 %	309
Auvergne-Rhône-Alpes	2 182	23 %	152 472	13 %	70
Occitanie	1 503	16 %	172 051	15 %	114
Centre-Val de Loire	584	6 %	125 256	11 %	214
Bourgogne-Franche-Comté	584	6 %	37 401	3 %	64
Autres régions	2 529	27 %	109 380	9 %	43
France métropolitaine	9 507	-	1 156 243	-	122

1.2. La production laitière caprine en France

À l'échelle européenne, la France possède le quatrième plus grand cheptel de chèvres laitières et se place au rang de premier producteur de lait, avec 709 millions de litres produits en 2023. Le cheptel caprin français est fortement orienté vers la production laitière, avec plus de 75 % du lait de chèvre livré en laiteries et 25% du lait transformé à la ferme. Les régions Nouvelle-Aquitaine et Pays de la Loire produisent plus de la moitié du lait livré aux laiteries (Figure I.1). En 2023, la Nouvelle-Aquitaine a produit 34,5 % de la production nationale avec 42 % des livraisons nationales (Institut de l'Élevage, 2024). Les Pays de la Loire ont produit 17 % de la production nationale avec 21 % des livraisons nationales. La production totale de fromages de chèvre atteint près de 100 000 tonnes, faisant de la France le premier producteur mondial de fromages de chèvre au lait pur de chèvre. Parmi les 46 fromages AOP français, 15 sont au lait de chèvre, symbolisant la volonté des acteurs régionaux de préserver leur lien au terroir

et leur savoir-faire transmis de génération en génération. En 2022, pour les exploitations au contrôle laitier, sur 233 461 lactations contrôlées, 64 % étaient des chèvres de race Alpine qui produisaient 819 kg de lait en 250 jours. En deuxième position, les chèvres de race Saanen représentaient 33 % des lactations contrôlées avec une production de 824 kg de lait en 250 jours (Figure I.2, Institut de l'élevage, 2022). Les 3 % des chèvres restantes sont essentiellement de race Croisée. Avec cette orientation laitière, qu'elles sont les grandes caractéristiques des systèmes caprins en France ?

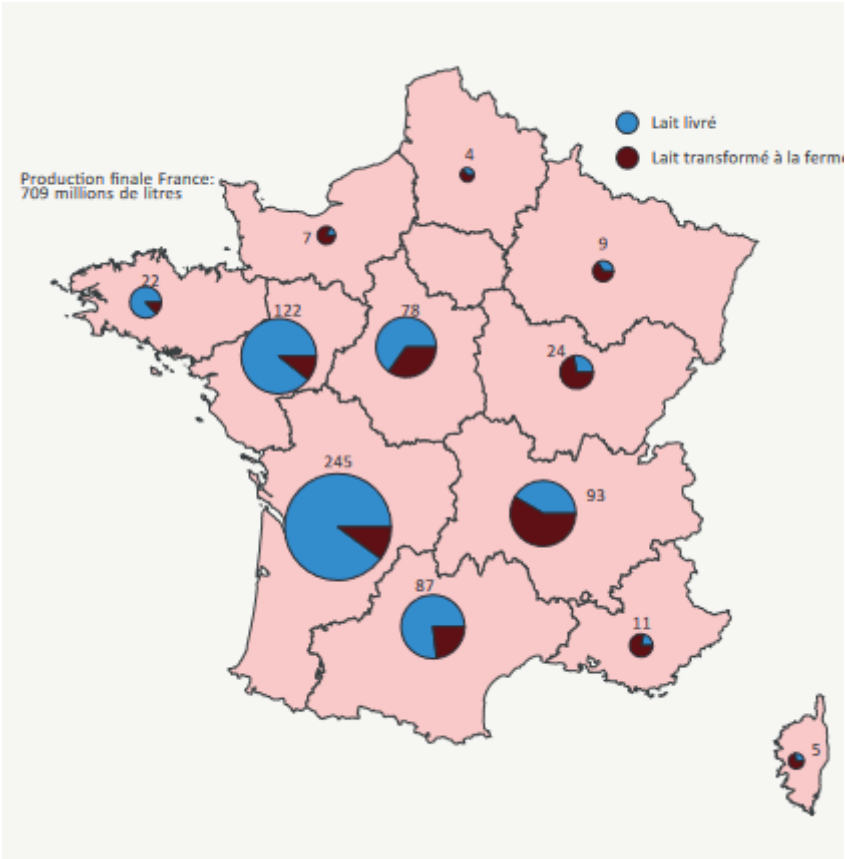


Figure I.1 Production laitière caprine en France en 2023 (Institut de l'Élevage,2024).

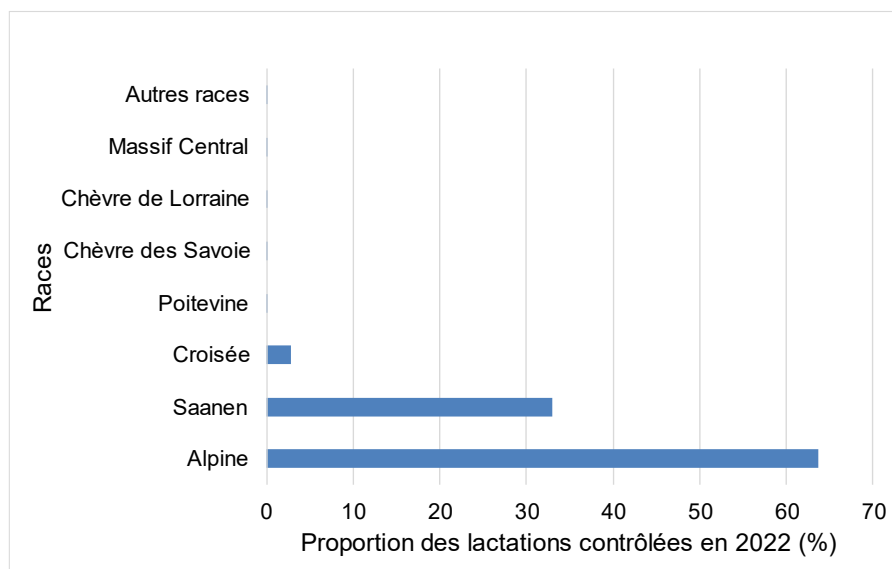


Figure 1.2 Répartition des chèvres en fonction des races au contrôle laitier 2022, 233 461 lactations contrôlées (Adapté des résultats du contrôle laitier 2022).

1.3. Des systèmes caprins diversifiés

Concernant les exploitations caprines, elles se différencient par le mode de valorisation du lait, le degré de spécialisation, le système fourrager, l'alimentation et la taille du cheptel. Plus de 60 % des exploitations caprines professionnelles sont spécialisées. Concernant la taille du cheptel, les systèmes livreurs comptent en moyenne 251 chèvres contre 87 chèvres pour les systèmes fromagers. La livraison aux laiteries prédomine généralement dans le centre ouest et le sud-ouest, tandis que les systèmes fromagers sont plus fréquents dans la région Centre, avec environ la moitié des exploitations produisant le fromage à la ferme. Pour les systèmes livreurs spécialisés centre ouest et sud-est, la taille du cheptel varie de 140 à 570 chèvres. Ces exploitations disposent de systèmes fourragers divers : systèmes « foin », « ensilage de maïs », pâturage ou sans foncier. Cette diversité induit une autonomie alimentaire très variable entre exploitations. Pour les systèmes livreurs spécialisés sud-est, la taille du cheptel varie de 100 à 300 chèvres. Le système alimentaire repose essentiellement sur du pâturage et sur l'achat de fourrages pour l'hiver et une utilisation faible de concentrés. Concernant, les systèmes fermiers spécialisés, la taille du cheptel varie entre 70 et 104 chèvres selon la région et la valorisation du litre de lait est dépendante de la localisation géographique. Ainsi, les fromagers du sud-est enregistrent en moyenne +0,68 € par litre de lait vendu que les autres systèmes fromagers de France, tout en ayant un plus faible volume de transformation par rapport aux autres régions (15 000-50 000 litres de lait contre 70 000 litres de lait). Par ailleurs, lorsque la livraison est associée à d'autres productions, elle s'entoure souvent d'autres herbivores (bovins allaitants,

bovins laitiers ou ovins allaitants) ou de cultures végétales. Toutefois, cette diversification expose les exploitations à une concurrence accrue avec les cultures, en particulier en période de conjoncture défavorable. Par exemple, en 2022 les systèmes livreurs et cultures de ventes ont perçu leur meilleur revenu depuis une décennie grâce à une hausse des prix de ventes et des rendements pour les céréales (Institut de l'élevage, 2024).

Les systèmes fourragers sont assez intensifs en centre, centre ouest et sud-ouest, avec plus souvent des prairies pâturées en Auvergne Rhône-Alpes et avec des parcours au sud-est (régions Occitanie et PACA) et en Corse. Sur le plan alimentaire, les fourrages, en particulier le foin, constituent en moyenne 68 % de la ration des chèvres, pouvant atteindre 75 % dans les élevages pratiquant le pâturage. Cependant, la part des concentrés et déshydratés reste très élevée dans la filière caprine (plus de 30 % de la matière sèche de la ration). Malgré la diversité des exploitations caprines, elles sont généralement moins autonomes que d'autres élevages herbivores (85 % d'autonomie alimentaire en élevage bovin lait (Brunschwig et Devun, 2012), avec des taux d'autonomie alimentaire de 70 % chez les livreurs et de 55 % chez les fromagers (Bossis et al., 2014), les exposants ainsi aux fluctuations des prix des matières premières et à la compétition pour l'utilisation des céréales et protéagineux.

1.4. Une collecte de lait saisonnée

La collecte de lait de chèvre est très saisonnière, due au cycle reproductif saisonnier de la chèvre restreint à une période de l'année, avec une collecte de mars jusqu'à août où deux tiers des volumes sont collectés (Figure I.3). Cette irrégularité est un inconvénient face à une demande croissante et constante en produits laitiers sur l'année. L'évolution du prix du lait au cours de l'année est inversée par rapport à la collecte de lait. En 2023, sur la fin d'année les 1 000 litres étaient payés plus de 1 050 euros contre 850 euros sur les mois de mai-juin là où la collecte était maximale (Figure I.3, Figure I.4). Cette pratique vise à inciter les producteurs à désaisonner la production. La production reste saisonnée avec 57 % des systèmes qui ont des mises-bas saisonnées sur les 10 dernières années, (Figure I.5).

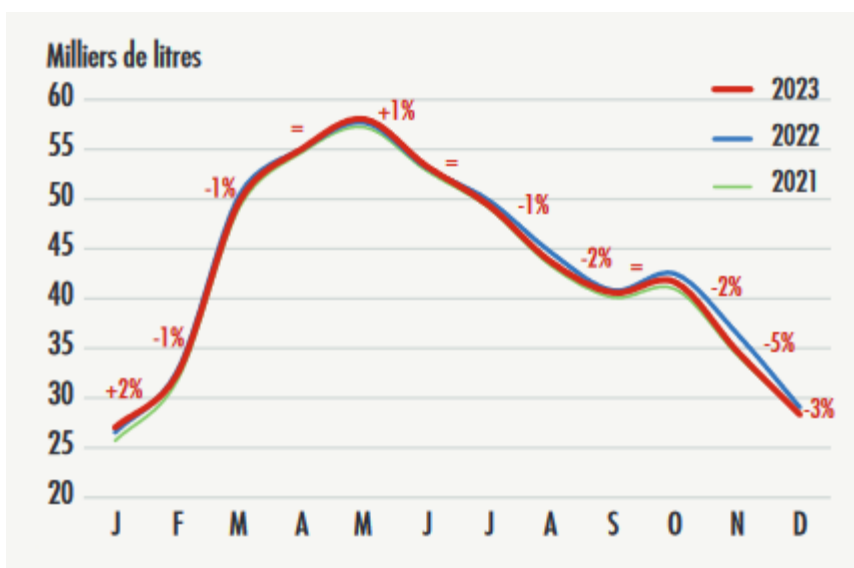


Figure I.3 Évolution mensuelle de la collecte de lait de chèvre sur les périodes 2021-2023 (Institut de l'élevage, 2024).

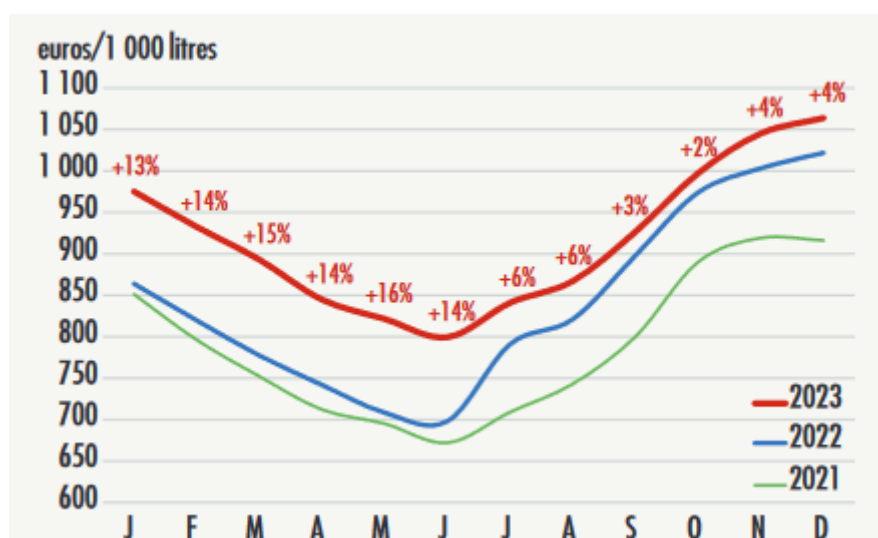


Figure I.4 Prix moyen payé du lait de chèvre en France (Institut de l'élevage, 2024).

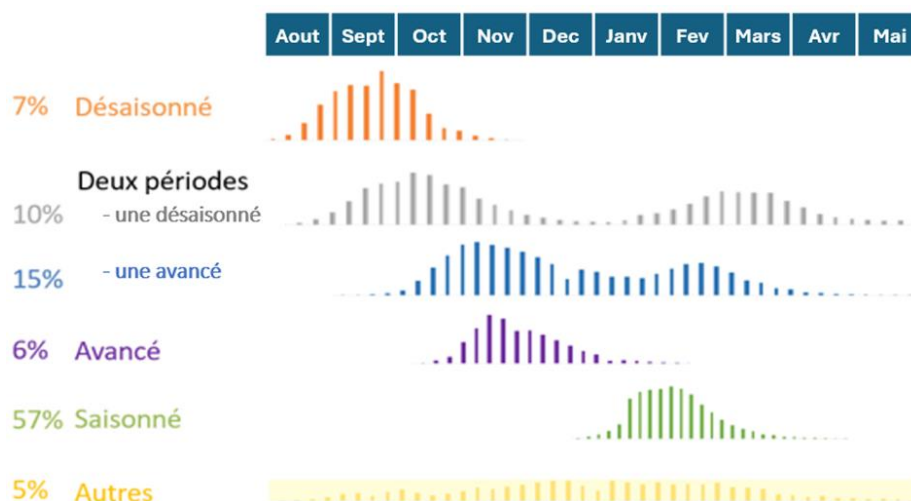


Figure I.5 Part des saisons de mises-bas des élevages sur les 10 dernières années issue des bases de données du contrôle laitier (Bidan, communication personnelle).

La filière caprine française est donc marquée par une forte orientation laitière avec des systèmes livreurs et fromagers, une saisonnalité de la collecte de lait et une diversité de systèmes d'exploitation. Cependant, la filière doit faire face à un certain nombre d'enjeux pour assurer la pérennité des systèmes caprins.

2. ACCROITRE LA LONGEVITE DES CHEVRES POUR ASSURER LA DURABILITE DES SYSTEMES CAPRINS

2.1. Un constat : une baisse de la durée de vie productive des chèvres en France

Dans un contexte de transition agroécologique, la filière caprine doit faire face à un certain nombre d'enjeux majeurs. Un des premiers enjeux concerne le renouvellement des actifs, avec une population d'éleveurs vieillissante (46 % des éleveurs ont plus de 50 ans (Perrot, 2024), l'attraction des jeunes est nécessaire pour assurer la pérennité des élevages. Entre 2020 et 2021, la Nouvelle-Aquitaine a perdu 3 % de ses livreurs à cause de départs à la retraite peu remplacés par de nouvelles installations (Institut de l'élevage, 2023). Sur la dernière décennie, la perte du nombre de livreurs a été de 13 % soit 348 éleveurs en moins, mais les dernières années sont marquées par une stabilité du nombre d'élevages (Institut de l'élevage, 2024). Avec le changement climatique et la multiplication des épisodes de sécheresses intenses, il est important de développer des systèmes fourragers résilients capables de résister à des épisodes de sécheresse ou à des maladies. De même, la limitation des intrants exogènes (fertilisants, traitements hormonaux pour la reproduction etc.), une meilleure maîtrise des charges opérationnelles et de structures, élever des animaux efficaces et robustes sont nécessaires pour aller vers des élevages plus vertueux. Mais la recherche de femelles laitières robustes n'est pas si simple et est à l'agenda de nombreux projets de recherche ces dernières années. En effet, depuis une trentaine d'années en France, une baisse globale de la durée de vie productive s'observe chez la chèvre. Les chèvres qui sont

nées en 1991 produisaient 346 jours de plus que des chèvres nées en 2011 (Palhière et al., 2018). Ceci conduit à une durée de vie productive moyenne de 2,7 ans. Aujourd'hui il est impossible de faire vieillir une chèvre dans nos systèmes du fait d'un certain nombre de critères qui pénalisent la longévité des femelles dans le troupeau. En effet, près de 40 % des élevages en France, ont un taux de réforme supérieur à 30 % (Inosys-Réseaux d'élevage Caprins, 2013). Ces chiffres pénalisent le coût de production et le résultat économique des systèmes caprins. Accroître la durée de vie productive permettrait de diluer les coûts fixes liés aux phases improductives d'élevage (stade jeune et phases de tarissement). Cet accroissement de la durée de vie productive présente aussi un intérêt pour les émissions de gaz à effets de serres. Augmenter la durée de vie productive favoriserait une diminution de la production de méthane par litre de lait. En diminuant le taux de réforme, l'éleveur diminue le nombre de chevrettes de remplacement dans le troupeau. Ainsi, la production de méthane par des animaux improductifs sur la période d'élevage est réduite (Martin et al., 2020; De Vries and Marcondes, 2020; Han et al., 2022).

Il est important de pouvoir associer longévité, productivité sur la carrière et désaisonnement si l'on veut des systèmes à la fois robustes et adaptés à la demande du marché. Qu'est-ce qui différencie des systèmes où la longévité est élevée par rapport à des systèmes où la longévité est faible ?

2.2. En France, qu'est-ce qui différencie les systèmes à longévité élevée et faible ?

Un état des lieux de pratiques d'élevage entre systèmes à longévité variable a été réalisé en 2013 par INOSYS-réseau d'élevage sur 238 bilans techniques de troupeaux caprins (Inosys-Réseaux d'élevage Caprins, 2013). En termes de conduites de reproduction, les élevages avec une forte longévité présentaient plus de mises-bas en saison avec des taux de renouvellement plus faible par rapport à la moyenne du contrôle laitier. On observe également moins de problèmes sanitaires pour ces animaux avec des frais vétérinaires plus faibles comparés à des systèmes avec une longévité faible (3,60 €/chèvre vs. 8,10 €/chèvre). Concernant la conduite alimentaire, les systèmes avec une longévité forte étaient moins intensifs avec moins de concentrés par chèvre (390 kg/chèvre/an vs. 480 kg/chèvre/an) favorisant le fourrage dans la ration. De plus, ces animaux produisaient moins de lait sur la campagne (760 kg/chèvre/an vs. 920 kg/chèvre/an) avec des durées de tarissement plus longues ce qui peut expliquer le plus faible litrage. **Finalement, les systèmes à plus forte longévité ont un troupeau plus sain, qui se reproduit en saison, avec une conduite de l'alimentation qui favorise le fourrage dans la ration pour produire un litrage inférieur à la moyenne du contrôle laitier.** Cette étude a permis de montrer ce qui différencie les systèmes en fonction de leur longévité. Mais il apparaît aussi important de bien identifier les principales causes de réformes chez la chèvre.

2.3. Qu'est ce qui met fin à la carrière d'une chèvre ? Principales causes de réforme

Chez la chèvre, une meilleure appréciation des causes de réforme et la sélection d'animaux robustes permettraient d'améliorer la longévité dans le troupeau. La réforme peut être volontaire sur décisions de l'éleveur (production laitière, taux cellulaires, infertilité, etc.) ou involontaire (pathologies, mortalités, etc.). Chez la chèvre peu d'éléments sur les causes de réforme sont présents dans la littérature. L'âge à la 1^{re} mise-bas est un facteur important de réforme des chevrettes. En effet, des chevrettes plus âgées à la 1^{re} mise-bas ont plus de risques de réformes que des chevrettes plus jeunes (mise-bas à 19 mois vs. entre 12 et 15 mois, (Ziadi et al., 2023)). En France, 24 % des chèvres ont une durée de vie productive de moins d'un an. Chez la chèvre, le critère laitier est souvent le 1^{er} critère de réforme volontaire dans les filières laitières (Malher et al., 2001; Gautier et al., 2012). En effet, la production laitière peut représenter de 34 % à 36,6 % des causes globales de réforme (Malher et al., 2001; Astruc et al., 2021). Par ailleurs, la reproduction est le 3^e critère de réforme involontaire et représente entre 13 % et 14,5 % des causes globales de réforme (Malher et al., 2001; Astruc et al., 2021). Les autres causes de réforme concernent les réformes involontaires qui prennent une place importante dans les causes globales de réforme. La mortalité et les problèmes sanitaires peuvent représenter jusqu'à 42,5 % des causes globales de réforme (Malher et al., 2001). Ces facteurs sont identiques à ceux déjà connus chez la vache laitière (Kern et al., 2016). Si le premier critère de réforme concerne la production laitière, les éleveurs laitiers favorisent des animaux capables de produire beaucoup donc efficaces sur le court terme. En revanche, cette pression de réforme met fin à la carrière de certaines femelles laitières moins efficaces sur le court terme mais qui pourraient le devenir sur le long terme du fait d'une potentielle robustesse plus élevée (Friggens et al., 2017). Ainsi, les pratiques de réformes et les lois de réponses individuelles des animaux à certaines pratiques conditionnent la diversité des carrières au sein d'un troupeau (Tichit et al., 2004). Aujourd'hui, quels sont les leviers disponibles pour améliorer la longévité des chèvres ?

2.4. Quels leviers pour améliorer la longévité des chèvres ?

2.4.1. Retarder les réformes involontaires par la sélection génétique ?

Chez la chèvre, la sélection actuelle prend en compte la production laitière et la morphologie (<http://fr.france-genetique-elevage.org/Les-index-des-races-caprines.html>). Cette sélection favorise les animaux les plus productifs dès la première lactation et ne prend pas en compte la longévité comme cela est fait chez les vaches laitières et les vaches allaitantes en France. Ces dernières années dans le cadre du projet MALO, une indexation de la production laitière sur les trois premiers rangs de lactation a été développée (idele.fr/detail-article/malo-indexation-lait-et-maturite-en-lien-avec-la-longevite-fonctionnelle-chez-les-caprins-laitiers). L'index en 1^{re} lactation (négativement corrélé à la longévité) et les index sur la 2^e et 3^e lactation (positivement

corrélés à la longévité) ont été combinés pour créer un index « lait carrière ». Cet index a été développé pour réduire la pression de sélection sur la première lactation et favoriser une sélection sur les lactations suivantes. Ce nouvel index offre une réelle opportunité de sélection sur la production laitière qui serait moins pénalisante pour la longévité (Arnal et al., 2022). Sélectionner les animaux sur la longévité permettrait d'avoir une structure de troupeau composée d'animaux plus âgés, plus productifs (car de rang de lactation plus élevé (Institut de l'élevage, 2022) et de diminuer les coûts liés au remplacement (Serradilla et al., 1997; Castañeda-Bustos et al., 2017). Avec une demande autour de la réduction d'intrants exogènes, les animaux doivent aussi être capable de produire et de se reproduire dans des environnements variés. La longévité peut être définie de deux manières : (1) la longévité vraie qui inclut toutes les causes de réformes y compris les critères de production et (2) la longévité fonctionnelle qui tient compte de toutes les causes de réformes excluant les critères de production (Ducrocq et al., 1988). Inclure la longévité fonctionnelle dans les schémas de sélection permettrait de retarder les réformes involontaires. Cette longévité fonctionnelle est faiblement héritable : 0,10-0,14 chez la chèvre (Castañeda-Bustos et al., 2017; Palhière et al., 2018) ; 0,11 chez la brebis (Riggio et al., 2009) ; 0,02-0,14 chez la vache laitière (Samoré et al., 2010) mais offre des perspectives de sélection intéressantes pour avoir des animaux qui perdurent dans les troupeaux. Cependant les mécanismes sous-jacents de cette longévité sont peu explorés chez la chèvre. L'étude menée par Ithurbide et al. (2022) sur deux lignées de chèvres Alpines sélectionnées sur la longévité (faible longévité vs. haute longévité) a montré qu'il existait des différences de survie entre les deux lignées à partir de la deuxième année de vie. Les chèvres à forte longévité avaient un risque de réforme moindre par rapport aux chèvres à faible longévité. Durant la 1^{re} lactation, les chèvres à forte longévité présentaient des taux de cellules somatiques plus faibles que les chèvres à faible longévité, suggérant une meilleure santé de la mamelle. La conformation et la santé de la mamelle sont corrélées positivement à la longévité fonctionnelle (Castañeda-Bustos et al., 2017). Par ailleurs, durant la 1^{re} lactation, les chèvres à faible longévité présentaient un rapport TB/TP plus fort et une largeur de poitrine plus faible par rapport aux chèvres à forte longévité, suggérant une mobilisation plus intense des réserves corporelles. La sélection sur la longévité est donc possible mais est d'une faible efficacité du fait de l'héritabilité faible. Il est donc nécessaire de maîtriser des leviers de conduite de troupeau pour améliorer ce critère.

2.4.2. Une bonne conduite des jeunes de la naissance à la mise à la reproduction est nécessaire pour une bonne poursuite de la carrière

Une bonne conduite des chevrettes est nécessaire pour assurer une croissance suffisante, le déclenchement de la puberté et une reproduction réussie pour pouvoir assurer le renouvellement du troupeau. Une croissance insuffisante dans le premier mois (gain moyen quotidien (GMQ) inférieur à 150 g) augmente très fortement le risque de réforme avant la première lactation. L'atteinte de la puberté est importante pour avoir une bonne carrière productive (Wathes et al., 2014). Les facteurs majoritaires

qui jouent sur l'apparition de la puberté sont le poids vif et l'âge. Chez la vache laitière, la puberté est atteinte lorsque la génisse atteint 40 à 50 % de son poids adulte (Le Cozler et al., 2009). Chez les génisses de race mixte ou de race allaitante ces pourcentages sont respectivement de 55 et 60 % (Wathes et al., 2014). Les agnelles de race à viande doivent atteindre 60 % de leur poids adulte pour atteindre la puberté. Chez la chevrette ce pourcentage est de 55 % (33 kg en race Alpine) pour qu'elle puisse être mise à la reproduction à 7 mois. Une mauvaise gestion de la croissance dans les deux premiers mois de vie de la chèvre peut entraîner des conséquences négatives sur la fertilité et la prolificité à l'âge adulte. Une ration pauvre en protéines et en énergie entraîne un retard de croissance et un retard dans l'atteinte du poids vif cible ainsi qu'un décalage dans l'âge à la puberté. Cette sous-alimentation se caractérise par une irrégularité de la pulsativité de la LH (hormone lutéinisante) entraînant un retard de la première ovulation (Foster et al., 1985). Une restriction alimentaire s'accompagne d'une diminution de la concentration en IGF-I (Insulin Growth factor I) fortement corrélée au poids vif et à la croissance dans la période pré-pubertaire. Chez les génisses, la baisse de concentration en IGF-I entraînerait une résistance à l'hormone de croissance (GH) amenant à une moindre croissance folliculaire et un retard de la puberté (Wathes et al., 2014). En revanche, une alimentation adaptée avec une supplémentation en concentrés (200-500 g/jour) dans une ration à base de foin ou de foin et de pâturage du sevrage à 12 mois d'âge améliore les performances de reproduction chez la brebis (avancement de l'âge de la puberté, meilleure fertilité et prolificité) (Pulina, 2005).

Un retard de croissance avant la première mise-bas a aussi un impact sur la production laitière en première lactation. Chez la chèvre, à 100 jours de lactation 16 kg de lait en plus peuvent être obtenus chez des primipares ayant eu un GMQ supérieur à 200 g/j en tant que chevrettes ([La croissance des chevrettes : un suivi à ne pas prendre à la légère | FIDOCL Conseil Elevage](#)). De même 3 kg de retard sur le poids vif au moment de la première mise à la reproduction entraîneraient une perte de 40 à 60 kg de lait sur la carrière de l'animal.

Tout retard à la puberté entraîne dans un système saisonné des animaux qui mettront bas plus tardivement par rapport à leurs contemporaines, et donc un intervalle plus court entre mise-bas et mise à la reproduction, ce qui induit un facteur de risque d'échec à la reproduction plus important et donc des réformes précoces de ces individus.

2.4.3. Une meilleure maîtrise de la reproduction pour éviter les réformes involontaires et assurer une pérennité des chèvres dans le troupeau

2.4.3.1. Importance de la maîtrise de la reproduction dans l'espèce caprine

Les caprins sont une espèce saisonnée : l'activité sexuelle est restreinte sur une période particulière de l'année (Chemineau et al., 2009). L'espèce caprine est sensible au changement la durée d'éclairement quotidien qu'on appelle « photopériode ». L'activité sexuelle se déclenche avec la diminution de la durée du jour en automne et se termine en fin d'hiver avec un rallongement de la durée du jour. Les chèvres sont une espèce de « jours courts ». Pour que l'activité sexuelle se déclenche, des jours courts doivent succéder à des jours longs. Chez les deux races principales en climat tempéré, Alpine et Saanen, la saison sexuelle s'étend en moyenne de début octobre à fin février. Le reste de l'année, correspond au repos sexuel appelé « anœstrus saisonnier » (Fatet et al., 2011; Lurette et al., 2016). L'information photopériodique est captée par la rétine puis transmise par voie nerveuse jusqu'à la glande pinéale. Cette dernière sécrète une hormone, la mélatonine, qui est un messenger permettant au système nerveux central d'interpréter le signal photopériodique. Cette mélatonine est uniquement sécrétée pendant la nuit. En automne, lorsque la durée du jour diminue, la sécrétion de mélatonine pendant la nuit augmente ce qui déclenche l'activité sexuelle. Au contraire, au printemps lorsque la durée du jour augmente, la sécrétion de mélatonine diminue pendant la nuit bloquant ainsi l'activité sexuelle.

En période d'activité sexuelle, une succession de cycles sexuels d'une durée moyenne de 21 jours est observable. Pendant cette période, pour que l'ovulation ait lieu, les ovaires subissent un certain nombre de modifications physiologiques (régulations endocrines), morphologiques (croissance, recrutement et atresie folliculaire) et chimiques (maturation folliculaire) (Fatet et al., 2011). La croissance folliculaire évolue par vagues selon trois étapes : le recrutement, la sélection et la dominance. Le recrutement conduit de nombreux follicules gonado-dépendants au stade follicules pré-antral. Durant la phase de sélection, les follicules pré-antraux continuent leur croissance sous dépendance des gonadotrophines (action de la FSH, hormone folliculo stimulante). La dernière phase concerne le plus gros des follicules (follicule dominant) qui évolue au stade pré ovulatoire avec acquisition des récepteurs à la LH (hormone lutéinisante) ou qui s'atresie en l'absence de pic de LH. Chez la chèvre, on estime entre trois et quatre vagues folliculaires par cycle, dont la dernière conduit à l'ovulation.

Le cycle sexuel est sous-contrôle d'hormones hypothalamo-hypophysaires et d'hormones stéroïdiennes. Les principales hormones sexuelles à l'origine de la régulation du cycle sexuel sont :

- La gonadolibérine ou GnRH (Gonadotropin Releasing Hormone), une hormone sécrétée par l'hypothalamus qui stimule la production de FSH et de LH.
- Les gonadotrophines sécrétées par l'hypophyse :

- La FSH qui permet le développement ovarien, la croissance des follicules et la stimulation de la production des œstrogènes.
 - La LH qui est responsable de la maturation finale des follicules, de l'ovulation et de la formation du corps jaune.
- L'œstradiol, une hormone sécrétée par les follicules et associée à l'expression de l'œstrus.
 - La progestérone, hormone sécrétée par le corps jaune et intervenant dans le maintien de la gestation.
 - Les prostaglandines sont sécrétées par l'utérus parmi elles la PGF2 α induit la lyse du corps jaune.

Le cycle sexuel se découpe en deux phases : une phase folliculaire (3-4 jours) et une phase lutéale (16-17 jours) (Figure 1.6). La phase folliculaire est une étape pendant laquelle un ou plusieurs follicules arrivent à maturation finale sous contrôle de la LH elle-même sous le contrôle de la GnRH (GRC, 2012). Lors de la croissance folliculaire, il existe un rétrocontrôle positif exercé par la sécrétion d'œstradiol sur l'axe hypothalamo-hypophysaire qui libère des gonadotrophines. L'ovulation survient 22 ± 2 heures après le pic pré ovulatoire de LH. Après l'ovulation, le follicule se transforme en corps jaune sécrétant la progestérone qui persiste pendant toute la phase lutéale. Pendant la période d'activité du corps jaune, la progestérone exerce un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire inhibant ainsi la sécrétion de GnRH et de LH et donc l'ovulation de nouveaux follicules. La FSH est produite à intervalles plus ou moins réguliers permettant le renouvellement des vagues folliculaires mais les follicules dominants ne parviennent pas à l'ovulation en l'absence de pic de LH : ils évoluent vers l'atrésie. En l'absence de fécondation, la muqueuse utérine produit des prostaglandines (PGF2 α) qui vont lyser le corps jaune, c'est la lutéolyse. Le taux de progestérone diminue à la fin de la phase lutéale et cette hormone sera absente pendant la phase folliculaire. Lorsqu'il y a fécondation, le corps jaune persiste et la gestation s'installe pour environ 5 mois (152 ± 10 jours en moyenne). Pendant l'anœstrus saisonnier, l'œstradiol exerce un rétrocontrôle négatif à faible concentration sur l'axe hypothalamo-hypophysaire, inhibant la sécrétion de la LH et empêchant l'apparition du pic pré ovulatoire. Cette rétroaction négative de l'œstradiol est sous contrôle de la photopériode par l'intermédiaire de la mélatonine (Chemineau et Delgadillo, 1994). Il n'y a donc pas d'ovulations, et en l'absence de corps jaune la progestérone est à un niveau quasiment nul.

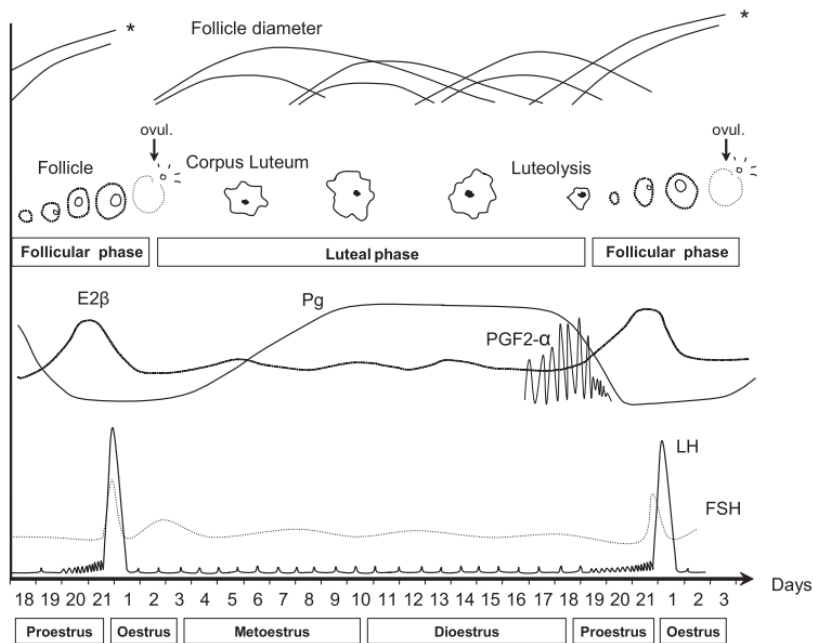


Figure 1.6 Représentation schématique des différents événements physiologiques durant le cycle sexuel chez la chèvre (Fatet et al.,2011).

2.4.3.2. Une reproduction réussie passe par une maîtrise des techniques de contrôle de la reproduction

La saisonnalité de la reproduction impose une bonne maîtrise de la reproduction en élevage. Un certain nombre de techniques ou de conduites du troupeau permettent d'optimiser la reproduction en lutte naturelle ou en insémination artificielle (IA). La capacité à désaisonner cette espèce saisonnée est un enjeu majeur pour la filière afin de répondre à la demande croissance des consommateurs pour des produits toute l'année.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré à la filière caprine, il existe un enjeu pour produire du lait à contre-saison et en avance de saison pour profiter d'un prix du lait élevé.

a. Programme hormonal

Une partie des éleveurs utilise un programme hormonal d'induction et de synchronisation des chaleurs pour obtenir des mises-bas décalées. Ce programme inclut la pose de dispositifs intravaginaux (éponges) imprégnés d'un progestagène de synthèse : l'acétate de fluorogestone (FGA) (Chemineau, 1996; Pellicer-Rubio et al., 2009). Ces éponges simulent la phase lutéale. Neuf jours après la pose de l'éponge, la chèvre reçoit deux injections séparées :

- Une de PGF2α (ou cloprosténol à 50 µg).
- Une hormone glycoprotéique d'origine animale (eCG : gonadotrophine choriionique équine ou PMSG, Pregnant Mare Serum Gonadotropin).

L'effet lutéolytique de la PGF2 α est destiné à faire disparaître un corps jaune naturel éventuellement présent au retrait de l'éponge. L'eCG stimule la croissance folliculaire terminale et provoque l'ovulation. L'éponge est retirée 11 jours après sa mise en place (soit 48 heures après les injections de PGF2 α et eCG). Les chaleurs apparaissent 28-30 heures après le retrait de l'éponge. Ce programme hormonal permet d'induire les chaleurs chez les chèvres en anœstrus saisonnier et de synchroniser les chaleurs des animaux déjà cyclés dans un troupeau. Cette synchronisation est intéressante pour pouvoir grouper les mises-bas afin de faciliter la gestion des lots d'animaux et le travail de l'éleveur. Ce programme hormonal est majoritairement utilisé pour réaliser une IA (43 \pm 2 heures après retrait de l'éponge) ou pour la monte en main. Le recours à l'IA et la synchronisation hormonale ont permis de mieux maîtriser la reproduction des chèvres à l'échelle de l'élevage en permettant à l'éleveur de grouper ses mises-bas sur une période précise de l'année et ajuster les apports alimentaires en fonction des besoins de lactation (Leboeuf et al., 2008). L'IA présente également un autre intérêt : celui d'accélérer l'amélioration génétique des animaux (Fatet et al., 2008). L'IA favorise une plus grande diffusion des gènes d'intérêt en augmentant le nombre de descendants issus de mâles améliorateurs. Cette pratique donne accès à une grande variabilité génétique grâce à la semence congelée et assure également une bonne maîtrise des risques sanitaires en évitant l'introduction de mâles extérieurs. Elle est néanmoins assez peu pratiquée en France : 8 % des chèvres sont inséminées (Campagne 2014) (Lurette et al., 2016). Depuis 2014, ce pourcentage est globalement stable (GEB-Institut de l'Élevage, 2020). En 2022, 67 534 IA ont été réalisées (Eliance, 2023). Des préconisations pour le choix des femelles à mettre à la reproduction ont été émises afin de maximiser la réussite à la reproduction. Il est conseillé d'éviter d'inséminer :

- Les chèvres adultes non fécondées ou ayant avorté la campagne précédente ;
- Des intervalles mises-bas / insémination inférieurs à 180 jours et supérieurs à 240 jours ;
- Les chèvres de plus de 5 ans ;
- Les chèvres pseudo-gestantes ;
- Les chèvres avec une production anormalement faible et/ou des taux de cellules anormalement forts ;
- Les chèvres ayant reçu au moins 3 programmes hormonaux dans leur carrière ;
- Les chèvres non venues en chaleur dans les 30 heures après le retrait de l'éponge (GRC, 2023a).

b. Programme lumineux avec ou sans mélatonine

Par ailleurs, un programme existe pour désaisonner le troupeau. Il n'est pas nécessaire pour l'ovulation induite par une synchronisation hormonale, mais assurera quelques chaleurs successives pour les retours après insémination ou pour la mise au bouc en contre saison ou en avance de saison. Il s'agit de l'utilisation d'un programme lumineux (GRC, 2023b - fiche 1a), associant en fonction de l'année des implants de mélatonine

posés à la base de l'oreille. Le principe est d'imiter les changements de la durée du jour (photopériode) en alternant des jours longs qui inhibent la reproduction (comme en été), avec des jours courts qui favorisent l'activité sexuelle. Ce programme va stimuler l'activité sexuelle des boucs et préparer les chèvres à venir en chaleurs à l'introduction des boucs. Cet effet sur l'activité ovulatoire spontanée des chèvres n'est pas immédiat, il est nécessaire d'avoir une certaine durée de jours longs (90 jours consécutifs) avant la période de jours courts. Le bouc doit être introduit après 60 jours courts consécutifs. Pour la chèvre, un jour long correspond à 16 heures de lumière consécutive avec une luminosité suffisante (200 lux au niveau des yeux des animaux sont conseillés pour bloquer efficacement la mélatonine). Les jours courts correspondent à 12 heures de lumière maximum. Pour bien maîtriser la sécrétion de la mélatonine, il est donc essentiel de bien gérer les périodes de nuit : la moindre lumière, même faible et de courte durée peut faire chuter le taux de mélatonine circulant. Si les jours courts débutent avant la mi-mars, les jours naturels conviennent. En cas de jours courts démarrant après la mi-mars, ou d'amplitude horaire liée à l'éclairage de travail dépassant les douze heures, il faut poser des implants de mélatonine au premier jour court. Le recours aux implants permet d'imiter des jours courts quelles que soient les conditions lumineuses dans lesquelles sont les animaux. En effet, cet implant permet un relargage progressif de l'hormone pendant 3-4 mois. Ainsi, l'augmentation du taux sanguin de mélatonine simule des jours courts même si les yeux de la chèvre perçoivent des jours longs ce qui stimule la libération pulsatile de LH et permet la reprise de l'activité sexuelle (Chemineau et al., 1992).

c. Effet bouc

Par ailleurs, l'utilisation d'un mâle pour le déclenchement des chaleurs est une solution alternative à l'utilisation d'hormones pour la maîtrise de la reproduction (Pellicer-Rubio et al., 2019). Après une séparation de deux mois, un bouc est introduit dans le groupe de chèvres réceptives, mais non cyclées (soit en fin de période d'anoestrus saisonnier ou après le recours à un programme lumineux), ce qui renforce le groupage de la reprise de l'activité sexuelle. Une ovulation survient dans les 2-3 jours qui suivent, elle est souvent suivie d'un corps jaune de courte durée. Dans la plupart des cas cette première ovulation induite par effet bouc n'est pas toujours associée à un œstrus, on parle d'ovulation « silencieuse ». Celle-ci n'est pas fertile, car le corps jaune produit est de mauvaise qualité et ne peut donc maintenir la gestation, on parle alors de « cycle court ». Après ce cycle court, l'activité ovarienne cyclique normale est le plus souvent rétablie. La deuxième ovulation, qui est quant à elle fertile, est associée à un comportement d'œstrus. Cette technique permet un avancement de la date de mises-bas et un groupage des mises-bas avec des pics de fécondations 5-10 jours et 20-30 jours (retour en chaleur des chèvres non fécondées au premier cycle) après l'introduction du bouc.

Il existe un programme intermédiaire qui associe l'utilisation d'une hormone et l'effet bouc : le programme éponge et effet bouc. Celui-ci permet de déclencher les chaleurs

de façon synchronisée. L'effet bouc permet l'initiation de la réponse hormonale, tandis que le retrait des éponges permet la synchronisation des chèvres du lot.

2.4.3.3. Non remise à la reproduction en cas d'échec de reproduction et poursuite de la lactation : la pratique de la lactation longue

Initialement utilisée en cas d'échec de reproduction, et si la production laitière est suffisante, la pratique de la lactation longue consiste à continuer de traire les chèvres non-gestantes. Aujourd'hui, cette pratique a évolué vers un choix volontaire de l'éleveur de ne pas mettre certaines chèvres à la reproduction et de les conduire en lactation longue.

Les chèvres en lactations longues produisent du lait plus de 16 mois, certaines chèvres ne sont d'ailleurs mises à la reproduction qu'une seule fois dans leur carrière. Certaines d'entre elles parviennent à maintenir leur lactation au-delà de 1 000 jours. Il est préférable de mettre en lactations longues les chèvres ayant une persistance de la production laitière élevée. Au cours de ces lactations, un rebond de la production est constaté de façon cyclique chaque année autour de la période de mises-bas des autres chèvres du troupeau (Figure I.7). Les chèvres en lactations longues peuvent être mises à la reproduction à plus de 500 jours de lactations pour redémarrer une nouvelle lactation.

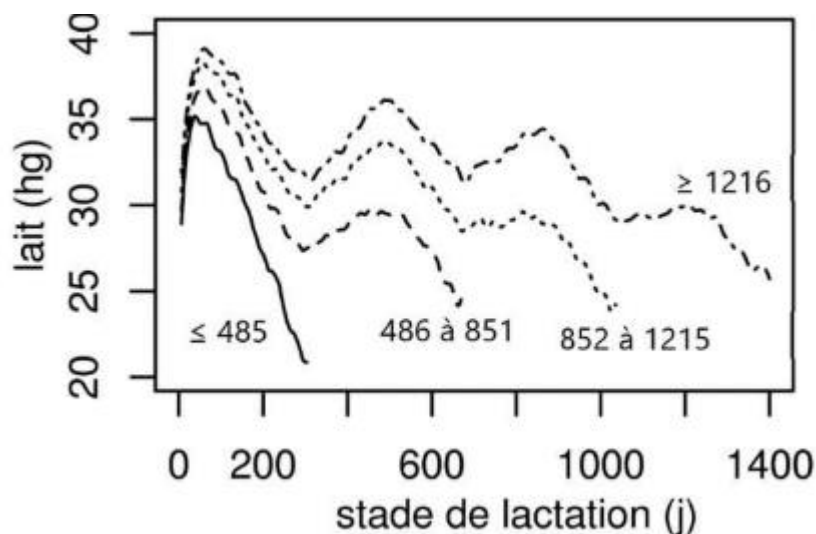


Figure I.7 Courbes de lactation des différentes lactations longues (LL) selon leur durée (en pointillé : 252 913 LL 486-851 jours ; 49 256 LL 852- 1 215 jours ; 26 236 LL) et une lactation standard (trait plein : 3 330 638 lactations ≤ 485 jours) entre 2010-2019 (D'après Bidan et al. (2022)).

La pratique des lactations longues chez la chèvre représente un peu plus de 10 % des lactations chaque année et est pratiquée significativement dans un peu plus d'un quart des troupeaux en France (Bidan et al., 2024). Un des avantages de cette pratique est la diminution du nombre de chevreaux produits. Les chevreaux mâles n'ayant que peu de débouchés en France, la diminution des naissances dans cette espèce où la prolificité garantit la production de suffisamment de femelles de renouvellement avec une faible fécondité répondrait à une demande sociétale. De plus, une diminution du nombre de mises-bas, période très à risque pour les chèvres, est favorable à leur longévité.

Le recours aux lactations longues permet de :

- Gagner en souplesse sur la conduite du troupeau (recaler certaines chèvres avec le reste du troupeau à la saison suivante, une alternative à la réforme de chèvres en échec de reproduction = lactations longues « subies » etc.) ;
- Optimiser les résultats économiques ;
- Réorganiser le travail ;
- S'adapter aux besoins du marché et de la conjoncture (une possibilité de produire du lait à contre saison etc.)(Bidan et al., 2024).

Il existe une diversité de techniques pour maîtriser la reproduction. La fertilité reste cependant variable, quelle que soit la technique mise en œuvre. Une bonne connaissance de ses facteurs de variation peut permettre d'optimiser les carrières.

2.4.3.4. Une meilleure caractérisation des facteurs de risques d'échec de reproduction pour une meilleure fertilité

Des études menées chez les chèvres laitières ont identifié des facteurs de variation de la réussite à la reproduction. Entre 2004 et 2010, l'étude menée par Chanvallon et al. (2013) a montré une fertilité moyenne à l'IA de 58,4 % et une fertilité globale (IA et retours le plus souvent en monte naturelle) de 81,1 %. En 2022, 65 576 IA ont eu lieu avec 56,9 % de fertilité à l'IA et 77,6 % de fertilité globale (Institut de l'élevage-Capgènes, 2022).

2.4.3.4.1. Performances de reproduction par année et par race

Avec une fertilité autour de 60 % pour la race Alpine et Saanen en 2014, pour les Alpine, la fertilité a baissé progressivement pour être en dessous de 60 % et en dessous de 55 % pour les Saanen (Figure I.8).

La race est un facteur de variation des performances de reproduction. La race Alpine a de meilleurs résultats de fertilité à l'IA que la race Saanen (Chanvallon et al., 2013; Freret et al., 2018; Institut de l'élevage-Capgènes, 2022) (Figure I.8). La race Alpine semble également présenter des résultats de fertilité globale meilleurs que la race Saanen (Chanvallon et al., 2013; Institut de l'élevage-Capgènes, 2022). Toutefois, Freret et al.

(2018) n'ont pas observé d'effet race dans leur étude pour la fertilité globale.

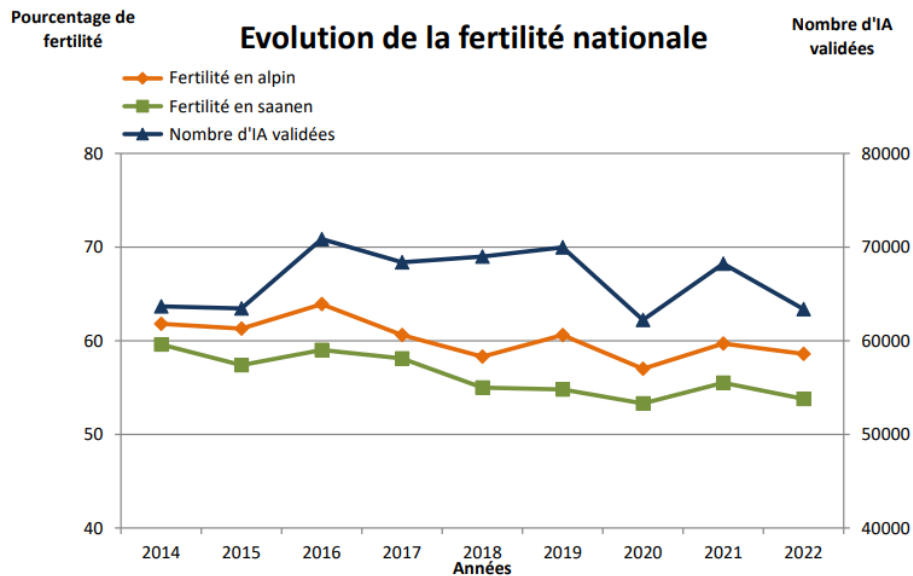


Figure I.8 Fertilité à l'IA par race (2014 à 2022, Institut de l'élevage-Capgènes, 2022).

2.4.3.4.2. Performances de reproduction par rang de lactation

Les résultats de fertilité à l'IA varient également selon le rang de lactation. Les chèvres primipares présentent de moins bons résultats de fertilité à l'IA que les multipares (Mellado et al., 2004, 2006; Chanvallon et al., 2013; Freret et al., 2018). Une des explications avancées par Chanvallon et al. (2013) serait liée à la conduite de la reproduction et notamment à un intervalle mise-bas/IA non adapté (trop court ou trop long) aux primipares liées aux pratiques d'élevages (saisonnalité de la reproduction ou utilisation de lactations longues) en lien avec l'apparition de la puberté des nullipares. Dans leur étude, seules 71 % des primipares étaient inséminées dans l'intervalle recommandé. Une des raisons pour lesquelles les primipares auraient également de moins bonnes performances de reproduction serait un risque de non-fécondations ou de mortalités embryonnaires plus important lié à des besoins énergétiques plus élevés que ceux des multipares. En effet, ce sont des animaux qui poursuivent leur croissance, cette fonction pouvant être prioritaire par rapport à la reproduction (Mellado et al., 2004, 2006). À partir du rang de lactation 2 à 5, la fertilité à l'IA et la fertilité globale sont meilleures, mais commencent à diminuer pour les rangs de lactation élevés (Chanvallon et al., 2013; Freret et al., 2018; GRC, 2023a). Au-delà du rang de lactation 5, la fertilité diminue (Mellado et al., 2006), Figure I.9). Ce constat de baisse de fertilité avec l'âge est également observé chez la vache laitière (Grimard et al., 2006). Chez la chèvre, il est déconseillé d'inséminer au-delà du rang 3 en particulier avec la pratique d'un programme hormonal. La répétition de l'utilisation de l'eCG pour l'induction et la synchronisation des chaleurs peut induire la production d'anticorps anti-eCG, ce qui réduit l'efficacité de l'hormone (retard de l'œstrus, du pic pré ovulatoire de LH et donc

de l'ovulation (Pellicer-Rubio et al., 2009; Furstoss et al., 2015). Les résultats de fertilité sont donc dégradés, il est donc recommandé de ne pas inséminer plus d'une fois par an avec un maximum de trois traitements de synchronisation avec de l'eCG dans la carrière de la chèvre.

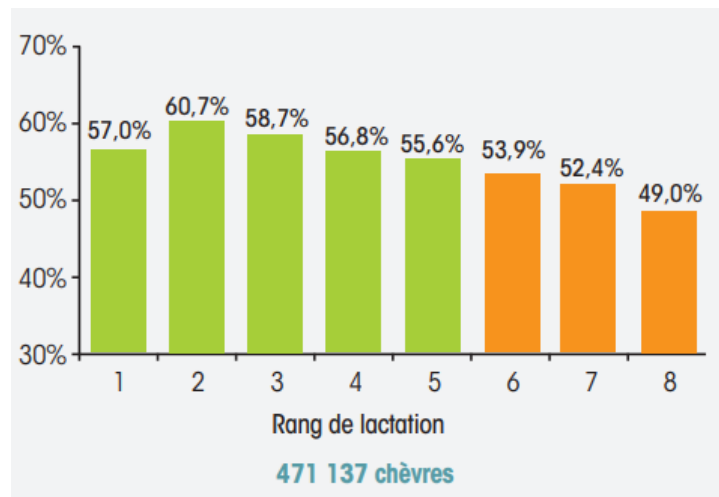


Figure I.9 Fertilité à l'IA par rang de lactation sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).

2.4.3.4.3. Performances de reproduction par période d'insémination

Certaines périodes de l'année peuvent pénaliser la réussite à l'IA. Les meilleurs résultats de fertilité à l'IA ont été observés pour les périodes entre le 1^{er} mars et le 15 juin (59,4 %) et du 1^{er} août au 30 septembre (58,7 %) en France. Pour la fertilité globale, ce sont les périodes du 16 juin au 31 juillet (81,3 %) et du 1^{er} août au 30 septembre (83,0 %) qui présentaient les meilleurs résultats (Chanvallon et al., 2013). Ce facteur a également été étudié par Freret et al. (2018), la fertilité à l'IA a été significativement diminuée pour des chèvres inséminées entre le 16 juin et le 31 juillet, les résultats étaient équivalents pour les autres périodes d'inséminations. Pour la fertilité globale, les résultats étaient meilleurs lorsque les chèvres étaient inséminées entre le 1^{er} août et le 30 septembre. Les retours étaient plus fertiles sur cette période, car les chèvres étaient proches de leur période de cyclicité naturelle. Furstoss et al. (2015) ont également remarqué que la fertilité semblait diminuer pendant la saison estivale et principalement durant le mois de juillet.

2.4.3.4.4. La fertilité à l'IA est influencée par l'intervalle entre la mise-bas et l'insémination

Chanvallon et al. (2013) ont montré que les chèvres inséminées entre 180 et 240 jours après la mise-bas obtenaient les meilleurs résultats de fertilité (60,2 % à l'IA et 82,5 %

pour la fertilité globale). Pour une insémination à moins de 180 jours de la mise-bas et à plus de 240 jours de la mise-bas, la fertilité à l'IA a été pénalisée de 10 points par rapport à cet intervalle optimum de 180-240 jours (Figure I.10). Furstoss et al. (2015) ont aussi conseillé d'inséminer les chèvres entre 180 et 240 jours post-partum afin de maximiser les chances de réussite à l'IA. En Espagne, les chèvres de races Payoya tendaient à présenter une moins bonne fertilité à l'IA lorsque celle-ci était réalisée à moins de 130 jours (51,0 %) comparé à des chèvres inséminées entre 131 et 212 jours (61,0 %) (Arrebola et al., 2014). Ces chèvres sont en moyenne deux fois moins productives que les Alpine et les Saanen conduisant à un intervalle mise-bas-IA plus précoce que celui généralement observé en France (Delgado-Pertíñez et al., 2009).

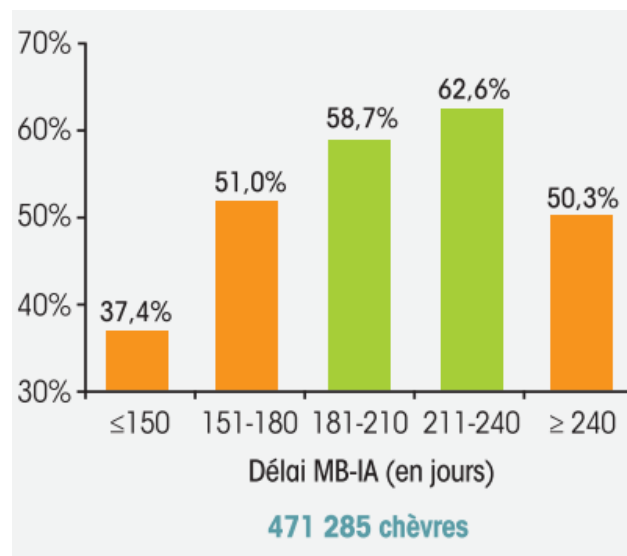


Figure I.10 Fertilité à l'IA en fonction de l'intervalle MB-IA sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).

2.4.3.4.5. Performances de reproduction en fonction de la réussite à l'IA à la campagne précédente

Chanvallon et al. (2013) ont montré que les chèvres ayant été gestantes suite à l'IA l'année précédente avaient de meilleurs résultats de fertilité (64,5 % de fertilité à l'IA que des chèvres en échec à l'IA l'année précédente (46,0 % de fertilité à l'IA, Figure I.11). Cet effet a également été observé dans l'étude menée par Freret et al. (2018).

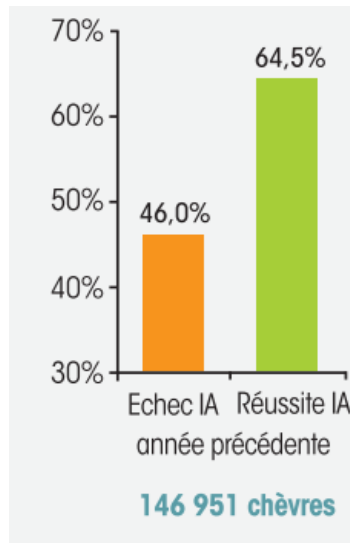


Figure I.11 Fertilité à l'IA en fonction de l'échec à l'insémination artificielle (IA) l'année précédente sur la période 2004-2010 (GRC fiche 2c,2023).

2.4.3.5. Avec le changement climatique, pour éviter une dégradation des performances globales, l'évaluation du stress thermique doit être prise en compte

Avec le changement climatique, les animaux d'élevage sont de plus en plus exposés à des conditions climatiques stressantes. Le stress thermique survient lorsque les animaux sont exposés à une combinaison de fortes températures, de forts rayonnements solaires, une forte humidité relative et ne sont plus capables de dissiper la chaleur qu'ils produisent (Das et al., 2016). Aujourd'hui, il existe un index température humidité (THI) qui sert à évaluer le degré de stress ressenti par les animaux. Bien que les seuils de sensibilité au stress soient bien définis chez la vache laitière (Das et al., 2016 ; Henry et al., 2018), il n'existe pas de consensus sur ces seuils chez la chèvre. Cette dernière est connue pour être très tolérante à la chaleur du fait de sa petite taille, elle démontre une forte capacité à dissiper la chaleur (Silanikove, 2000).

Ces conditions environnementales ont des conséquences sur les performances des animaux d'élevage (Das et al., 2016). Le stress thermique agit négativement sur le centre de contrôle de l'appétit au niveau de l'hypothalamus induisant une baisse de l'ingestion (Das et al., 2016). Cette réduction de l'ingestion est nécessaire pour limiter la production de chaleur ce qui amène les animaux en situation de bilan énergétique négatif entraînant donc une mobilisation des réserves corporelles. Les chèvres en situation de stress thermique peuvent avoir une baisse d'ingestion comprise entre 22 et 35 % (Salama et al., 2014). La chèvre n'étant plus capable de satisfaire ses besoins énergétiques, la production laitière baisse. Contreras-Jodar et al. (2018) ont montré une baisse de 8 % de la production laitière pour des chèvres en milieu de lactation exposées au stress thermique. Par ailleurs, le stress thermique peut avoir des

conséquences sur les performances de reproduction. Chez le bouc soumis au stress thermique, on observe une baisse de la libido due à une baisse du niveau de testostérone, une baisse de la motilité des spermatozoïdes (Adjassin et al., 2022). Chez la chèvre, on observe une baisse de la croissance folliculaire et de la maturation des ovocytes (Adjassin et al., 2022). Ainsi, le stress thermique peut avoir des conséquences au moment de l'IA, mais aussi sur les retours ou les chèvres conduites en monte naturelle uniquement.

En conclusion, comme dans de nombreuses autres productions, la maîtrise de la longévité des animaux est un enjeu dans la filière caprine. Actuellement, les animaux les plus productifs et fertiles sur une lactation sont ceux qui sont conservés dans les troupeaux au détriment de la longévité. Cela entraîne un taux de renouvellement important qui oblige à maintenir des effectifs élevés de chevrettes et qui diminue la productivité sur l'ensemble de la vie de l'animal. La longévité chez la chèvre peut être améliorée en utilisant la sélection génétique. Une meilleure connaissance des facteurs de variation de la durée de la carrière permettrait de proposer des outils de conduite du troupeau (choix des animaux à réformer) plus pertinents afin de progresser sur ce critère en parallèle d'une sélection qui amènerait une amélioration lente compte tenu de la faible héritabilité du caractère.

3. POUR MIEUX COMPRENDRE LA CONSTRUCTION DE LA CARRIERE, IL EST IMPORTANT DE CONSIDERER LES INTERACTIONS QUI EXISTENT ENTRE LES DIFFERENTES FONCTIONS BIOLOGIQUES

Comme nous l'avons vu au paragraphe 1, la production laitière d'une chèvre est en moyenne de 820 kg de lait en 250 jours. Compte tenu de sa faible durée de gestation, pour mettre bas à la même période l'année suivante, la chèvre est mise à la reproduction entre 180 et 240 jours de lactation (donc plutôt en fin de lactation). La compétition entre les fonctions de reproduction et de lactation sera à ce moment moins importante que chez la vache laitière mise à la reproduction en début de lactation (entre 60 et 90 jours de lactation) (Figure I.12).

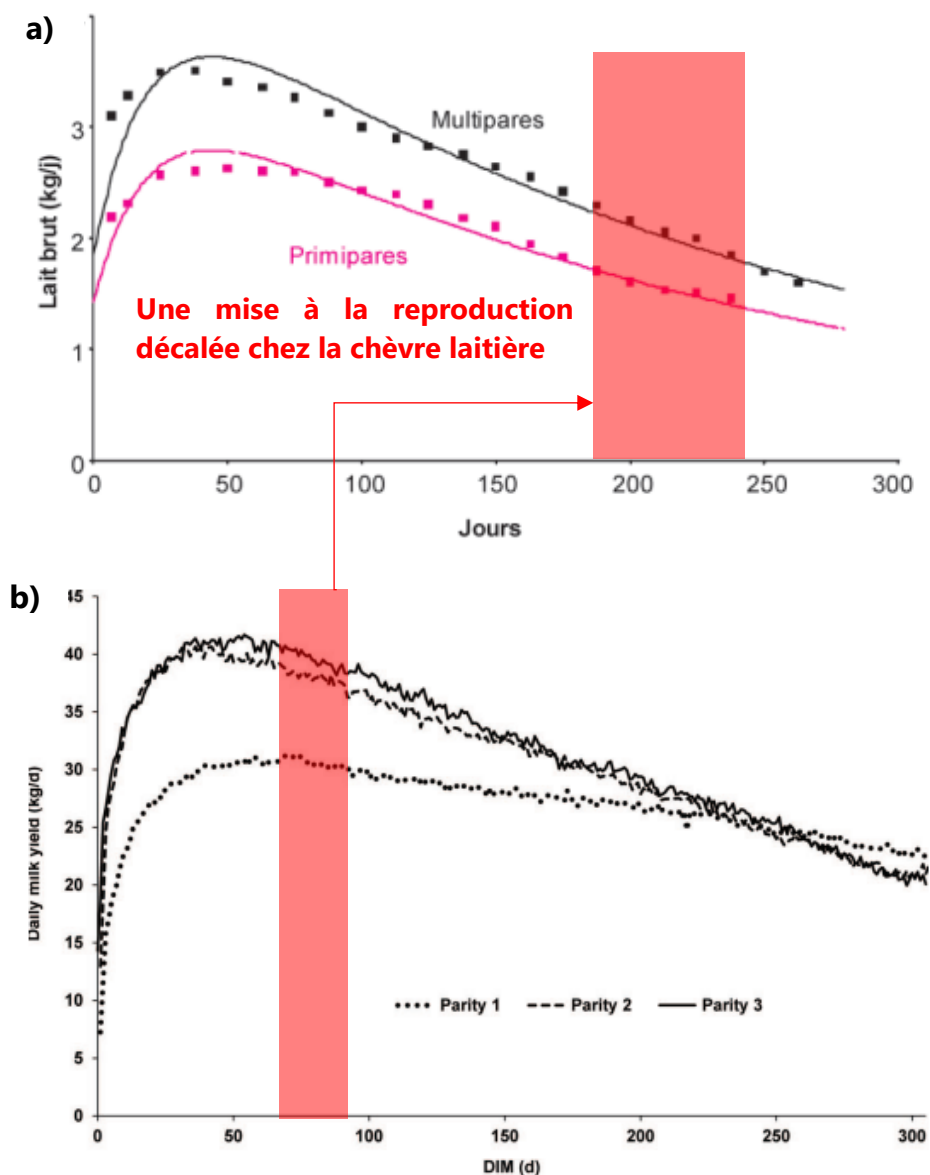


Figure I.12 Comparaison des différences dans la mise à la reproduction illustré par des courbes de lactation chez la chèvre laitière (a) (adapté de Sauvant et al. (2012)) et chez la vache laitière (b) (adapté de López et al. (2015)).

3.1. Les réserves corporelles un outil essentiel du pilotage du troupeau caprin pour assurer une reproduction efficace

3.1.1. Le rôle adaptatif des réserves corporelles pour préserver la fonction de reproduction

L'évolution des réserves corporelles durant les cycles gestation-lactation suggère fortement l'existence de mécanismes adaptatifs liés à l'utilisation des réserves corporelles pour soutenir la fonction de reproduction. L'animal peut être vu comme un système biologique où s'enchaînent plusieurs fonctions physiologiques au cours des cycles de production. La couverture des besoins liée à ces fonctions est nécessaire à l'expression du potentiel de l'animal. Durant la gestation, il y a une accumulation des réserves corporelles. En début de lactation, lorsque l'ingestion ne satisfait pas les besoins énergétiques (bilan énergétique négatif), les animaux utilisent leurs réserves énergétiques (lipolyse) afin de pallier ce déficit (Roche et al., 2009; Friggens et al., 2010). Le démarrage de la lactation est ainsi marqué par une priorisation de la sécrétion lactée : augmentation de l'utilisation des nutriments par la glande mammaire, augmentation de la lipolyse et diminution de la lipogenèse, augmentation du métabolisme du foie (néoglucogénèse, glycogénolyse), utilisation préférentielle des lipides comme source d'énergie par rapport au glucose, mobilisation des réserves protéiques, augmentation de l'absorption des minéraux. Ces changements métaboliques rendent indisponibles certains nutriments pour d'autres fonctions biologiques comme la reproduction (qui représente pourtant une faible demande avant l'ovulation, au moment de la fécondation et en début de gestation). Une fois l'embryon implanté, un changement métabolique s'opère afin que la gestation devienne prioritaire par rapport aux autres fonctions biologiques. Ainsi, les besoins énergétiques diminuent, l'ingestion satisfait les besoins, les animaux sont de nouveau en bilan énergétique positif et peuvent stocker de nouveau des réserves corporelles (lipogenèse) afin de préparer la lactation suivante. Ces différents changements métaboliques qui s'opèrent pour soutenir une fonction physiologique particulière (régulations dites d'« homéorhèse », Bauman et Currie, 1980) sont génétiquement déterminés pour assurer la survie de l'espèce (Sauvant, 1994; Friggens et al., 2007). Cette composante génétique dans l'évolution des réserves corporelles implique que ces changements s'opèrent même si l'environnement nutritionnel n'est pas contraignant.

La trajectoire phénotypique des réserves corporelles apparaît essentielle pour appréhender les stratégies d'adaptation qui peuvent différer d'un animal à l'autre et qui peuvent être différentes selon les contraintes imposées par le milieu. Garnsworthy et Topps, (1982) ont nourri avec trois régimes différents pendant la gestation, trois groupes de vaches qui ont vêlé avec des niveaux différents de réserves corporelles. Après le vêlage, les vaches ont reçu la même alimentation. À condition alimentaire équivalente, les vaches « grasses » ont plus mobilisé leurs réserves lipidiques que les vaches « normales ». Les vaches « maigres » ont reconstitué leurs réserves lipidiques. Ces différences observées peuvent s'expliquer par le fait que les vaches « grasses » et « maigres » essaient d'atteindre un niveau optimal de réserves corporelles là où un compromis coût - bénéfice s'opère (Friggens, 2003). Ces observations suggèrent fortement la priorité de la femelle à atteindre un niveau de réserves corporelles suffisant pour soutenir la fonction de reproduction. Une baisse d'apport énergétique chez des vaches gestantes en fin de lactation (donc pendant la croissance terminale du fœtus chez la vache) entraîne une baisse de la production laitière plutôt qu'une mobilisation des réserves corporelles (Friggens et al., 2010). Le niveau et la dynamique de mobilisation des réserves corporelles apparaissent comme deux indicateurs essentiels à prendre en compte dans la relation avec la reproduction. Chez les femelles laitières, une forte mobilisation des réserves corporelles traduit un environnement nutritionnel contraignant par rapport à un environnement nutritionnel non-contraignant. Dans ce cas, l'investissement dans un nouveau cycle reproductif est retardé, car l'environnement nutritionnel est défavorable. De même, le niveau des réserves corporelles peut être vu comme un signal pour préserver l'investissement dans la reproduction, car d'un point de vue énergétique la fécondation est peu coûteuse en énergie, mais le maintien de la gestation, la croissance fœtale et le début de la lactation suivante sont extrêmement coûteux en énergie (Scaramuzzi et al., 2006).

3.1.2. Le niveau des réserves corporelles, reflet du statut nutritionnel de la femelle laitière, est en lien avec les performances de reproduction

L'état corporel reflète le statut nutritionnel de l'animal. Les réserves corporelles de l'animal sont appréciées au travers de la note d'état corporel (NEC) qui reflète la quantité de réserves lipidiques disponible au niveau du tissu sous-cutané. L'objectif de cet indicateur est de pouvoir estimer la quantité des réserves corporelles et de pouvoir piloter l'alimentation en conséquence. Chez la chèvre, la NEC est estimée par une grille développée en 1985 (Santucci et Maestrini, 1985). Cette grille se base sur une échelle de notation de 0 à 5 points de deux zones de palpation : la zone lombaire et la zone sternale. De plus, les tissus adipeux sous-cutanés sont très réduits au niveau lombaire et se déposent essentiellement au niveau sternal chez la chèvre (Le Frileux et al., 1995). De nombreuses études s'accordent à dire que le niveau des réserves corporelles peut affecter les performances de reproduction chez les ruminants. Cet effet est bien connu chez la vache autant laitière qu'allaitante, mais ces animaux sont mis à la reproduction en début de lactation (entre 60 et 90 jours postpartum) alors que la chèvre est mise à la reproduction bien plus tard (entre 180 et 240 jours de lactation cf.

paragraphe 2.4.3.4.4).

3.1.2.1. Effets sur la cyclicité

Chez la vache laitière, certaines études ont montré un allongement de la durée de l'anoestrus post-partum chez les vaches maigres au vêlage (Markusfeld et al., 1997; Chagas et al., 2007; Cutullic et al., 2012; Bedere et al., 2018) tandis que d'autres auteurs n'ont pas vu d'effet (Garnsworthy and Topps, 1982; Garnsworthy and Jones, 1987; Buckley et al., 2003). Dissocier les effets de l'état corporel au vêlage ou à la mise à la reproduction seul de la mobilisation des réserves post-partum n'est pas évident. Certains auteurs ont attribué l'effet de reprise de cyclicité à l'état corporel au vêlage seul car les femelles maigres et en bon état avaient mobilisé la même quantité de réserves corporelles après vêlage (observation chez la vache laitière (Ponsart et al., 2006).

Ces effets de l'état corporel à la mise-bas sur la reprise de cyclicité pourraient impliquer certaines hormones comme la leptine. La leptine est uniquement produite par les adipocytes et est probablement un signal qui lie le statut nutritionnel de l'animal et les performances de reproduction. Chez la vache laitière, la concentration en leptine est liée à la NEC. Une courte restriction alimentaire a pour conséquence une baisse de la concentration en insuline et en IGF-I et une baisse de production d'ARNm codant pour la leptine dans les adipocytes. Chez la brebis, la leptine répond à des changements court terme dans l'alimentation, mais aussi sur le long terme avec l'état des réserves énergétiques. Plus ces réserves énergétiques sont importantes plus la concentration en leptine sera élevée. La concentration sanguine en leptine sert de messages aux follicules sur des changements à court terme de l'alimentation sans variation de poids vif, mais aussi sur des variations long terme des réserves corporelles de l'animal (Armstrong et al., 2003). Ces messagers hormonaux seraient le reflet de la stratégie d'utilisation des réserves et d'adaptation des femelles laitières pour préserver la reproduction.

3.1.2.2. Effets sur la saison de reproduction

Chez la chèvre, les animaux maigres présentent une saison de reproduction plus courte avec des durées anormales de cycles œstraux, un nombre réduit de follicules antraux dans l'ovaire et un plus faible nombre d'ovulations que les animaux en bon état corporel (Zarazaga et al., 2005; De Santiago-Miramontes et al., 2009; Gallego-Calvo et al., 2014; Zarazaga et al., 2014). De même, les brebis avec une NEC faible présentent aussi une saison de reproduction plus courte liée à un démarrage plus précoce de l'anoestrus saisonnier (Forcada et al., 1992).

3.1.2.3. *Effets sur le taux d'ovulation*

De nombreuses études chez la chèvre et la brebis montrent une relation positive entre la NEC et le nombre d'ovulations. Chez la chèvre, les animaux maigres présentent un nombre réduit de follicules dans l'ovaire et un plus faible nombre d'ovulations que les animaux en bon état corporel (De Santiago-Miramontes et al., 2009). De même, les brebis laitières qui ont une NEC élevée présentent un taux d'ovulation plus élevé, un plus grand nombre de gros follicules, une fréquence et une amplitude plus élevée des pulses de LH durant la phase folliculaire par rapport à celles qui ont une NEC plus faible (Rhind et al., 1984; Forcada et al., 1992; Viñoles, 2003).

3.1.2.4. *Effets sur les taux de gestation et de mises-bas*

Chez la vache, certaines études suggèrent une association positive entre la NEC au vêlage et la fertilité (Buckley et al., 2003; Walsh et al., 2011; Bedere et al., 2018). Chez la chèvre, les relations entre fertilité/prolificité et NEC à la mise à la reproduction ont été explorées compte tenu de la période tardive de mise à la reproduction par rapport à la mise-bas. La NEC à la mise à la reproduction est positivement corrélée au taux de gestation et au taux de mises-bas chez la chèvre (Mellado et al., 1996, 2004; Alvarado et al., 2022) et la brebis (Yilmaz et al., 2011; Fidelle et al., 2015). Mellado et al. (1996) ont observé une baisse de 20 % du taux de mises-bas pour des chèvres avec une NEC (échelle de 1 à 9 points) à la mise à la reproduction de 3 (NEC= 2,0 sur une échelle de 0 à 5 points) par rapport à des chèvres ayant une NEC supérieure ou égale à 4 (NEC= 2,5 sur une échelle de 0 à 5 points). Ces résultats sont en accord avec une autre étude menée par les mêmes auteurs où les chèvres avec une NEC supérieure ou égale à 1,5 avaient trois fois plus de chances de mettre bas que des chèvres avec des réserves corporelles moins importantes (Mellado et al., 2004). Si la NEC à la mise à la reproduction est supérieure à 2,5 alors la probabilité d'avorter est divisée par deux. Dans cette étude, le scénario le plus probable serait que les chèvres les plus maigres au moment de la mise à la reproduction (NEC < 1,5) seraient en hypoglycémie ce qui déclencherait l'expulsion prématurée du fœtus. Plus récemment les travaux menés par Alvarado et al. (2022) confirment que les chèvres gestantes ont présenté une NEC plus élevée autour de la période de reproduction que les chèvres non-gestantes. Chez la brebis, Sejian et al. (2010) ont montré que celles qui ont une NEC intermédiaire (3,0-3,5) ont de meilleurs taux de mises-bas que des brebis avec une NEC faible (2,5) ou NEC élevée (4,0). Il semblerait qu'il existe un optimum d'état corporel pour lequel les performances de reproduction sont maximums. Les brebis en mauvais état corporel expérimentent une situation de sous-nutrition, avec une diminution de la sécrétion de GnRH qui influe sur le pic pré ovulatoire de LH, le développement folliculaire (moins bonne compétence des ovocytes), l'expression des chaleurs et le développement embryonnaire précoce. Un changement au niveau des métabolites sanguins apparaît avec une hypoglycémie, une hypo insulïnémie, une diminution de la sécrétion d'IGF-I et une augmentation de la sécrétion de l'hormone de croissance (GH) (Scaramuzzi et al., 2006). Ainsi, les effets observés sur l'ovaire sont indirects et passent par l'axe

hypothalamo-hypophysaire.

Ainsi, le niveau des réserves corporelles, évalué par la NEC à la mise-bas ou au moment de la reproduction, influence les performances de reproduction (reprise rapide de cyclicité en début de saison sexuelle, nombre d'ovulations, taux de gestation, taux de mises-bas). Au-delà du niveau des réserves corporelles, leur dynamique d'utilisation (mobilisation/reconstitution) pourrait également affecter les performances.

3.1.3. La dynamique des réserves corporelles, reflet de la contrainte nutritionnelle imposée par l'environnement, est aussi à considérer pour expliquer la variabilité des performances de reproduction.

Comme évoqué précédemment (§ 3.1.1), le début de lactation est marqué par la mobilisation des réserves corporelles due à une augmentation des besoins non compensée par l'augmentation de l'ingestion (bilan énergétique négatif). L'intensité de ce déficit énergétique a des conséquences sur la durée de l'œstrus post-partum chez la vache (Butler et Smith, 1989; Opsomer et al., 2000; Butler, 2000, 2003; Diskin et al., 2003; Walsh et al., 2011) : plus il est élevé, plus il retarde la première ovulation (Garnsworthy et al., 2008). Physiologiquement, le début de lactation est marqué par une augmentation de la concentration plasmatique de la GH qui favorise la partition de l'énergie vers la mamelle pour soutenir la fonction de lactation (Bauman, 2000; Garnsworthy et al., 2008). Durant cette période de bilan énergétique négatif, la chute et la faible concentration plasmatique en insuline empêchent l'augmentation dans le foie des récepteurs à la GH et la sécrétion d'IGF-I. Cette situation crée un découplage avec l'axe somatotrope. De même, du fait de la mobilisation des réserves lipidiques, la leptine chute également pendant cette période (Butler, 2000). L'insuline et l'IGF-I ne peuvent plus travailler de concert avec les gonadotrophines ralentissant donc la croissance folliculaire et empêchant le follicule dominant d'ovuler (Robinson et al., 2006; Garnsworthy et al., 2008; Walsh et al., 2011). La mobilisation des réserves lipidiques (triglycérides) entraîne une augmentation des concentrations sanguines en acides gras non estérifiés (AGNE) qui sont utilisés par le foie pour fabriquer de l'énergie. Si les capacités du foie sont dépassées, les acides gras s'accumulent dans l'organe et sont responsables de pathologies hépatiques. Un mauvais fonctionnement hépatique entraîne une moins bonne productivité liée à une baisse de l'ingestion qui peut avoir des conséquences sur la reproduction (Friggens et al., 2010; Walsh et al., 2011). Lors d'acétonémie, les corps cétoniques circulant dans le sang (béta hydroxybutyrate) ont des effets délétères sur la qualité des ovocytes et donc sur la fertilité (Friggens et al., 2010; Leroy et al., 2008). Les relations entre mobilisation des réserves et reproduction sont liées à ces mécanismes adaptatifs par lesquels les femelles puisent dans leurs réserves lorsque l'environnement nutritionnel est contraignant par rapport à leur production laitière.

Chez la vache, la sélection sur des critères de production a probablement entraîné une partition d'énergie en faveur de la production laitière au détriment d'autres fonctions comme la reproduction (Royal et al., 2000; Pryce et al., 2001). La femelle priorise alors la progéniture actuelle au détriment d'une progéniture future (Friggens, 2003; Friggens et al., 2010). La forte mobilisation dépasse un « seuil » au-dessus duquel il y aurait un effet sur la reproduction. Cet effet délétère de l'augmentation de la productivité laitière sur les performances de reproduction n'a cependant pas la même intensité dans toutes les races. Il est bien marqué en race Prim'Hosltein, mais est moins important en race Montbéliarde et en race Normande en France malgré des évolutions sur la production similaire même si légèrement inférieures.

Cet effet d'une intense mobilisation des réserves corporelles (i.e., signal d'un environnement nutritionnel contraignant) sur la reproduction est lié à des compromis entre production laitière, réserves corporelles et reproduction. Cependant, chez les petits ruminants, lorsque la reproduction a lieu en saison sexuelle, les femelles sont en période de reconstitution des réserves corporelles (en période de tarissement chez la brebis, en fin de lactation chez la chèvre). La dynamique des réserves qui précède la mise à la reproduction peut entraîner des conséquences sur la reproduction. Lorsque l'état corporel est faible, dans les deux ou trois semaines avant la reproduction, un « flushing » peut être pratiqué. Cela passe par une augmentation transitoire de la densité énergétique de la ration (généralement une augmentation ou une introduction de concentrés dans la ration) qui va favoriser la croissance et le nombre de follicules déjà engagés dans ce processus (Viñoles, 2003).

3.1.4. Utilisation du « flushing » chez les petits ruminants

La mise à la reproduction se fait à un moment où le stress énergétique est moindre chez la chèvre comparée à la vache (dans le dernier tiers de la lactation). Il est donc possible de modifier temporairement le bilan énergétique en ajoutant du concentré dans la ration. Cette pratique est fréquente, elle permet d'augmenter le taux de cyclicité quand on l'utilise en dehors de la saison sexuelle couplé à l'effet mâle (Johnson et al., 2011) et aux traitements hormonaux, elle permet aussi d'augmenter la fertilité et le taux d'ovulation (Viñoles, 2003; Scaramuzzi et al., 2006; De Santiago-Miramontes et al., 2008).

Compte tenu de la période de mise à la reproduction qui se situe dans le dernier tiers de lactation chez la chèvre, l'environnement nutritionnel est probablement moins limitant dans cette espèce que chez la vache. Cette affirmation mérite toutefois d'être explorée car elle est peu documentée actuellement.

3.2. La production laitière, une fonction essentielle à assurer dans les systèmes caprins

3.2.1. Niveau de production laitière et performances de reproduction

Les effets du niveau de production laitière sur la reproduction ont largement été étudiés chez la vache. Certaines études ont montré une association négative entre le niveau de production et le taux de gestation (Pinto et al., 2000; Michel et al., 2003; Grimard et al., 2006; Friggens et al., 2010; Freret et al., 2011). Cette conséquence de la production laitière pourrait être liée à des facteurs génétiques (corrélations négatives entre production et reproduction, surtout en race Prim'Holstein) et des facteurs nutritionnels (plus faible bilan énergétique et une plus grande exposition post-partum à un bilan énergétique négatif chez les plus hautes productrices) (Grimard et al., 2006; Cutullic et al., 2012). D'autres auteurs suggèrent une relation inverse lorsque le niveau de production est corrigé d'un certain nombre de facteurs (période de vêlage, parité, valeur génétique pour le lait etc.) (Buckley et al., 2003). Enfin, certains auteurs n'observent pas de relation entre le niveau de production laitière et le taux de gestation (Bedere et al., 2018). Par ailleurs, le niveau de production laitière peut augmenter le risque de mortalités embryonnaires tardives (Grimard et al., 2006 ; Michel et al., 2003 ; Friggens et al., 2010 ; Freret et al., 2011). Sartori et al. (2002) ont montré que les embryons produits par les génisses ou vaches taries étaient de meilleure qualité que ceux produits par les vaches en lactations (en été : 72 % d'embryons de bonnes qualités vs. 33 % d'embryons de bonnes qualités). Les effets du niveau de production laitière sur le taux de gestation et la survie embryonnaire peuvent être attribués à la production laitière seule, indépendamment des réserves corporelles (Friggens et al., 2010). Dans la littérature, les effets de la production laitière sur la reproduction ne sont pas simples à interpréter et se confondent souvent avec la mobilisation des réserves corporelles. Une forte production laitière est la combinaison d'un fort potentiel génétique et d'une bonne conduite d'élevage. Les vaches hautes productrices mobilisent plus intensément leurs réserves corporelles (Royal et al., 2000; Pryce et al., 2001) et les effets sur la reproduction peuvent donc être attribués soit à la dynamique des réserves corporelles, soit à la production laitière, soit aux deux. Pour pouvoir interpréter les effets seuls du niveau de production, il faut le découpler des réserves corporelles. Lors de l'étude menée par Cutullic et al. (2010), deux stratégies d'alimentation ont été mises en place, une alimentation très énergétique conduisant à une forte production et une faible mobilisation des réserves corporelles vs. une alimentation peu énergétique conduisant à une faible production et une forte mobilisation des réserves corporelles. La détection de l'œstrus a été plus importante chez les vaches faiblement productrices. Ceci est en accord avec les observations de Lopez et al. (2004) qui avaient observé une corrélation négative entre la production laitière et la durée de l'œstrus ($r = -0,51$). Plus récemment, Bedere et al. (2018) ont montré que l'augmentation d'un kg de production laitière au pic de lactation retarde l'intervalle entre le vêlage et la 1^{re} détection de l'œstrus de 1,1 jour en moyenne. De plus, l'intervalle entre le vêlage et la 1^{re} détection de l'œstrus n'est pas associé à la NEC, ce qui appuie fortement l'hypothèse que l'intensité et la durée de

l'œstrus sont liées en premier lieu à la production laitière. L'intensité de production en début de lactation associée à une plus forte ingestion peut conduire à un catabolisme plus intense des hormones stéroïdiennes par le foie (plus faible concentration plasmatique d'œstradiol en phase folliculaire et de progestérone en phase lutéale). Les vaches fortes productrices auraient alors une durée d'œstrus plus courte et une expression moins marquée des chaleurs (Lopez et al., 2004). L'œstradiol est une hormone qui a une action directe sur le centre nerveux lié aux comportements sexuels (Chagas et al., 2007). Cette moins bonne détection de l'œstrus peut entraîner des conséquences sur la fécondité chez la vache, car l'IA est majoritairement réalisée après une détection visuelle des chaleurs (Friggens et al., 2010; Walsh et al., 2011).

Les relations entre production laitière et reproduction ont été peu explorées chez la chèvre. Dans l'étude menée par Freret et al. (2018) la quantité de lait produite avant l'IA (28 ± 16 jours) a affecté la fertilité à l'IA. Celle-ci a été significativement plus faible pour des chèvres produisant plus de 4,5 kg (59,9 % de fertilité à l'IA) par rapport à des chèvres produisant moins de 2,8 kg (64,9 % de fertilité à l'IA). En revanche, la production laitière avant l'IA (28 ± 16 jours) ne semble pas affecter la fertilité globale. Chanvallon et al. (2013) ont montré que les chèvres ayant un niveau moyen de production laitière (production laitière cumulée à 250 jours comprise entre 710 et 980 kg) sont celles qui présentent les meilleurs résultats de fertilité. En revanche, celles ayant un niveau de production laitière élevé (production laitière cumulée à 250 jours supérieure à 980 kg) présentent de moins bons résultats de fertilité à l'IA, mais la différence n'est pas significative (60,4 % de fertilité à l'IA pour le niveau élevé vs. 62,4 % de fertilité à l'IA pour le niveau moyen). De même, l'étude menée par Arrebola et al. (2014) montre que les chèvres de race Payoya qui ont une production supérieure ou égale à 2 kg au moment de l'IA avaient de moins bons résultats de fertilité à l'IA que celles qui produisent moins de 2 kg. Les plus hautes productrices au moment du traitement hormonal auraient une moins bonne réponse au traitement de synchronisation se traduisant par l'ovulation d'un ovocyte de moins bonne qualité.

3.2.2. Dynamique de production laitière et performances de reproduction

La dynamique de la production laitière a également un effet sur les performances de reproduction. Chez la vache laitière, l'étude menée par Dubois et al. (2006) a montré que la forme de la courbe de lactation exerçait une influence sur l'incidence de mortalités embryonnaires tardives (MET). Les vaches ayant un pic précoce et peu marqué associé à des taux élevés et celles ayant un pic précoce associé à un TB faible (uniquement les multipares) présentaient une incidence de MET plus importante.

Pour Buckley et al. (2003), le taux de réussite à la première insémination est plus faible chez les vaches présentant des courbes de lactation à faible persistance que pour celles présentant une bonne persistance. Cela a été confirmé par Cutullic et al. (2012) qui ont également montré le lien entre la forme de la courbe de lactation et l'incidence de non-

fécondation ou de mortalité embryonnaire précoce (NF-MEP) et MET. Les vaches ayant un pic élevé et les courbes de lactations les moins « persistantes » ont un risque plus élevé de non-fécondation ou de mortalité embryonnaire précoce (NF-MEP) et plus de risque de MET que les vaches à courbe de lactation plus « persistantes » (plus plates) après le pic de production.

Cependant, l'inverse a été observé par Roumeas et al. (2014) : pour un même niveau de production totale sur la lactation, les vaches qui ont un pic de lactation plus marqué obtenaient de meilleures performances de reproduction par rapport aux vaches avec un pic moins marqué et un profil plus persistant.

Chez la chèvre, Freret et al. (2018) ont montré que les chèvres en augmentation ou ayant une production laitière stable autour de l'IA avaient de moins bons résultats de fertilité à l'IA que les chèvres en phase de diminution de production laitière. Ces liens n'ont cependant été que très peu étudiés dans cette espèce.

3.3. Le niveau et la dynamique de la production laitière et des réserves corporelles sont importants à considérer pour caractériser les performances de reproduction : importance de la caractérisation des trajectoires phénotypiques à l'échelle de la lactation

Avec l'augmentation de la fréquence de mesures individuelles en élevage, en lien avec le développement des technologies de l'élevage de précision, la caractérisation de trajectoires phénotypiques est devenue possible. La dynamique des réserves corporelles (mobilisation et reconstitution des réserves lipidiques) permet d'identifier les animaux qui mobilisent intensément et qui ne reconstituent pas suffisamment leurs réserves. En effet, cette dynamique reflète la capacité de l'animal à faire face à des périodes où l'environnement nutritionnel est défavorable (restriction alimentaire, mauvaise qualité de fourrages, stades physiologiques particuliers) (Blanc et al., 2006). En routine, cette dynamique des réserves corporelles est appréciée par l'évaluation de la NEC et du PV à différents stades physiologiques relativement accessibles en élevage (Puillet et Martin, 2017). Par exemple, une mesure fréquente du PV peut donner accès au bilan énergétique de l'animal (Thorup et al., 2013). Avec le développement de plateaux de pesée intégrés à des salles de traite, la mesure en routine du PV devient de plus en plus accessible, même si cette pratique reste encore peu répandue. En revanche, la NEC étant une mesure subjective, de nombreuses méthodes alternatives ont été envisagées pour évaluer la composition corporelle des chèvres tels que la mesure par échographie, et l'imagerie tridimensionnelle, mais la méthode manuelle reste à ce jour une des plus fiables si l'on veut obtenir des données fréquentes chez la chèvre (Lerch et al., 2021). Elle est cependant contraignante pour les élevages commerciaux. L'utilisation de modèles mécanistes (Tedeschi et al., 2013; Puillet et Martin, 2017) pour valoriser la masse de données brutes générées en élevage ouvre des perspectives pour convertir des séries temporelles de données en paramètres biologiquement interprétables, et ainsi comparer des individus. Caractériser les performances à l'échelle de la carrière peut permettre de comprendre comment la

trajectoire au cours d'une parité peut impacter la réforme ou les parités suivantes et observer d'éventuels changements de priorités entre fonctions (Puillet et Martin, 2017). Peu de modèles de PV ou de NEC ont été développés chez la chèvre et chez les petits ruminants en général, mais les dernières années ont marqué le développement de méthodes de phénotypages de trajectoires de PV et NEC sur la lactation et sur plusieurs cycles de production chez la brebis (Macé et al., 2019, 2023). À l'inverse du PV ou de la NEC, de nombreux auteurs ont proposé des modèles mathématiques pour caractériser la forme de la courbe de lactation (Wood, 1967; Cobby and Le Du, 1978; Dhanoa, 1981; Wilmink, 1987). Certains auteurs ont élaboré des modèles basés sur des concepts biologiques de flux de nutriments vers la mamelle (Dijkstra et al., 1997; Friggens et al., 1999; Pollott, 2000). Ces modèles ont permis de déterminer des facteurs de variations qui peuvent jouer sur le niveau et la dynamique de la production laitière. Parmi ces facteurs de variation, la parité, la race, la saison de mises-bas peuvent jouer sur la forme de la courbe de lactation (Gipson and Grossman, 1990; Arnal et al., 2018). Plus récemment, certains modèles ont été développés pour représenter explicitement les perturbations observées durant la lactation (Ben Abdelkrim et al., 2021a). Ce type d'approche permet de comparer les animaux et ouvre l'accès à la sélection d'animaux plus résilients capables de faire face à des perturbations sur le court terme. L'analyse conjointe de différentes trajectoires phénotypiques à l'échelle de la lactation et de la carrière, est nécessaire pour mettre en évidence les interactions entre fonctions et les potentielles priorités qui y sont associées. Cette analyse repose donc sur la compréhension de la diversité des stratégies d'utilisation des réserves corporelles dans l'élaboration des performances productives et reproductives (Friggens et al., 2017).

Nous proposons donc dans cette thèse de caractériser les trajectoires phénotypiques individuelles de PL, de PV et de NEC pour comprendre les interactions entre les fonctions de lactation, de gestion des réserves corporelles et de reproduction. Pour rappel, trois questions de recherche ont été formulées :

- *Quelle est la diversité des trajectoires phénotypiques individuelles de production laitière (PL), de poids vif (PV) et de note d'état corporel (NEC) chez la chèvre à l'échelle d'une lactation et à l'échelle de la carrière ?*
- *Dans quelle mesure ces trajectoires phénotypiques expliquent-elles la variabilité des performances de reproduction chez la chèvre à l'échelle de la lactation ?*
- *Quelles sont les conséquences de la diversité des trajectoires individuelles à l'échelle du troupeau ?*

II. CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DE LA DIVERSITE DES TRAJECTOIRES PHENOTYPIQUES CHEZ LA CHEVRE

1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Pour élever des chèvres robustes, capables de produire et de se reproduire dans des environnements variés, il est essentiel de considérer les interactions entre les fonctions biologiques. L'accès à des données fréquentes tout au long du cycle de production des individus, combiné à l'utilisation de modèles mathématiques permettent de caractériser des trajectoires phénotypiques (PL, PV et NEC). L'étude de la diversité de ces trajectoires contribue à la compréhension des potentiels arbitrages entre fonctions. L'objectif de ce chapitre est de présenter l'analyse de la diversité des trajectoires phénotypiques reposant sur une approche méthodologique en trois étapes. La première étape consiste à caractériser les trajectoires phénotypiques individuelles. La deuxième étape consiste à explorer les associations entre les trajectoires de PL, de PV et de NEC. La dernière étape consiste à caractériser les trajectoires phénotypiques sur plusieurs lactations consécutives. Pour cela, deux bases de données issues de deux stations expérimentales caprines en France ont été mobilisées. En lien avec la question de la diversité des trajectoires individuelles, l'intérêt central de ces bases de données est l'enregistrement conjoint des variables d'intérêt (PL, PV et NEC) sur un nombre important d'individus (1 442 chèvres) et de cycles de production (4 068 lactations). Des modèles adaptés à la fréquence des données ont été utilisés pour caractériser les trajectoires sur l'ensemble de la lactation. À l'issue de cette étape, des indicateurs synthétiques ont été recalculés pour résumer l'information contenue dans ces trajectoires. Ces indicateurs synthétiques ont servi de support à la réalisation d'analyses multivariées (analyses en composantes principales et classification ascendante hiérarchique) pour déterminer des clusters de PL, de PV et de NEC. L'évolution des chèvres au sein de ces clusters a ensuite été explorée au cours de la carrière des animaux.

2. ARTICLE N°1: DIVERSITY OF PERFORMANCE PATTERNS IN DAIRY GOATS: MULTI-SCALE ANALYSIS OF THE LACTATION CURVES OF MILK YIELD, BODY CONDITION SCORE AND BODY WEIGHT

Article published in Peer Community Journal : Animal Science.

N. Gafsi^{1,2}, O. Martin¹, F. Bidan², B. Grimard³, L. Puillet¹

¹Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

²Institut de l'Élevage, F-75595 Paris

ABSTRACT

In the dairy goat sector, reduced longevity is a key issue leading to higher replacement rates in the herd and a poor dilution of doe rearing costs. There is a need to better understand the determinants of lifetime performance. Thus, the general objective of this work was to analyze the phenotypic variability of lifetime trajectories (milk yield (MY), body weight (BW) and body condition score (BCS)) through a 3-step approach: (1) characterize individual phenotypic lactation curves, (2) explore the associations between MY, BW and BCS curves at the lactation scale and (3) assess the diversity of phenotypic curves over successive lactations. Routine data from two experimental farms: Le Pradel (Dataset 1, Ardeche department, France) and MoSAR experimental farm (Dataset 2, Yvelines department, France) were used. Dataset 1 included 793 Alpine goats from 1996 to 2020. Dataset 2 included 339 Alpine and 310 Saanen goats from 2006 to 2022. Weekly MY records (Dataset 1) and daily MY records (Dataset 2) were fitted using a lactation model with explicit representation of perturbations. Monthly BW records (Dataset 1) and BCS record (Dataset 1&2) were fitted using the Grossman multiphasic model. Daily BW records (Dataset 2) were fitted using a weight model. Each individual lactation curve modelled for MY, BW and BCS was thus summarized by synthetic indicators of level and dynamics. Principal component analysis was performed on the MY, BW and BCS indicators separately, and clusters of phenotypic curves identified. At the lactation scale, associations between MY, BW and BCS clusters were evaluated by contingency tables with a chi-square test. Lifetime-scale bar plots were used to display cluster changes throughout parities. For MY curves, 4 and 3 clusters were found for primiparous and multiparous goats respectively. For BW, lumbar and sternal BCS curves, 3 clusters were found for all parities. At the lactation scale, no major association was found among phenotypic curves suggesting a diversity of energy partitioning strategies between life functions. At the lifetime scale, change among clusters occurred primarily between first and second lactation, whereas a pattern of stable cluster membership appeared for multiparous goats. Further analyses are needed to include reproductive performance in analyzing lifetime performance clusters, to better identify clusters or combinations of clusters at risk for culling.

Key words: Dairy goats, milk yield curves, body weight curves, body condition score curves, lactation scale, lifetime scale

INTRODUCTION

The dairy goat sector faces many challenges, such as animals with reduced longevity (Palhière et al., 2018) and high replacement costs. In the future design of livestock farming, breeding and managing robust animals is on the agenda of many research programs. One of the key elements of robustness is to consider goats as a biological

system in which productive functions (e.g., lactation, growth, reproduction, etc...) dynamically interact through complex mechanisms involving nutrient partitioning (Bauman and Currie, 1980; Friggens et al., 2017). Nutrient partitioning implies that energy cannot be maximized across all productive functions and therefore some functions are given priority over others, especially to support some physiological stages (e.g. lactation). Thus, individual variability in performance could reveal different nutrient partitioning strategies. A first important aspect to explain changes in nutrient partitioning is the succession of reproductive cycles throughout life. This modifies priorities among functions to support a given physiological stage (e.g., gestation, lactation). In addition to these homeorhetic drivers, priorities can be modified by various aspects of the farming system environment. For instance, it is well documented that genetic selection for milk production has altered priorities among functions in dairy cattle leading to health and reproductive disorders (Pryce et al., 2001; Roche et al., 2009; Friggens et al., 2010). Indeed, high genetic merit for milk has led to energy partitioning in favor of lactation over other biological functions. It is also known that priorities can be modified to cope with nutritional constraints. For instance, most of female mammals will not invest energy in pregnancy during feed shortage (Friggens, 2003). As a central function to support lactation and as a buffer for variation in nutritional environment, body reserves play a central role in energy partitioning among productive functions.

Assessing the diversity of phenotypic lactation curves reflecting productive functions (e.g., milk yield (MY) and body reserves (body weight (BW), body condition score (BCS)) is a way to understand interactions among biological functions and potential trade-offs between them. With time series data based on more frequent measures (e.g., MY, BW, BCS...), the use of mathematical models can provide information about individual phenotypic lactation curves and their variability. Models can be used to transform raw data into biologically meaningful information. Over the past decades, authors have proposed mathematical models to capture the shape of the lactation curve (Wood, 1967; Cobby & Le Du, 1978; Dhanoa, 1981; Wilmink, 1987) and some wanted to have models based on a biological framework (Dijkstra et al., 1997; Friggens et al., 1999; Pollott, 2000). With more frequent data, a recent model was developed to characterize the lactation curve with an explicit representation of perturbations (Ben Abdelkrim et al., 2021a). This model allows a better estimation of the lactation potential for a given animal. Having an estimation of the potential lactation curve can help to identify those goats that need improved feeding management (Arnal et al., 2018). Studies on modelling the shape of BW or BCS curves through lactation (Macé et al., 2023) are less frequent. Some mathematical functions with an exponential approach (Sauvant et al., 2012) or a random regression approach (Berry et al., 2003) have been used. In dairy cows, Ollion et al. (2016) developed a method to characterize trade-offs among biological functions. This method was based on principal component analysis (PCA) followed by agglomerative hierarchical classification (AHC) using MY curves, BCS curves and reproductive performance.

Studying the diversity of lactation curve sequences on a lifetime scale opens the perspective to look at potential changes in priorities among functions across the lifespan, and thus to see how early lifetime performance can impact the subsequent productive lifetime. Understanding the career diversity within a herd would allow the development of management strategies adapted to different curve sequence types, thereby favoring animal longevity. To our knowledge, no studies in dairy goats have used models to compare milk, body weight and body condition dynamics at a lactation scale or at a lifetime scale. In this study, we hypothesized that a multi-scale approach (lactation and lifetime scale) based on phenotypic curves would bring insights on energy partitioning strategies among biological functions. The general objective of this work was to analyze the variability of lifetime phenotypic trajectories through a 3-step approach: (1) characterize individual lactation curves, (2) explore the associations between MY, BW and BCS curves at the lactation scale and (3) assess the diversity of phenotypic curves over successive lactations.

MATERIAL AND METHODS

Ethics approval

This paper did not require animal experimentation approval because the datasets came from routine data recorded on farm. The two farms housed their animals in conditions that fully complied with the current regulations on animal housing (directive 98/58/CE).

Datasets

Dataset 1 (1996-2020).

Data came from the experimental farm Le Pradel (agricultural high school Olivier de Serres) located in the French department Ardeche (44° 34' 58.4364" N; 4° 29' 53.2068" E). The data set contained 2,460 lactations from 793 Alpine goats including 93,965 weekly milk records, 28,099 monthly BW records and 26,271 monthly BCS records. Over this period, goats were milked twice daily, and the recorded milk yield value was the sum of the two milkings. BW was measured once a month on a weighing balance. BCS was evaluated at lumbar and sternal regions on a 0 to 5 scale (Morand-Fehr and Hervieu, 1999). Le Pradel farm had a seasonal system with a kidding period between January and February. During the breeding season in August, inseminated goats received a hormonal treatment. Males were introduced 18 days after artificial insemination (AI). Males stayed until October to mate the goats that returned to heat after AI and those that were not inseminated. Goats produced milk from January to November-December. All lactations retained for milk records had a first record less than 30 days after kidding, a last record after 240 days in milk and had less than 30 days interval between two records. All lactations retained for BW and BCS records had a first record less than 17 days after kidding, a last record after 240 days, more than 8 records per lactation and less than 100 days interval between two records. Lactations lasted on average 289.6 ± 28.5 days. The final dataset 1 concerned 2,271 lactations for

milk records, 1,935 lactations for BW records and 1,851 lactations for BCS records (Table II.1).

Dataset 2 (2006-2022).

Data came from the MoSAR experimental farm (INRAE-AgroParisTech) located in the French department of Yvelines (48° 50' 31.4801" N; 1° 56' 56.5843" E). The data set contained 1,608 lactations from 339 Alpine and 310 Saanen goats including 396,814 daily milk records, 252,725 daily BW records and 11,525 monthly BCS records. The farm has a rotary parlor with an automatic weighing platform, goats were milked and weighed twice a day. The recorded value for milk was the sum of the two milkings. The recorded value for BW was an average of the two measurements. BCS was assessed as the same way as in dataset 1. The MoSAR experimental farm had a seasonal system with a kidding period between January and February. During the breeding season in August, all goats received a hormonal treatment. Selected goats were inseminated after treatment on a fixed date in August. For the goats that were naturally mated, a male was introduced in small groups of 10-12 goats over 6-7 days. Goats produced milk from January to November-December. All lactations retained for milk records in our dataset had a first record less than 5 days after kidding, a last record after 240 days in milk and had less than 30 days interval between two records. All lactations retained for BW and BCS records had a first record less than 20 days after kidding, a last record after 240 days, more than 8 records per lactation and less than 80 days interval between two records. Lactations lasted on average 280.1 ± 35.1 days. The final dataset 2 concerned 1,256 lactations for milk records, 1,299 lactations for BW records and 381 lactations for BCS records (Table II.1).

Table II.1 Lactation selection criteria for milk yield, body weight and body condition score records with parity and breed distribution for dataset 1 and 2.

		Milk yield		Body weight		Body condition score	
		Dataset 1	Dataset 2	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 1	Dataset 2
Lactation stage (d)	First record	<30	<5	<17	<20	<17	<20
	Last record	>240	>240	>240	>240	>240	>240
Interval between records (d)		<30	<30	<100	<80	<100	<80
Record per lactation		/	/	>=8	>=8	>=8	>=8
Parity	Primiparous	671	520	606	499	549	143
	Multiparous	1,600	736	1,329	800	1,302	238
Breed	Alpine	2,271	716	1,935	742	1,851	191
	Saanen	0	540	0	557	0	190
Total		2,271	1,256	1,935	1,299	1,851	381

Models of individual phenotypic lactation curves

Models were selected according to data frequency.

Lactation curve fitting of both daily and monthly data (dataset 1 and 2)

The perturbed lactation model proposed by Ben Abdelkrim et al. (2021a) was fitted to the MY time-series data (Figure II.1). This model was designed to decompose lactation dynamics into two components: a theoretical unperturbed lactation curve, and the perturbations in milk yield. This approach was selected to characterize lactation curves corrected for perturbations because it captures a proxy of the lactation potential. The model used for the unperturbed lactation was a modified version of the Wood model (Wood, 1967) integrating a late lactation decrease. The model was fitted in Scilab (Version 6.1.1, www.scilab.org) using an updated version (Martin, unpublished/personal communication) of the fitting protocol described in Ben Abdelkrim et al. (2021a). For further details about the model and the fitting procedure see Appendix A, section 1.

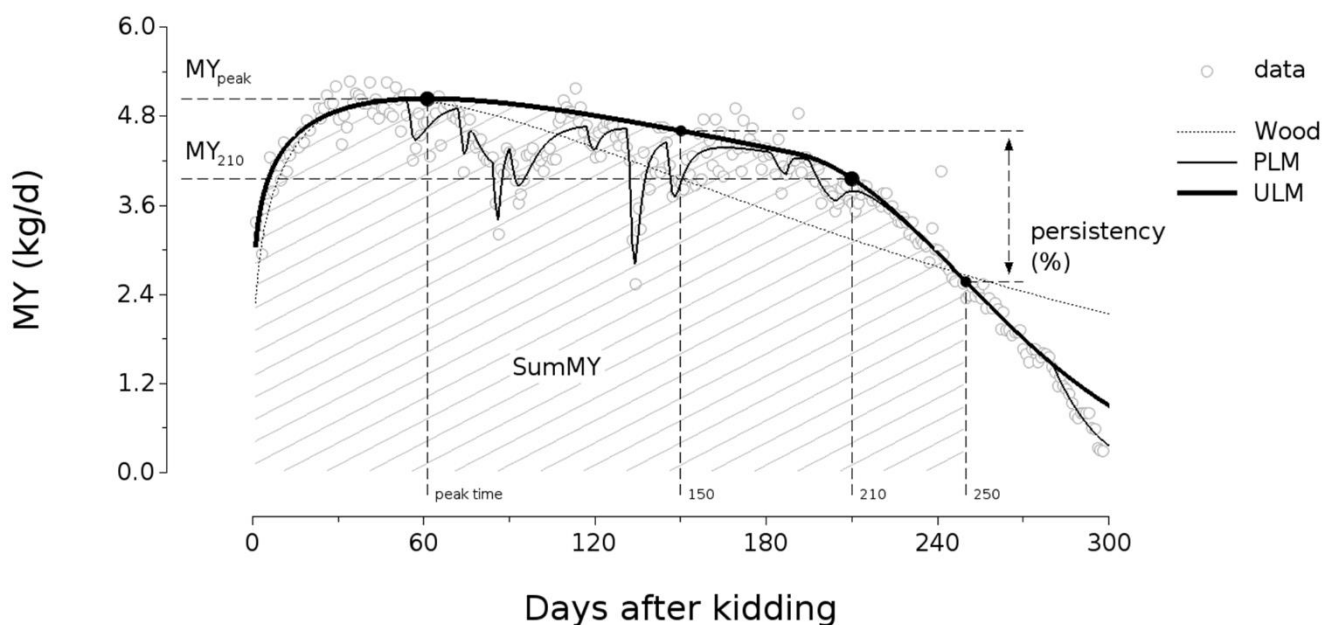


Figure II.1 Example of daily milk records fitted using the model proposed by Ben Abdelkrim et al. (2021a) with empty white circles representing raw data, black bold lines representing the unperturbed lactation model (ULM), thin black lines representing the perturbed lactation model (PLM), and grey dotted lines representing the theoretical Wood model. The ULM trajectory was summarized with synthetic indicators: MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150}) / MY_{150} \times 100$.

BCS curve fitting of monthly data (dataset 1 and 2)

The triphasic model proposed by Grossman et al. (1999) was fitted to monthly BCS time-series data (Figure II.2). This model was designed to decompose body condition dynamics into three parts: a depletion phase, a plateau phase, and a repletion phase. This model allows characterization of curves with less frequent data (at least five records were needed). The model was fitted using RStudio (version 2023.06.01). For further details about the model and the fitting procedure see Appendix A, section 3.

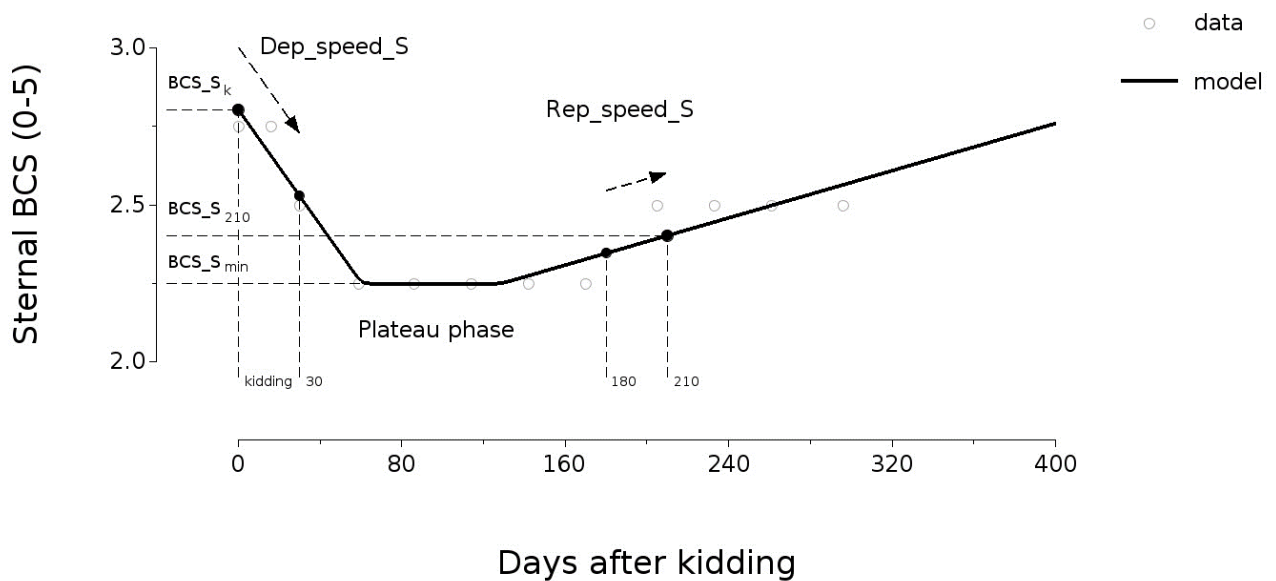


Figure II.2 Example of monthly sternal body condition records fitted using the model proposed by Grossman et al. (1999) with empty white circles representing raw data, black straight lines representing the fitted curve. This fitted curve was summarized with synthetic indicators: BCS_{S_k} = sternal BCS at kidding; BCS_{S_{min}} = minimum sternal BCS; BCS_{S₂₁₀} = sternal BCS at 210 days; Dep_speed_S_{k→30} : sternal BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; Rep_speed_S_{180→210}: sternal BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$.

BW curve fitting of daily data

The unperturbed weight model proposed by Martin and Ben Abdelkrim, (2019) was fitted to the daily BW time-series data from dataset 2 (Figure II.3). This model was designed to decompose the BW dynamics during a lactation into a sequence of depletion/repletion of BW. This model was built to be flexible and to capture various shapes of BW curves. The model was fitted using RStudio (version 2023.06.01). For further details about the model and the fitting procedure see Appendix A section 2.

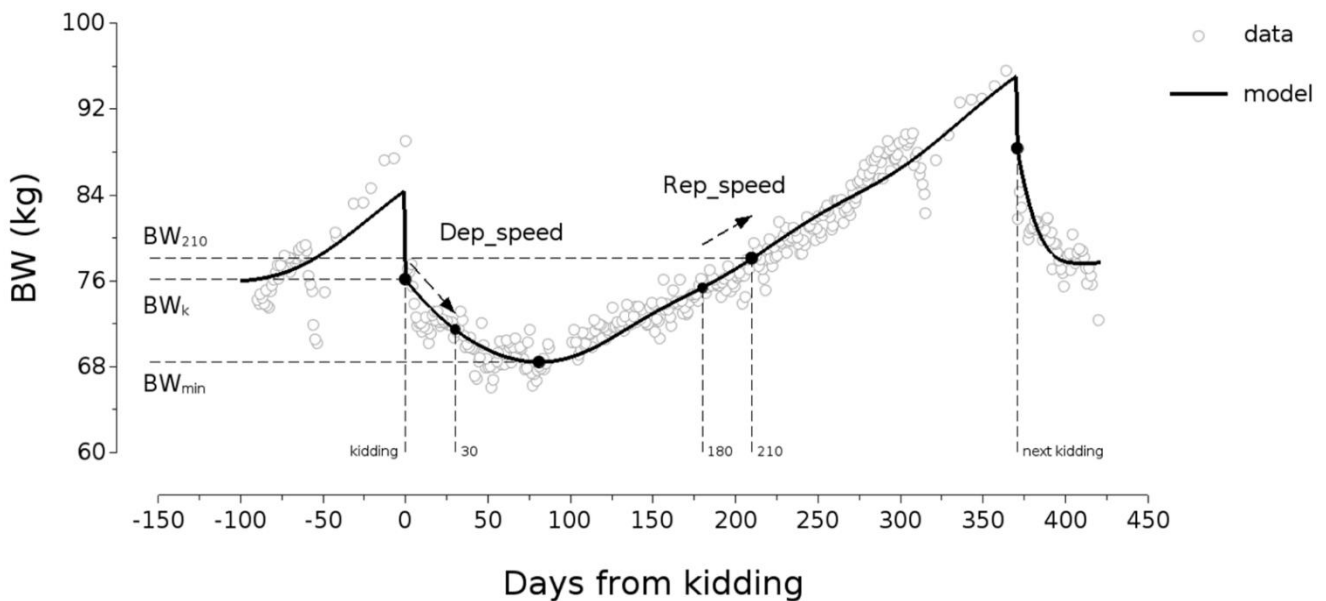


Figure II.3 Example of daily body weight records fitted using the model proposed by Martin and Ben Abdelkrim, (2019) with empty white circles representing raw data, black straight lines representing the fitted trajectory. This fitted trajectory was summarized with synthetic indicators: BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30}$: Body weight depletion speed between kidding and 30 days = $(BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210}$: Body weight repletion speed between 180 and 210 days = $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$.

The same fitting procedure used for BCS was used to fit monthly BW data from dataset 1.

Fitting convergence

Non-convergence of the fitting procedure occurred in situations where the model was irrelevant to describe data. Non-convergence of the fitting procedure accounted for 0 % of lactations of the datasets for MY, 3 % of lactations of the datasets for BW and

30 % of lactations of the datasets for lumbar BCS and 22 % of lactations of the datasets for sternal BCS. Modelled curves with extreme features were removed using the Tukey's rule (Tukey, 1977) applied to estimates of model parameters and root mean square error (RMSE) (exclusion of values above the third quartile plus three times the interquartile range). Loss associated to extreme features accounted for 3 % of lactations of the datasets for MY, 7 % of lactations of the datasets for BW and 6 % of lactations of the datasets for lumbar and sternal BCS.

Synthetic indicators to describe fitted individual phenotypic lactation curves

Finally, we used synthetic indicators derived from modelled curves to describe lactation, BW and BCS curves during lactation. Two types of indicators were used: level indicators were considered to characterize performance at specific times and dynamic indicators were considered to characterize temporal changes in performance (Table II.2).

Table II.2 Description of the set of synthetic indicators used to describe fitted individual phenotypic curve for milk yield (MY), body weight (BW) and body condition score (BCS).

Curve	Type ²	Indicator	Description and calculation	Unit
Milk production	L	SumMY	Total milk produced between 0 and 250 days of lactation, calculated as the sum of daily milk yield values	kg
	L	MY _{peak}	Highest daily milk yield reached during lactation	kg/d
	L	MY ₂₁₀	Daily milk yield at 210 days of lactation	kg/d
	D	Peak time	Lactation time at which the maximum milk yield value is reached	d
	D	Persistency	Rate of decrease of milk production between 150 and 250 days of lactation: $(MY_{250} - MY_{150}) / MY_{150} \times 100$	%
Body weight	L	BW _k	Daily body weight at kidding	kg
	L	BW _{min}	Minimum daily body weight reached during lactation	kg
	L	BW ₂₁₀	Daily body weight value at 210 days of lactation	kg
	D	Dep_speed _{k->30}	Speed of body weight depletion between 0 and 30 days of lactation, calculated as $(BW_{30} - BW_k) / 30$	kg/d
	D	Rep_speed _{180->210}	Speed of body weight repletion between 180 and 210 days of lactation, calculated as: $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$	kg/d
Lumbar or sternal body condition score ¹	L	BCS_X _k	Lumbar/sternal BCS at kidding	[0-5] scale
	L	BCS_X _{min}	Minimum lumbar/sternal BCS reached during lactation	[0-5] scale
	L	BCS_X ₂₁₀	Lumbar/sternal BCS at 210 days of lactation	[0-5] scale
	D	Dep_speed_X _{k->30}	Speed of lumbar/sternal BCS depletion between 0 and 30 days of lactation, calculated as: $(BCS_{X_{30}} - BCS_{X_k}) / 30$	[0-5] scale/d
	D	Rep_speed_X _{180->210}	Speed of lumbar/sternal BCS repletion between 180 and 210 days of lactation, calculated as: $(BCS_{X_{210}} - BCS_{X_{180}}) / 30$	[0-5] scale/d

¹ X stands for lumbar (L) or sternal (S).

² L = level; D = dynamic.

Statistical analysis

Clusters of phenotypic curves at lactation scale

All statistical analyses were performed using RStudio (version 2023.06.01). Data and scripts can be found in the repository linked to this manuscript (Gafsi et al., 2023). To characterize groups of individual phenotypic curves, principal component analysis (PCA) was performed on the synthetic indicators of MY, BW and BCS separately. The number of principal components (PC) was based on the cumulative variance. To choose the number of PCs at least 75 % of the total variance was needed. PCA was followed by an agglomerative hierarchical clustering (AHC) based on the retained number of PCs for each of MY, BW and BCS, using Ward's linkage procedure. Ward's method is a hierarchical procedure that iteratively merges groups of individuals represented by points in a Euclidean space resulting in the smallest increase in the sum of within-group sums of squares. This clustering method produces groups that minimize intra-group dispersion and maximize inter-group dispersion at each binary fusion. Preliminary analysis was conducted including the farming systems, breed, and parities all together. Breed and farming systems did not play a strong role on cluster characterization. Parity played a strong role in cluster characterization for MY and BW. So, we performed a clustering by parity (primiparous vs. multiparous) for MY and BW, whereas we performed a single clustering for all parities together for BCS. The optimal number of clusters was based on the higher relative loss of inertia criteria. Differences between clusters for each synthetic indicator were assessed using a one-way ANOVA followed by a Tukey test.

At lactation scale, contingency tables between clusters of phenotypic curves

To assess the associations between MY, BW and BCS curves at the lactation scale, we produced two-way contingency tables. After clustering, each lactation was assigned a MY, BW or BCS cluster. A contingency table summarized the conditional frequencies of two clusters (e.g., MY and BW clusters). It was used to assess if a cluster membership for a given phenotypic curve was associated to a particular cluster membership for another phenotypic curve, i.e. it showed how these two clusters were dependent on each other. MY, BW and BCS records concerned different numbers of lactations, so each contingency table (e.g., MY with BW or MY with lumbar BCS) considered different sub-populations. Chi-squared tests were performed to assess for associations, between phenotypic curves. Cramer's V test was performed on significant associations to evaluate the strength of the associations. Cramer's V values ranged from 0 to 1. Values close to 1 indicate a strong association, whereas values close to 0 indicate a weak association.

At lifetime scale, changes in cluster composition for each parity

To assess the diversity of phenotypic lactation curves at lifetime scale, we produced bar plots of the composition of each cluster for parity n in terms of clusters in the next parity $n+1$. With this visual display, it is possible to characterize if goat's assignment to a cluster is stable across parities (reflecting goats with a stable type of lactation curve across parities) or if assignment to a cluster varies across parities (reflecting goats with various dynamics during their lifetime). Chi-squared tests were performed to assess for associations between lactation curves. Cramer's V test was performed on significant associations to evaluate the strength of the associations.

RESULTS

Goodness-of-fit

For the two data sets, the RMSE averaged $5.0\% \pm 1.9\%$ of the average MY per lactation, $2.7\% \pm 1.0\%$ of the average BW per lactation, $3.6\% \pm 1.6\%$ of the average lumbar BCS per lactation, and $3.1\% \pm 1.3\%$ of the average sternal BCS per lactation.

Phenotypic lactation curves characterization

For all clusters of MY, BW and BCS, a detailed description of cluster names is given in Table II.3.

Table II.3 Detailed description of cluster names for MY, BW and BCS. The upper script letter describes the phenotype (Y: milk yield; W: body weight; LU: lumbar BCS and ST: sternal BCS). The superscript describes if the cluster is for primiparous (p) or multiparous (m) goats. The subscript describes the key feature of the cluster (letter for level and plus or minus sign for dynamics).

Phenotypic curve	Cluster	
	Primiparous	Multiparous
MY ¹	Y ^p _{L+} = Low MY and high persistency.	Y ^m _{M+} = Medium MY and high persistency.
	Y ^p _{L-} = Low MY and low persistency.	Y ^m _{M-} = Medium MY and low persistency.
	Y ^p _{M-} = Medium MY and low persistency.	Y ^m _H = High MY and medium persistency.
	Y ^p _H = High MY and medium persistency.	
BW	W ^p _{L-} = Low BW and low depletion.	W ^m _{L-} = Low BW and low depletion.
	W ^p _{H+} = High BW and high depletion.	W ^m _{H+} = High BW and high depletion.
	W ^p _{H-} = High BW and low depletion.	W ^m _{H-} = High BW and low depletion.
All parities		
Lumbar BCS	LU _{M+} = Medium lumbar BCS and depletion.	
	LU _M = Medium lumbar BCS and low depletion.	
	LU _{H+} = High lumbar BCS and depletion.	
Sternal BCS	ST _{M+} = Medium sternal BCS and depletion.	
	ST _M = Medium sternal BCS and low depletion.	
	ST _{H+} = High sternal BCS and depletion.	

¹Abbreviations: MY = milk yield; BW = body weight; BCS = body condition score

Clusters of MY lactation curves

The first two PCs accounted for 83.5 % of the total variance for primiparous goats and 81.6 % for multiparous goats. The first PC captured the total amount of milk produced during the lactation and accounted for 53.1 % of the total variance for primiparous goats and 50.7 % for multiparous goats. The second PC captured the persistency and peak time of the lactation curve and accounted for 30.4% of the total variance for primiparous goats and 30.8 % for multiparous goats. Based on the highest loss of inertia, four clusters were retained for primiparous goats, and three clusters were retained for multiparous goats (Figure II.4).

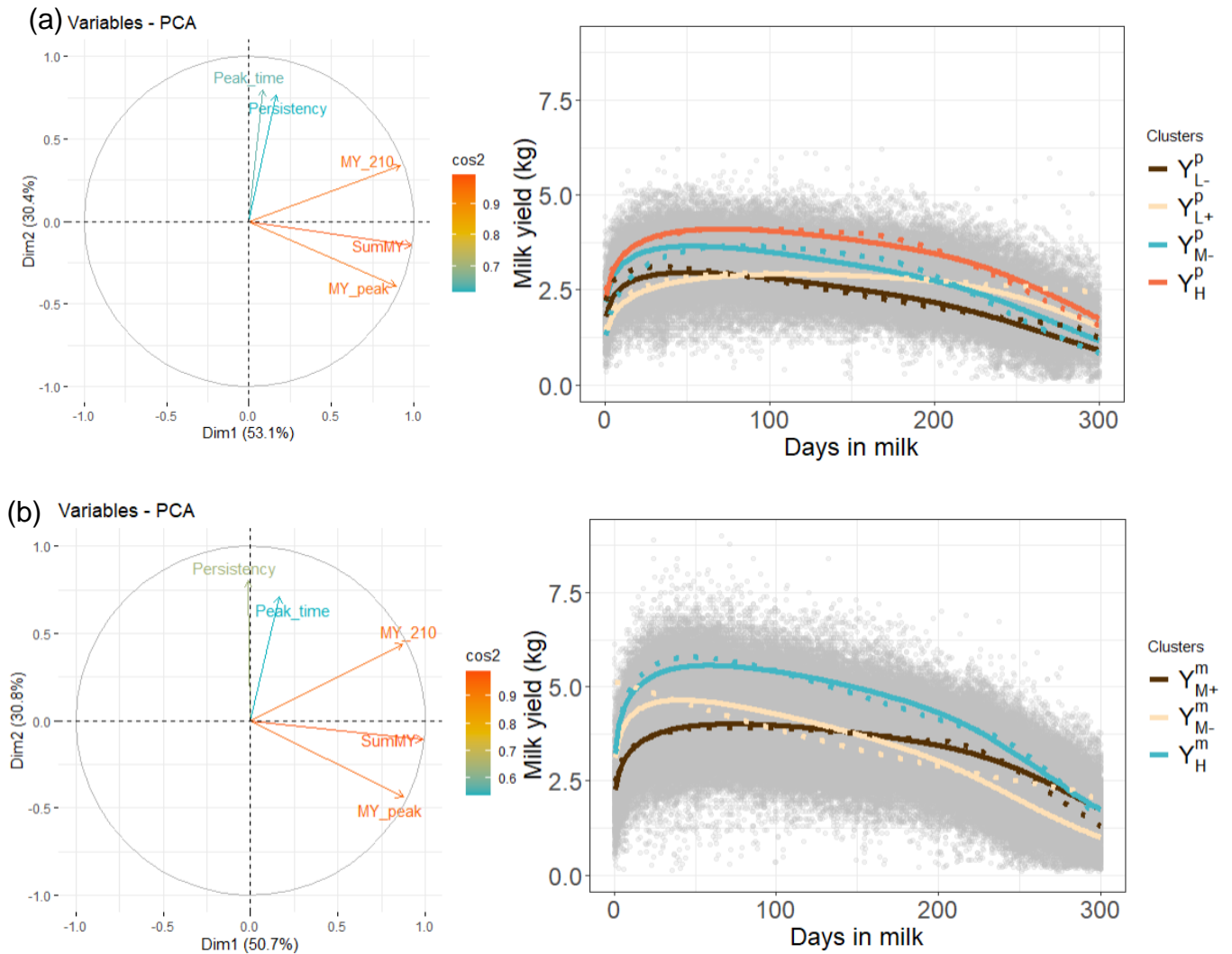


Figure II.4 PCA and clusters of milk yield synthetic indicators in primiparous (a) and multiparous (b) goats with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines representing a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$; Y_{L+}^P = Low milk yield and high persistency cluster for primiparous; Y_{L-}^P = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_{M-}^P = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_H^P = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y_{M+}^m = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y_{M-}^m = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y_H^m = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous).

Full details for each cluster are given in Tables II.4 and II.5.

Primiparous clusters were characterized by:

- a group of low persistency clusters with two different total milk production levels (63.3% of the primiparous): a low-level cluster ($Y^{P_{L-}}$) that produced 155.6 kg less over the lactation than a medium-level cluster ($Y^{P_{M-}}$).
- a medium persistency cluster with the highest total milk production level that gathered 22.6% of the primiparous (Y^{P_H}).
- the highest persistency cluster with a low total milk production level that gathered 14.1% of the primiparous ($Y^{P_{L+}}$).

Table II.4 Statistical description of synthetic indicators for MY clusters in primiparous goats.

Indicator	$Y^{P_{L-}}$ ³ n = 273	$Y^{P_{L+}}$ n = 163	$Y^{P_{M-}}$ n = 459	Y^{P_H} n = 262	Pooled SE	p-value ²
SumMY ¹	629.1 ^a	675.5 ^b	784.7 ^c	925.4 ^d	67.2	***
MY _{peak}	3.0 ^a	3.0 ^a	3.7 ^b	4.2 ^c	0.4	***
MY ₂₁₀	2.1 ^a	2.7 ^b	2.6 ^b	3.4 ^c	0.3	***
Peak time	47.4 ^a	106.0 ^b	49.8 ^a	71.4 ^c	26.7	***
Persistency	-36.7 ^a	-19.2 ^b	-35.2 ^a	-27.2 ^c	10.9	***

^{a-d} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; MY_{peak} = highest milk yield value; MY₂₁₀ = milk yield value at 210 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$.

² p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p < 0.1), * (p < 0.05); and *** (p ≤ 0.001).

³ $Y^{P_{L+}}$ = Low milk yield and high persistency cluster; $Y^{P_{L-}}$ = Low milk yield and low persistency cluster; $Y^{P_{M-}}$ = Medium milk yield and low persistency cluster; Y^{P_H} = High milk yield and medium persistency cluster.

Multiparous clusters were characterized by:

- a group of medium total milk production levels with two different persistency (65.4 % of the multiparous): a high persistency cluster ($Y^{m_{M+}}$) that maintained 20.4 % more the production than a low persistency cluster ($Y^{m_{M-}}$).
- the highest total milk production level cluster with a medium persistency (Y^{m_H}) that gathered 34.6 % of the population.

Table II.5 Statistical description of synthetic indicators for MY clusters in multiparous goats.

Indicator	$Y^{m_{M+}}$ ³ n = 741	$Y^{m_{M-}}$ n = 740	Y^{m_H} n = 783	Pooled SE	p-value ²
SumMY ¹	911.4 ^a	940.9 ^b	1,212.4 ^c	111.5	***
MY _{peak}	4.1 ^a	4.7 ^b	5.7 ^c	0.6	***
MY ₂₁₀	3.4 ^a	2.9 ^b	4.1 ^c	0.5	***
Peak time	71.1 ^a	38.1 ^b	58.3 ^c	27.4	***
Persistency	-25.9 ^a	-46.3 ^b	-36.3 ^c	12.4	***

^{a-c} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; MY_{peak} = highest milk yield value; MY₂₁₀ = milk yield value at 210 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$.

² p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p<0.1), *(p<0.05); and ***(p≤0.001).

³ $Y^{m_{M+}}$ = Medium milk yield and high persistency cluster; $Y^{m_{M-}}$ = Medium milk yield and low persistency cluster; Y^{m_H} = High milk yield and medium persistency cluster.

With respect to farm, for primiparous goats, Pradel's Alpine goats, Grignon's Alpine goats, and Grignon's Saanen goats were more represented in the $Y^{p_{M-}}$ cluster because this is the cluster with the highest number of goats overall. For multiparous goats, Pradel's Alpine goats were more represented in the Y^{m_H} cluster, whereas Grignon's Alpine goats were less represented in this cluster. Grignon's Saanen goats were more represented in the $Y^{m_{M+}}$ cluster. See Appendix B section 1 for more details.

Clusters of BW lactation curves

The first two PCs accounted for 77.4% of the total variance for primiparous goats and 79.4% for multiparous goats. The first PC represented the level of BW at different times of lactation and accounted for 52.8% of the total variance for primiparous goats and 56.9% for multiparous goats. The second PC represented the BW speed loss in the 30 days after kidding and accounted for 24.7% of the total variance for primiparous goats and 22.5% for multiparous goats. Three clusters were retained for each parity group due to the highest loss of inertia (Figure II.5).

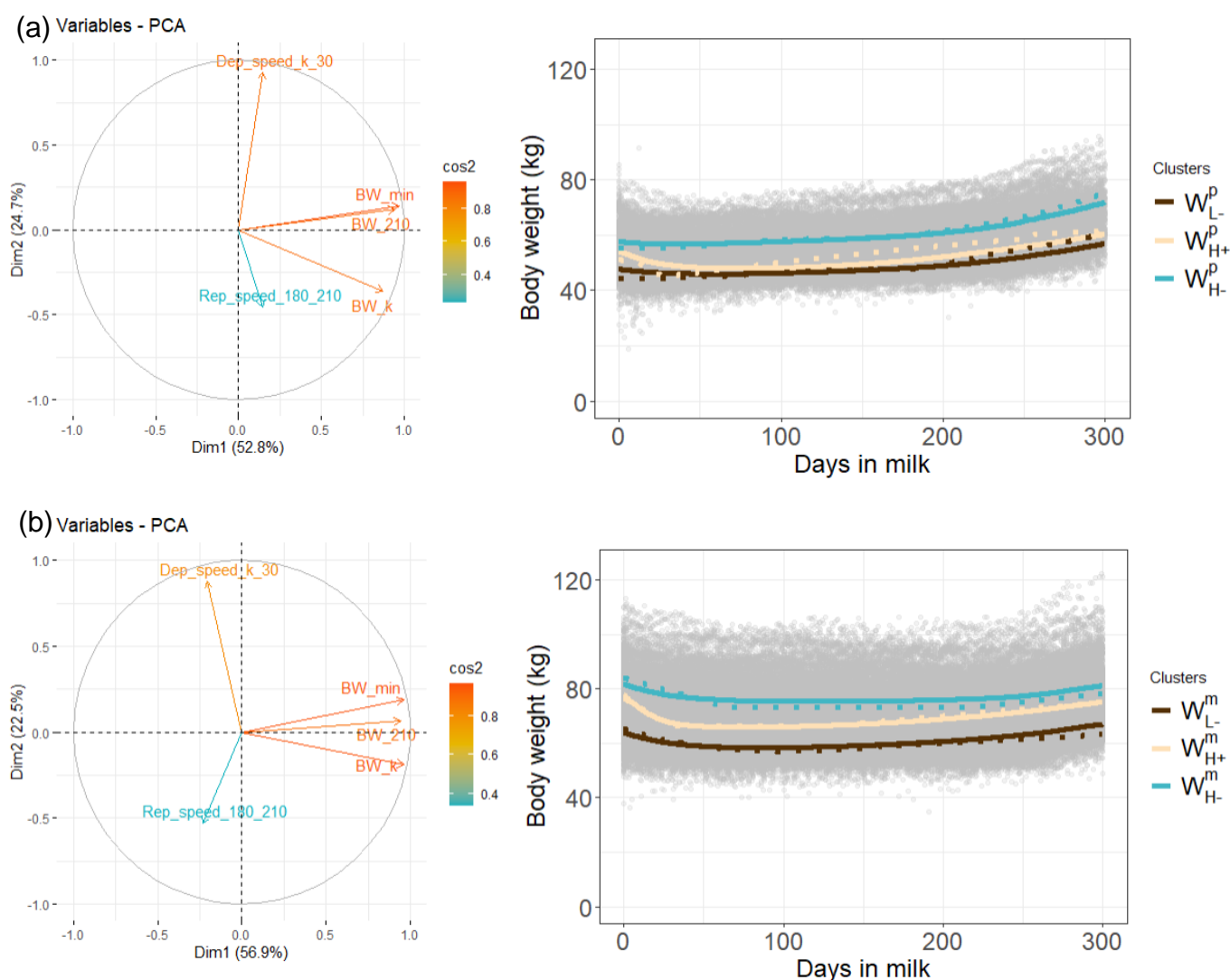


Figure II.5 PCA and clusters of body weight synthetic indicators in primiparous (a) and multiparous (b) goats with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30}$: Body weight depletion speed between kidding and 30 days = $(BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210}$: Body weight repletion speed between 180 and 210 days = $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$; W_{L-}^P = Low body weight and low depletion cluster in primiparous; W_{H+}^P = High body weight and high depletion cluster in primiparous; W_{H-}^P = High body weight and low depletion cluster in primiparous; W_{L-}^m = Low body weight and low depletion cluster in multiparous; W_{H+}^m = High body weight and high depletion cluster in multiparous; W_{H-}^m = High body weight and low depletion cluster in multiparous).

Full details for each cluster are given in Tables II.6 and II.7.

Primiparous clusters were characterized by:

- a group of low depletion clusters with two different BW level at kidding (68.6% of the primiparous): a low-level cluster (**WP_L**) that averaged 10.0 kg less at kidding than a high-level cluster (**WP_H**). Those profiles had a higher BW₂₁₀ than BW_k.
- the highest depletion cluster with a high BW level at kidding (**WP_{H+}**) that gathered 31.4% of the population. Despite having the highest repletion speed, this cluster presented a lower BW₂₁₀ than BW_k due to the high level of depletion, that is not totally compensated at 210 days of lactation.

Table II.6 Statistical description of synthetic indicators for BW clusters in primiparous goats.

Indicator	WP _L ³ n = 418	WP _{H+} n = 312	WP _{H-} n = 264	Pooled SE	p-value ²
BW _k ¹	47.7 ^a	54.3 ^b	57.7 ^c	4.0	***
BW _{min}	45.2 ^a	47.6 ^b	55.6 ^c	3.5	***
BW ₂₁₀	49.5 ^a	52.9 ^b	61.5 ^c	4.3	***
Dep_speed _{k→30}	-0.05 ^a	-0.17 ^b	-0.03 ^c	0.07	***
Rep_speed _{180→210}	0.04 ^a	0.06 ^b	0.05 ^c	0.03	***

^{a-c} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW₂₁₀ = body weight at 210 days; Dep_speed_{k→30} = (BW₃₀ - BW_k) / 30; Rep_speed_{180→210} = (BW₂₁₀ - BW₁₈₀) / 30.

² p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p < 0.1), * (p < 0.05); and *** (p ≤ 0.001).

³ WP_L = Low body weight and low depletion cluster; WP_{H+} = High body weight and high depletion cluster; WP_{H-} = High body weight and low depletion cluster.

Multiparous clusters were characterized by:

- a group of low depletion clusters with two different BW level at kidding (73.4 % of the multiparous): a low-level (**W^m_L**) that averaged 17.6 kg less at kidding than a high-level cluster (**W^m_H**). For these clusters BW₂₁₀ was lower than BW_k.
- the highest depletion cluster with a high BW level at kidding (**W^m_{H+}**) that gathered 26.6% of the multiparous. Despite having the highest repletion speed, this profile presented a lower BW₂₁₀ than BW_k due to the high level of depletion, that is not totally compensated at 210 days of lactation.

Table II.7 Statistical description of synthetic indicators for BW clusters in multiparous goats.

Indicator	W^{m_L} ³ n = 835	$W^{m_{H+}}$ n = 513	$W^{m_{H-}}$ n = 583	Pooled SE	p-value ²
BW _k ¹	64.1 ^a	78.1 ^b	81.7 ^c	6.2	***
BW _{min}	57.8 ^a	65.5 ^b	74.2 ^c	5.2	***
BW ₂₁₀	61.1 ^a	69.4 ^b	76.2 ^c	5.4	***
Dep_speed _{k→30}	-0.14 ^a	-0.35 ^b	-0.14 ^a	0.12	***
Rep_speed _{180→210}	0.04 ^a	0.04 ^b	0.01 ^c	0.03	***

^{a-c} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW₂₁₀ = body weight at 210 days; Dep_speed_{k→30} = (BW₃₀ - BW_k) / 30; Rep_speed_{180→210} = (BW₂₁₀ - BW₁₈₀) / 30.

² p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p < 0.1), *(p < 0.05); and ***(p < 0.001).

³ W^{m_L} = Low body weight and low depletion cluster; W^{m_{H+}} = High body weight and high depletion cluster; W^{m_{H-}} = High body weight and low depletion cluster.

For primiparous goats, Pradel's Alpine goats were more represented in the W^{p_{L-}} and W^{p_{H+}} clusters. Grignon's Alpine goats were more represented in the W^{p_{L-}} cluster. Grignon's Saanen goats were more represented in the W^{p_{H-}} cluster. For multiparous goats, Pradel's Alpine goats and Grignon's Alpine goats were more represented in the W^{m_{L-}} cluster. Grignon's Saanen goats were more represented in the W^{m_{H-}} cluster. See Appendix B section 2 for more details.

Clusters of BCS lactation curves

For lumbar and sternal BCS, clusters were built all parities together. For lumbar BCS, the first two PCs accounted for 75.8% of the total variance. The first PC represented levels of lumbar score at different times of the lactation (BCS_{L_{min}} and BCS_{L_k}) and accounted for 46.9% of the total variance. The second PC represented the lumbar BCS speed loss in the 30 days after kidding and accounted for 28.9% of the total variance. Three clusters were retained due to the highest loss of inertia. For sternal BCS, the first two PCs represented 78.6% of the total variance. The first PC represented levels of sternal score at different times of the lactation (BCS_{S_{min}} and BCS_{S₂₁₀}) and accounted for 50.7% of the total variance. The second PC represented the sternal BCS speed loss in the 30 days after kidding and accounted for 27.9% of the total variance. Three clusters were retained due to the highest loss of inertia (Figure II.6).

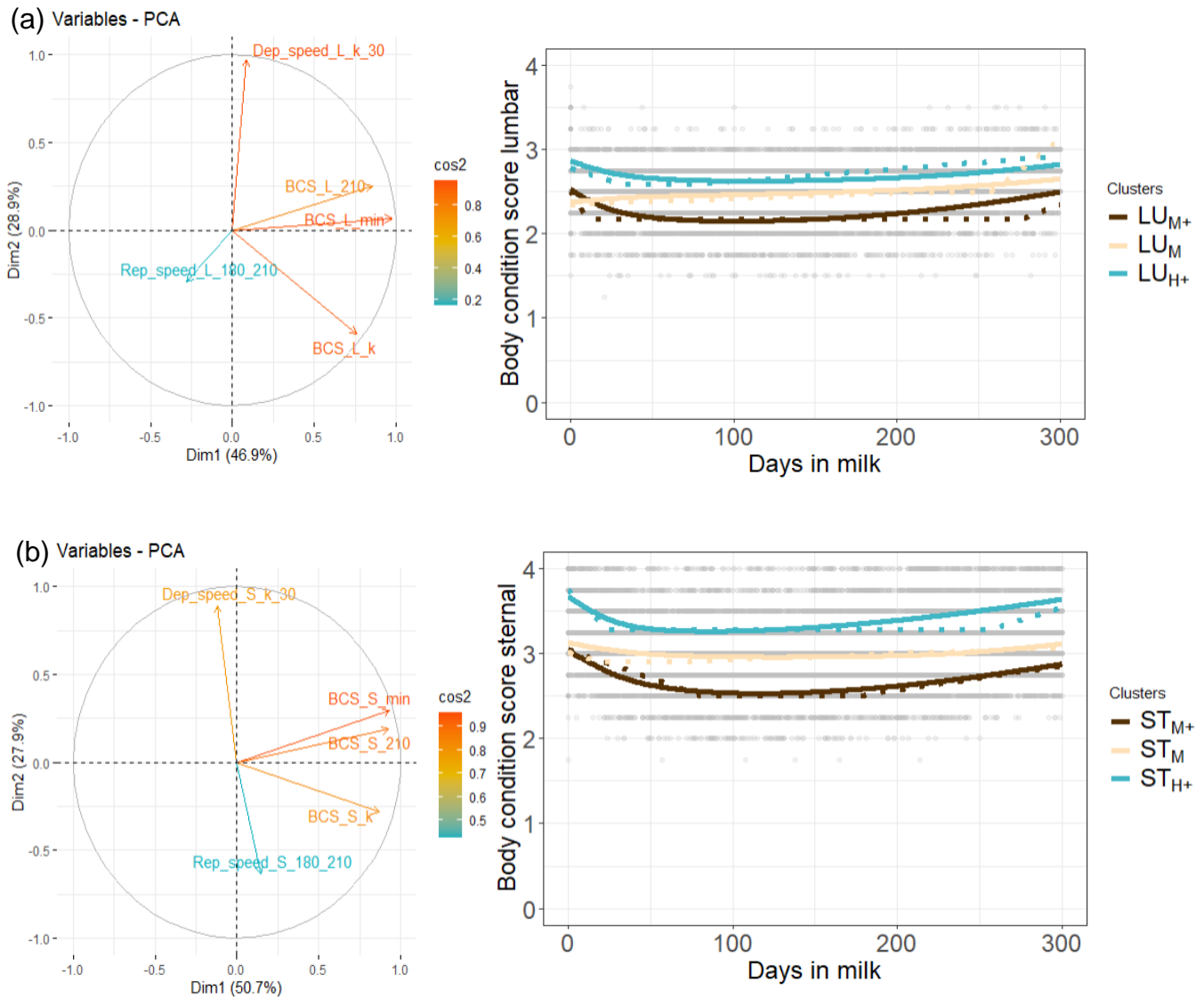


Figure II.6 PCA and clusters of lumbar (a) and sternal (b) body condition score synthetic indicators with grey circles representing raw data, lines representing the mean cluster and dotted lines a paragon cluster (i.e., the most representative goat in the cluster) (BCS_{L_k} = lumbar BCS at kidding; BCS_{L_{min}} = minimum lumbar BCS; BCS_{L₂₁₀} = lumbar BCS at 210 days; Dep_speed_{L_k→30}: lumbar BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{L_{30}} - BCS_{L_k}) / 30$; Rep_speed_{L₁₈₀→210}: lumbar BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{L_{210}} - BCS_{L_{180}}) / 30$; BCS_{S_k} = sternal BCS at kidding; BCS_{S_{min}} = minimum sternal BCS; BCS_{S₂₁₀} = sternal BCS at 210 days; Dep_speed_{S_k→30}: sternal BCS depletion speed between kidding and 30 days = $(BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; Rep_speed_{S₁₈₀→210}: sternal BCS repletion speed between 180 and 210 days = $(BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$; LU_{M+} = Medium lumbar body condition score and depletion cluster; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion cluster; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster).

Full details for each cluster are given in Tables II.8 and II.9.

Lumbar BCS clusters were characterized by:

- a group of depletion clusters with two different lumbar BCS level at kidding (68.7 % of the population): a medium level cluster (**LU_{M+}**) that averaged 0.4 points less at kidding than a high-level cluster (**LU_{H+}**). LU_{M+} profile presented the highest repletion speed and the lowest minimum lumbar BCS value.
- the lowest depletion cluster with a medium lumbar BCS level at kidding that gathered 31.3% of the population (**LU_M**). LU_M cluster presented the same repletion speed than LU_{H+}.

Table II.8 Statistical description of synthetic indicators for lumbar BCS clusters in goats.

Indicator	LU _{M+} ³ n = 437	LU _M n = 459	LU _{H+} n = 572	Pooled SE	p-value ²
BCS_L _k ¹	2.5 ^a	2.4 ^b	2.9 ^c	0.2	***
BCS_L _{min}	2.1 ^a	2.3 ^b	2.6 ^c	0.2	***
BCS_L ₂₁₀	2.3 ^a	2.5 ^b	2.7 ^c	0.2	***
Dep_speed_L _{k→30}	-0.009 ^a	0.002 ^b	-0.006 ^c	0.005	***
Rep_speed_L _{180→210}	0.002 ^a	0.001 ^b	0.001 ^b	0.001	***

^{a-c} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ BCS_L_k = lumbar BCS at kidding; BCS_L_{min} = minimum lumbar BCS; BCS_L₂₁₀ = lumbar BCS at 210 days; Dep_speed_L_{k→30} = (BCS_L₃₀ - BCS_L_k) / 30; Rep_speed_L_{180→210} = (BCS_L₂₁₀ - BCS_L₁₈₀) / 30.

² p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p<0.1), *(p<0.05); and ***(p≤0.001).

Sternal BCS profiles were characterized by:

- a group of depletion clusters with two different sternal BCS level at kidding (56.5 % of the population): a medium-level cluster (**ST_{M+}**) that averaged 0.7 points less at kidding than a high-level cluster (**ST_{H+}**). ST_{M+} cluster presented the lowest minimum sternal BCS. These clusters presented the highest and the same repletion speed.
- the lowest depletion cluster with a medium sternal BCS level at kidding that gathered 43.5 % of the population (**ST_M**). ST_M cluster presented the lowest repletion speed.

Table II.9 Statistical description synthetic indicators for sternal BCS clusters in goats.

Indicator	ST _{M+} ³ n = 489	ST _M n = 708	ST _{H+} n = 433	Pooled SE	p-value ²
BCS_ <i>S_k</i> ¹	3.0 ^a	3.1 ^b	3.7 ^c	0.2	***
BCS_ <i>S_{min}</i>	2.5 ^a	2.9 ^b	3.2 ^c	0.2	***
BCS_ <i>S₂₁₀</i>	2.6 ^a	3.0 ^b	3.4 ^c	0.2	***
Dep_speed_ <i>S_{k→30}</i>	-0.010 ^a	-0.003 ^b	-0.010 ^a	0.006	***
Rep_speed_ <i>S_{180→210}</i>	0.0020 ^a	0.0004 ^b	0.0020 ^a	0.001	***

^{a-c} Means with superscripts differ significantly by row.

¹ BCS_*S_k* = sternal BCS at kidding; BCS_*S_{min}* = minimum sternal BCS; BCS_*S₂₁₀* = sternal BCS at 210 days; Dep_speed_*S_{k→30}* = (BCS_*S₃₀* - BCS_*S_k*) / 30; Rep_speed_*S_{180→210}* = (BCS_*S₂₁₀* - BCS_*S₁₈₀*) / 30.

²p-value resulting from Tukey's test assessing the significance of differences between profiles for each variable. NS (p<0.1), *(p<0.05); and ***(p≤0.001).

³ ST_{M+} =Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M =Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} =High sternal body condition score and depletion cluster.

For lumbar BCS, Pradel's Alpine goats were more represented in the LU_{H+} cluster, whereas Grignon's Alpine goats were more represented in the LU_M cluster. Grignon's Saanen goats were more represented in the LU_M cluster. Primiparous represented between 30 % and 38 % of the population in each profile for lumbar BCS. For sternal BCS, Pradel's Alpine goats were more represented in the ST_M cluster, whereas Grignon's Alpine goats were more represented in the ST_{H+} cluster. Grignon's Saanen goats were more represented in the ST_{H+} cluster. Primiparous represented between 30 % and 35 % of the population in each profile for sternal BCS. See Appendix B section 3 for more details.

Diversity of phenotypic curves at lactation scale

Associations between MY curves and BW curves

In this section, the association between MY and BW is presented. For primiparous goats, the association between MY and BW clusters is shown in Table II.10. The Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V of 0.17. The association $Y^{P_{M-}}$ with $W^{P_{L-}}$ accounted for the highest proportion of goats with 17.8 % of the population, followed by the associations $Y^{P_{L-}}$ with $W^{P_{L-}}$ and $Y^{P_{M-}}$ with $W^{P_{H+}}$ with 13.9 % of the population. The association $Y^{P_{L+}}$ with $W^{P_{H+}}$ accounted for the lowest proportion of goats with 2.8 % of the population. The remaining 51.6% of the population was almost equally distributed among the clusters.

Table II.10 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to MY and BW clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Body weight profile						Total	
	$W^{P_{L-}^2}$		$W^{P_{H+}}$		$W^{P_{H-}}$		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%		
$Y^{P_{L-}^2}$	124	13.9	45	5.0	43	4.8	212	23.7
$Y^{P_{L+}}$	44	4.9	25	2.8	44	4.9	113	12.7
$Y^{P_{M-}}$	159	17.8	124	13.9	77	8.6	360	40.3
Y^{P_H}	60	6.7	86	9.6	62	6.9	208	23.3
Total	387	43.3	280	31.4	226	25.3	893	100.0

¹ % = proportion of lactations among the 893 primiparous goats.

² $Y^{P_{L+}}$ = Low milk yield and high persistency cluster; $Y^{P_{L-}}$ = Low milk yield and low persistency cluster; $Y^{P_{M-}}$ = Medium milk yield and low persistency cluster; Y^{P_H} = High milk yield and medium persistency cluster; $W^{P_{L-}}$ = Low body weight and low depletion cluster; $W^{P_{H+}}$ = High body weight and high depletion cluster; $W^{P_{H-}}$ = High body weight and low depletion cluster.

For multiparous goats, the association between MY and BW clusters is shown in Table II.11. The Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V of 0.17. The association $Y^{m_{M+}}$ with $W^{m_{L-}}$ accounted for the highest proportion of goats with 18.6% of the population. The association $Y^{m_{M+}}$ with $W^{m_{H+}}$ accounted for the lowest proportion of goats with 5.6 % of the population. The remaining 75.8 % of the population was almost equally distributed among the clusters.

Table II.11 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to MY and BW clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Body weight profile						Total	
	$W^{m_{L-}}$		$W^{m_{H+}}$		$W^{m_{H-}}$		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%		
$Y^{m_{M+}}$ ²	313	18.6	95	5.6	145	8.6	553	32.8
$Y^{m_{M-}}$	242	14.4	166	9.9	140	8.3	548	32.5
$Y^{m_{H}}$	169	10.0	200	11.9	215	12.8	584	34.7
Total	724	43.0	461	27.4	500	29.7	1,685	100.0

¹ % = proportion of lactations among the 1,685 multiparous goats.

² $Y^{m_{M+}}$ = Medium milk yield and high persistency cluster; $Y^{m_{M-}}$ = Medium milk yield and a low persistency cluster; $Y^{m_{H}}$ = High milk yield and a medium persistency cluster; $W^{m_{L-}}$ = Low body weight and low depletion cluster; $W^{m_{H+}}$ = High body weight and high depletion profile cluster; $W^{m_{H-}}$ = High body weight and low depletion cluster.

The conclusions were the same for the associations between MY and lumbar BCS curves and for the associations between MY and sternal BCS curves see Appendix C section 1 and 2.

Associations between BW and sternal BCS curves

In this section, the association between BW and sternal BCS is presented. For primiparous goats, the association between BW and sternal BCS clusters is shown in Table II.12. The Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V of 0.25. The association $W^{p_{L-}}$ with ST_{M+} and $W^{p_{H+}}$ with ST_M accounted for the highest proportion of goats with 18.8 % of the population, followed by the association $W^{p_{L-}}$ with ST_M with 17.9 % of the population. The association $W^{p_{H-}}$ with ST_{M+} accounted for the lowest proportion of goats with 1.6 % of the population. The remaining 42.9 % of the population was almost equally distributed among the clusters.

Table II.12 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BW and sternal BCS clusters (see section 2 for clustering methodology).

Body weight profile	Sternal BCS profile						Total	
	ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
W ^p _{L-} ²	84	18.8	80	17.9	24	5.4	188	42.0
W ^p _{H+}	75	16.7	84	18.8	29	6.5	188	42.0
W ^p _{H-}	7	1.6	29	6.5	36	8.0	72	16.0
Total	166	37.1	193	43.1	89	19.9	448	100.0

¹ % = proportion of lactations among the 448 primiparous goats.

² W^p_{L-} = Low body weight and low depletion cluster; W^p_{H+} = High body weight and high depletion cluster; W^p_{H-} = High body weight and low depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

For multiparous goats, the association between BW and sternal BCS clusters is shown in Table II.13. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.18. The association W^m_{L-} with ST_M accounted for the highest proportion of goats with 18.6 % of the population, followed by the association W^m_{L-} with ST_{M+} with 14.2 % of the population. The association W^m_{H-} with ST_{M+} accounted for the lowest proportion of goats with 2.8 % of the population. The remaining 64.4 % of the population was almost equally distributed among the clusters.

Tableau II.13 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to BW and BCS sternal clusters (see section 2 for clustering methodology).

Body weight profile	Sternal BCS profile						Total	
	ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
W ^m _{L-} ²	139	14.2	182	18.6	74	7.6	395	40.5
W ^m _{H+}	120	12.3	132	13.5	93	9.5	345	35.3
W ^m _{H-}	27	2.8	115	11.8	94	9.6	236	24.2
Total	286	29.3	429	44.0	261	26.7	976	100.0

¹ % = proportion of lactations among the 976 multiparous goats.

² W^m_{L-} = Low body weight and low depletion cluster; W^m_{H+} = High body weight and high depletion cluster; W^m_{H-} = High body weight and low depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

The conclusions were the same for the associations between BW and lumbar BCS curves see Appendix C section 3.

Association between lumbar and sternal BCS curves

For primiparous goats, the association between lumbar and sternal BCS clusters is shown in Table II.14. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.27. The association LU_{M+} with ST_{M+} accounted for the highest proportion of goats with 21.4 % of the population, followed by the association LU_{H+} with ST_M with 19.5 % of the goats. The association LU_M with ST_{M+} accounted for the lowest proportion of goats with 6.7 % of the population. The remaining 52.4 % of the population was almost equally distributed among the clusters.

Table II.14 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BCS lumbar and BCS sternal clusters (see section 2 for clustering methodology).

		Sternal BCS profile						Total	
		ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		n	%
Lumbar BCS profile	n	% ¹	n	%	n	%	n		
LU _{M+} ²	80	21.4	31	8.3	28	7.5	139	37.2	
LU _M	25	6.7	51	13.6	30	8.0	106	28.3	
LU _{H+}	27	7.2	73	19.5	29	7.8	129	34.5	
Total	132	35.3	155	41.4	87	23.3	374	100.0	

¹ % = proportion of lactations among the 374 primiparous goats.

² LU_{M+} = Medium lumbar body condition score and depletion cluster; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion cluster; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

For multiparous goats, the association between lumbar and sternal BCS clusters is shown in Table II.15. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.35. The association LU_{M+} with ST_{M+} accounted for the highest proportion of goats with 20.0 % of the population, followed by the association LU_{H+} with ST_M with 18.6 % of the goats. The association LU_{M+} with ST_{H+} accounted for the lowest proportion of goats with 4.1 % of the population. The remaining 57.3 % of the population was almost equally distributed among the clusters.

Table II.15 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to lumbar and sternal BCS clusters (see section 2 for clustering methodology).

Lumbar BCS profile	Sternal BCS profile						Total	
	ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		n	%
profile	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
LU _{M+} ²	148	20.0	52	7.0	30	4.1	230	31.1
LU _M	59	8.0	108	14.6	45	6.1	212	28.6
LU _{H+}	36	4.9	138	18.6	124	16.8	298	40.3
Total	243	32.8	298	40.3	199	26.9	740	100.0

¹ % = proportion of lactations among the 740 multiparous goats.

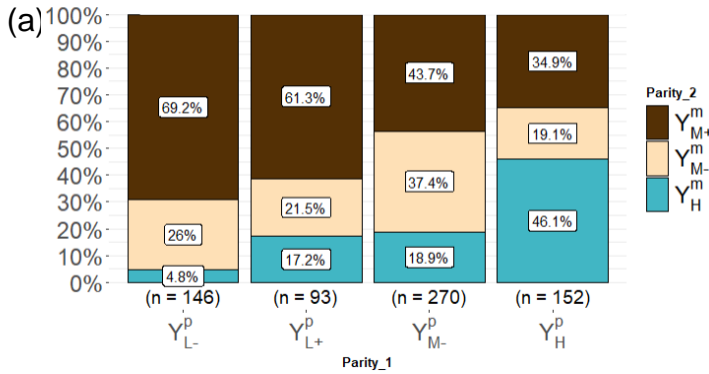
² LU_{M+} = Medium lumbar body condition score and depletion cluster; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion cluster; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion cluster; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

Diversity of phenotypic lactation curves at lifetime scale

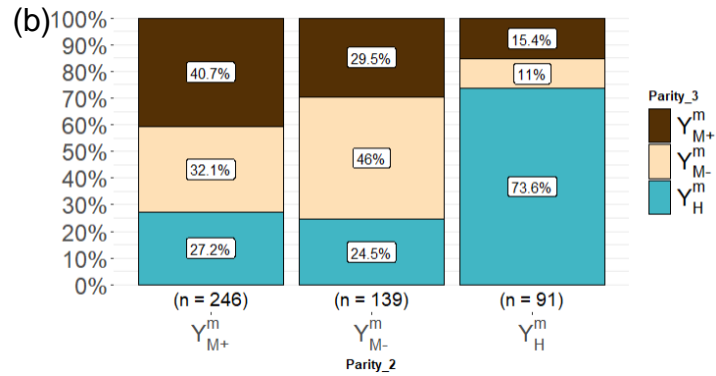
MY lactation curves throughout parities

Individual lactation transition in MY curves between successive lactations is shown in Figure II.7. Between parity 1 to 4, the Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V ranging from 0.27 to 0.32. For primiparous goats, almost half of the goats in the Y^{p_H} cluster remained the most productive ones in parity 2 (Y^{m_H}), while the other half switched to other clusters. More than half of the goats in the two lowest productive clusters (Y^{p_{L-}} and Y^{p_{L+}}) switched to the Y^{m_{M+}} cluster. Goats in the Y^{p_{M+}} cluster were almost equally distributed among the clusters in parity 2. For multiparous goats, more than two third of the goats in the Y^{m_H} cluster remained in this cluster in successive lactations. The proportion of goats that remained in the Y^{m_{M-}} cluster in successive lactations increased with parity. Goats in the Y^{m_{M+}} cluster were almost equally distributed among the clusters in successive lactations.

$\chi^2_{\text{Pearson}}(6) = 98.87, p = 4.33e-19, \hat{V}_{\text{Cramer}} = 0.27, \text{CI}_{95\%} [0.21, 1.00], n_{\text{obs}} = 661$



$\chi^2_{\text{Pearson}}(4) = 81.65, p = 7.80e-17, \hat{V}_{\text{Cramer}} = 0.29, \text{CI}_{95\%} [0.23, 1.00], n_{\text{obs}} = 476$



$\chi^2_{\text{Pearson}}(4) = 64.99, p = 2.59e-13, \hat{V}_{\text{Cramer}} = 0.32, \text{CI}_{95\%} [0.24, 1.00], n_{\text{obs}} = 306$

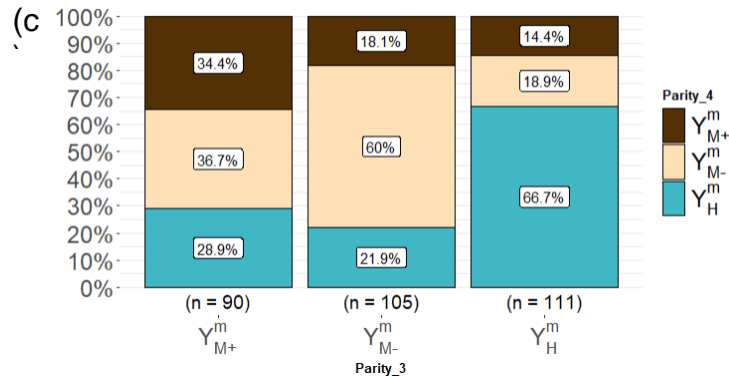


Figure II.7 Barplots displaying the frequency of goats affected to a MY cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3, (c) parity 3 and 4 (Y^P_{L+} = Low milk yield and high persistency cluster for primiparous; Y^P_{L-} = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^P_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y^P_H = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y^m_{M-} = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y^m_H = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous).

BW lactation curves throughout parities

Individual lactation transition in BW curves between successive lactations is shown in Figure II.8. Between parity 1 and 4, the χ^2 test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V ranging from 0.41 to 0.44. For primiparous, goats in the W^P_{H-} cluster switched clusters in parity 2. More than 80% of the goats in the W^P_{H+} and in the W^P_{L-} clusters switched to the W^m_{L-} cluster in parity 2. For multiparous, more than two third of the goats in the W^m_{H-} cluster remained in this cluster in successive lactations. Half of the goats in the W^m_{H+} cluster remained in this cluster, while the other half switched clusters in successive lactations. Half of the goats in the W^m_{L-} cluster remained in this cluster, while the other half switched clusters in successive lactations.

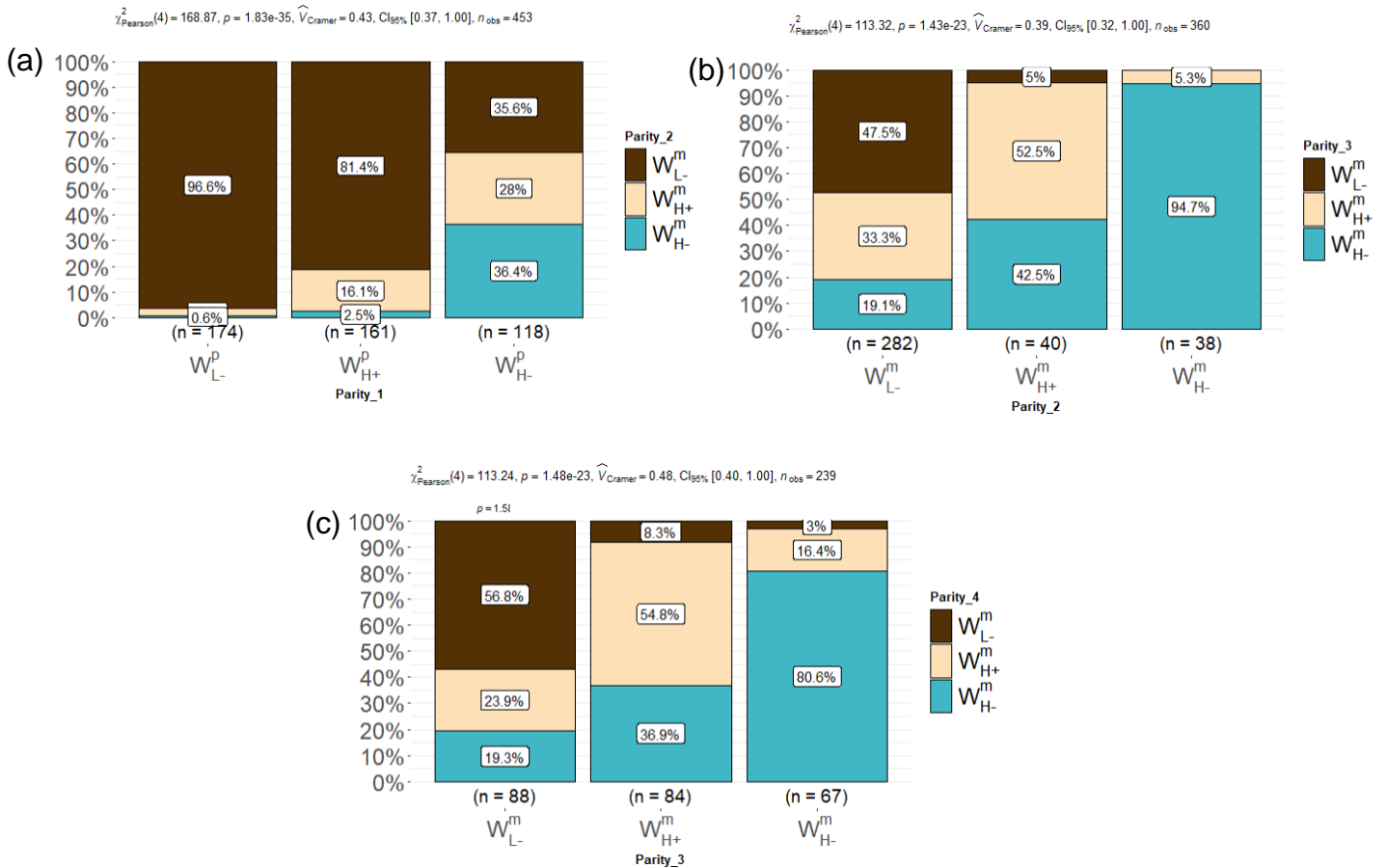


Figure II.8 Barplots displaying the frequency of goats affected to a BW cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3, (c) parity 3 and 4 (W_{L-}^p = Low body weight and low depletion cluster; W_{H+}^p = High body weight and high depletion cluster; W_{H-}^p = High body weight and low depletion cluster; W_{L-}^m = Low body weight and low depletion cluster; W_{H+}^m = High body weight and high depletion cluster; W_{H-}^m = High body weight and low depletion cluster).

BCS lactation curves throughout parities

Only sternal BCS is presented here. Individual lactation transition in sternal BCS curves between successive lactations is shown in Figure II.9. Between parity 1 and 4, Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V ranging from 0.35 to 0.49. For primiparous, more than half of the goats in the three clusters remained in their cluster in parity 2, while the other part switched to other clusters. For multiparous, more than three quarters of the goats in the ST_{H+} profile remained in this cluster in successive lactations, while the other part switched to other clusters. More than half of the goats in the ST_{M+} and ST_M profile remained in their cluster in successive lactations, while the other part switched to other clusters.

$\chi^2_{\text{Pearson}}(4) = 51.10, p = 2.12 \times 10^{-10}, \hat{V}_{\text{Cramer}} = 0.35, \text{CI}_{95\%} [0.25, 1.00], n_{\text{obs}} = 197$

$\chi^2_{\text{Pearson}}(4) = 53.68, p = 6.15 \times 10^{-11}, \hat{V}_{\text{Cramer}} = 0.41, \text{CI}_{95\%} [0.30, 1.00], n_{\text{obs}} = 148$

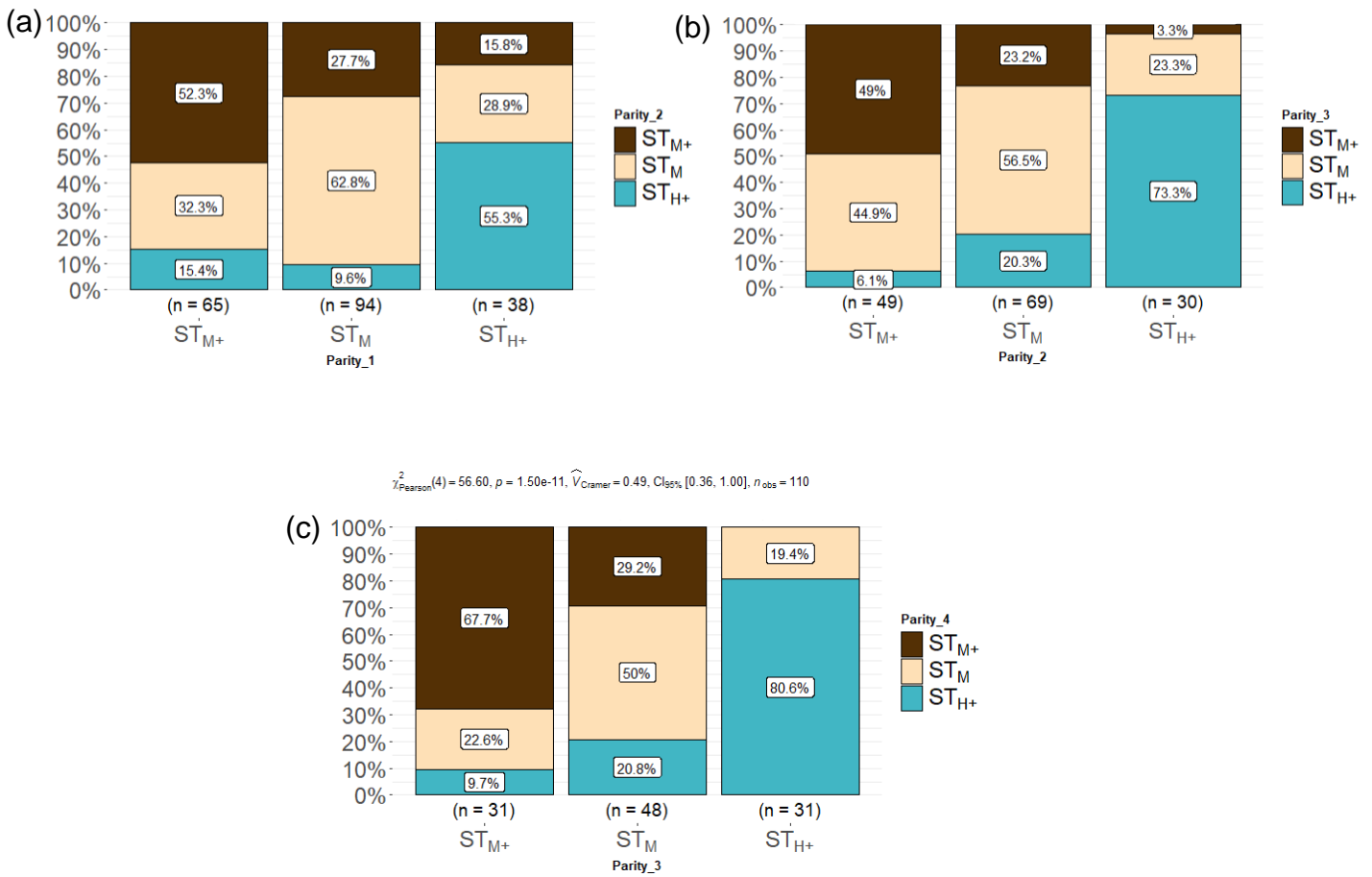


Figure II.9 Barplots displaying the frequency of goats affected to a sternal BCS cluster between (a) parity 1 and 2, (b) parity 2 and 3 and (c) parity 3 and 4 (ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion profile; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion profile).

DISCUSSION

Our dataset is relatively large and the frequency of measurement of the different variables is high. However, it reflected only the management of two farms. The observations made here are a starting point for a better understanding of the relationships between milk production, body condition score and body weight in goats, but will need to be confirmed in various systems. In addition, it will be necessary to add reproductive performance, which is also considered when making decisions about culling.

The first objective of this work was to characterize the diversity of phenotypic curves of performance (MY, BW, BCS) at the lactation scale.

MY curves

For MY curves we found four clusters for primiparous goats and three clusters for multiparous goats. Parity had a strong effect on the scale of the lactation curve. Over the lactation, primiparous had lower total milk yield than multiparous goats (Gipson and Grossman, 1990). Parity also affected the shape of the lactation curve. For all parities, some clusters presented the same shape characterized by a low persistency with different milk production levels ($Y^{P_{L-}}$, $Y^{P_{M-}}$, $Y^{m_{M-}}$). These clusters, in terms of shape, were close to the mean curve of cluster 2, which represented the most common shape of lactation observed by Arnal et al. (2018) over the French dairy goat population. This cluster 2 represented 39 % of the French dairy goat population, characterized by a marked peak and a medium persistency, i.e. a low persistency for our study because Arnal et al. had an additional atypical cluster with a very low persistency. For primiparous goats, one cluster combined a low level of milk with the highest persistency over the whole population ($Y^{P_{L+}}$). This is consistent with observations made by Gipson and Grossman, (1990), where persistency was the highest in primiparous goats and decreased when parity increased. This can be explained by a lower level of development of the mammary gland (Safayi et al., 2010). This shape of lactation curve was also observed in the study of Arnal et al. (2018). However, persistency and MY are not always negatively correlated, because for all parities we observed that the highest productive clusters were those with a medium persistency (Y^{P_H} , Y^{m_H}) rather than those with the lowest persistency. This result is close to the finding of Arnal et al. (2018) that their highest productive cluster had a high persistency. We can hypothesize that better fed goats produce more milk and are better able to maintain that production.

Despite differences between Saanen and Alpine goats being reported in the literature (Gipson and Grossman, 1990; Rupp et al., 2011; Arnal et al., 2018), breed did not have a significant effect on the scale or the shape of the lactation curves in the present study, regardless of parity on the two farms. It should be noted that the two breeds were only present on one farm (MoSAR) and thus had the same feeding and management environment.

Lactation curves of BW

For BW curves we found three clusters for primiparous and multiparous goats. Parity and breed played a strong role on the scale of BW curves. As expected, primiparous goats were lighter than multiparous ones. For all parities, we found low depletion clusters ($W^{P_{L-}}$, $W^{M_{L-}}$, $W^{P_{H-}}$, $W^{M_{H-}}$) and high depletion clusters ($W^{P_{H+}}$, $W^{M_{H+}}$). The low depletion clusters had the same shape but differed in terms of level. Only the high depletion clusters differed in terms of shape from the other clusters. However, the depletion speed was lower in primiparous goats than in multiparous goats. Indeed, for primiparous goats, the difference between kidding and the minimum of BW averaged 3.7 kg, while for multiparous this difference averaged 8.3 kg. These results are consistent with what Sauvont et al. (2012) observed when they modelled the BW curve by parity. They observed that primiparous were lighter and lost less BW (4.0 kg on average) than multiparous goats (7.3 kg on average). To our knowledge, little work has been done to characterize BW curves in dairy goats. Our work can be compared to the study of Macé et al. (2019) in meat sheep. They analyzed BW longitudinal data in 1146 ewes to characterize curves over multiple production cycles. Most of their curves had the same shape but differed in terms of level.

All multiparous clusters had a higher BW at kidding (BW_k) than at the beginning of the subsequent gestation (BW_{210}). In contrast, for primiparous clusters the opposite was mainly true, indicating that primiparous goats were still growing in first lactation. For multiparous and for all clusters BW_k was higher than BW_{210} at the end of lactation. BW is easy to measure on farm to monitor animals, especially to quantify energy balance (Thorup et al., 2012). However, BW measures also include digestive content, growth, gravid uterus and body reserves. Therefore, BW measures alone are not consistent enough to quantify body reserve changes. They need to be analyzed with BCS to better understand body reserves dynamics.

A breed effect was observed for BW curves: Saanen goats were more represented in the high-level clusters for all parities ($W^{P_{H-}}$, $W^{M_{H-}}$). They were generally heavier than Alpine goats (Sauvant et al., 2012).

Lactation curves of BCS

For lumbar and sternal BCS we found three clusters for all parities. First for all parities, we found high depletion clusters for lumbar (LU_{M+} , LU_{H+}) and sternal (ST_{M+} , ST_{H+}) BCS. Then, we found low depletion clusters for lumbar (LU_M) and sternal (ST_M) BCS. High depletion clusters presented the same shape but differed in terms of level. Only the low depletion clusters differed in terms of shape. These results are also consistent with the observations of Macé et al. (2019). They found the same shape but differing in terms of level. Moreover, for the high depletion clusters, the variation between kidding and the minimum of BCS averaged 0.4 points for LU_{M+} , 0.3 points for LU_{H+} , and 0.5 points for ST_{M+} and ST_{H+} . Our values, especially for sternal BCS, are lower but close to those described in the French feeding system (Inra, 2018).

Parity did not significantly affect BCS curves. Indeed, primiparous goats represented a third of the whole population in each of the clusters. Breed did not significantly affect BCS curves. We observed only a farm effect on BCS because Grignon's Alpine and Saanen goats were more represented in the LU_M- and ST_{H+} clusters. This can probably be explained by differences in the personnel carrying out the BCS evaluation (although differences in herd management, or a random distribution linked to the clustering approach cannot be excluded).

A great diversity of associations among biological functions

The second objective of this work was to assess the diversity of associations among the different phenotypic curves. We investigated whether one phenotypic curve was associated with another. At the lactation scale, the Chi² test was significant for associations but the Cramer's V showed weak to moderate values (globally less than 0.4) (Kotrlik et al., 2011). This lack of strong associations among lactation curves of MY, BW and BCS suggests there exists a relatively large diversity of energy partitioning strategies among individuals. Associations among MY, BW and BCS were well-studied in dairy cows. Some studies showed a positive correlation between pre-calving BCS and milk production (Waltner et al., 1993; Roche et al., 2007), whereas other studies did not find any relationship between these variables (Garnsworthy and Topps, 1982; Garnsworthy and Jones, 1987). More recently, Ollion et al. (2016) assessed the diversity of trade-offs between milk production, body reserves and reproduction in early lactation dairy cows. They showed four different trade-off profiles according to a priority given to a biological function. The first trade-off profile represented cows giving priority to lactation instead of reproduction, the second trade-off profile represented cows giving priority to reproduction instead of lactation. The third trade-off profile represented cows with poor performances in all functions, and the last trade-off profile represented cows with no trade-off among functions. All of these approaches considered correlations between traits at one time point and not at the whole lactation scale. Moreover, these performance traits were evaluated at the beginning of the lactation where cows exhibited a negative energy balance allowing energy partitioning in favor of milk over body reserves. Another possible explanation for the lack of strong associations found in our study is that trade-off between life functions, and therefore correlations between traits, are well expressed when animals face feed shortage (Blanc et al., 2006; Friggens et al., 2017). Our data came from two experimental farms where we can assume that animals are well managed and not so constrained in terms of nutrition.

The diversity of associations among biological functions found in the present study could also suggest a great diversity in intake at the individual level. However, we are not able today to accurately evaluate individual intake. Furthermore, BCS was used as a proxy to evaluate body reserve dynamics. As a subjective evaluation of body reserves, BCS was probably not accurate enough to capture a relationship with MY. MY fat would have been important to consider, because at equal MY fat could vary a lot. However,

this variable was not considered in our study because although some data were available, the frequency was low (less than one measurement per month). On the one hand, this diversity of biological profiles can be seen as a potential resource to improve farming system resilience (Dumont et al., 2020). On the other hand, this diversity raises questions about feeding systems that assumed a relationship between a BW and a MY curve. There is a need to better quantify body reserves contribution in terms of energy to goat's requirements (Inra, 2018). These findings question management strategies that are based on the average animal, i.e; ignoring cluster types. A perspective can be to adapt management strategies to the diversity of individual profiles in terms of phenotypic curves and then better match animal's requirements.

The final objective of this work was to assess the diversity of phenotypic curves at the lifetime scale. For each phenotypic trait, the χ^2 test was significant. Cramer's V test showed lower values for MY than for BW and BCS suggesting stronger associations for BW and BCS. For MY curves, we saw for primiparous goats that almost half of the goats in the Y^P_H cluster remained in this cluster in parity 2, while the lowest productive goats (Y^P_{L-} and Y^P_{L+}) switched cluster in parity 2. For multiparous, we observed a more stable pattern of cluster membership with two thirds of the goats in the Y^M_H cluster remaining in this cluster in successive lactations. Usually, milk production increases from first to fourth parity. After the fourth parity, the level of milk production decreases (Arnal et al., 2018). However, with genetic improvement, we can make the hypothesis that some goats can reach their milk potential earlier. Goats that stayed in the highest productive clusters could be animals that have reached their milk potential relatively early. Goats that are changing clusters could be the ones that have not reached their potential early. For BW curves across parities, we saw that for primiparous goats, most of the goats in the W^P_{L-} remained in the lowest BW cluster (W^M_{L-}) in parity 2, while W^P_{H+} switched to the W^M_{L-} cluster. Goats in the W^P_{H+} presented the highest depletion speed, so they were not able to recover from the intense depletion and remained in the lowest cluster in parity 2. For multiparous goats, we also observed a pattern of cluster membership, with more than three-quarters of the goats in the W^M_{H-} profile remaining in this cluster in successive lactations. Half of the goats in the W^M_{L-} remained in this cluster in successive lactations. For sternal BCS curves across parities, we saw that more than half of the primiparous goats in the three clusters remained in their cluster in parity 2. For multiparous goats, we observed that three-quarters of the goats in the ST_{H+} cluster remained in this cluster in successive lactations. More than half of the goats in the ST_{M+} and ST_M remained in their cluster in successive lactations. These observations on BW and BCS over successive lactations, are consistent with what Macé et al. (2019) observed in meat sheep. They observed one-third up to half of ewes remaining in the same trajectory during successive cycles of production. They supposed that changes in profile distribution could be linked to litter size that can play a role in body weight depletion. We did not consider the prolificacy of the goats in our study. This information was missing for 35% of the animals. When the number of kids was known (single kid for 33% of the goats, two kids for 51%, three kids and more for 16%), we did not find any relationship with our clusters. However, it is an information to consider in

further analysis as it is described to be a factor related to milk production (Hayden et al., 1979; Zamuner et al., 2020). These results highlighted the importance of a lifetime approach to better understand potential changes in priorities among functions and see how an early lifetime performance can impact the whole productive lifespan (Puillet and Martin, 2017). Lifetime and longevity approaches are increasingly being studied because in France from 1991 to 2011, the female productive life decreased by 346 days, which led to an average productive lifespan of 2.7 years per goat (Palhière et al., 2018), which increases replacement costs.

A methodology to analyze trade-off between phenotypic curves with heterogeneous data frequency

This methodology was built to analyze the trade-off between phenotypic lactation curves based on longitudinal data with different frequencies. We used models adapted to the data frequency to better characterize our curves. However, this approach implied the creation of synthetic indicators to have the same baseline for phenotypic curves characterized by different models. For MY curves, synthetic indicators were simple to find, because we used common indicators to summarize a lactation curve with level and dynamic indicators such as the MY_{peak} , Peak time and Persistency. However, because the BW (dataset 1) and BCS data were less frequent (datasets 1 and 2) less elaborate models were used. This then meant that a more simple set of summary indicators was used to characterize these curves, which may not be as informative as those for MY. With heterogeneity in frequencies, it is difficult to use the same models to capture phenotypic curves. Differences in frequencies could lead to use simple models with parameters that are not always biologically meaningful. Or it may lead to the use of more complex models that deal with problems of parameters identifiability. It is important to find a way to use biologically meaningful parameters from different models as inputs for a clustering approach. This approach with model parameters will help to summarize the phenotypic curves without considering synthetic indicators.

Further development and potential use of on-farm record for managing animal

With development of on-farm automatic measuring technologies, more frequent data for MY or BW are becoming available. Some authors developed methods to characterize new indicators such as the deviation of milk production from a theoretical potential production (Poppe et al., 2020; Ben Abdelkrim et al., 2021a; Adriaens et al., 2021). Intense and rapid MY or BW losses might be used as indicators of disease or metabolic disorders. Being able to identify these animals is of great interest for farming management. In our study, we used specific models that dissociated the effects of perturbation from a theoretical unperturbed curve. To characterize phenotypic curves, we focused only on unperturbed curves, which represented the potential production that an animal could have in a non-perturbed environment. With unperturbed MY and BW curves we saw a diversity of associations, it would be of future interest to also consider perturbations. The extent to which there are common perturbations on MY and BW curves may be informative. This approach has been used in dairy cows where

Ben Abdelkrim et al. (2021b) identified common perturbations in MY and BW. Using perturbations in a trajectory analysis could help to select animals that better cope with their environment.

Data acquisition for BCS is more complicated in goats than in dairy cows. Manual BCS evaluation provided satisfactory results but is still a subjective method depending on the operator (Lerch et al., 2021). Recent studies have shown that new methods such as 3-dimension imaging did not provide satisfactory estimators of body composition and further developments may be needed to develop a robust phenotyping tool (Lerch et al., 2021). For all parities, BCS curves were well discriminated one month after kidding and stayed constant over the whole lactation. This observation suggests that BCS measures frequency can be reduced to key periods (kidding period, two months before breeding period, dry-off). This paper is the first step of a study that will include reproductive success in the analysis. Including reproduction outcome will help to predict fertility according to phenotypic curves for a given lactation. This analysis will be conducted also on the lifetime scale to look for potential unfavorable clusters. These further analyses will clarify this diversity of phenotypic curves and will provide metrics to better manage at-risk animals in terms of reproduction (e.g., finding the best periods to monitor at-risk animals). In the dairy goat sector, extended lactations became an alternative farming management to reduce culling and give another chance for a goat to reproduce. Being able to make early decisions on reproductive management, can be of economic interest and may increase sustainability (Adriaens et al., 2020).

CONCLUSION

With a multi-scale approach on MY, BW and BCS time-series data, it was possible to characterize the diversity of associations between phenotypic lactation curves related to milk production and the use of body reserves. For each of MY, BW and BCS, the lactation curves clustered into 4 (MY) or 3 (BW, BCS) clusters. The diversity of associations at the lactation scale between clusters suggests a diversity of energy partitioning strategies among goats, which may provide different adaptive responses to environmental perturbations. Our results challenge mainstream management strategies that are based on average animal profiles. Rather, considering diversity of performance profiles can be a way to better adapt management to individuals or groups of individuals to improve their robustness. At the lifetime scale, change among clusters are more pronounced between first and second lactation, while a stable pattern of cluster membership appears for multiparous goats. Indeed, more than two thirds of the highest clusters for each phenotypic curve remained in these clusters in successive lactations. To further identify some clusters or combination of clusters that are at risk of culling, a first perspective of this study is to combine reproductive performance with MY, BCS and BW curves and then provide metrics to better manage animals at risk of culling.

APPENDICES

Appendices are deposited on Zenodo with this following doi : [10.5281/zenodo.10090604](https://doi.org/10.5281/zenodo.10090604)

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge the teams at the INRAE UMR 791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants (Ile-De-France, France) experimental farm and Le Pradel experimental farm (Ardeche, France) for the care of the animals and their work to provide the different dataset. We gratefully acknowledge Maxime Legris from l'Institut de l'Elevage (Ile-De-France, France) for his help on statistical support for this paper. We gratefully acknowledge Nicolas Friggens for his help to revise the English of the manuscript.

DATA, SCRIPTS, CODE, AND SUPPLEMENTARY INFORMATION AVAILABILITY

Data and scripts/code are deposited on Recherche Data Gouv with this following doi : <https://doi.org/10.57745/C1XPQ2>

CONFLICT OF INTEREST DISCLOSURE

The authors declare that they comply with the PCI rule of having no financial conflicts of interest in relation to the content of the article. Laurence Puillet is a recommender of PCI Animal Science.

FUNDING

This work was funded by the French Livestock Institute and was supported by ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) with a CIFRE doctoral fellowship (2020/1547). This doctoral fellowship is a part of a research axis of a Technical Joint Unit called "Sustainable goat systems of tomorrow" (UMT SC3D).

3. CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons développé une méthode de caractérisation de trajectoires phénotypiques individuelles permettant de gérer une hétérogénéité de fréquences. En utilisant cette approche multi-échelle sur des données temporelles de PL, de PV et de NEC nous avons pu analyser la diversité des trajectoires phénotypiques liées à la lactation et à l'utilisation des réserves corporelles. La diversité des associations observée entre les différentes trajectoires phénotypiques à l'échelle de la lactation suggère une diversité de stratégies d'utilisation de l'énergie chez les chèvres, pouvant engendrer des réponses adaptatives variées face aux perturbations environnementales. À l'échelle de la carrière, les changements entre clusters sont plus marqués entre la première et la deuxième lactation, tandis qu'une stabilité dans l'appartenance aux clusters apparaît chez les chèvres multipares. Cependant, l'analyse des trajectoires à l'échelle de la carrière est incomplète si les performances de reproduction ne sont pas considérées. En effet, la réussite à la reproduction conditionne grandement les décisions de réforme (à l'exception des chèvres pouvant être conservées pour faire des lactations longues). Analyser les courbes de PL, PV et de NEC en lien avec la reproduction permettrait d'identifier d'éventuels profils à risque d'échec de reproduction, c'est ce que nous proposons d'explorer dans le prochain chapitre.

III. CHAPITRE 3 : RELATIONS ENTRE TRAJECTOIRES PHENOTYPIQUES DE PRODUCTION LAITIERE, NOTE D'ETAT CORPOREL ET POIDS VIF ET REUSSITE A LA REPRODUCTION

1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Dans le chapitre 2, nous avons caractérisé la diversité des profils d'évolution de production laitière, poids vif et note d'état corporel à l'échelle de la lactation et montré qu'il existait une diversité d'associations entre ces différentes trajectoires phénotypiques. L'absence d'associations fortes entre trajectoire de lactation et de gestion des réserves corporelles suggère qu'il existe une diversité de stratégies de partition d'énergie entre les différentes fonctions biologiques. Aujourd'hui chez la chèvre, il manque des éléments de connaissance autour des relations entre les trajectoires phénotypiques de PL, PV et NEC et la réussite à la reproduction. L'analyse de ces relations est nécessaire pour mieux comprendre la construction des carrières à l'échelle individuelle et leur diversité au sein du troupeau. Ainsi, l'objectif de ce chapitre était d'évaluer comment les dynamiques d'évolution de la PL, du PV et de la NEC affectaient la réussite à la reproduction. Trois niveaux de détail ont été considérés afin de déterminer les meilleurs proxies pour analyser les performances de reproduction : l'appartenance à un cluster de trajectoire (PL, PV ou NEC), l'effet des indicateurs synthétiques et l'effet des paramètres de modèles. Des modèles mixtes de régression logistiques ont été utilisés pour évaluer les effets de ces différents niveaux de détails sur la réussite à la reproduction mesurée par la fertilité à l'insémination artificielle dans notre étude.

2. ARTICLE N°2: EXPLORING HOW MILK PRODUCTION, BODY WEIGHT AND BODY CONDITION DYNAMICS AFFECT REPRODUCTIVE SUCCESS AFTER ARTIFICIAL INSEMINATION IN DAIRY GOATS

Article submitted in Theriogenology

N. Gafsi^{1,2}, O. Martin¹, F. Bidan², B. Grimard³, L. Puillet¹

¹Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

²Institut de l'Élevage, F-75595 Paris

³Université Paris-Saclay, INRAE, ENVA UMR BREED, F-78350, Jouy-en-Josas

Corresponding author: Nicolas GAFSI, e-mail: nicolas.gafsi@outlook.fr

ABSTRACT

In the context of agroecological transition, breeding females with good reproductive ability, and therefore an increased number of successive lactations, is of great interest for farmers. This implies to better understand the variability of reproductive success, based on the dynamic interplay of biological functions such as body reserves, lactation, and reproduction. The objective of the study was to assess the relationship between artificial insemination (AI) success and phenotypic lactation curves used as proxies of biological functions. Data came from two French experimental farms breeding Alpine and Saanen goats. Milk yield (MY), body weight (BW) and sternal body condition score (BCS_S) data were recorded over the period 1996-2021. These time series data, at the lactation scale, were fitted with different models adapted to the data frequency to characterize their dynamics and further determine clusters of profiles. This overall methodological approach allowed the characterization of each phenotypic lactation curve (MY, BW and BCS_S) with three levels of increasing details: cluster membership, synthetic indicators and model parameters. According to data availability and these different levels of detail, three different data subsets were considered to investigate the link between phenotypic lactation curves and reproductive success. The first data set contained 638 lactations that had all information for MY, for BW and for BCS_S. The second data set contained 1359 lactations that had all information for MY and BW. The third data set was split into data sets that contained 1731 lactations for MY and 795 lactations for BCS_S. Mixed logistic regression with year as a random effect were performed to analyze the relationship between AI success and (1) cluster of phenotypic lactation curves membership, (2) synthetic indicators of phenotypic lactation curves (3) parameters of the fitted model to individual phenotypic lactation curves. Goats were inseminated 208.1 ± 11.0 days after kidding and fertility at AI was 67.1 ± 0.5 %. Among known factors affecting AI success, only parity and lactation stage at AI were related to AI ($p < 0.05$). For primiparous, AI success was affected by MY clusters ($p < 0.05$). For multiparous, MY clusters and BCS_S clusters were not related to AI success. Moreover, AI success was affected by some synthetic indicators such as: persistency ($p < 0.001$) and repletion speed of BW ($p < 0.001$). These three complementary approaches on MY showed that the shape of the lactation curve played more on AI success than the level of milk production.

Key words: lactation, body reserves, artificial insemination, productive curve, phenotyping

IMPLICATIONS

In the context of agroecological transition, finding the best predictors of reproductive success in lactating goats is interesting for farmers. We proposed different proxies reflecting phenotypic lactation curves of milk, body weight and body condition score to assess their relations with reproductive success. Goats with a high persistency profile were less likely to succeed at reproduction than others. These goats could be good

candidates for extended lactation. Moreover, the dynamic of body weight and the level of body condition score played on reproductive success. This approach offered indicators to identify goats at risk of reproductive failure.

INTRODUCTION

In French dairy goat systems, predicting female's success or failure at reproduction is of great interest to support farmer's decision as it can determine if the female is managed in extended lactation. Indeed, reproductive disorders are the third cause of culling (Astruc et al., 2021) and extended lactation for reproductive failure concerns 176,595 goats (i.e., 16.4 % of goats in the French national performance control with at least one extended lactation in their productive life) (de Cremoux et al., 2024). Understanding the variability of reproductive success will help to better manage the diversity of productive curves in a herd.

Variability in reproductive success depends on the complex dynamic interplay between milk production and body reserves management. These interactions have been extensively studied in dairy cows (Pryce et al., 2004; Roche et al., 2007; Friggens et al., 2010; Cutullic et al., 2012; Bedere et al., 2018). Genetic selection for milk production led to reproductive disorders in dairy cows. High-yielding cows experienced a higher and longer negative energy balance leading to consequences on different reproductive parameters such as: higher incidence of embryonic loss (Grimard et al., 2006; Diskin and Morris, 2008; Sartori et al., 2010), higher clearance of oestrogens leading to shorter and less expressed estrus (Lopez et al., 2004), and lower probability of conception (Nebel and McGilliard, 1993; Walsh et al., 2011; Bedere et al., 2018). Not only the level of milk production played on reproductive success in dairy cows but also the shape of the lactation curve. Cows with persistent milk profiles had higher risks of non-fertilization and early embryonic death, whereas cows with non-persistent milk profiles had higher risks of late embryonic death (Cutullic et al., 2012). However, the interval between parturition and first mating is longer in dairy goats (about 7 months after kidding) than in dairy cows (about 60 days after calving). This may alter priorities among functions.

In goats, studies have demonstrated the impacts of animal and environmental factors on fertility after AI, such as breed, parity, lactation stage at AI, breeding season, failure at previous AI, milk production level around AI (Chanvallon et al., 2013; Furstoss et al., 2015; Freret et al., 2018). Other studies have showed relationships between level of body reserves (BCS at mating) and reproductive performance (e.g., estrus duration, ovulation rate ...) (Forcada et al., 1992; Branca, 2004; De Santiago-Miramontes et al., 2009). Moreover, with climate change and a breeding season on summer for seasonal systems, heat stress must be considered as an environmental factor that can affect fertility. Indeed, dairy goats under extreme heat stress conditions showed lower reproductive performance (Adjassin et al., 2022). To our knowledge, no studies have considered criteria related to milk production and body reserves in a broad approach,

allowing to identify the best predictors to characterize reproductive success in dairy goats. In a previous study, we showed that there was a diversity of associations between phenotypic lactation curves of milk yield (MY), body weight (BW) and body condition score (BCS), suggesting a diversity of energy partitioning between these functions (Gafsi et al., 2024). How will incorporating reproductive success into phenotypic lactation curves improve our understanding of the dynamic interplay between MY, BW, BCS and reproduction in dairy goats? Therefore, the objective of the study was to assess the relationship between AI success and phenotypic lactation curves with three levels of increasing detail: cluster membership, synthetic indicators, and model parameters.

MATERIAL AND METHODS

Data and reproductive management

Data came from two experimental farms: Le Pradel (agricultural high school Olivier de Serres) located in the French department Ardeche (44° 34' 58.4364" N; 4° 29' 53.2068" E) and the MoSAR experimental farm (INRAE- AgroParisTech) located in the French department of Yvelines (48° 50' 31.4801" N; 1° 56' 56.5843" E). For the MoSAR experimental farm, goats were housed indoor, all year round, in free straw stalls. They were milked twice daily (07:00 and 15:00) and milk yield was recorded at each milking using an automatic device designed for milk recording in small ruminants developed by INRAE (European patent no. 94916284.6). They received a TMR (10 to 15% refusal) mainly based on forages (hay, dry lucerne, and beet pulp) and supplemented about 20% of commercial concentrates and 1% minerals-bicarbonate. All feeds were offered ad libitum twice daily, after milking, in collective trough. The milking parlour was equipped with a walk-over weigher providing body weights at each milking and averaged to give daily BW (after exclusion of outliers greater than + 25% of previous BW). The farm had a seasonal system with a kidding period between January and February. During August, selected goats were inseminated with frozen semen following an oestrus induction and synchronization treatment. The treatment involved depositing a vaginal sponge impregnated with progestogen (20-45 mg fluorogestone acetate) for 11 days. Goats received an intramuscular injection of PGF₂α (50 µg cloprostenol) and 400-500 IU of eCG 48 hours before sponge removal. AI was performed 43-45 hours after sponge removal (Fatet et al., 2011). Non-pregnant goats were then bred in natural mating with the non-inseminated goats. During breeding period in August, all goats received a hormonal treatment. Goats were inseminated in August. Over the last 15 years, goats have been hand-mated in small groups of 10-12 per day for 6-7 days, resulting in an average kidding rate of 85%.

For Le Pradel farm, goats were grazing on cultivated pastures (grass and alfalfa), with a rotational system (1-2 ha plots). Daily grazing duration is 6-7h/day on average during early and late grazing and 10-12h/day during periods of large production of grass. On average, goats were grazing during 150 days per year. When not grazing, goats are housed indoor on free straw stalls. Forages are distributed ad libitum, after milking, in

collective trough. Concentrates and dehydrated alfalfa pellets are distributed by automatic feeder. Goats were milked twice a day (06:30 and 16:00). Milk production was individually recorded with the national performance control method and body weight was individually recorded monthly with a standard scale. The farm had also a seasonal system with a kidding period between January and February. During August, selected goats were inseminated with frozen semen following an oestrus induction and synchronization treatment (same protocol as MoSAR farm). Non-pregnant goats were then bred in natural mating with the non-inseminated goats. Males were introduced 18 days after AI. Males stayed until October to mate the goats returning to heat after AI and those who were not inseminated.

MY, BW and sternal BCS (BCS_S) data were recorded over the period 1996-2020. BCS_S was kept due to higher data availability and sternal site was a better proxy of body fatness in dairy goats than lumbar site (Inra, 2018). Data concerned 1442 goats (1132 Alpine; 310 Saanen) with 4068 lactations. For each lactation, time series data of each phenotype were fitted with different models (Table III.1) adapted to recording frequency (monthly, weekly, daily) following a method developed in a previous paper (Gafsi et al., 2024) to characterize their dynamics. MY, BW and BCS_S curves were then summarized into synthetic indicators (see Figure III.1 that synthetize the methodology in the previous paper). Principal component analysis and agglomerative hierarchical clustering analysis were performed separately for MY, BW and BCS_S curves. For MY and BW, the clustering was performed per parity (primiparous vs. multiparous), while for BCS the clustering was performed for all parities together.

A three-level analysis of reproductive success

The clustering approach allowed us to characterize the overall shape of each phenotypic curve of MY, BW and BCS_S at the lactation scale with three levels of increasing detail: cluster membership, synthetic indicators, and model parameters (Figure III.1 and Figure III.2). In the present paper, three different data subsets were considered according to data availability and allowed us to exploit these different levels of detail to investigate the link between phenotypic lactation curves and reproductive success. The first data set contained 638 lactations that had all information for MY, for BW and for BCS_S. This first data set was used to consider the effects of the 3 phenotypes (effect of cluster membership for MY, BW and BCS_S) on reproductive success. The second data set contained 1359 lactations that had all information for MY and BW. This second data set was used to consider the effects of the synthetic indicators of MY and BW on reproductive success. The third data set was split into data sets that contained 1731 lactations for MY and 795 lactations for BCS_S. This latter data set was used to investigate the specific effect of model parameters of MY and BCS_S on reproductive success. BW model parameters were not considered because two different models were used to characterize the phenotypic lactation curves (cf. Gafsi et al., 2024)

Table III.1 Models used to fit raw data to obtain phenotypic curves of MY, BW and BCS for the whole lactation.

Raw data ¹	Model used to fit raw data	Parameters ²
MY	Perturbed lactation model (updated version Martin,2023)	$a, b, c, d, e, N_p, Loss$
BW	Unperturbed weight model (Martin and Ben Abdelkrim, 2019)	$m_1, m_2, n_1, n_2, h_1, h_2, k_1, k_2$
	Grossman et al., (1999)	B_M, k_E, k_L, t_1, L
BCS	Grossman et al., (1999)	$: B_M, k_E, k_L, t_1, L$

¹MY = milk yield; BW= body weight; BCS = body condition score

²Revised Wood model parameters: a = mean level at the beginning of lactation; b = rate of milk increase before the peak; c = decrease rate after the peak; d = time of late decrease of milk; e = time of half decrease of milk. $Loss$ = difference between total milk production calculated with unperturbed model and perturbed model, N_p = number of perturbations; m_1 = asymptotic mature body weight (in kg) at parturition p ; m_2 = asymptotic mature body weight (in kg) at parturition $p + 1$; n_1 = time of nadir (i.e., min weight) in days after parturition p ; k_1 = intensity of depletion (ranging from 0 to 1) after parturition p ; h_1 = time of half repletion in days after nadir after parturition p ; n_2 = time of nadir (i.e., min weight) in days after parturition $p + 1$; k_2 = intensity of depletion (ranging from 0 to 1) after parturition $p + 1$; h_2 = time of half repletion in days after nadir after parturition $p + 1$; B_M = plateau value in middle stage (in kg BW or BCS) k_E = slope in early stage (in kg BW/d or BCS/d) k_L = slope in late stage (in kg BW/d or BCS/d); t_1 = upper bound of early stage (in d); L = length of the middle stage (in d)

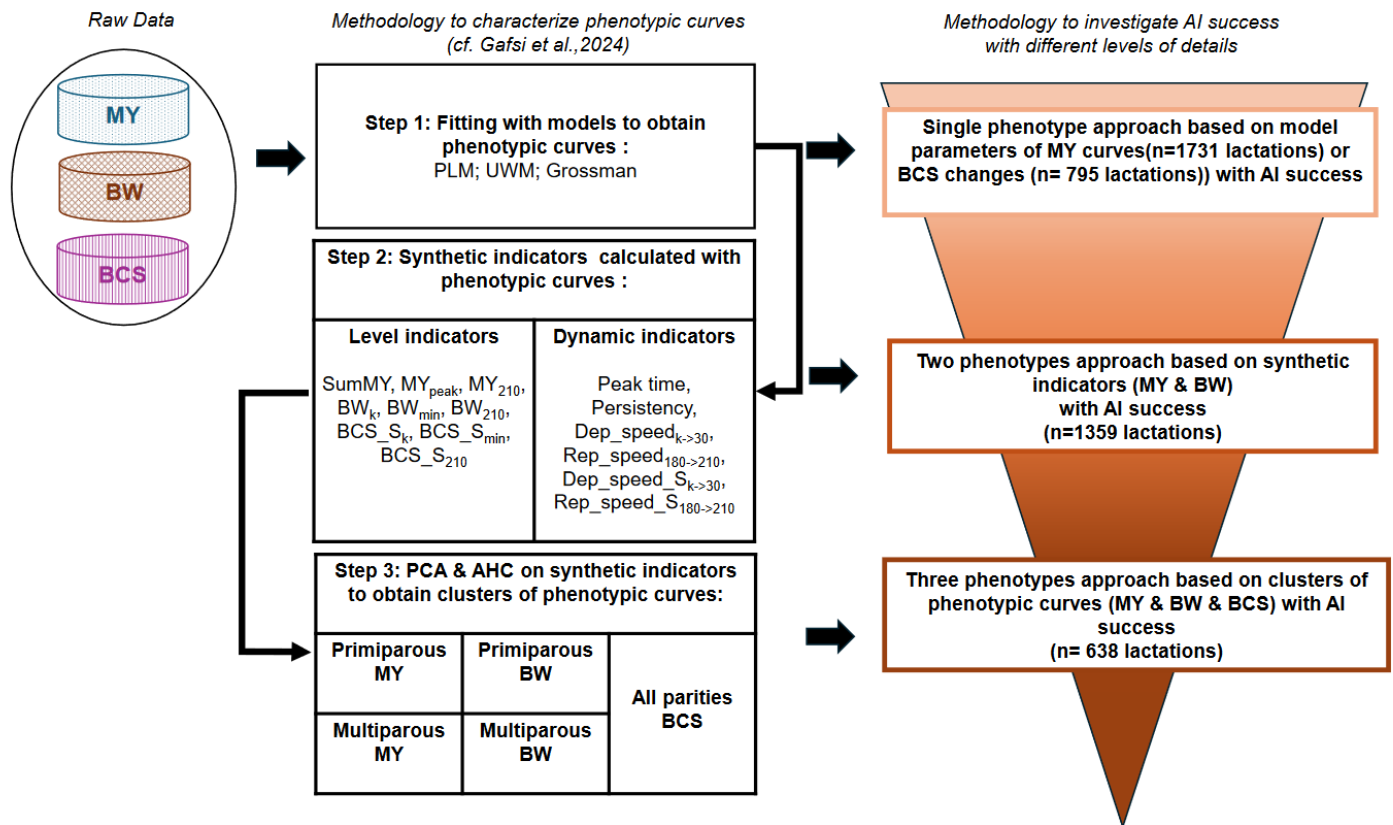


Figure III.1 Scheme that represented the whole methodology used in the paper with: (1) the different steps used to characterize phenotypic lactation curves of milk yield (MY), body weight (BW), and body condition score (BCS), and (2) the different steps used to investigate artificial insemination (AI) success with different levels of detail. To characterize phenotypic lactation curves three steps were used. The first step was to fit the raw data with models adapted to the recording frequency (monthly, weekly, daily) to obtain phenotypic lactation curves : MY was fitted with the perturbed lactation model (PLM) (updated version Martin, 2023), BW was fitted with two models : the unperturbed weight model (UWM) (Martin and Ben Abdelkrim, 2019), and the Grossman et al. (1999) model, BCS was fitted with the Grossman et al. (1999) model. In the second step, MY, BW and BCS curves were then summarized into synthetic indicators with level and dynamic indicators : MY : SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; MY_{peak} = highest milk yield value; MY_{210} = milk yield value at 210 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150} / MY_{150}) \times 100$; BW : BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW_{210} = body weight at 210 days; $Dep_speed_{k \rightarrow 30} = (BW_{30} - BW_k) / 30$; $Rep_speed_{180 \rightarrow 210} = (BW_{210} - BW_{180}) / 30$; BCS : BCS_{S_k} = Sternal BCS at kidding; $BCS_{S_{min}}$ = Minimum sternal BCS; $BCS_{S_{210}}$ = Sternal BCS at 210 days; $Dep_speed_{S_k \rightarrow 30} = (BCS_{S_{30}} - BCS_{S_k}) / 30$; $Rep_speed_{S_{180 \rightarrow 210}} = (BCS_{S_{210}} - BCS_{S_{180}}) / 30$. In the final step principal component analysis (PCA) and agglomerative hierarchical clustering (AHC) were performed on synthetic indicators separately for MY, BW and BCS curves to obtain clusters of phenotypic lactation curves.

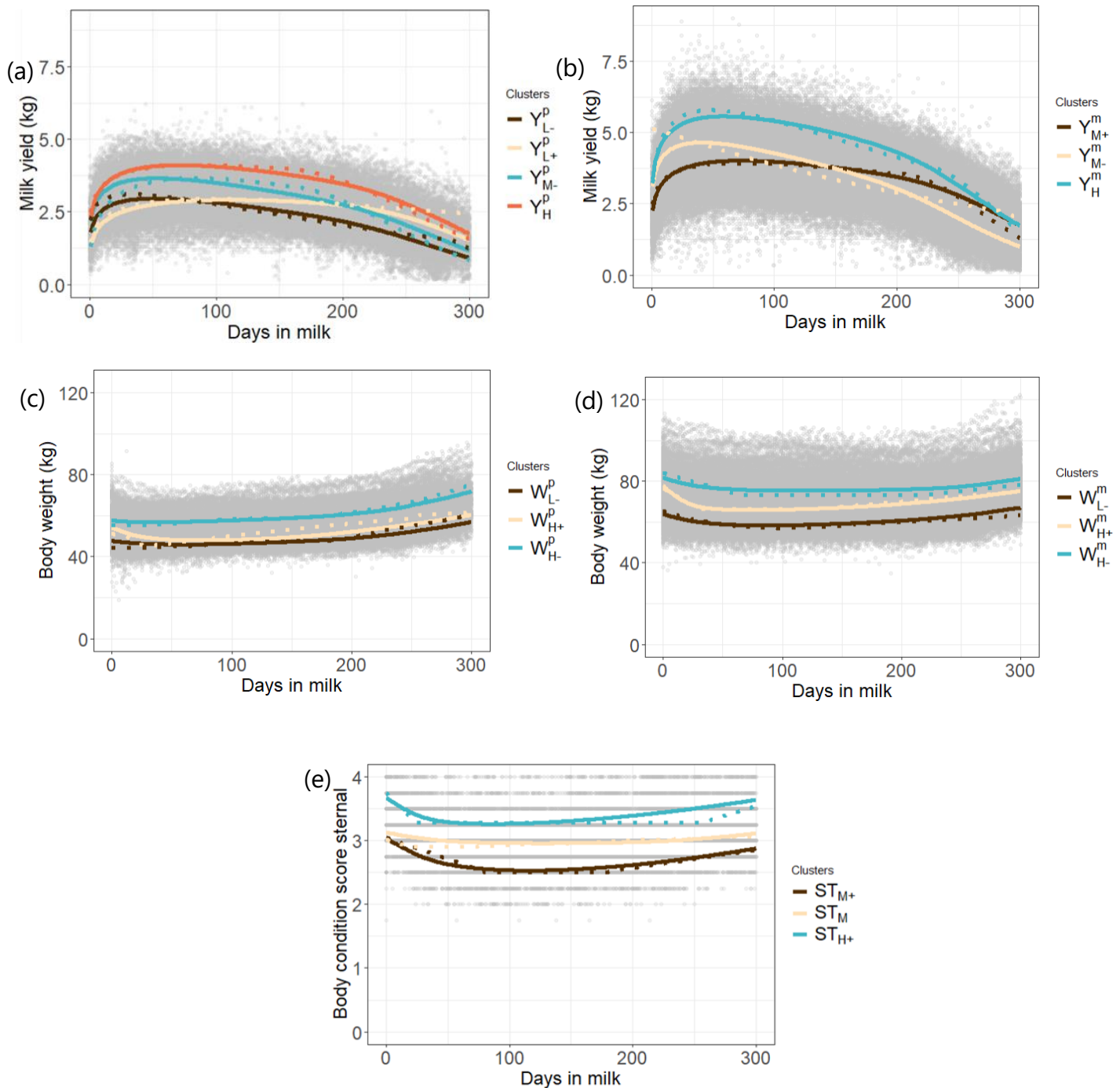


Figure III.2 Clusters of phenotypic lactation curves estimated after principal component analysis and hierarchical clustering analysis on synthetic indicators for milk yield ((a) primiparous, (b) multiparous), body weight((a) primiparous, (b) multiparous) and sternal body condition score ((e) all parities together); Y_{L-}^p = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_{M-}^p = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_{H+}^p = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous; Y_{M+}^m = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y_{M-}^m = Medium milk yield and low persistency cluster for multiparous; Y_{H+}^m = High milk yield and medium persistency cluster for multiparous; W_{L-}^p = Low body weight and low depletion cluster for primiparous; W_{H+}^p = High body weight and high depletion cluster for primiparous; W_{H-}^p = High body weight and low depletion cluster for primiparous; W_{L-}^m = Low body weight and low depletion cluster for multiparous; W_{H+}^m = High body weight and high depletion cluster for multiparous; W_{H-}^m = High body weight and low depletion cluster for multiparous; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High

sternal body condition score and depletion cluster)(Adapted from Gafsi et al.(2024)).

Assessment of the reproductive success

Because natural mating management was not the same in the two farms, only AI was studied. Reproductive success, as a binary outcome (1: AI success; 0: AI failure), was derived from the length of the interval between AI and the following kidding date: intervals less than 160 days were interpreted as an AI success and intervals greater than 160 days were interpreted as an AI failure (Freret et al., 2018). If there were no following kidding dates, it was interpreted as an AI failure. The overall fertility considering AI success and subsequent natural matings success was not studied.

Assessment of heat stress

Weather time series data from the closest locations of the two experimental farms were used as a proxy for environmental conditions. Therefore, a French national database SAFRAN (web application SICLIMA) including daily average temperature, minimum, maximum temperature, and relative humidity was used to calculate the Temperature Humidity Index (THI). The THI combined the ambient temperature (T , °C) and relative humidity (RH, %) and was described by NRC, (1971) as:

$$THI = (1,8 \times T + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26,8)]$$

Statistical analysis

The statistical unit considered was the AI event. Mixed logistic regressions were performed using RStudio with the lme4 package (version 2023.06.01) to analyze the relationship between AI success and (1) cluster of phenotypic lactation curves membership, (2) synthetic indicators of phenotypic lactation curves, and (3) model parameters of phenotypic lactation curves. For all models, factors usually known to affect AI success were considered, such as parity (1= primiparous vs. 2+ = multiparous), breed (Alpine vs Saanen), lactation stage at AI calculated as the interval between kidding and AI, and the success of AI during the previous campaign (0,1, non-concerned (NC)) (Freret et al., 2018). The maximum daily THI values at AI were also considered (<80 vs. ≥80). A threshold of 80 was used because goats begin to experience heat stress when the THI is higher than 80 (Silanikove and Koluman, 2015). All the variables used in the different approaches are detailed in Tables III.8 to III.11. All the quantitative variables were classified in two ways:

- Some variables may have a quadratic relationship with AI success, suggesting better AI success at a certain threshold, and lower AI success beyond that threshold. For these variables, the classification was based on the raw distribution.

- The other quantitative variables were divided into quartiles of the three groups with 33% of the population in each group.

For all variables, one group was designated as the reference category for odds ratio (OR = 1). An OR greater than one implies an increased likelihood, and an OR lower than one implies an opposite association. The confidence interval (CI) indicated the level of uncertainty around the effect measure. If the CI crossed 1 (e.g., 95%CI [0.85;1.60]), this implied no statistical difference for the studied variables. The first approach was based on phenotypic lactation curves of MY, BW, and BCS. Univariate analysis was performed on the phenotypic lactation curves and common factors to assess their relationship with AI success. Variables related to AI success (p-value <0.20) were retained to build the final models. Models were performed by parity based on the methodology used to create the phenotypic lactation curves (Gafsi et al., 2024). The second approach was based on the synthetic indicators of MY and BW. Univariate analysis was performed on the synthetic indicators and common factors to assess their relationship with AI success. Variables related to AI success (p-value <0.20) were retained in the second step of the analysis. These variables were submitted to a forward and backward stepwise selection procedure to keep the best independent variables with the lowest Akaike's information criterion (AIC). The last approach was based on model parameters for MY and BCS because the same models were used in the two farms. The same methodology as for the second approach was used. For all approaches, at least the lactation stage at AI was forced as adjustment variable in all models. Lactation stage at AI is one of the major factors affecting AI fertility (Freret et al., 2018). Considering our approach using phenotypic lactation curves, it is essential to adjust all variables with the lactation stage at AI. For all approaches, the p-values were adjusted using Tukey's test for multiple comparisons. The significance threshold was set as 0.05. A tendency was considered with $0.05 \leq p\text{-value} \leq 0.10$.

For all approaches, the model used was:

$$Y_{ij} = \text{Log} \left(\frac{p_{ij}}{1 - p_{ij}} \right) = X_{ij}\beta + u_j$$

$$u_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_u^2)$$

where the outcome Y_{ij} is a binary variable representing the AI success for a goat i in the year j . X_{ij} is a matrix containing all adjustments (i.e., variables generated by the fitting procedure) and independent variables, β is the vector of coefficients associated with these variables, u_j is the random effect for the year j . The random effect u_j was assumed to follow a normal distribution with a mean of 0 and a variance of σ_u^2 .

RESULTS

Description of goats according to dataset used

The mean characteristics of the individual goats are presented in Table III.2. Over the period 1996-2021, goats were inseminated between 6 August 1996 and 17 August 2021. On average, goats presented a good sternal BCS around AI. Among the factors known to affect AI success, more than 50 % of the goats were inseminated between 200 and 215 days of lactation, with an average lactation stage that respected recommendations (GRC, 2023a) (Table III.2 and Tables III.8 to III.11). Primiparous represented 44% to 48% of the goats which is higher than the French national results where primiparous represented 37% of the total population (Institut de l'élevage, 2022) (Tables III.8 to III.11). In the different datasets, the Alpine breed represented 89.0% to 95.0% of the animals (Tables III.8 to III.11). The percentage of goats that failed AI during the previous campaign was low and accounted for 2.8% to 3.5% of the herd (Tables III.8 to III.11). In the different datasets, AI fertility was high and ranged from 67.1% to 71.7%.

Table III.2 Individual goat characteristics according to dataset used.

	Clusters of phenotypic lactation curves		Synthetic indicators		MY model parameters		BCS_S model parameters	
	n = 638		n = 1,359		n = 1,731		n = 795	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Parity	2.0	1.2	2.1	1.3	2.0	1.2	2.0	1.2
Lactation stage _{at AI} (d)	209.2	8.4	207.8	10.6	208.1	11.0	209.7	9.1
BCS_S ₂₁₀ ([0-5] scale) ¹	3.0	0.3	3.0	0.3	3.0	0.3	3.0	0.3
BW ₂₁₀ (kg)	58.5	9.2	60.2	10.1	60.2	10.1	58.7	9.3
MY ₂₁₀ (kg/d)	3.2	0.7	3.1	0.7	3.1	0.7	3.2	0.7
SumMY(kg)	914.1	184.1	900.8	182.0	903.2	186.4	917.6	189.1
AI fertility (%)	71.7	0.5	67.6	0.5	67.1	0.5	69.4	0.5

¹ SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; MY₂₁₀ = milk yield value at 210 days; BW₂₁₀ = body weight at 210 days; BCS_S₂₁₀ = sternal BCS at 210 days.

Relationship between AI success and clusters of phenotypic lactation curves

Relationships between the variables studied and AI success are presented in Table III.3 for primiparous and Table III.4 for multiparous goats. For primiparous, AI fertility was 74.1%. Breed, AI success during the previous campaign, maximum THI values at AI, and BW clusters were not retained after the univariate analysis ($p > 0.20$; Table III.8). Goats in the low milk yield and low persistency cluster ($Y^{P_{L-}}$) were more likely to succeed at AI than goats in the low milk yield and high persistency cluster ($Y^{P_{L+}}$) ($p < 0.05$). The lactation stage at AI and sternal BCS clusters were not related to AI success. For multiparous goats, fertility at AI was 69.6%. Breed, AI success during the previous campaign, and BW clusters were not retained after the univariate analysis ($p > 0.20$; Table III.8). Lactation stage at AI, MY clusters and BCS_S clusters were not related fertility.

Table III.3 Relationship between adjustment variables, phenotypic lactation curves, and AI success in primiparous dairy goats (n=309 lactations).

Variables	n	Fertility (%)	OR ¹	CI ¹	p-value
Lactation stage _{at AI}					
(d)					
<200	47	74.6	-	-	
[200;215[	232	74.7	1.00	[0.44;2.28]	>0.90
>=215	30	77.9	1.20	[0.38;3.77]	>0.90
Clusters of MY ²					
$Y^{P_{L-}}$	47	88.8	-	-	
$Y^{P_{H}}$	100	70.5	0.30	[0.10;0.90]	0.14
$Y^{P_{L+}}$	42	60.7	0.19	[0.06; 0.62]	0.03
$Y^{P_{M-}}$	120	76.6	0.41	[0.15; 1.17]	0.34
Clusters of BCS_S ²					
ST_M	149	80.5	-	-	
ST_{H+}	43	75.4	0.74	[0.31;1.79]	0.78
ST_{M+}	117	70.7	0.58	[0.31; 1.09]	0.21

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval.

² $Y^{P_{L+}}$ = Low milk yield and high persistency cluster for primiparous; $Y^{P_{L-}}$ = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; $Y^{P_{M-}}$ = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; $Y^{P_{H}}$ = High milk yield and medium persistency cluster for primiparous ; ST_{M+} =Medium sternal body condition score and depletion cluster ; ST_M =Medium sternal body condition score and low depletion cluster ; ST_{H+} =High sternal body condition score and depletion cluster .

Table III.4 Relationship between adjustment variables, phenotypic lactation curves, and AI success in multiparous dairy goats (n=329 lactations).

Variables	n	Fertility (%)	OR ¹	CI ¹	p-value
Lactation stage _{at AI} (d)					
<200	21	52.6	-	-	
[200;215[	211	74.8	2.67	[0.88; 8.09]	0.19
≥215	97	64.9	1.66	[0.52; 5.32]	0.67
Clusters of MY ²					
Y ^m _{M-}	90	70.3	-	-	
Y ^m _H	113	60.8	0.66	[0.34; 1.27]	0.43
Y ^p _{M+}	126	62.3	0.70	[0.36; 1.36]	0.54
Clusters of BCS _S ²					
ST _M	145	67.6	-	-	
ST _{H+}	108	63.1	0.82	[0.46; 1.47]	0.78
ST _{M+}	76	62.9	0.81	[0.42; 1.57]	0.81

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval.

² Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y^m_{M-} = Medium milk yield and a low persistency cluster for multiparous; Y^m_H = High milk yield and a medium persistency cluster for multiparous; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

Relationship between AI success and synthetic indicators of phenotypic lactation curves

Relationships between the variables studied and AI success are presented in Table III.5. Parity, breed, AI success during the previous campaign, MY_{peak}, MY₂₁₀, SumMY, Peak time, BW_k, BW₂₁₀, maximum THI values at AI, and Dep_{speed_{k->30}} were not retained after the univariate analysis ($p > 0.20$; Table III.9). AI success was significantly lower for goats inseminated before 200 days postpartum than for goats inseminated between 200 days and 215 days postpartum ($p < 0.001$). Moreover, AI success tended to be lower for goats inseminated before 200 days postpartum than for goats inseminated after 215 days postpartum ($p = 0.086$). AI success was significantly lower for goats with high persistency ($\geq -26.1\%$) than for goats with low persistency ($< -36.7\%$) ($p < 0.001$). AI success was significantly lower for goats with a slower repletion of BW (< 0.03 kg/d) than for goats with a faster repletion of BW (≥ 0.05 kg/d) ($p < 0.001$). AI success tended to be lower for goats with a BW_{min} higher or equal to 60 kg than for goats with a BW lower than 50 kg ($p = 0.068$), but the overall effect was not significant ($p = 0.08$).

Table III.5 Relationship between adjustment variables, synthetic indicators, and AI success in dairy goats (n=1359 lactations).

Variables	n	Fertility (%)	OR ¹	CI ¹	p-value
Lactation stage _{at AI} (d)					
<200	274	59.0	-	-	
[200;215[	757	73.3	1.91	[1.38; 2.65]	<0.001
≥215	328	68.4	1.51	[1.03; 2.20]	0.086
Persistency (%) ²					
<-36.7	444	75.6	-	-	
[-36.7; -26.1[	461	71.9	0.83	[0.60; 1.13]	0.46
≥-26.1	454	52.0	0.35	[0.25; 0.48]	<0.001
Rep_speed _{180->210} (kg/d)					
<0.03	478	61.2	-	-	
[0.03;0.05[	332	65.9	1.23	[0.90; 1.68]	0.40
≥0.05	549	73.7	1.78	[1.31; 2.41]	<0.001
BW _{min} (kg)					
<50.0	451	71.3	-	-	
[50.0;60.0[	448	66.7	0.80	[0.59; 1.09]	0.34
≥60.0	460	63.2	0.69	[0.50; 0.96]	0.068

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

² Persistency = (MY₂₅₀-MY₁₅₀/MY₁₅₀) x100; BW_{min} = minimum body weight; Rep_speed_{180->210} = (BW₂₁₀ – BW₁₈₀) / 30.

Relationship between AI success and model parameters of phenotypic lactation curves

Relationships between the variables studied and MY parameters are presented in Table III.6. Breed, AI success during the previous campaign, maximum THI values at AI, parameters *a*, *b* and *Loss* were not retained after the univariate analysis ($p > 0.20$; Table III.10). AI success was lower for multiparous goats than for primiparous ($p < 0.001$). AI success was significantly lower for goats inseminated before 200 days postpartum than for goats inseminated between 200 days and 215 days ($p < 0.001$) and compared to goats inseminated after 215 days ($p < 0.05$). AI success decreased significantly when goats had a slower decrease rate of milk production after the peak (parameter $c \geq 0.0034$) than for goats with a higher decrease rate of milk production after the peak (parameter $c < 0.0026$) ($p < 0.001$). AI success was significantly lower for goats with a later time of late decrease (parameter $d \geq 219.4$ days) than for goats with an earlier time of late decrease (parameter $d < 183.4$ days) ($p < 0.001$). AI success was significantly lower for goats with a later time of half decrease (parameter $e \geq 118.4$ days) than for goats with an earlier time of half decrease (parameter $e < 92.8$ days) ($p = 0.002$). AI success tended to be lower for goats with a number of perturbations (parameter N_p) lower than 6 by lactation than for goats with a number of perturbations between 6 and 8 by lactation ($p = 0.081$).

Relationships between the variables studied and sternal BCS parameters are presented in Table III.7. Parity, breed, the success at AI during the previous campaign, maximum THI values at AI, parameters k_E , k_L , t_1 , and L were not retained after the univariate analysis ($p > 0.20$; Table III.11). AI success was significantly lower for goats with a nadir of sternal BCS (parameter B_M) lower than 2.5, than for goats with a nadir of sternal BCS between 2.5 and 2.75 ($p < 0.001$), and compared to goats with a nadir sternal BCS higher or equal to 2.75 ($p < 0.05$).

Table III.6 Relationship between adjustment variables, MY parameters, and AI success in dairy goats (n=1731 lactations).

Variables	n	Fertility (%)	OR ¹	CI ¹	p-value	
Parity	1	758	73.2	-	-	
	2+	973	65.5	0.69	[0.54; 0.89]	0.003
Lactation stage _{at AI} (d)	<200	348	60.3	-	-	
	[200;215[	903	74.8	1.95	[1.44; 2.63]	<0.001
	≥215	480	72.3	1.72	[1.21; 2.44]	0.008
c^2	<0.0026	570	64.3	-	-	
	[0.0026;0.0034[	563	67.3	1.14	[0.88; 1.48]	0.58
	≥0.0034	598	76.1	1.77	[1.34; 2.34]	<0.001
d	<183.4	573	75.9	-	-	
	[183.4;219.4[	568	76.1	1.01	[0.74; 1.38]	>0.90
	≥219.4	590	54.1	0.37	[0.27; 0.52]	<0.001
e	<92.8	570	73.1	-	-	
	[92.8;118.4[	574	73.5	1.02	[0.78; 1.34]	>0.90
	≥118.4	587	60.9	0.57	[0.42; 0.79]	0.002
N_p^3	<6	555	67.3	-	-	
	[6;8[	406	74.0	1.38	[1.03; 1.86]	0.081
	≥8	770	66.8	0.98	[0.76; 1.26]	>0.90

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

² Revised Wood model parameters: c = decrease rate of milk production after the peak; d = time of late decrease of milk; e = time of half decrease of milk.

³ Perturbed lactation model parameters: N_p = number of perturbations.

Table III.7 Relationship between adjustment variables, sternal BCS parameters, and AI success in dairy goats (n=795 lactations).

Variables	n	Fertility (%)	OR ¹	CI ¹	p-value
Lactation stage _{at AI} (d)					
<200	92	62.7	-	-	
[200;215[	495	70.0	1.39	[0.84; 2.30]	0.41
≥215	208	59.5	0.87	[0.51; 1.51]	.087
<i>B_M</i> ²					
<2.5	87	49.4	-	-	
[2.5;2.75[	197	73.7	2.87	[1.63; 5.05]	<0.001
≥2.75	511	67.8	2.15	[1.29; 3.57]	0.009

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

² Grossman parameters: *B_M* = plateau value in middle stage (BCS) (i.e. nadir sternal BCS)

DISCUSSION

Factors usually known to affect AI success

The objective of the study was to analyze the relationship between AI success and (1) cluster of phenotypic lactation curves membership, (2) synthetic indicators of phenotypic lactation curves and (3) model parameters of phenotypic lactation curves. AI fertility was high and ranged from 67.1% to 71.7%, which is between 10.2 to 14.8 points higher than the average national fertility in 2022 (56.9 %) (Institut de l'élevage-Capgènes, 2022). Breed, was not retained in the final models. Generally, Alpine goats presented a higher AI fertility than Saanen goats (Chanvallon et al., 2013; Freret et al., 2018). This lack of breed effect, could be linked to the fact that Saanen represented between 2.8% to 3.5% of our herd. Parity is one of the factors with a known effect on AI success. In our study, parity was significantly related to AI success in the statistical model that included MY model parameters. AI success was higher for primiparous goats than for multiparous goats. This is not in agreement with previous studies (Chanvallon et al., 2013; Freret et al., 2018; Mellado et al., 2006). One hypothesis advanced by these authors is related to reproductive management, with an interval between kidding and AI not adapted to primiparous goats (Chanvallon et al., 2013). Another hypothesis is that primiparous had supplementary needs for growth compared to multiparous, and growth is a priority function compared to reproduction (Mellado et al., 2006). In our study, parity was adjusted for confounding factors such as lactation stage at AI and milk parameters. Primiparous were usually more persistent goats than multiparous. The lower fertility observed in the other studies might also be related to a confounding effect of persistency, which was considered in our study. Moreover, our results could be linked to good management practices with special care for young animals in the two experimental farms. For the lactation stage at AI, goats inseminated before 200 days postpartum were less likely to succeed at AI than goats

inseminated between 200 and 215 days and those inseminated later than 215 days. In the two farms, recommendations were globally respected, and a few goats were inseminated before 180 days or after 240 days. THI was not related to fertility in our study, despite the threshold of 80 being surpassed for 16 à 19% of the days of mating. Artificial insemination efficiency, used in this study, might be less dependent on heat stress than on natural mating. Heat stress is known to affect male fertility (Adjassin et al., 2022; Gupta et al., 2013) and individual activity, which is less important for fertility when artificial insemination is used.

Milk production

Over the lactation, goats produced more than French milk national results (815 kg/lactation/year) (Institut de l'élevage, 2022). For the relationship between fertility and milk production, we found consistent results among the three analysis levels (cluster, synthetic indicators, and model parameters). AI success was significantly related to MY clusters: primiparous goats in the low milk yield and low persistency cluster ($Y^{P_{L-}}$) were more likely to succeed at AI than primiparous goats in the low milk yield and high persistency cluster ($Y^{P_{L+}}$). Similarly, when we consider the indicators, goats with high persistency ($\geq -26.1\%$) were less likely to succeed at AI than goats with low persistency ($< -36.7\%$). For the MY model parameters, the highest the decrease rate of milk production after the peak (c), the highest was the fertility. Other indicators (time of late decrease of milk production, time of half decrease of milk production, decrease rate after the peak, etc.) lead to the same conclusion: the shape of the lactation curve has a stronger effect on fertility than the level of milk production. This is particularly well illustrated by primiparous goats: the two groups $Y^{P_{L+}}$ and $Y^{P_{L-}}$ produced almost the same amount of milk over 250 days of lactation but fertility was higher when persistency was low. This effect of the shape of the lactation curve after the peak or the change in milk production around the breeding period on fertility has already been observed by Freret et al. (2018). For them, goats that had an increase or a stable milk production around AI were less likely to be pregnant than goats with a decrease of milk production around AI. This relationship between fertility and the shape of the lactation curve is the opposite in dairy cows. Cows with "flatter" curves (high persistency) have higher fertility (lower risks of late embryonic death, (Cutullic et al., 2012). This might be explained by the period of reproduction in the two species: early lactation in cows (60-90 days postpartum) and late lactation in goats (210-250 days postpartum). Prioritization between milk production and reproduction might be different at these two periods. We can hypothesize that persistent goats still invest energy in milk production 210 days after kidding, which delays reproductive efficiency (Friggens, 2003). This observation may have two implications: in systems where reproductive efficiency is a major concern, the selection of high milk yield at the beginning of lactation and low persistency after the peak of production might be an aim. If a short period of kidding is not needed, goats with high persistency might be naturally mated later after parturition. These goats can also be good candidates for extended lactation: with high persistency they can easily maintain milk production.

Body condition score

For sternal BCS, results showed complementary information for cluster and model parameter analyses. Fertility was not significantly related to sternal BCS clusters. This is probably related to the combined effect of the lack of statistical power ($n=638$ lactations) and adjustment for MY clusters. However, globally, we can see that the ST_{M+} characterized by goats at a medium level but mobilizing their body reserves to reach the lowest BCS for the whole lactation presented the lowest fertility for all parities. Moreover, with model parameters analysis, we found that the nadir of sternal BCS, B_M , was significantly related to AI success. Goats with a nadir lower than 2.5 were less likely to succeed at AI compared to goats with a nadir between 2.5 and 2.75 or higher or equal to 2.75. These results are consistent with the study led by Fidelle et al. (2015) on dairy sheep. Sheep with a BCS higher than 3 at AI had higher lambing rates than sheep with a BCS lower than 2. Moreover, Mellado et al. (2004) reported a positive correlation between BCS around mating and kidding rates in dairy goats. Indeed, goats with a BCS lower than 1.5 were three times less likely to conceive compared to goats with a higher BCS. Globally, animals with a high BCS have better reproductive efficiency than animals with a low BCS. BCS reflects the nutritional status of an animal. Undernutrition can affect several reproductive functions such as sex hormone production, oocyte quality and competence, fertilization, and early embryonic development (Sejian et al., 2010). Undernutrition can affect GnRH secretion from the pituitary gland, leading to a decrease in pulsatile secretion of LH and so pre-ovulatory LH surge. However, goats are provided with hormonal treatments that induced ovulation. Poorer AI fertility could be related to the absence of a response to oestrus induction and synchronization treatment, poorer oocyte quality, and poorer uterine environment. Indeed, goats with a low BCS had lower concentrations of insulin-like growth factor I (IGF-I), which can affect follicular maturation, progesterone production from the luteal corpus and impair early embryo development (Leroy et al., 2008). Oocyte quality can be affected up to two months before the breeding period which can result in low fertility (Britt, 1992). Globally, the BCS level is more informative than dynamic indicators. Monitor goats until their reach their nadir BCS is important to decide which goat inseminate and exclude goats with a nadir BCS lower than 2.5. Because BCS assessment is a subjective method, and the variability among animals was low, this probably explains the lack of dynamic effects on reproductive performance.

Body weight

For BW synthetic indicators, goats with a slower repletion (BW variation between 180 and 210 days of lactation <0.03) were less likely to succeed at AI than goats with a faster repletion (BW variation between 180 and 210 days of lactation ≥ 0.05). This observation is consistent with literature in dairy cows (Buckley et al., 2003) and in dairy sheep (Viñoles, 2003). Goats with a faster BW repletion probably had a faster return to positive energy balance. In dairy sheep, a positive energy balance restored normal pituitary activity (e.g., normal GnRH secretion, normal LH pulsatility, and increased FSH

concentrations). Moreover, leptin and insulin concentrations increased in the blood, which acted directly on the ovary, leading to an increased ovulation rate (Scaramuzzi et al., 2006). Finally, only the dynamic of BW between 180 days and 210 days was relevant to explain AI success. Indeed, the whole trajectory and the level of BW were not relevant to explain the AI success. The level of BW captured the “size” of the goats and was not sufficient to explain AI success.

What is the best information to assess AI success?

This approach with three different levels of detail: cluster membership, synthetic indicators, and model parameters brought complementary information. Cluster membership and model parameters were relevant for scientists but meaningless for dairy goat sector (i.e., technicians, farmers ...). Synthetic indicators are more relevant for the dairy goat sector because these indicators could be accessible on farm. For scientists, the use of clusters or model parameters will depend on data availability. Indeed, the data used in this paper had frequent records of MY, BW and BCS allowing for a lactation curve characterization. For high-frequency MY records, using adapted models to characterize a curve on the whole lactation was relevant to target goats with a high persistency cluster. However, in commercial dairy goat farms, MY is measured at the best once a month, the use of models to characterize a trajectory is difficult. With our approach, we showed that the dynamics of milk after the peak (i.e., the persistency) mattered more than milk level. Measuring the slope of milk after the peak could be a good proxy to assess whether the female is maintaining production or not (i.e., delaying the ability to reproduce). Goats with high persistency can either be mated with males (natural mating or hand mating), where fertility results are better, or delayed for reproduction and favored for extended lactation. For BW and BCS, the curve on the whole lactation was not relevant for assessing AI success. In commercial dairy goat farms, BW and BCS are not frequently measured. For BW we can advise farmers to monitor BW gain one month to two months before AI to target goats with a slower BW gain. For BCS, monitoring goats once a month from kidding to nadir could be sufficient to target goats with the lowest body reserves and early decide which goat should be inseminated.

CONCLUSION

The results suggest that the effect of the shape of the lactation curve especially persistency rather than milk yield on AI success. Goats with high persistency are less likely to succeed at AI than goats with lower persistency. Therefore, goats with high persistency prioritize milk production rather than reproduction, whereas goats with low persistency prioritize reproduction. Goats with minimum sternal BCS less than 2.5 are less likely to succeed at AI than goats with higher sternal BCS. To avoid detrimental effects on reproductive performance, it is necessary to maintain sternal BCS over 2.5 during the lactation. Finally, goats with a high repletion speed for BW are more likely to succeed at AI than those with a lower repletion speed. Among the three levels of

detail only synthetic indicators are useful for farmers.

ETHICS APPROVAL

Not applicable.

DATA AND MODEL AVAILABILITY STATEMENT

None of the data were deposited in an official repository.

DECLARATION OF GENERATIVE AI AND AI-ASSISTED TECHNOLOGIES IN THE WRITING PROCESS

The authors did not use any artificial intelligence assisted technologies in the writing process.

AUTHOR ORCIDS

Nicolas Gafsi: [0009-0004-0808-5720](https://orcid.org/0009-0004-0808-5720)

Olivier Martin: [0000-0001-7375-2850](https://orcid.org/0000-0001-7375-2850)

Fabrice Bidan: 0009-0002-0553-8822

Bénédicte Grimard: [0000-0002-5419-4774](https://orcid.org/0000-0002-5419-4774)

Laurence Puillet: [0000-0003-2358-7302](https://orcid.org/0000-0003-2358-7302)

DECLARATION OF INTEREST

None.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge the teams at the INRAE UMR 791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants (Ile-De-France, France) experimental farm and Le Pradel experimental farm (Ardeche, France) for the care of the animals and their work to provide the different dataset. We gratefully acknowledge Maxime Legris from l'Institut de l'Elevage (Ile-De-France, France) for his help on statistical support for this paper.

FINANCIAL SUPPORT STATEMENT

This work was funded by the French Livestock Institute and was supported by ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) with a CIFRE doctoral fellowship (2020/1547). This doctoral fellowship is a part of a research axis of a Technical Joint Unit called "Sustainable goat systems of tomorrow" (UMT SC3D).

3. CONCLUSION DU CHAPITRE

L'approche basée sur trois niveaux de détails : appartenance à un cluster de PL, PV ou de NEC, les indicateurs synthétiques issus des courbes modélisées et les paramètres de modèles apporte des éléments de compréhension sur les interactions entre trajectoires phénotypiques et réussite à la reproduction. Les résultats indiquent que la dynamique de PL a plus d'effets que le niveau de PL sur la réussite à l'IA. Les chèvres présentant une forte persistance ont une réussite de l'IA plus faible que celles avec une faible persistance. Ainsi, les chèvres à persistance élevée privilégient la production laitière au détriment de la reproduction au moment de l'IA, tandis que celles à faible persistance privilégient la reproduction au moment de l'IA. De même, la dynamique de PV a plus d'effets que le niveau de PV sur la réussite à l'IA. Les chèvres qui gagnent plus rapidement du poids ont de meilleurs résultats à l'IA que des chèvres qui gagnent moins rapidement du poids. En revanche, pour la NEC, le niveau a plus d'effets que la dynamique sur la réussite à l'IA. Maintenir un NEC supérieur à 2,5 pendant la lactation est donc nécessaire pour éviter des impacts négatifs sur les performances de reproduction. Les résultats concernent uniquement l'IA, il serait pertinent de pouvoir confirmer ces résultats sur la réussite en saillie naturelle également.

IV. CHAPITRE 4 : UN MODELE DE SIMULATION DE DEMOGRAPHIE DU TROUPEAU CAPRIN QUI VALORISE LES TRAJECTOIRES PHENOTYPIQUES

1. INTRODUCTION DU CHAPITRE

Dans les chapitres précédents, nous avons caractérisé la diversité des trajectoires de PL, PV et de NEC et nous avons regardé leurs effets sur la réussite à l'IA. Dans le présent chapitre, nous proposons d'explorer par une approche de simulation, la mise en perspective à l'échelle du troupeau d'un des principaux résultats obtenus dans le **chapitre 3** : les différences de fertilité selon le profil de production laitière. Pour cela, nous avons exploité un modèle de simulation de démographie de troupeaux caprins laitiers en développement au sein de l'unité MoSAR (Martin, 2023, communication personnelle). Ce modèle individu-centré permet de simuler sur le long terme, les effets de pratiques de reproduction, réforme et renouvellement sur (1) la quantité de lait produite par le troupeau (2) la distribution temporelle des mises bas (3) la distribution des parités du troupeau et (4) la vente du lait et des chevreaux. Par rapport aux simulateurs individu-centrés existants (e.g. Puillet et al., 2010), l'originalité du présent simulateur réside dans son exploitation directe de performances de reproduction et de production laitière issues de données observées. Les performances du troupeau sont ainsi recomposées sur la base des profils dynamiques modélisés et selon la probabilité de réussite à la reproduction observée en fonction du profil. Les observations issues d'un troupeau donné sont ainsi injectées dans le simulateur, lui conférant une base réaliste sur laquelle des modulations de pratiques peuvent être réalisées sous la forme d'expérimentations virtuelles. Les simulateurs existants qui intègrent une représentation fine des fonctions (et donc de leurs interactions) sont basés sur des modèles individuels mécanistes, impliquant une étape laborieuse de calibration. Ainsi, le simulateur a pu être paramétré à partir des observations que nous avons réalisées dans nos jeux de données issus des deux sites expérimentaux. Cela nous a permis d'explorer l'impact global à l'échelle du troupeau de différents compromis entre les fonctions de lactation et de reproduction à l'échelle des individus.

Cette approche permet aussi d'identifier des trous de connaissances et de prédire par exemple des conséquences à long terme de choix de conduite d'élevage sur les performances du troupeau. Dans le contexte de cette thèse, la simulation informatique est exploitée pour aller plus loin dans l'étude des conséquences d'échecs à l'IA, liés aux dynamiques de PL, sur les performances du troupeau. Cet outil permettra ainsi au-delà de la thèse d'appréhender de nouvelles questions ou d'explorer les conséquences de pratiques en élevage répondant ainsi à des enjeux de la filière. Ce chapitre contient quatre parties :

- 1) Description du fonctionnement global du simulateur ;
- 2) Validation du simulateur sur les données de l'installation expérimentale MoSAR;
- 3) Simulation de deux scénarios basés sur les conséquences d'un écart de fertilité à l'IA sur les performances du troupeau.
- 4) Analyse de sensibilité des performances du troupeau aux variations de fertilité à l'IA et en SN pour mettre en évidence des étalements de mises-bas.

2. DESCRIPTION DU SIMULATEUR

Le fonctionnement du simulateur repose sur la manipulation d'une matrice d'individus (1 ligne = 1 individu). Cette matrice, appelée HERDMATRIX contient des variables (en colonne) décrivant chaque individu (Tableau IV.13). Ces manipulations correspondent à des évènements qui vont modifier les variables individuelles (Tableau IV.14). Le simulateur utilise des variables globales de planning contenant des dates calendaires (Tableau IV.15). Ces dates déclenchent des évènements qui mettent à jour les dates au cours de la simulation. Une opération CREATE permet d'ajouter un nouvel individu dans la matrice et d'initialiser ses variables descriptives. Cette opération est déclenchée par les évènements @initialisation et @conception. Une opération DELETE permet de supprimer un individu de la matrice. Cette opération est déclenchée par les évènements @birth_of_male (par défaut, seules les femelles sont conservées), @death et @culling. L'évènement @death est un évènement aléatoire pouvant affecter un individu, la mort d'une femelle gestante induisant la mort des fœtus qu'elle porte. L'évènement peut affecter un fœtus et dans ce cas, cela induit une réduction de la taille de portée de sa mère gestante. L'évènement @culling est déclenché selon les règles de conduite simulées. Une opération UPDATE permet d'incrémenter les variables de temps (âge, jours de gestation, jours dans le cycle, jours de lactation, jours après mise-bas), de contrôler les variables de chaque individu et éventuellement de les mettre à jour (par exemple, passage du statut gestant à non-gestant au moment de la mise bas), de modifier les variables de planning et de lancer des évènements selon la date et des règles définies. Certaines variables de type « classe » (class_age, class_phy, class_lac, batch, cf. Tableau IV.13) évoluent au cours du temps en fonction des différents évènements.

1.1.1.1 La gestion des naissances

Dans le simulateur, un nouvel individu est créé au moment de sa conception dans l'utérus de sa mère, avec un âge négatif (les individus à naître au stade fœtal sont ainsi virtuellement présents dans le troupeau avant leur naissance). La taille de portée est aléatoirement définie au moment de la conception, en appliquant la distribution observée dans les données. Cette méthode permet de simplifier l'implémentation du simulateur et ouvre des opportunités immédiates (introduction d'un taux de mortalité embryonnaire) ou futures (par exemple pour le calcul d'une variable de poids vif). Pour ce nouvel individu, dès lors que son âge devient nul, la naissance est déclenchée. Le

sexe du nouvel individu est aléatoirement défini au moment de sa conception avec une probabilité de 50 % pour chaque sexe. À sa naissance, si cet individu est un mâle, il est alors pointé pour la réforme.

1.1.1.2 La gestion de l'âge à la reproduction et du déclenchement de la puberté

Lors de l'incrémentation journalière, lorsque l'âge de l'individu atteint l'âge de mise à la reproduction, les chevrettes passent dans la catégorie des nullipares (class_age=2) mais pas encore mise à la reproduction (batch=0). Les chevrettes qui atteignent l'âge de la puberté deviennent photoréfractaires (état d'anoestrus saisonnier).

1.1.1.3 La gestion de la photopériode et reprise de cyclicité

La reprise de cyclicité est gérée par un module qui inclut un modèle photopériodique (Forsythe et al., 1995). Si la durée cumulée de jours longs (16 heures de lumières consécutives en 24 heures) dépasse les 89 jours (c'est-à-dire la durée minimale de trois mois consécutifs de jours longs) alors les femelles photoréfractaires deviennent photosensibles. Si le nombre cumulé de jours décroissants perçus est supérieur ou égal à 58 jours, les femelles photosensibles deviennent cyclées. Mais la reprise de cyclicité (affectation d'un nombre de jours dans le cycle ; variable dic = days in cycle) est tirée aléatoirement dans une loi uniforme afin de favoriser un étalement cohérent. Si le nombre cumulé de jours croissants perçus est supérieur ou égal à 58 jours et que la femelle est photosensible, cyclée et au 1^{er} jour du cycle alors elle devient photo réfractaire et non cyclée (Chemineau et al., 1992).

1.1.1.4 La gestion de l'ovulation

Un modèle simple d'ovulation est défini pour chaque individu, avec un âge de puberté (1^{re} ovulation entre 6 et 7 mois après la naissance), une durée de période anovulatoire avant la reprise de cyclicité après mise-bas (entre 30 et 40 jours) et durée du cycle prédéfinie par animal (21 jours). Ce modèle génère des jours d'ovulation où une insémination peut réussir selon une probabilité de fécondation en fonction d'un profil de dynamique de PL (cf partie 1.1.1.5). Les femelles cyclées dont les jours dans le cycle (dic) correspondent à la durée de l'œstrus, ovulent et leur jour dans le cycle est réinitialisé à 0.

1.1.1.5 La gestion de la mise à la reproduction (durée de la période de reproduction, type de reproduction etc.)

Chaque année, la période de reproduction est définie par une date de début de période de reproduction (date à laquelle les animaux mis à la reproduction sont sélectionnés), une date de synchronisation, une date d'insémination artificielle (IA), une date de fin de période de reproduction (date jusqu'à laquelle des saillies naturelles (SN) sont répétées) et une modalité de répétition des SN. Les dates d'ouverture et de fermeture

de la prochaine saison sont alors prédéfinies (dates actuelles + intervalle d'années souhaité). Le simulateur tient compte d'un pourcentage de chèvres mises à l'IA. Par exemple, si l'on choisit de mettre 30 % de primipares et multipares à l'IA alors le reste des femelles (chèvres et chevrettes) seront en mises en SN. Le simulateur va affecter aléatoirement un type de reproduction (IA ou SN) en respectant les proportions souhaitées de femelles en IA.

Dans le contexte de Grignon, chaque année, le 2 août et le 15 octobre marquent respectivement l'ouverture et la fermeture la saison de reproduction. Concernant la part des chèvres mises à l'IA, un pourcentage de 30 % de primipares et multipares a été choisi sur la base des observations faites dans les données.

Durant la période de reproduction, le modèle de probabilité de fécondation est défini par :

- Une probabilité de réussite à l'IA (P_{AI}) selon le cluster de lactation (Tableau IV.1)
- Une probabilité de réussite à la SN (P_{SN}) selon le cluster de lactation (Tableau IV.1)

Ce modèle probabiliste est directement basé sur les pourcentages de réussite observés dans la base de données de Grignon. Pour les individus gestants en fin de période de reproduction, un cluster est affecté à la mise-bas pour la lactation suivante selon un modèle de probabilité basé sur les transitions observées dans la base de données (Tableau IV.2). À chaque gestation sont associés aléatoirement une durée de gestation, une taille de portée et le sexe de chaque chevreau selon les distributions observées dans la base de données. Le fait d'introduire les individus de renouvellement sur la base de mises bas simulées permet de garantir le réalisme.

Tableau IV.1 Illustration de la table des probabilités de réussite en insémination artificielle (IA) et en saillies naturelles (SN) en du numéro de cluster de PL.

<i>Cluster</i>	P_{IA}	P_{SN}
C_0	p_1^1	p_2
C_1	p_3	p_4
C_2	p_5	p_6
C_3	p_7	p_8
...	.	.

¹ $p_{1...n}$: probabilité comprise entre 0 et 1 de réussite à l'IA ou en SN en fonction du numéro de cluster $C_{0...n}$.

Tableau IV.2 Illustration de la table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation $n + 1$.

<i>Cluster de lactation n</i>	<i>Probabilité d'appartenance au cluster de lactation $n + 1$</i>			
	C_1	C_2	C_3	...
C_0	p_1^1	p_2	p_3	.
C_1	p_4	p_5	p_6	.
C_2	p_7	p_8	p_9	.
C_3	p_{10}	p_{11}	p_{12}	.
...

¹ $p_{1...n}$: probabilité comprise entre 0 et 1 de transition entre clusters, la somme des probabilités d'une ligne doit être égale à 1.

1.1.1.6 La gestion des échographies

Après la mise à la reproduction, lorsque la date correspond à la date d'échographies (J +45), les femelles gestantes confirmées sont allotées dans un lot « gestantes » sinon elles sont pointées « à réformer ».

1.1.1.7 La gestion des mises-bas et de la lactation

Lorsqu'une femelle gestante atteint la durée de gestation qui lui a été affectée, la mise-bas est déclenchée. Tous les paramètres physiologiques sont réinitialisés, sa parité augmente d'un niveau, et la femelle entre en lactation. Dès lors, un cluster de lait lui est affecté aléatoirement selon son cluster au rang de lactation précédent ainsi que des paramètres de courbes de lactation. Les individus d'un troupeau se répartissent dans des clusters de lactation $C_{0..n}$, selon leur parité. Le cluster C_0 correspond aux chevrettes, sans lactation. Les clusters $C_{1..k}$ correspondent à des clusters de primipares. Les clusters $C_{k+1..n}$ correspondent à des clusters de multipares (Figure IV.1). Si la femelle est en lactation, sa production laitière journalière est calculée. La somme des productions laitières individuelles permet ainsi de calculer les ventes annuelles de lait et de voir comment elles se répartissent dans l'année.

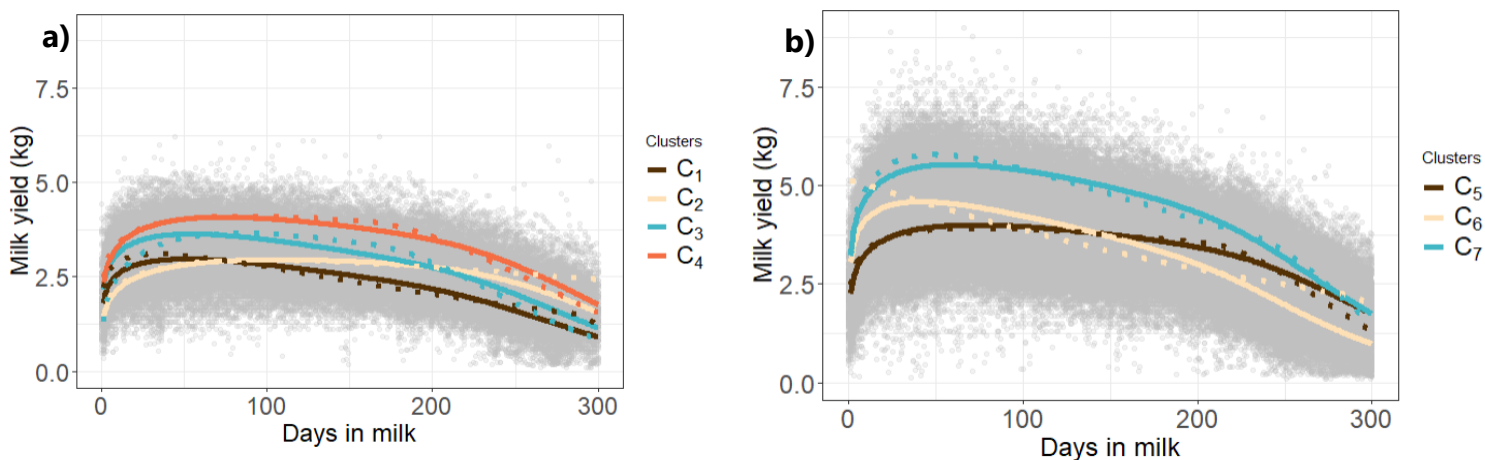


Figure IV.1 Clusters de trajectoires phénotypiques de PL chez les primipares (a) et les multipares (b) : C_1 : Y_{L+}^P = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : Y_{L-}^P = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : Y_{M-}^P = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_4 : Y_{H+}^P = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : Y_{M+}^m = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : Y_{M-}^m = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y_{H+}^m = Production laitière forte et persistance moyenne.

À chaque cluster de lactation $C_{1..n}$ est associée une dynamique de lactation caractérisée par le vecteur des paramètres du modèle ULM : $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ (Martin, 2024 communication personnelle). Afin de préserver une structure de variance covariance réaliste des paramètres d'un cluster, le vecteur P caractérisant un individu d'un cluster est aléatoirement tiré dans la liste des vecteurs de la base de données. Ainsi, une dynamique de lactation simulée correspond à une courbe réellement observée dans nos bases de données. Chaque année, une date de tarissement est définie à date calendaire fixe. Dès que cette date est atteinte, la lactation est stoppée pour toutes les femelles en lactation.

1.1.1.8 La gestion des réformes

Lorsque la date de réforme est atteinte (arbitrairement tous les 28 jours) tous les animaux pointés « à réformer » au cours de la lactation quittent le troupeau. Les individus non-gestants en fin de période de reproduction sont maintenus « à réformer » jusqu'à leur tarissement. La mort ou la réforme d'une femelle gestante induit la suppression des individus au stade fœtal porté par cette femelle. La mort d'un individu au stade fœtal induit la mise à jour de la variable de taille de portée de sa mère. Un taux de mortalité est appliqué à tous les individus. Un taux de réforme volontaire est appliqué selon une règle de décision basée sur l'âge des animaux. Par souci de simplicité, un taux de renouvellement est appliqué pour maintenir un effectif constant du troupeau en réinitialisant des individus d'âge nul dans le cluster C_0 . Concrètement, à chaque mise-bas d'un individu femelle, une règle de décision est appliquée pour conserver ou non l'individu dans le troupeau. Le maintien d'un effectif constant est lié à une capacité d'accueil de la salle de traite et du nombre de primipares souhaité dans le troupeau. Ainsi, si la taille du troupeau dépasse la capacité d'accueil de la salle de traite, les plus jeunes nullipares et les plus vieilles multipares sont alors réformées. Par ailleurs, ce nombre souhaité de primipares est fixé et ne tient pas compte d'éventuelles réformes de nullipares pour cause de décès ou d'échecs de reproduction.

1.1.1.9 Les sorties du simulateur

Au cours de la simulation, les résultats sont stockés dans plusieurs fichiers de sortie exploitables pour des graphiques et des analyses.

Un premier fichier concerne les évènements que peuvent rencontrer les animaux au cours de leur carrière. Les colonnes « event » et « event_num » donnent respectivement les évènements rencontrés par chèvre (« birth » = naissance, « puberty » = puberté, etc.) et l'occurrence de ces évènements par animal (Tableau IV.3).

Tableau IV.3 Exemple de la table d'évènements rencontrés pour chaque animal au cours d'une simulation.

date	animal_id	event	event_num
2000/01/02	2024125024346362	birth	1
2000/01/04	2024125024346486	birth	1
2000/01/06	2024125024346457	birth	1
2000/01/10	2024125024346414	birth	1
2000/01/15	2024125024346400	birth	1
2000/01/19	2024125024346381	birth	1
2000/01/24	2024125024346428	birth	1
2000/01/25	2024125024346442	birth	1
2000/01/25	2024125024346472	birth	1
2000/01/26	2024125024346501	birth	1
2000/06/15	2024125024346457	puberty	1
2000/06/28	2024125024346381	puberty	1

Un deuxième fichier concerne la production laitière individuelle des chèvres. La production laitière individuelle (colonne « my ») est donnée en fonction de la date calendaire (colonnes « year », « month », « day »), du stade de lactation (colonne « dim »), de l'âge et de la parité (colonnes « age » et « parity » respectivement) (Tableau IV.4).

Tableau IV.4 Exemple de la table de production laitière individuelle.

year	month	day	dim	animal_id	age	my	parity
2005	1	26	1	2024125024346381	1834	1.903113	5
2005	1	27	2	2024125024346381	1835	2.229329	5
2005	1	28	3	2024125024346381	1836	2.441354	5
2005	1	29	4	2024125024346381	1837	2.600820	5
2005	1	30	5	2024125024346381	1838	2.729148	5
2005	1	31	6	2024125024346381	1839	2.836567	5
2005	2	1	7	2024125024346381	1840	2.928831	5
2005	2	2	8	2024125024346381	1841	3.009532	5
2005	2	3	9	2024125024346381	1842	3.081075	5
2005	2	4	10	2024125024346381	1843	3.145157	5
2005	2	5	11	2024125024346381	1844	3.203025	5
2005	2	6	12	2024125024346381	1845	3.255627	5
2005	2	7	13	2024125024346381	1846	3.303697	5
2005	2	8	14	2024125024346381	1847	3.347821	5
2005	2	9	15	2024125024346381	1848	3.388475	5

Un troisième fichier concerne la composition du troupeau par classes d'âge. Les classes d'âge sont données par les colonnes : « fetus » si l'âge est négatif ; « kid » si l'âge est positif et que l'individu est un mâle ; « doe » si l'âge est positif et que l'individu est une femelle ; « nulliparous » si la parité est égale à 0 ; « primiparous » si la parité est égale à 1 et « multiparous » si la parité est supérieure à 1 (Tableau IV.5).

Tableau IV.5 Exemple de la table de composition du troupeau par classes d'âge.

year	month	day	fetus	kid	doe	nulliparous	primiparous	multiparous
2000	1	2	9	0	1	0	0	0
2000	1	3	9	0	1	0	0	0
2000	1	4	8	0	2	0	0	0
2000	1	5	8	0	2	0	0	0
2000	1	6	7	0	3	0	0	0
2000	1	7	7	0	3	0	0	0
2000	1	8	7	0	3	0	0	0
2000	1	9	7	0	3	0	0	0
2000	1	10	6	0	4	0	0	0
2000	1	11	6	0	4	0	0	0
2000	1	12	6	0	4	0	0	0
2000	1	13	6	0	4	0	0	0
2000	1	14	6	0	4	0	0	0

Un quatrième fichier concerne la composition du troupeau par parité. La composition du troupeau par parité est donnée par les colonnes : « p_1 » qui correspond aux individus pas encore nés (fœtus) ; « p00 » qui correspond aux nullipares ; « p01 » qui correspond aux primipares et « p02-p10 » qui correspond aux multipares (Tableau IV.6).

Tableau IV.6 Exemple de la table de composition du troupeau par parité.

year	month	day	p_1	p00	p01	p02	p03	p04	p05	p06	p07	p08	p09	p10.
2005	1	1	302	35	44	26	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	2	302	34	45	26	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	3	302	34	45	26	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	4	302	34	45	26	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	5	302	34	44	27	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	6	302	34	44	27	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	7	302	33	45	27	9	6	0	0	0	0	0	0
2005	1	8	301	33	45	26	10	5	1	0	0	0	0	0
2005	1	9	301	33	45	26	8	7	1	0	0	0	0	0
2005	1	10	301	31	46	26	9	7	1	0	0	0	0	0
2005	1	11	301	30	44	26	12	7	1	0	0	0	0	0
2005	1	12	301	29	45	26	12	7	1	0	0	0	0	0
2005	1	13	301	28	45	24	14	8	1	0	0	0	0	0

Un cinquième fichier concerne la composition du troupeau par classe de statut physiologique. La composition du troupeau par statut physiologique est donnée par les colonnes : « in_utero » qui correspond aux fœtus d'âge négatif ; « preburbertal » qui correspond aux chevrettes avant la 1^{ère} ovulation ; « photorefractory » qui correspond aux individus photorefractaires et « photosensitive » qui correspond aux

individus photosensibles ; « cycling » aux individus cyclés et « pregnant » aux individus gestants (Tableau IV.7).

Tableau IV.7 Exemple de la table de composition du troupeau par classe de statut physiologique.

year	month	day	in_uterus	prepubertal	photorefractory	photosensitive	cycling	pregnant
2005	3	9	0	152	120	0	0	0
2005	3	10	0	152	120	0	0	0
2005	3	11	0	152	120	0	0	0
2005	3	12	0	152	120	0	0	0
2005	3	13	0	152	120	0	0	0
2005	3	14	0	152	120	0	0	0
2005	3	15	0	152	120	0	0	0
2005	3	16	0	152	120	0	0	0
2005	3	17	0	152	120	0	0	0
2005	3	18	0	152	120	0	0	0
2005	3	19	0	152	120	0	0	0

Un sixième fichier concerne la vente de lait (colonne « milk ») et des animaux réformés (colonnes « kid », « doe », « nulli », « primi » et « multi ») sur l'ensemble de la période simulée (Tableau IV.8).

Tableau IV.8 Exemple de la table des ventes de lait et d'animaux.

milk	2442675
kid	3187
doe	0
nulli	2398
primi	0
multi	636

Un ensemble de trois graphiques est aussi proposé comme sorties du simulateur. Un premier graphique décrit l'évolution de la démographie du troupeau simulé par année (Figure IV.2a). Dans ce graphique, par exemple à partir des 5 premières années de simulations, la démographie du troupeau semble se stabiliser. Un deuxième graphique décrit l'évolution de la PL simulée en fonction de la parité (Figure IV.2b). Ce graphique montre la variabilité individuelle qu'il peut exister dans les trajectoires de PL sur le troupeau MoSAR. Enfin, un dernier graphique décrit l'évolution de la photopériode, du nombre d'ovulations et la distribution des mises-bas (Figure IV.2c).

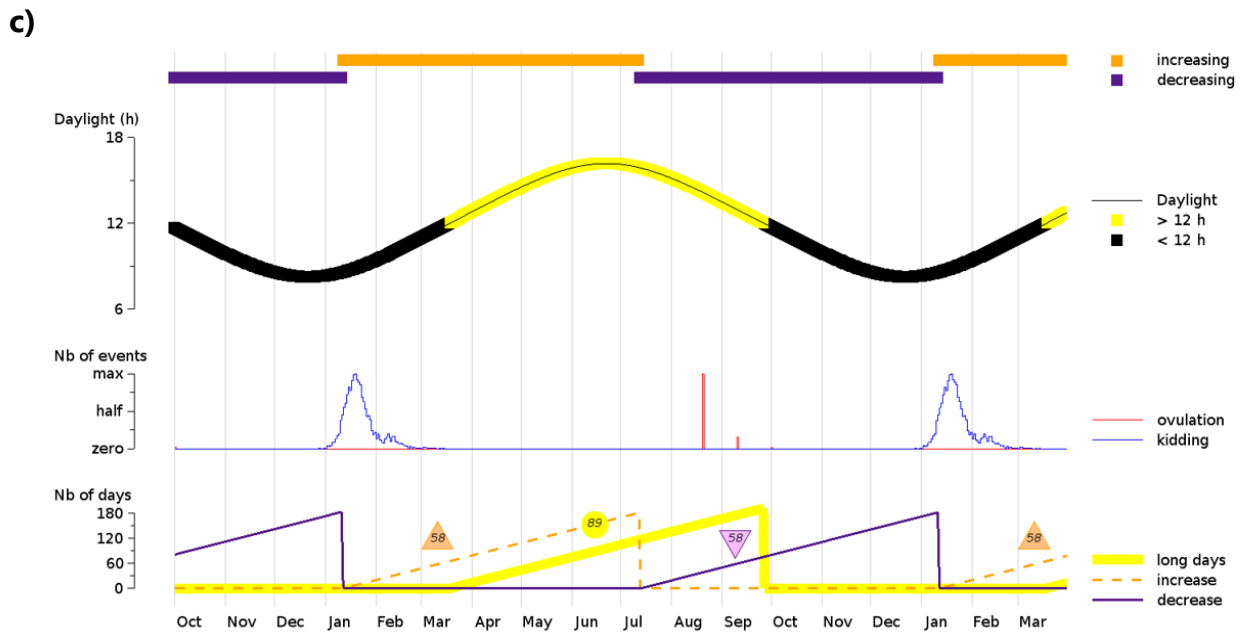
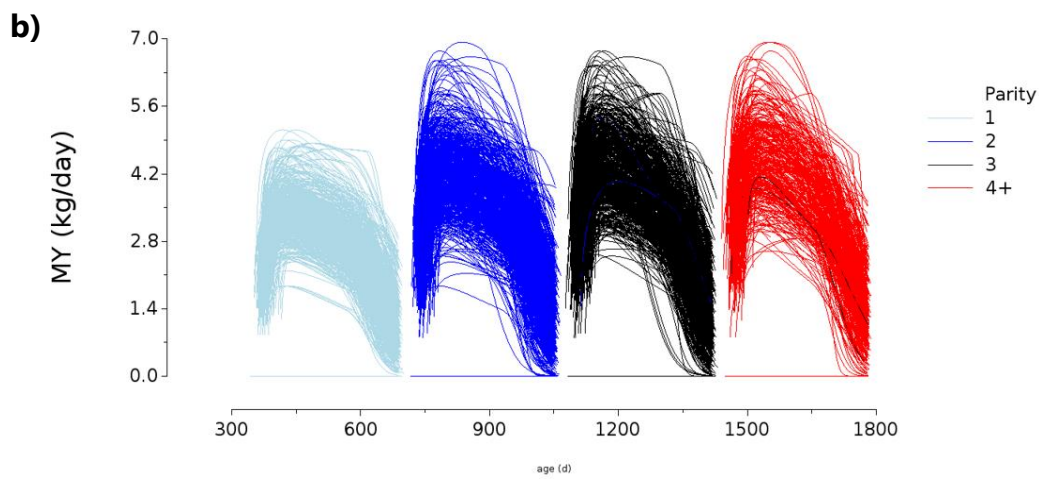
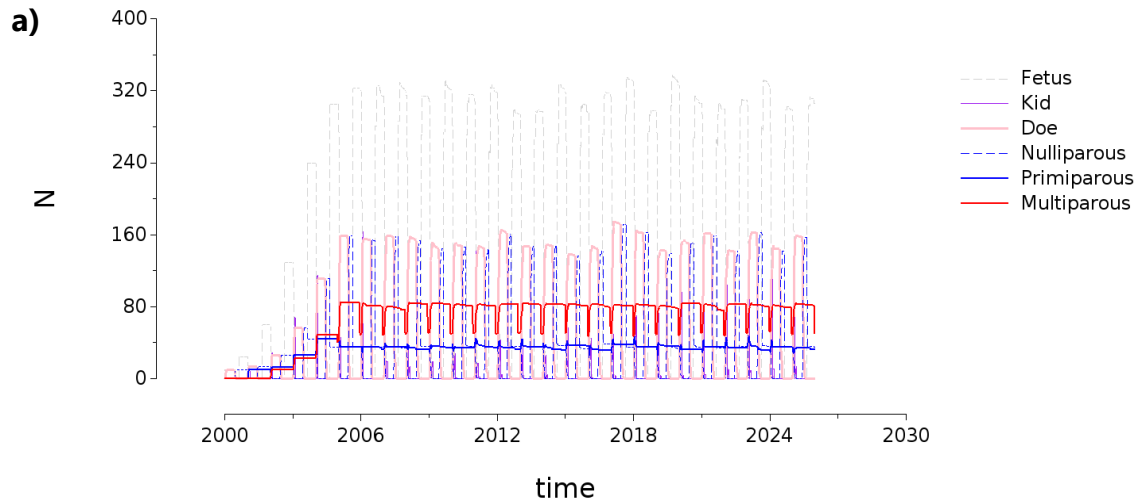


Figure IV.2 Sorties du simulateur : (a) graphique d'évolution de la démographie du troupeau par année de simulation en fonction de la classe d'âge ; (b) graphique de la production laitière individuelle simulée à partir des données observées sur le troupeau MoSAR ; (c) graphique de l'évolution de la photopériode, du nombre d'ovulations et de la distribution des mises-bas.

3. VALIDATION DU SIMULATEUR AVEC LES DONNEES DE LA STATION EXPERIMENTALE CAPRINE MoSAR

Le simulateur a été initialisé avec 10 individus nés uniformément sur une période de 30 jours après la date de début de simulation. Les valeurs déterminées pour les chèvres du troupeau MoSAR dans les chapitres 2 et 3 (Tableau IV.9 : probabilités de réussite à l'IA et en SN en fonction des clusters ; Tableau IV.10 : probabilités de transitions entre clusters) ont été utilisées. Le fonctionnement du troupeau a été simulé sur 25 ans. Les 5 premières années de simulation correspondent à une période de stabilisation du fonctionnement du simulateur et les 20 années suivantes de simulation sont exploitées pour l'analyse des résultats (Figure IV.2a). Huit répétitions ont été réalisées pour prendre en compte les processus aléatoires liés à la reproduction et la mortalité et stabiliser la variance des sorties. À partir des résultats obtenus, la courbe de livraison de lait du troupeau et les distributions des mises-bas simulées ont été comparées aux données réelles de quatre campagnes de production du troupeau MoSAR (2020 à 2023).

Le troupeau MoSAR est constitué de 37 % de primipares et 63 % de multipares. Le troupeau simulé est constitué de 31 % de primipares et 69 % de multipares. Concernant la courbe de livraison simulée, celle-ci surestime légèrement les quantités de lait livrées par rapport aux courbes de livraisons réelles. Cette différence est expliquée par le fait que nous simulons des courbes de lactations théoriques (issues du modèle PLM, voir chapitre 2), qui ne prennent pas en compte les perturbations réelles de la production laitière rencontrées par une chèvre au cours de sa lactation (Figure IV.3). En appliquant un taux de perturbations entraînant entre 5 et 10 % de pertes de PL par mois, les courbes simulées se rapprochent des courbes réellement observées. La courbe de livraison simulée sans perturbations reste toutefois cohérente par rapport aux courbes de livraison réelles. La quantité livrée simulée était de 117 603 kg sur la lactation alors que les quantités réelles livrées sur les quatre campagnes étaient de 101 967 kg pour 2020, 94 225 kg pour 2021, 90 774 kg pour 2022 et 106 843 kg pour 2023.

Au niveau des performances de reproduction sur 20 ans en moyenne la fertilité à l'IA simulée a été de 66,0 ($\pm 2,0$ %) et la fertilité en SN sur toute la saison de reproduction simulée a été de 91,4 ($\pm 0,9$ %). En moyenne, sur les données réelles du troupeau MoSAR, la fertilité à l'IA était de 62,0 ($\pm 15,7$ %) et la fertilité en SN sur toute la saison de reproduction était de 88,1 ($\pm 6,0$ %). Concernant la distribution des mises-bas, le simulateur a donné une distribution théorique des mises-bas éloignée de la

distribution réelle observée sur le troupeau MoSAR (Figure IV.4). Bien que les résultats de fertilité soient proches de la réalité, certains choix ont probablement affecté cette distribution simulée. Dans la conduite du troupeau MoSAR, les nullipares sont mises à la reproduction plus tardivement que les primipares et multipares ce qui conduit à des mises-bas de février l'année suivante correspondant au deuxième pic de la distribution. Une modification du simulateur permettra de tenir compte de cet élément de conduite et améliorera la distribution finale.

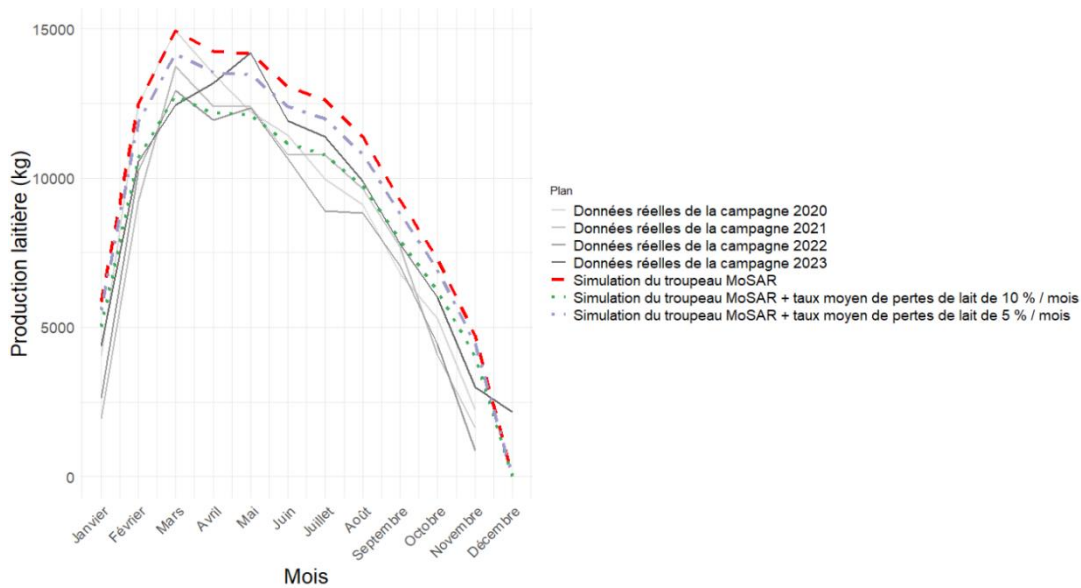


Figure IV.3 Courbe de livraison simulée à partir d'une simulation du troupeau MoSAR sur la période 2005-2025 et courbes de livraisons réelles obtenues sur les campagnes de 2020 à 2023.

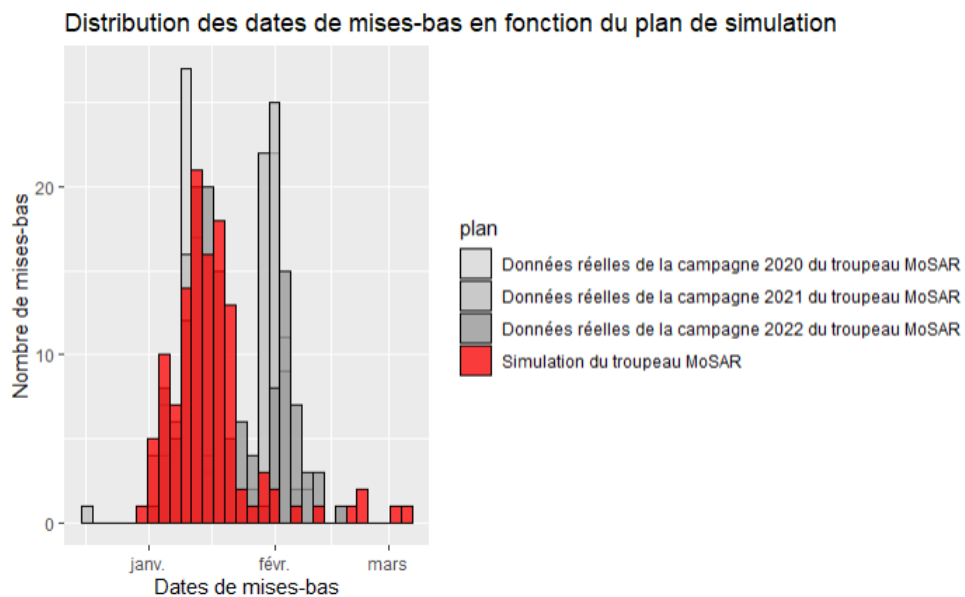


Figure IV.4 Exemples de distributions de mises-bas simulées et réelles sur une campagne de production.

Tableau IV.9 Table des probabilités de réussite en insémination artificielle (IA) et en saillies naturelles (SN) en fonction du numéro de cluster de PL réellement observé sur le troupeau MoSAR.

<i>Cluster</i> ¹	P_{IA}	P_{SN}
C_0	1	0.94
C_1	0.70	0.86
C_2	0.60	0.86
C_3	0.63	0.90
C_4	0.54	0.87
C_5	0.57	0.90
C_6	0.70	0.86
C_7	0.48	0.90

¹ C_1 : Y_{L+} = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : Y_{L-} = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : Y_{M-} = Production laitière moyenne et faible persistance ; C_4 : Y_{H+} = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : Y_{M+} = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : Y_{M-} = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y_{H-} = Production laitière forte et persistance moyenne.

Tableau IV.10 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation $n + 1$ réellement observées à Grignon.

Cluster lactation n^1	Probabilité d'appartenance au cluster de lactation $n + 1$						
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_0	0.3	0.1	0.41	0.19	0	0	0
C_1	0	0	0	0	0.73	0.25	0.02
C_2	0	0	0	0	0.81	0.07	0.12
C_3	0	0	0	0	0.57	0.3	0.13
C_4	0	0	0	0	0.37	0.22	0.41
C_5	0	0	0	0	0.43	0.32	0.25
C_6	0	0	0	0	0.3	0.54	0.16
C_7	0	0	0	0	0.17	0.19	0.64

¹ C_1 : $Y^{p_{L+}}$ = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : $Y^{p_{L-}}$ = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : $Y^{p_{M-}}$ = Production laitière moyenne et faible persistance ; C_4 : Y^{p_H} = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : $Y^{m_{M+}}$ = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : $Y^{m_{M-}}$ = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y^{m_H} = Production laitière forte et persistance moyenne.

4. COMPARAISON DE DEUX PLANS D'EXPERIENCE : EFFET DE LA DIVERSITE DES TRAJECTOIRES DE PL SUR LES PERFORMANCES DE REPRODUCTION

Pour explorer l'impact de la diversité des trajectoires individuelles et des performances de reproduction associées et illustrer le potentiel du simulateur, nous avons testé deux compositions contrastées de troupeau en termes de type de trajectoires. Nous avons vu dans le **chapitre 3**, que la persistance dégradait les résultats de fertilité à l'IA. Chez les primipares, le cluster Y_{PL+}^P présentait une fertilité inférieure de 10% comparée au cluster Y_{PL-}^P (60,0 % versus 70,0%). Deux scénarios de simulation ont été implémentés :

- Dans le premier scénario (P-F+), le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{PL-}^P (faible persistance). Les transitions observées pour les autres clusters sont les données observées sur le troupeau MoSAR (Tableau IV.11).
- Dans le deuxième scénario (P+F-), le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{PL+}^P (forte persistance). Les transitions observées pour les autres clusters sont les données observées sur le troupeau MoSAR (Tableau IV.12).
- Dans les deux scénarios, les probabilités de réussite en IA et en SN sont celles réellement observées sur le troupeau MoSAR (Tableau IV.9).

Les résultats des deux scénarios montrent que la courbe de livraison du lait ne diffère pas sur les périodes de janvier à mars. En revanche, à partir du mois d'avril, le troupeau P+F- produit plus de lait que le troupeau P-F+ (Figure IV.5). La moyenne de production laitière totale vendue sur 20 ans est significativement plus faible pour le scénario P-F+ que pour le scénario P+F- (2 371 358 kg vs. 2 232 360 kg) (Figure IV.6).

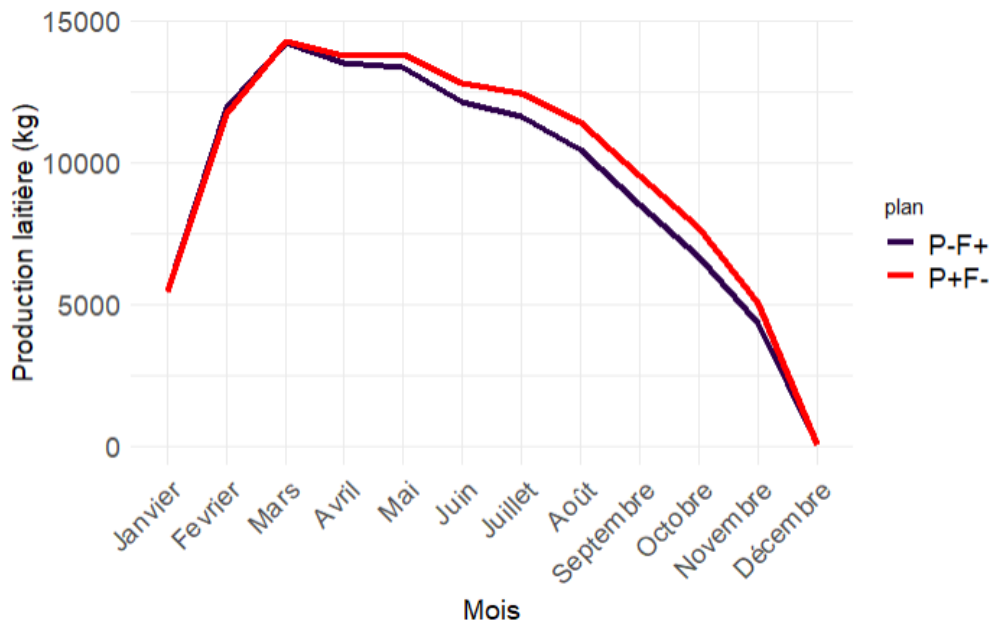


Figure IV.5 Courbe de livraison simulée à partir d'une simulation des deux scénarios sur la période 2005-2025 : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L-}^P (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L+}^P (forte persistance).

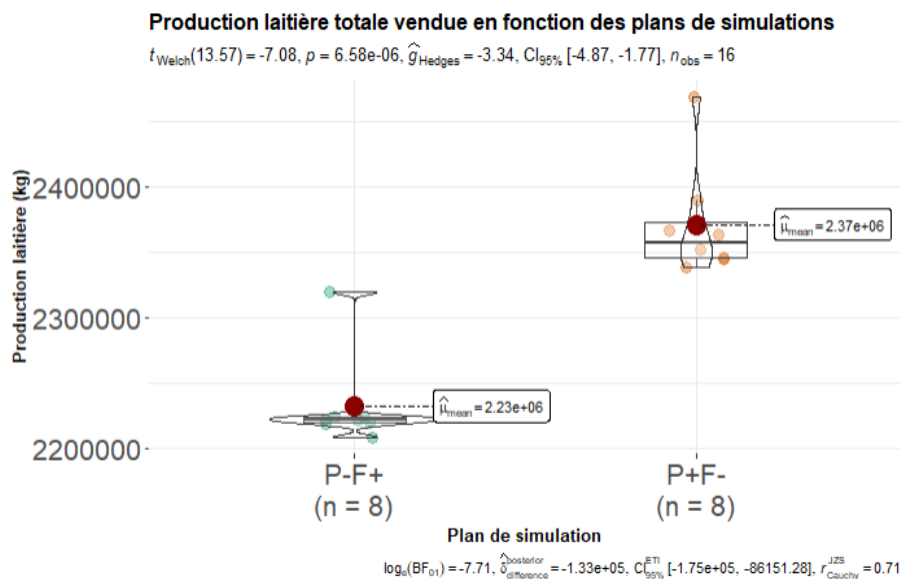


Figure IV.6 Variabilité du cumul de production laitière totale vendue sur la période 2005-2025 en fonction des plans de simulations (n =8 simulations) : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L-}^P (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L+}^P (forte persistance).

Pour le troupeau simulé P+F-, la moyenne de la fertilité à l'IA était de 63,0 ($\pm 2,0$ %) et la moyenne de la fertilité en saillie naturelle sur la saison de reproduction de 91,0 ($\pm 0,4$ %). Pour le troupeau simulé P-F+, la moyenne de la fertilité à l'IA était de 73,0 ($\pm 2,0$ %) et la moyenne de la fertilité en saillie naturelle sur la saison de reproduction de 91,0 ($\pm 0,7$ %). Concernant la répartition des mises-bas, malgré un premier pic de mises-bas en janvier légèrement supérieur pour le troupeau P-F+ par rapport au troupeau P+F- (Figure IV.7), l'écart moyen de 10 % de fertilité à l'IA entre les deux scénarios n'a pas eu d'effets majeurs sur le profil de distribution des mises-bas. La particularité du troupeau MoSAR est que toutes les chèvres sont synchronisées, de plus nous n'avons que 30 % des chèvres inséminées et la très bonne fertilité en saillies naturelles compense d'éventuels échecs d'insémination artificielle. Des étalements de mises-bas attendues seraient probablement visibles si la fertilité du troupeau était beaucoup plus faible. Nous nous proposons donc d'explorer par une analyse de sensibilité le seuil de fertilité à partir duquel les mises-bas s'évalent en partant du principe que les profils de production laitière affectent la fertilité à l'IA et en SN.

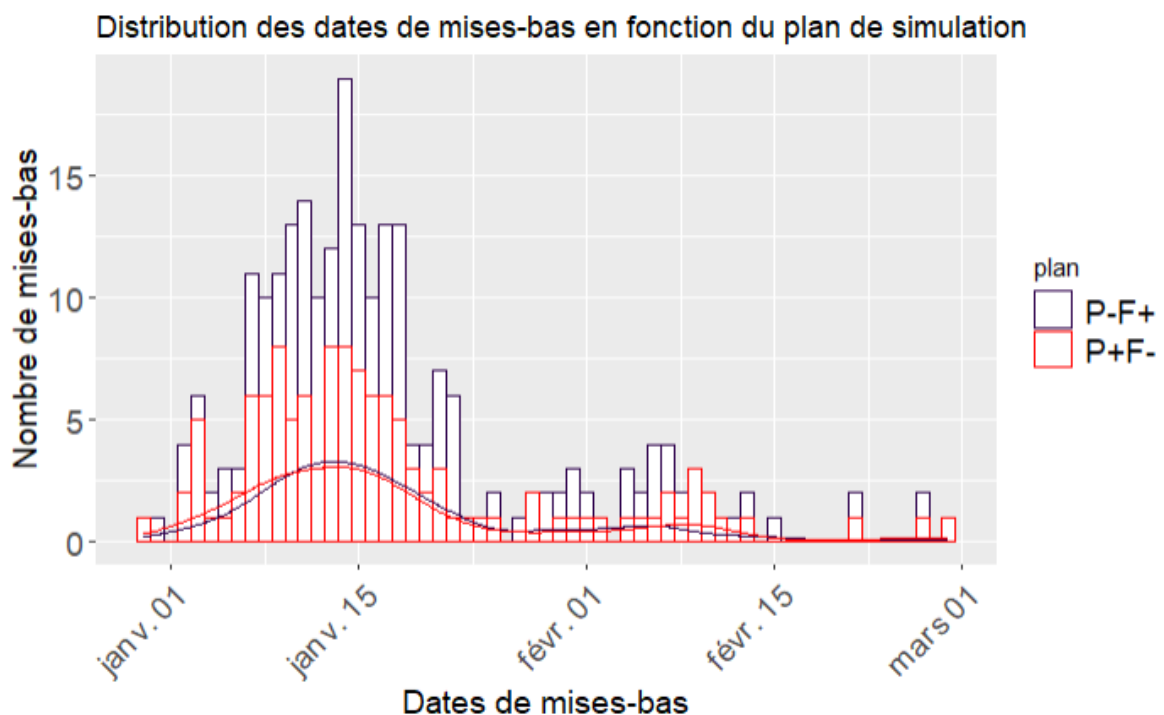


Figure IV.7 Distribution des dates de mises-bas en fonction du plan de simulation : P-F+ : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L-}^P (faible persistance) ; P+F- : le troupeau est constitué exclusivement de primipares appartenant au cluster Y_{L+}^P (forte persistance).

Tableau IV.11 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation $n + 1$ pour le scénario cluster faible persistance : primipares uniquement constituées du cluster C_2 (Y^{P_L}).

Probabilité d'appartenance au cluster de lactation $n + 1$

<i>Cluster de lactation n^1</i>	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_0	0	1	0	0	0	0	0
C_1	0	0	0	0	0.73	0.25	0.02
C_2	0	0	0	0	0.81	0.07	0.12
C_3	0	0	0	0	0.57	0.3	0.13
C_4	0	0	0	0	0.37	0.22	0.41
C_5	0	0	0	0	0.43	0.32	0.25
C_6	0	0	0	0	0.3	0.54	0.16
C_7	0	0	0	0	0.17	0.19	0.64

¹ C_1 : $Y^{P_{L+}}$ = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : $Y^{P_{L-}}$ = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : $Y^{P_{M-}}$ = Production laitière moyenne et faible persistance ; C_4 : Y^{P_H} = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : $Y^{m_{M+}}$ = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : $Y^{m_{M-}}$ = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y^{m_H} = Production laitière forte et persistance moyenne.

Tableau IV.12 Table des transitions entre clusters d'une lactation n à une lactation n+1 pour le scénario cluster forte persistance : primipares uniquement constituées du cluster C_1 ($Y^{p_{L+}}$).

Probabilité d'appartenance au cluster de lactation n+1

<i>Cluster de lactation n¹</i>	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_0	1	0	0	0	0	0	0
C_1	0	0	0	0	0.73	0.25	0.02
C_2	0	0	0	0	0.81	0.07	0.12
C_3	0	0	0	0	0.57	0.3	0.13
C_4	0	0	0	0	0.37	0.22	0.41
C_5	0	0	0	0	0.43	0.32	0.25
C_6	0	0	0	0	0.3	0.54	0.16
C_7	0	0	0	0	0.17	0.19	0.64

¹ C_1 : $Y^{p_{L+}}$ = Production laitière faible et persistance forte ; C_2 : $Y^{p_{L-}}$ = Production laitière faible et persistance faible ; C_3 : $Y^{p_{M-}}$ = Production laitière moyenne et faible persistance ; C_4 : Y^{p_H} = Production laitière forte et persistance moyenne ; C_5 : $Y^{m_{M+}}$ = Production laitière moyenne et persistance forte ; C_6 : $Y^{m_{M-}}$ = Production laitière moyenne et persistance faible ; C_7 : Y^{m_H} = Production laitière forte et persistance moyenne.

5. ANALYSE DE SENSIBILITE POUR SIMULER UN ETALEMENT DES MISES-BAS

Dans cette partie, nous avons réalisé un plan de simulation avec un gradient croissant de fertilité à l'IA et en SN. À partir des données observées, 9 taux de fertilité sont testés : 10 % de la fertilité à l'IA et en SN réelle jusqu'à 90 % de la fertilité à l'IA et en SN réelle. Les résultats des 9 simulations montrent que la hauteur du premier pic de mises-bas diminue lorsque la fertilité est très dégradée (gradient décroissant de 0,9 (90 % de la fertilité réelle) à 0,1 (10 % de la fertilité réelle)) (Figure IV.8). L'opposé est observable sur les autres pics de distribution. Ces étalements de mises-bas entraînent des conséquences sur la démographie du troupeau caprin. Par exemple, dans le cas d'une simulation avec un taux de 30 % de fertilité à l'IA et en SN réelle on aura des variations dans les proportions de primipares et multipares au cours des années de simulations (Figure IV.9). Ainsi ce simulateur apparaît très prometteur pour tester des scénarios où la fertilité du troupeau est très dégradée et d'évaluer les conséquences pour les performances du troupeau.

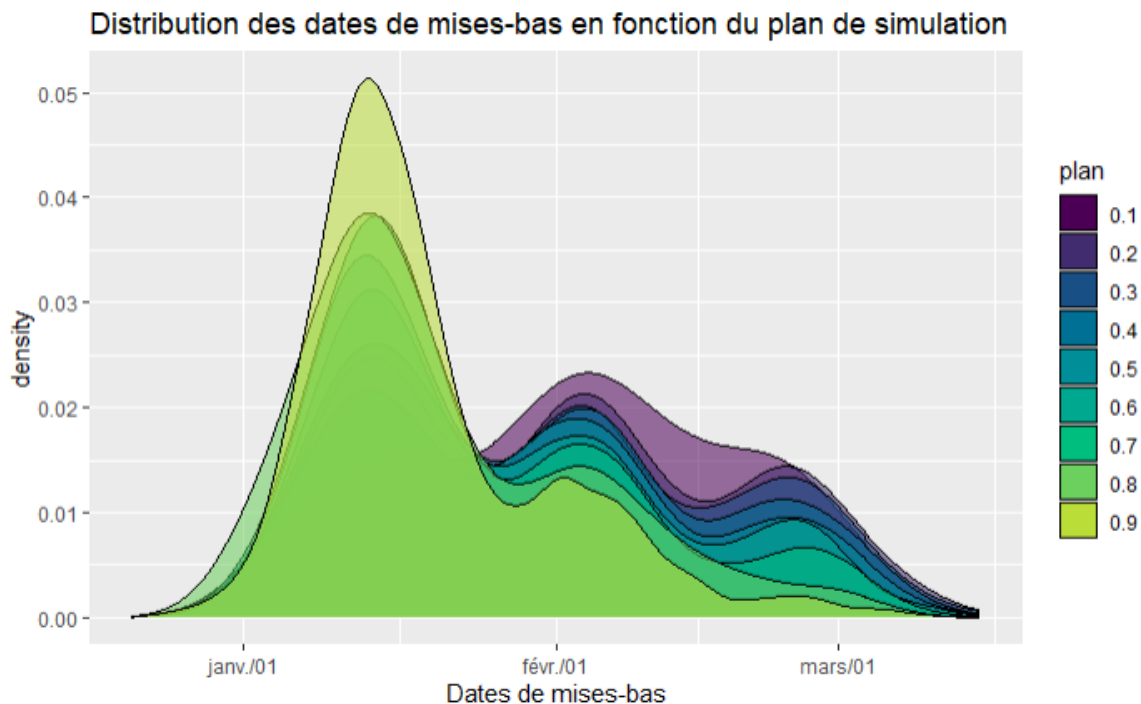


Figure IV.8 Distribution des dates de mises-bas en fonction du plan de simulation : gradient croissant de fertilité observé 0,1 (10 % de la fertilité réelle) jusqu'à 0,9 (90 % de la fertilité réelle).

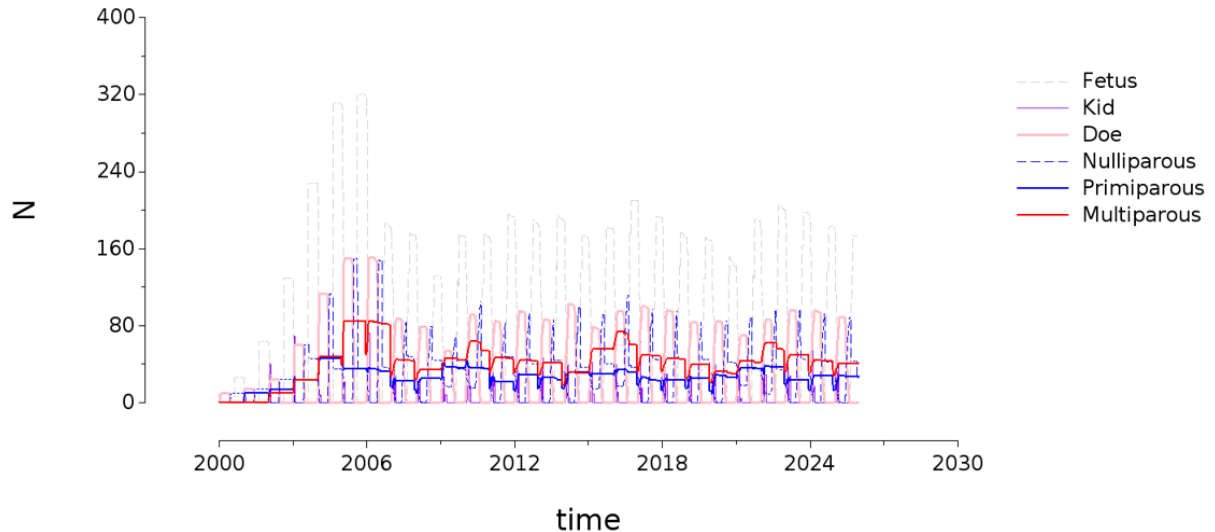


Figure IV.9 Graphique d'évolution de la démographie du troupeau par année de simulation en fonction de la classe d'âge dans le cas d'une simulation avec une fertilité égale à 30 % de la fertilité observée à Grignon.

6. CONCLUSION DU CHAPITRE

Le simulateur de troupeau caprin présenté dans ce chapitre a l'avantage de permettre de manipuler directement des trajectoires phénotypiques et des probabilités de succès à l'IA réellement observées sur le troupeau MoSAR. Ce simulateur présente l'intérêt d'avoir un temps de calcul rapide, ce qui ouvre la voie à une utilisation potentielle pour les acteurs de terrain. Si le simulateur présente un réalisme suffisant pour explorer des scénarios, l'étape de validation sur les données du troupeau MoSAR a permis d'identifier des pistes d'amélioration. Une première piste est d'utiliser les courbes individuelles de lactation perturbées pour mieux prédire la courbe de livraison du troupeau. Une deuxième piste concerne la sophistication du modèle de reproduction. En effet, on remarque qu'un écart de 10 % de fertilité à l'IA n'a que peu de conséquences sur l'étalement des mises-bas sur le troupeau MoSAR. L'implémentation d'un effet sur la fertilité pour les cycles de retour d'IA et de SN serait plus représentative de l'effet des clusters de lait sur l'étalement des mises-bas, la démographie et la courbe de livraison du troupeau. Si les références de fertilité sur SN n'ont pu être constituées dans le cadre de la thèse, une extrapolation de la fertilité sur IA pourrait être envisagée sur les cycles en SN. Du fait de la généricité du simulateur, celui-ci doit être mis à l'épreuve d'autres systèmes caprins en France. En effet, le simulateur pourrait représenter des systèmes avec une période de mises-bas (en saison, en contre saison)

ou deux périodes de mises-bas. De même, dans l'optique d'aller vers des systèmes plus durables, une représentation de systèmes où il n'y a pas d'hormones, mais uniquement de l'effet mâle serait intéressante à analyser. Enfin, cette approche par modélisation pourra permettre d'apporter des pistes de réflexion pour la conduite du troupeau sur les choix de mise à la reproduction ou d'orientation d'animaux vers la pratique des lactations longues au regard des courbes de lactations et de la réussite de la reproduction.

Tableau IV.13 Liste des variables individuelles contenues dans HERDMATRIX.

Variable	Description	Format
animal_ID	Identifiant unique de l'animal	aaaa.000000
mother_ID	Identifiant unique de la mère	aaaa.000000
Generation	Numéro de génération	Entier positif

Sex	Sexe	0 : femelle ; 1 ; mâle
Age	Age en jours	Négatif avant la naissance ; Positif après la naissance
Est_lgth	Durée de l'œstrus en jours	Réel positif
Ane_lgth	Durée de l'ancœstrus en jours	Réel positif
Age_pub	Age à la puberté en jours	Entier positif
Parity	Rang de lactation	-1 : fœtus ; 0 : chevrette ; > 0 : chèvre
kidding_date	Date de mises-bas	aaaammjj
milking	Status de lactation	0 : pas en lactation ; 1 : en lactation
dak	Jours après mises-bas	Entier positif
dim	Jours de lactation	Entier positif (remis à zéro au tarissement)
cycling	Statut de cyclicité	0 : non cyclée ; 1 : cyclée
dic	Jours dans le cycle	Entier positif (remis à zéro à l'ovulation)
class_age	Type d'individus	-1 : fœtus; 0 : chevreau; 1 : chevrette; 2 : nullipare; 3 : primipare ; 4 : multipare
class_physio	Stade physiologique	-1 : dans l'utérus; 0 : pré-puberté; 1 : cyclée; 2 : gestante; 3 : ancœstrus
class_lactation	Stade de lactation	0 : pas en lactation ; 1 : début ; 2 : milieu ; 3 : fin ; 4 : prolongée
cluster	Cluster de lactation	Entier positif
u _{i:1-5}	Paramètre i associé à ULM	Nombre réel issus des données
MY	Production laitière en kg/j	Nombre réel positif
Pregnant	Statut de gestation	0 : non-gestante; 1 : gestante
Dip	Jours de gestation	Entier positif (remis à zéro à la mise-bas)
Fert_nb	Nombre de fécondations	Entier positif
litter_size	Nombre de fœtus dans l'utérus	Entier positif
GL	Durée de gestation attendue en jours	Entier positif

insem	Statut de mise à la reproduction	0 : non mise à la reproduction ; 1 : mise à la reproduction
AI_timing	Classe du moment de l'insémination	0 : précoce ; 1 : tardif (relatif aux jours après mises-bas)
AI_proba	Probabilité de succès à l'IA	Nombre réel issus des données fonction du numéro de cluster et de AI_class
NM_number	Nombre de saillies naturelles	Entier positif
NM_proba	Probabilité de succès en saillies naturelles	Nombre réel issus des données fonction du numéro de cluster
death_proba	Probabilité de mortalité	Nombre réel issus des données fonction de l'âge
culling_risk	Score associé au risque de réforme	Nombre réel issus des données
culling_decision	Décision de réforme	0 : à garder dans le troupeau ; 1 : à reformer
extend_lactation	Statut de lactations longues	0 : non permis ; 1 : permis
herd_status	Status dans le troupeau	-1 : dans l'utérus ; 0 : dans le troupeau ; 1 : mort ; 2 : à vendre
Batch	Lots d'individus	-1 : jeunes ; 0 : choisis pour la mise à la reproduction ; 1 : individus à l'IA ; 2 : individus en saillies naturelles ; 3 : à reformer ; 4 : individus mis à la reproduction ; 5 : individus confirmés gestants
Photo	Statut photopériodique	-1 : non exposé ; 0 : active ; 1 : photo réfractaire ; 2 : photo sensible

Tableau IV.14 Série d'événements manipulés par le simulateur.

Événement	Règle de déclenchement ^a	Opération déclenchée
@initialization	Début de simulation	CREATE
@daily	Chaque jour	age+1 dak+1 dim+1*milking dip+1*pregnant my=milking*ULM(U,dim)
@breeding start	Si %date = date_BS	
@ovulation	Si dic = EL	
@artificial insemination	Si %date = date_AI	Mise à jour de date_AI
@natural_insemination	Si %date = date_NM	Mise à jour de date_NI
@breeding_end	Si %date = date_BE	
@conception	Si succès AI ou NI	CREATE
@birth_of_male	Si age = 0 ou sex=1	DELETE
@birth_of_female	Si age = 0 ou sex=0	
@death	Evènement aléatoire	DELETE
@kidding	Si dip = GL	
@puberty	Si age = age_puberty	
@stimulation	Si CLD ≥ 89	Mise à jour de Photo
@resumption	Si CPDD ≥ 58	Mise à jour de cycling
@culling_decision	Si %date=date_BS|BE|DO	
@culling	Si %date = date_CU	DELETE
@drying_off	Si %date = date_DO	

^aCLD = Jours longs cumulés ; CPDD = Cumul de jours décroissants perçus ; EL = durée de l'œstrus ; GL = durée de gestation ; BS : Début de saison de reproduction ; BE : Fin de saison de reproduction :

AI : Insémination artificielle ; NI : Saillies naturelles ; DO : Tariesement ; CU : Réforme.

Tableau IV.15 Variables de planning.

Variable ^a	Description	Update event	Update rule
date_BS	Prochaine date de début de saison de reproduction	@breeding_start	+ 1 year
date_BE	Prochaine date de fin de saison de reproduction	@breeding_start	date_BS+ 30 days
date_AI	Prochaine date d'IA	@artificial_insemination	+ 1 year
date_NI	Prochaine date de SN	@natural_insemination	+ 21 days
date_DO	Prochaine date de tariesement	?	?
date_CU	Prochaine date de réforme	?	?

^aBS : Début de saison de reproduction ; BE : Fin de saison de reproduction ; AI : Insémination artificielle ; NI : Saillies naturelles ; DO : Tariesement ; CU : Réforme.

V. CHAPITRE 5 : DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif général de cette thèse était de comprendre les interactions entre les fonctions de lactation, de gestion des réserves corporelles et de reproduction par une approche de modélisation de trajectoires phénotypiques (PL, PV et NEC). Dans le **chapitre 2**, l'analyse de la variabilité des trajectoires phénotypiques a montré qu'il existait une diversité d'associations entre les différentes trajectoires phénotypiques suggérant une diversité de profils de partition d'énergie entre les différentes fonctions à l'échelle d'une lactation. À l'échelle de la carrière, une répétabilité dans les enchaînements de certains clusters a été mise en évidence sur plusieurs lactations. La capacité d'une femelle laitière à enchaîner les cycles de production repose en grande partie sur sa capacité à se reproduire. Ainsi, dans le **chapitre 3**, les relations entre trajectoires phénotypiques de PL, PV et de NEC et les performances de reproduction (réussite à l'IA) ont été analysées, en considérant trois types d'indicateurs caractérisant les trajectoires : l'appartenance à un cluster de trajectoires, les indicateurs synthétiques et les paramètres de modèles. La dynamique de PL, caractérisée par le cluster sur la lactation et l'indicateur synthétique de persistance, est plus explicative d'échecs à l'IA que le niveau de PL au moment de la mise à la reproduction (Figure V.1). En effet, les chèvres présentant les lactations les plus persistantes avaient une réussite à l'IA plus faible que les chèvres avec une plus faible persistance. De même, l'indicateur synthétique de vitesse de gain de PV autour de l'IA est plus explicatif d'échecs à l'IA que le niveau de PV à la mise à la reproduction. À l'inverse, le niveau minimal de NEC observé au cours de la lactation caractérisé par un des paramètres issus de modèles est plus explicatif que la dynamique de NEC au moment de la mise à la reproduction. L'ensemble de ces résultats montre que des indicateurs relatifs aux dynamiques de production et d'utilisation des réserves sont utiles pour mieux anticiper les facteurs de variation de la réussite à l'IA.

Pour comprendre les conséquences à l'échelle du troupeau de la diversité des trajectoires et des relations avec les performances de reproduction, un simulateur de fonctionnement du troupeau caprin en développement à l'unité MoSAR a été exploité (**chapitre 4**). Le potentiel du simulateur pour réaliser des expérimentations virtuelles a été illustré avec deux scénarios de composition de troupeau en termes de type de primipares. Un scénario reposait sur un troupeau constitué de primipares avec un profil de persistance laitière faible et un troupeau constitué de primipares avec un profil de persistance laitière élevé. Ces deux profils présentaient un écart de fertilité à l'IA de 10%. Cet écart de fertilité à l'IA n'a pas eu de conséquences sur la distribution des mises-bas : les effectifs mis en saillie naturelle et le taux de réussite de celle-ci permettent de tamponner les effets de la réussite à l'IA.

Dans ce **chapitre 5**, nous proposons tout d'abord de discuter du potentiel applicatif de ce travail de thèse, effectué dans le cadre d'un contrat CIFRE avec IDELE. Nous discuterons ensuite de la valorisation des bases de données et des challenges rencontrés pour l'élaboration d'une chaîne de traitements de données capable d'analyser plusieurs phénotypes en même temps (approches multivariées) et de façon dynamique pour caractériser la capacité des chèvres à produire et se reproduire et contribuer à une meilleure compréhension de leur robustesse. Enfin, nous discuterons des pistes de recherche ouvertes par nos résultats.

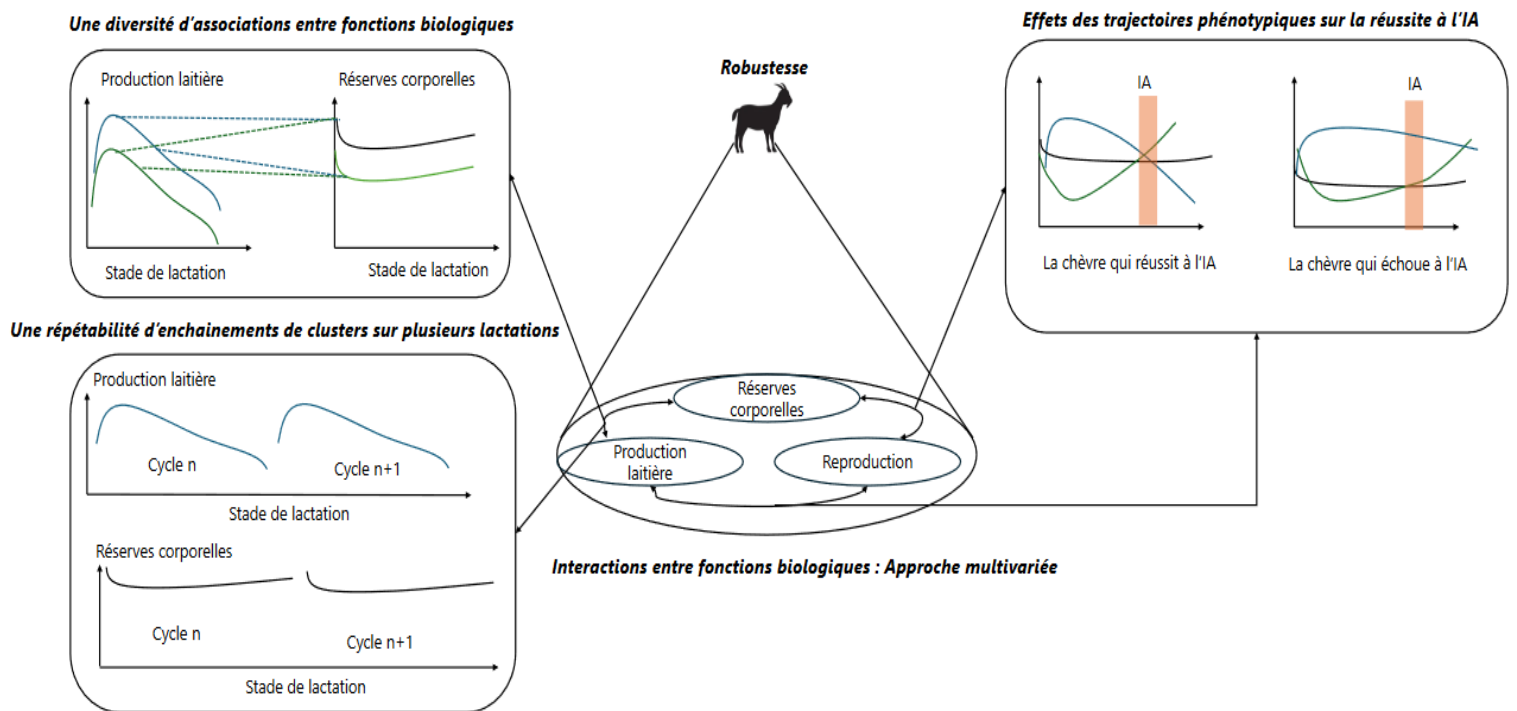


Figure V.1 Schéma de synthèse des principaux résultats de la thèse.

1. LES RESULTATS DE LA THESE APPORTENT UN POTENTIEL APPLICATIF SUR LE TERRAIN POUR LES ELEVAGES CAPRINS

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE, réalisée entre l'UMR MoSAR et l'IDELE. Il est donc important de discuter de l'intérêt des résultats scientifiques pour l'entreprise, dont l'objectif est de pouvoir apporter des références scientifiques et techniques à destination des conseillers en élevages et des éleveurs.

1.1. Apports sur la caractérisation des priorités entre fonctions biologiques chez la chèvre

Les travaux bibliographiques réalisés chez la vache tendent à généraliser un modèle applicable à tous les animaux : au moment de la mise à la reproduction, la priorité est généralement donnée à la production laitière, les réserves corporelles doivent être suffisamment importantes au vêlage et l'alimentation après vêlage doit permettre de limiter l'amaigrissement pour obtenir une bonne performance de reproduction.

Nous avons pu mettre en évidence, sur un grand jeu de données, que les stratégies sont bien plus variables chez la chèvre. La mise à la reproduction intervient plus tardivement dans la lactation et les fonctions sont sans doute moins en concurrence directe. D'après nos résultats, la variabilité des associations entre dynamique de production laitière, d'évolution de la NEC et du PV est très importante et la fertilité en saillie naturelle étant relativement élevée, cette diversité de dynamiques affecte peu le maintien des animaux dans le troupeau d'une lactation à l'autre. Des stratégies individuelles variées persistent donc dans le troupeau.

Nos observations ont cependant été réalisées dans deux troupeaux avec de bons résultats de reproduction. Il serait intéressant de les explorer dans des élevages avec de moins bons résultats ou de les simuler en accentuant les différences de performances pour voir leurs effets sur la composition du troupeau.

1.2. Apports pour la sélection génétique

En général, la persistance est un critère souvent recherché par les éleveurs bovins lait du fait de son intérêt économique, de ses effets bénéfiques sur la fertilité et la santé des vaches (Dekkers et al., 1998). La persistance est aussi recherchée par les éleveurs caprins (Astruc et al., 2021). Ainsi, de nombreuses études essaient d'estimer l'héritabilité de la persistance dans un objectif d'indexation (vache laitière : 0,09-0,15 Cole et Null, 2009 ; Albarrán-Portillo et Pollott, 2013 ; brebis laitière : 0,11 Pollott et Gootwine, 2001 ; chèvre laitière : 0,10-0,17 Arnal et al., 2020). Cependant, la période de reproduction des chèvres est bien plus tardive (210 jours de lactation) par rapport à celle des vaches laitières (60-90 jours de lactation) ce qui a amené Arnal et al. (2020) à supposer un potentiel antagonisme entre réussite à l'IA et persistance de la PL. Les résultats de la thèse ont montré qu'il existait bien un antagonisme entre la réussite à l'IA et persistance de la PL : les chèvres présentant les lactations les plus persistantes

présentaient une moins bonne réussite à l'IA (60,7 % vs. 88,8 %). Par ailleurs, l'IA est le moyen pour diffuser le progrès génétique au sein d'une population. Cet antagonisme IA/persistance mis en parallèle de la recherche de la persistance par les éleveurs semble paradoxal et mériterait d'être discuté avec les généticiens et les éleveurs afin de définir les stratégies de sélection les plus adaptées à ces deux enjeux.

La sélection sur la persistance doit néanmoins s'accompagner d'une sélection sur la production par lactation afin de conserver des animaux productifs, priorité des éleveurs et enjeu d'avenir si l'on souhaite limiter les émissions de gaz à effet de serre par les ruminants.

1.3. Apports pour la conduite du troupeau

Le critère de persistance de la PL peut servir d'indicateur pour écarter certaines chèvres à l'IA. Ainsi, les chèvres présentant les lactations les plus persistantes qui investissent encore de l'énergie dans la PL au moment des IA pourraient être conduites en saillie naturelle (économisant ainsi le coût de l'IA) ou en lactation longues. La vitesse de reprise de PV autour de la reproduction ou le minimum de NEC sternale sont aussi intéressants pour écarter certaines chèvres de l'IA. Le PV ou la NEC peuvent être contraignants à mesurer sur un nombre élevé d'individus. Les éleveurs ou conseillers pourraient mettre en place des leviers pour ne pas devoir évaluer systématiquement le PV ou la NEC sur toutes chèvres mais en cibler certaines et ajuster l'alimentation. Aujourd'hui, les éleveurs ou les conseillers manquent de références quantitatives sur les effets de la PL, du PV et de la NEC sur la reproduction. Si nos résultats sur la dynamique de PV et le niveau NEC sur les performances de reproduction sont connus chez les ruminants (Buckley et al., 2003; Sejian et al., 2010), peu d'études ont été menées sur un nombre élevé de chèvres et sur une période aussi longue. Nos résultats seront diffusés aux conseillers et aux éleveurs lors de journées techniques et serviront à l'élaboration de fiches techniques pour la conduite de l'IA.

Les observations réalisées dans cette thèse supposent un relevé relativement fréquent des variables de production laitière (pour évaluer la persistance), note d'état corporel (pour évaluer la valeur minimale au cours de la lactation) et poids vif (pour évaluer le GMQ autour de la mise à la reproduction). Si 43 % des chèvres françaises sont au contrôle laitier (France Génétique Elevage, 2022), les mesures de note d'état et de poids vif sont loin d'être généralisées en ferme. Les observations réalisées dans cette thèse montrent l'intérêt de ces mesures et sont en faveur d'une automatisation du relevé de ces informations ce qui est envisageable avec l'évolution de l'élevage de précision.

Nos résultats ont également montré une diversité d'associations entre les trajectoires de PL, PV et NEC, traduisant une diversité de stratégies biologiques des chèvres laitières dans l'utilisation des réserves pour soutenir la production laitière. Si l'on considère que pour une même trajectoire de PL, il existe plusieurs trajectoires de NEC, cette diversité suggère une variabilité individuelle dans l'acquisition et la partition des ressources. Ce constat peut conduire à repenser la façon dont est gérée l'alimentation des chèvres. Il ne s'agirait plus de raisonner sur l'animal moyen mais plutôt d'adapter les conduites à cette diversité observée. Cela complexifie l'élaboration des tables d'alimentation et le conseil à apporter aux éleveurs mais serait plus précis et en faveur d'une gestion en lots adaptée sur d'autres critères (combinaison de critères sur la PL, PV, NEC, âge).

Le développement d'un modèle de démographie du troupeau qui intègre des trajectoires phénotypiques réelles de PL, présente une réelle opportunité pour le conseil en élevage. Cet outil est générique et peut s'appliquer à différents contextes d'élevages. Il serait pertinent de récupérer d'autres données pour calibrer le simulateur et le mettre à l'épreuve d'autres systèmes d'élevage caprins. Le modèle a montré des résultats cohérents et satisfaisants vis-à-vis de la station de MoSAR, mais c'est un outil encore en développement. Par exemple, les distributions des mises-bas simulées n'étaient pas complètement satisfaisantes vis-à-vis de la réalité. Le deuxième pic de mises-bas observé dans la réalité qui correspond aux primipares est confondu avec le premier pic de mises-bas simulé. Or, cette particularité de conduite n'a pas été considérée dans le simulateur mais, sera considérée dans l'avenir pour affiner cette distribution. Dans le simulateur, les IA ont lieu à dates fixes, mais dans la réalité il existe une variabilité dans les dates en fonction des années. De même, la proportion de chèvres mises à l'IA n'est pas toujours de 30 %. Introduire de la variabilité sur certains paramètres pourrait être pertinent pour mieux appréhender la réalité. Par ailleurs, le critère de réforme pourrait être amélioré par exemple en introduisant un critère sur la PL, sachant que c'est le premier critère de réforme volontaire en filière laitière. Ces modifications permettraient d'améliorer la capacité prédictive de ce simulateur. Le temps de simulation est relativement court ce qui en fait un outil potentiellement utilisable hors cadre de la recherche.

2. VALORISATION DE DEUX BASES DE DONNEES DE STATIONS EXPERIMENTALES CAPRINES EN FRANCE SUR UNE LONGUE PERIODE

2.1. Des données fréquentes qui permettent de bien décrire les dynamiques de production laitière et de mobilisation des réserves corporelles

Les données dans les deux stations étaient relativement fréquentes et disponibles depuis une longue période. La station du Pradel disposait de données hebdomadaires pour la PL et mensuelles pour le PV et la NEC sur la période 1996-2020. La station de MoSAR disposait quant à elle de données journalières pour la PL et le PV et mensuelles pour la NEC sur la période 2006-2022. Ces deux bases de données étaient donc pertinentes pour bien décrire les dynamiques de PL, de PV et de NEC et leurs relations.

De plus, les stations du Pradel et de MoSAR ont l'avantage d'avoir eu globalement les mêmes opérateurs pour renseigner les données, en particulier de NEC (1 personne pour la station du Pradel et 2 personnes pour la station de MoSAR sur l'ensemble des années étudiées). Le relevé des données dans les deux stations sur une longue période nous a permis d'avoir des animaux qui restent longtemps dans les élevages et donc de pouvoir analyser des carrières. La volonté de valoriser un outil de simulation pour une perspective d'utilisation sur le terrain, nous a contraints à dimensionner les analyses statistiques sur cette base de données. Ainsi, cette base de données construite pour la caractérisation des trajectoires mériterait d'être analysée sous d'autres angles pour aller plus loin dans la caractérisation des carrières.

2.2. Des performances de reproduction précises, mais uniquement sur les résultats à l'insémination artificielle

Durant la thèse, seule la réussite à l'IA a été considérée : d'une part, au Pradel, il n'était pas possible de calculer les résultats de fertilité en saillie naturelle (manque d'enregistrement du statut gestantes / non-gestantes des femelles vendues avant la mise-bas) et d'autre part, à MoSAR, les saillies naturelles sont faites en monte en main après traitement de synchronisation de l'œstrus. Cette pratique n'est pas représentative des pratiques en élevages commerciaux en France. Les échanges menés avec le personnel de la station du Pradel vont conduire à une attention plus grande portée à l'enregistrement des chèvres mises en SN. Dans les prochaines années, il est fortement probable que ces données soient disponibles et exploitables.

2.3. Des résultats qui reposent sur deux stations expérimentales caprines en France

Bien qu'un grand nombre de lactations individuelles aient été analysées, nos résultats ne sont le reflet que de deux troupeaux caprins, gérés dans des stations expérimentales. Ces deux stations ont ainsi une bonne conduite technique du troupeau (alimentation, reproduction, etc.) et des résultats de fertilité supérieurs à ceux observés à l'échelle nationale (en moyenne une réussite à l'IA dix points supérieurs aux résultats de 2022 de 58.7 %). Par exemple, les recommandations en termes de mises à la reproduction préconisent d'inséminer les chèvres entre 180 et 240 jours car en dehors la fertilité est diminuée. Dans nos deux systèmes d'élevages, les stades à l'IA étaient resserrés autour de 200-215 jours et peu de chèvres étaient inséminées à des stades extrêmes. Cette spécificité de la conduite en station expérimentale a permis de se soustraire de l'effet stade de lactation et d'identifier de façon plus précise le poids des covariables que sont la PL, le PV et la NEC. Par ailleurs, peu d'élevages commerciaux caprins en France disposent d'autant de données sur différents phénotypes. Si les données nationales du Service National d'Information Génétique (SNIG) disposent de données mensuelles de PL à partir desquelles il est possible de caractériser des trajectoires de PL, le PV et la NEC ne sont pas renseignés dans ces bases de données. Cependant, les deux systèmes se distinguent sur la conduite de l'alimentation.

En effet, la station de MoSAR est sur une ration complète mélangée avec des chèvres conduites uniquement en bâtiments alors qu'au Pradel, les chèvres pâturent 150 jours/an avec une ration en routine basée sur du foin de luzerne et des concentrés.

Dans notre étude, ces différences de conduite sont comprises dans l'effet élevage entré dans les modèles mais ne peuvent être analysées finement. Les méthodes utilisées permettent d'envisager des expérimentations comparant des conduites différentes à l'avenir (effet d'une conduite alimentaire sur la forme des courbes de lactation par exemple).

2.4. ... et qui nécessitent des données complémentaires pour mieux caractériser les interactions entre fonctions biologiques

Pour aller plus loin dans notre approche, certaines données nous ont manqué. Dans le **chapitre 2**, nous avons recherché s'il existait des associations entre les trajectoires phénotypiques de PL, PV et NEC, avec l'hypothèse sous-jacente que ces associations reflétaient différentes stratégies de partition d'énergie et d'utilisation des réserves corporelles. Nous n'avons pas mis en évidence d'association forte entre PL et NEC. Nous aurions pu approfondir ce résultat avec des données sur la qualité du lait (Taux Butyreux (TB), Taux Protéique (TP)), et ainsi mieux caractériser l'investissement énergétique dans la fonction de lactation. L'utilisation des données TP, TB, TB/TP permet d'évaluer en partie le déficit énergétique et la lipomobilisation. La mise en relation des trajectoires d'évolution des taux avec les trajectoires de NEC et de PV aurait peut-être révélé des associations plus fortes.

Malheureusement, les mesures de TB et TP n'étaient pas suffisamment fréquentes dans les deux stations et le nombre de lactations conservées pour les analyses aurait été très réduit. Par ailleurs, nous avons analysé la diversité d'enchaînement des trajectoires à l'échelle de la carrière complète de la femelle. La carrière démarre dès la naissance : un retard de croissance peut entraîner des conséquences sur la reproduction et les futures lactations (Wathes et al., 2014). Il aurait donc été intéressant de pouvoir s'appuyer sur des données de croissance des chevrettes. Dans le **chapitre 3**, nous avons exploré les relations entre PL, PV, NEC et performances de reproduction. Nous avons restreint l'analyse sur la réussite à l'IA pour les raisons évoquées précédemment (§2.2). Une analyse des relations avec les performances après mise à la reproduction en saillie naturelle serait à conduire celle-ci étant plus représentative de ce qui se fait sur le terrain.

3. DEVELOPPEMENT D'UNE CHAINE D'ANALYSE POUR CARACTERISER UNE DYNAMIQUE DE PHENOTYPES

Pour comprendre le phénotype complexe qu'est la robustesse, il est nécessaire d'avoir une approche multivariée, reposant sur l'analyse conjointe de plusieurs phénotypes reflétant différentes fonctions biologiques (lactation, gestion des réserves corporelles et reproduction). Un des enjeux était de trouver un bon compromis entre le nombre de phénotypes analysés et le nombre de chèvres conservé. En effet, la robustesse s'exprime sur du long terme ce qui implique d'avoir un nombre suffisant d'individus pour caractériser des carrières. L'exploration de la diversité des trajectoires phénotypiques pour révéler les stratégies individuelles des chèvres laitières a reposé sur la mise en œuvre d'une chaîne d'analyse originale avec (1) l'utilisation de modèles mathématiques pour caractériser des dynamiques de phénotypes, (2) la création d'indicateurs synthétiques qui résument les trajectoires, (3) l'utilisation de méthodes statistiques pour explorer cette diversité et (4) la valorisation des trajectoires dans un modèle de démographie du troupeau. Plusieurs challenges méthodologiques ont été relevés et peuvent donner lieu à des améliorations.

3.1. Des modèles adaptés à une hétérogénéité des fréquences pour établir les dynamiques de phénotypes

En raison de l'hétérogénéité de fréquences de mesures dans les deux stations, l'utilisation des modèles avait pour but de reconstituer une trajectoire de phénotypes et d'utiliser les paramètres de modèles comme variables synthétiques des trajectoires pour caractériser des types de trajectoires phénotypiques. Ainsi, nous avons voulu utiliser les mêmes modèles dans les deux stations : modèle de perturbation de courbe de lactation pour la PL (PLM, Ben Abdelkrim et al., 2021a) et modèle de Grossman et al. (1999) pour le PV et la NEC. Si le modèle PLM montrait une bonne qualité d'ajustement aux données journalières et hebdomadaires de PL, ce n'était pas le cas pour les modèles utilisés sur les données de PV et de NEC. Le modèle de Grossman et al. (1999), initialement créé par les auteurs pour caractériser une courbe de lactation avec peu de mesures, est apparu pertinent pour les données mensuelles de PV (Le Pradel) et de NEC (Le Pradel et MoSAR). Cependant, ce modèle montrait une mauvaise qualité d'ajustement pour des données journalières de PV (MoSAR), d'où l'utilisation d'un autre modèle (Martin et Ben Abdelkrim, 2019). L'utilisation de modèles adaptés à la fréquence des données nous a empêchés d'utiliser directement les paramètres issus des modèles comme variables qui résument les trajectoires. Ainsi, la création de nouveaux indicateurs synthétiques a été nécessaire pour s'affranchir de cette contrainte.

3.2. Pour analyser cette dynamique, des indicateurs synthétiques ont été choisis

Pour caractériser des types de trajectoires de PL, de PV et de NEC, des indicateurs synthétiques ont été calculés pour résumer l'information contenue dans les trajectoires modélisées. Un certain nombre de travaux menés sur la courbe de lactation révèlent des indicateurs communs qui la résument comme : la PL au pic, le moment du pic par rapport à la mise bas, la PL cumulée sur 305 jours (chez la vache), la persistance (Wood, 1967; Dhanoa, 1981; Wilmink, 1987). Comme les fréquences de PV et de NEC sont plus faibles, des indicateurs synthétiques plus simples ont été calculés pour caractériser les trajectoires. Il est possible que ces indicateurs soient moins informatifs que les indicateurs de PL. De plus, il est pertinent de se demander si la NEC et le PV sont des bons indicateurs des réserves corporelles. Le PV, mesure accessible en élevage par la pesée ne reflète pas complètement les réserves corporelles du fait des évolutions du contenu digestif des animaux, mais aussi de la croissance des chèvres. De plus, la NEC est une mesure subjective des réserves corporelles très dépendante de l'opérateur. Mais elle reste encore aujourd'hui la mesure la plus fiable (Lerch et al., 2021). Avec le développement de l'élevage de précision et de l'intelligence artificielle, il est probable qu'on accède dans les prochaines années à des mesures fiables et objectives des réserves corporelles pour les animaux d'élevage.

Une piste d'amélioration de l'approche serait de considérer les paramètres de modèles comme indicateurs synthétiques. Cette nécessité, de créer de nouveaux indicateurs venait de l'hétérogénéité de fréquences entre les stations. Collecter des données dans d'autres stations expérimentales qui ont des données de PL ou de PV avec des fréquences proches de la station de MoSAR ou du Pradel (ex : les stations expérimentales caprines INRAE de Bourges ou Patuchev (Unité Expérimentale Ferlus, Lusignan)) permettrait l'utilisation de modèles communs entre tous ces sites. Les paramètres issus des modèles seraient alors les variables d'entrée pour caractériser des clusters de trajectoires.

3.3. Les méthodes statistiques pour analyser la diversité des trajectoires phénotypiques

À l'échelle de la lactation, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) pour caractériser les clusters de PL, PV et de NEC. Cette approche peut avoir des limites, car la caractérisation des clusters est dépendante des variables d'entrée et de la taille de l'échantillon. Avec cette approche, les trajectoires ont été caractérisées séparément, c'est-à-dire phénotype par phénotype, ce qui diffère de l'approche réalisée par Ollion et al. (2016) qui ont analysé conjointement la dynamique de PL et de NEC en lien avec les performances de reproduction. Ce type d'approche n'a pas été retenu dans nos travaux, car l'analyse conjointe des phénotypes n'a montré aucun résultat pertinent sur les relations entre les différentes trajectoires en rendant l'interprétation impossible.

Par ailleurs, pour des approches plus génétiques des trajectoires, des méthodes type « random regression » pourraient être mobilisées, pour estimer des valeurs génétiques de certains caractères comme la persistance (Arnal et al., 2020). Il est possible d'envisager d'utiliser des ACP fonctionnelles sur les données pour caractériser les différentes trajectoires phénotypiques (Arnal et al., 2018). Il serait donc intéressant de refaire ces analyses avec ces différents types d'approches pour évaluer les différences, la qualité d'ajustement et la rapidité de calcul.

Pour évaluer la réussite à l'IA en fonction des trajectoires phénotypiques à l'échelle d'une lactation, le choix d'utiliser des modèles mixtes de régressions logistiques a été fait. Ce type de modèle est pertinent pour analyser des variables binaires (0 ou 1) et explorer des variables potentiellement explicatives d'échecs de reproduction. Cette méthode est souvent employée pour analyser des variables de reproduction (Buckley et al., 2003; Grimard et al., 2006; Freret et al., 2018). Dans cette thèse, ce type de modèle avait pour but d'expliquer des échecs à l'IA à l'aide de différentes variables reliées aux trajectoires phénotypiques. Ces modèles peuvent avoir aussi un potentiel prédictif. Avec plus de données issues d'autres fermes, il serait intéressant de tester le potentiel prédictif de la régression logistique sachant qu'elle a déjà montré son efficacité prédictive chez la vache laitière comparée à d'autres types de modèles (Hempstalk et al., 2015).

Dans le cadre de l'approche carrière, une première analyse a consisté à examiner le pourcentage de chèvres réformées en fonction des clusters de production laitière, de poids vif et de NEC. Cette analyse n'a pas mis en évidence de clusters présentant un risque accru de réforme, les proportions de chèvres réformées étant globalement similaires entre les clusters. Par conséquent, une deuxième approche a été adoptée, consistant à étudier les transitions entre clusters pour les chèvres qui restent dans le troupeau d'une parité à l'autre. L'unité statistique de nos travaux était la lactation, mais toute la carrière de la chèvre aurait pu initialement être considérée dans des approches plus complexes impliquant des algorithmes de « machine learning ». Ces derniers auraient servi à déterminer des schémas de carrière divers et peut-être d'identifier des profils de chèvres susceptibles d'avoir une longue carrière productive.

3.4. Un modèle troupeau intégrant l'information sur les trajectoires modélisées

On peut classiquement opposer les modèles d'intégration de connaissance (avec un grain plus ou moins fin de représentation des mécanismes sous-jacents) aux modèles d'interprétation des données (qui transforment les données brutes en information synthétique). Le présent simulateur relève d'une forme hybride entre ces deux approches dans la mesure où il intègre à la fois une représentation à l'échelle des individus de mécanismes biologiques et de pratiques d'élevage, et une exploitation directe de données observées. Ce type de modèle troupeau peut être comparé au modèle développé par Ezanno, (2005) dont l'objectif était d'évaluer l'impact d'un

changement de NEC via un changement dans la ration sur les performances productives et reproductives d'un troupeau bovin tropical. Ce modèle manipule des matrices contenant des probabilités de transition entre classes d'âge et de NEC. En manipulant les probabilités de transitions de classes, il a été possible de quantifier les effets sur les performances et la démographie du troupeau.

Notre modèle permet d'aller plus loin dans la représentation biologique des individus en intégrant directement toute la trajectoire d'un phénotype (ici la PL) au cours d'une succession de cycles de production.

Les méthodes présentées sont génériques et peuvent être étendues à d'autres élevages ou même à d'autres espèces (ex : vaches laitières en stations expérimentales).

4. À L'ISSUE DE LA THESE : QUELLES SONT LES PERSPECTIVES DE RECHERCHES ?

La chaîne d'analyse construite au cours de cette thèse pourra servir à répondre aux prochaines questions de recherches. Après la thèse, cette chaîne d'analyse sera mise entièrement à disposition dans le cadre de la science ouverte et de la reproductibilité de la recherche.

Dans cette thèse, les interactions entre lactation, gestion des réserves corporelles et réussite à l'IA ont été considérées. En général, la fertilité à l'IA est plutôt bonne si les éleveurs respectent les recommandations émises par le Groupe Reproduction Caprine (GRC) (idele.fr/detail-dossier/les-fiches-techniques-du-grc). En revanche, des questions de recherches subsistent sur les relations entre les trajectoires phénotypiques et **la réussite en saillie naturelle**. La fertilité en SN sur une saison de reproduction (plusieurs cycles) est très bonne (entre 80-90 % de réussites) mais lorsque le bouc est introduit dans les cases pour saillir les femelles, celui-ci peut y rester plusieurs semaines. En définitive, les résultats sont très bons, mais certaines femelles ont potentiellement été fécondées plus rapidement que d'autres (réussite sur le 1^{er} cycle ou non) impactant ainsi la reproduction de la lactation suivante (intervalle mise-bas / IA plus court) ainsi que la conduite des animaux en lot homogène de même stade (chevrette ou chèvre en production). Il pourrait être intéressant de mener le même type d'analyse que nous avons proposé avec l'IA pour comprendre les relations entre les trajectoires phénotypiques et la rapidité de fécondation en SN. Durant leur lactation, certaines chèvres ont deux opportunités d'être fécondées : après IA et après SN. D'autres sont mises à la reproduction uniquement en SN. C'est donc la gestion des retours en SN après IA ou SN seules qui est essentielle pour grouper au mieux les mises-bas et éviter des étalements trop importants. Ces étalements de mises-bas et donc de stades de lactation peuvent entraîner des conséquences sur la gestion de l'alimentation dans le troupeau qui s'effectue en lots. Ils ont aussi un effet sur les performances de reproduction l'année suivante puisque les chèvres ne sont pas toutes au même stade de lactation au moment des saillies.

Depuis les dix dernières années, de nombreux auteurs s'interrogent sur les méthodes

les plus pertinentes pour **évaluer la robustesse en élevage** (Blanc et al., 2013; Friggens et al., 2017). S'il existe une diversité de définitions de la robustesse, ces auteurs s'accordent sur le fait que c'est un trait complexe qui nécessite de tenir compte de tout le système biologique et donc des interactions entre les fonctions. Ces interactions doivent être analysées au regard d'éventuelles perturbations environnementales. L'environnement dans lequel sont élevés les chèvres est ce qui va en partie conditionner leur capacité à produire et se reproduire sur plusieurs cycles. Des périodes où l'alimentation peut être moins disponible peuvent changer les arbitrages entre fonctions (Friggens, 2003). De même, l'exposition à des pathogènes peut entraîner des réformes précoces et donc diminuer la longévité des animaux. Des périodes d'exposition au stress thermique peuvent avoir des conséquences sur la PL et les performances de reproduction (Adjassin et al., 2022). Un environnement peu perturbé peut permettre d'avoir une longévité élevée même pour des animaux avec une faible robustesse (Friggens et al., 2017). Cet environnement est donc essentiel à considérer pour comprendre les interactions entre les fonctions biologiques et mieux caractériser les animaux les plus robustes (les mieux à même de poursuivre leur carrière dans des environnements perturbés).

Sur les deux stations, les informations nécessaires pour intégrer la qualité de l'environnement (diversité des rations, environnement climatique dans le bâtiment, cahier sanitaire, etc.) n'étaient pas disponibles. Cependant, pour **voir l'effet de l'environnement** sur la PL ou le PV, il est nécessaire d'avoir une fréquence élevée d'informations pour capter d'éventuelles perturbations. Or du fait de l'hétérogénéité des fréquences, la précision de l'estimation des perturbations n'est pas la même. Dans l'avenir, grâce au développement d'outils numériques et de l'élevage de précisions, l'accès aux données d'environnement deviendra de plus en plus accessible en élevage (Friggens et al., 2017). En raison d'une période de reproduction au mois d'août dans les deux systèmes d'élevage, des données climatiques provenant de stations météorologiques proches (bases de données SAFRAN) ont été considérées dans l'analyse de la réussite à l'IA. Le stress thermique évalué par le THI (Temperature Humidity Index) n'a pas eu d'effet sur les performances de nos chèvres. Le seuil utilisé pour considérer le stress thermique est celui communément admis chez la vache laitière. Il est possible que les caprins soient plus résistants au stress thermique que les bovins. Cependant, nous n'avons pas exploré dans cette thèse l'effet de la température sur les trajectoires de PL, NEC et PV. En revanche, dans le cadre d'un stage de M2 que j'ai co-encadré, nous avons regardé l'effet du stress thermique sur d'éventuelles perturbations de la courbe de lactation et nous avons observé des effets du stress thermique sur certains paramètres de perturbation. Avec des données fréquentes de PL et de PV comme pour station de MoSAR et les modèles utilisés, il peut être possible de déterminer des perturbations de PL et de PV. L'étude menée par Ben Abdelkrim et al. (2021b) a montré qu'il existait des perturbations communes entre le PV et la PL à l'échelle d'une lactation chez la vache laitière. Identifier des perturbations peut permettre de cibler des animaux capables de faire face à des chocs sur le court terme et d'être capables de revenir à un état initial plus rapidement (Friggens et al., 2017).

Une nouvelle approche pourrait être de considérer des paramètres de perturbations de PL et de PV comme variables d'entrées pour du clustering afin d'identifier des profils de chèvres perturbés susceptibles d'avoir des effets sur la fertilité. On peut supposer que des perturbations à court terme peuvent diminuer la production laitière et/ou la fertilité et donc la longévité de la chèvre.

Si l'environnement peut expliquer la diversité des trajectoires observées et des associations entre fonctions, il serait intéressant de voir l'apport de l'animal et donc de sa génétique dans l'élaboration de la robustesse. Avec le suivi généalogique des troupeaux de nos deux stations, il pourrait être intéressant de faire une évaluation génétique des trajectoires phénotypiques. Ces trajectoires phénotypiques ont un potentiel de sélection qui a été démontré pour les dynamiques de PV et de NEC sur 1 116 brebis allaitantes (Macé et al., 2018).

La robustesse a une composante temporelle puisqu'elle peut évoluer dans le temps (Blanc et al., 2013; Friggens et al., 2017). Nous avons fait du clustering sur des trajectoires à l'échelle d'une lactation, mais on peut envisager le même type d'approche sur la carrière de la chèvre. **La caractérisation des perturbations pourrait également se faire à l'échelle de la carrière.** Il pourrait être intéressant d'explorer s'il existe une certaine répétabilité des perturbations de PL ou de PV sur plusieurs lactations en lien avec l'environnement ou des facteurs de conduite d'élevage. L'exposition à des perturbations répétées pourrait affecter la robustesse des animaux. Ces approches pourraient ainsi servir à trouver des profils de chèvres « robustes », d'élaborer des indicateurs suffisamment précoces dans la vie de la chèvre pour évaluer sa robustesse. Enfin, il sera nécessaire d'avoir à disposition des informations sur les causes de réformes pour ne pas biaiser cette analyse.

CONCLUSION GENERALE

Ma thèse s'inscrit dans le projet plus large de l'UMR MoSAR, autour de la robustesse des ruminants, et dans celui de l'UMT SC3D autour des conduites d'élevage innovantes pour répondre aux enjeux de la filière (axe 3). L'objectif de ma thèse était de comprendre les interactions entre la lactation, la gestion des réserves corporelles et la réussite à la reproduction chez la chèvre laitière par une approche de modélisation de trajectoires phénotypiques. Cette analyse a reposé sur les données issues de deux stations expérimentales caprines, disposant de données de PL, PV et de NEC sur une longue période.

Dans un premier temps, nous avons modélisé les trajectoires phénotypiques de PL, PV et de NEC puis nous avons analysé la diversité ces trajectoires à l'échelle d'une lactation et de la carrière. **L'analyse de la variabilité des trajectoires a montré qu'il existait une diversité d'associations entre les trajectoires, suggérant une diversité de profils d'acquisition et de partition d'énergie entre les différentes fonctions biologiques.** Ces résultats peuvent amener à repenser la gestion de l'alimentation au lot en adoptant une conduite adaptée à cette variabilité observée.

La capacité d'une femelle laitière à enchaîner des cycles de production repose en partie sur sa capacité à se reproduire. Ainsi dans un deuxième temps, les relations entre trajectoires phénotypiques et performances de reproduction (réussite à l'IA) ont été explorées. La dynamique de PL sur l'ensemble de la lactation et la dynamique de PV autour de l'IA étaient plus explicatives d'échecs à l'IA que les niveaux de PL et de PV. **Ainsi les chèvres les plus persistantes ou ayant une plus faible reprise de PV avaient moins de chances de réussir à l'IA.** Par ailleurs, le niveau le plus bas au cours de la lactation de NEC sternale était plus explicatif d'échecs à l'IA que la dynamique de NEC. **Ainsi, les chèvres les plus maigres avaient moins de chances de réussir à l'IA.** Ces résultats menés sur un nombre élevé de chèvres et sur une longue période offrent des perspectives pour le conseil en élevage et la conduite du troupeau.

Dans une dernière partie de la thèse, une partie des précédents résultats ont été considérés dans un modèle de démographie du troupeau caprin. Ce modèle troupeau, encore en voie de développement, est un outil intéressant pour le conseil en élevage. **Ce modèle individu-centré permet de simuler sur le long terme, l'impact du succès à l'IA sur les performances du troupeau en se basant sur les trajectoires de PL réellement observées en ferme.** En conclusion, l'approche mise en œuvre dans cette thèse qui combine différents outils (modèles dynamiques, analyses statistiques, modèle individu-centré de démographie de troupeau) avec des données longitudinales de PL, de PV et de NEC, constitue une avancée pour aborder la question de la robustesse et la gestion des carrières.

REFERENCES

- Adjassin JS, Assani AS, Bani AA, Sanni Worogo HS, Adégbeïga Alabi CD, Comlan Assogba BG, et al. Impact of heat stress on reproductive performances in dairy goats under tropical sub-humid environment. *Heliyon* 2022;8:e08971. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08971>.
- Adriaens I, Friggens NC, Ouweltjes W, Scott H, Aernouts B, Statham J. Productive life span and resilience rank can be predicted from on-farm first-parity sensor time series but not using a common equation across farms. *J Dairy Sci* 2020;103:7155–71. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17826>.
- Adriaens I, van den Brulle I, D'Anvers L, Statham JME, Geerinckx K, De Vliegher S, et al. Milk losses and dynamics during perturbations in dairy cows differ with parity and lactation stage. *J Dairy Sci* 2021;104:405–18. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19195>.
- Albarrán-Portillo B, Pollott GE. The relationship between fertility and lactation characteristics in Holstein cows on United Kingdom commercial dairy farms. *J Dairy Sci* 2013;96:635–46. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5632>.
- Alvarado A V., Alvarado AS, Arellano F, Véliz F, De Santiago Á, Contreras V, et al. Body condition score and serum metabolites and minerals concentrations as indicators of ovarian activity and pregnancy success in goats on rangeland. *Spanish J Agric Res* 2022;20:e0404. <https://doi.org/10.5424/sjar/2022204-19737>.
- Armstrong DG, Gong JG, Webb R. Interactions between nutrition and ovarian activity in cattle: physiological, cellular and molecular mechanisms. *Reprod Suppl* 2003;61:403–14. <https://doi.org/10.1530/biosciproc.5.030>.
- Arnal M, Larroque H, Leclerc H, Ducrocq V, Robert-Granié C. Estimation of genetic parameters for dairy traits and somatic cell score in the first 3 parities using a random regression test-day model in French Alpine goats. *J Dairy Sci* 2020;103:4517–31. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17465>.
- Arnal M, Palhière I, Clement V. 738. Maturity, a new indicator to improve longevity of Saanen dairy goats in France 2022:3042–5. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-940-4_738.
- Arnal M, Robert-Granié C, Larroque H. Diversity of dairy goat lactation curves in France. *J Dairy Sci* 2018;101:11040–51. <https://doi.org/10.3168/JDS.2018-14980>.
- Arrebola F, González O, Torres R, Abecia J-A. Artificial insemination in Payoya goats: factors affecting fertility. *Anim Prod Sci* 2014;54:356. <https://doi.org/10.1071/AN13138>.

Astruc J-M, de Boissieu C, Buisson D, Clément V, De Crémoux R, Doucet M, et al. RUSTIC - Vers une approche intégrée de la robustesse des petits ruminants. *Innovations Agronomiques*, 2021, 82, pp.369-396. (10.15454/3c2s-aw55). (hal-03156026) <https://inria.hal.science/hal-03156026/>

Bauman DE, Bruce Currie W. Partitioning of Nutrients During Pregnancy and Lactation: A Review of Mechanisms Involving Homeostasis and Homeorhesis. *J Dairy Sci* 1980;63:1514–29. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(80\)83111-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(80)83111-0).

Bauman DE. Regulation of nutrient partitioning during lactation: homeostasis and homeorhesis revisited. *Rumin Physiol Dig Metab Growth Reprod* 2000:311–28. <https://doi.org/10.1079/9780851994635.0311>.

Bedere N, Cutullic E, Delaby L, Garcia-Launay F, Disenhaus C. Meta-analysis of the relationships between reproduction, milk yield and body condition score in dairy cows. *Livest Sci* 2018;210:73–84. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.01.017>.

Ben Abdelkrim A, Puillet L, Gomes P, Martin O. Lactation curve model with explicit representation of perturbations as a phenotyping tool for dairy livestock precision farming. *Animal* 2021a;15:100074. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100074>.

Ben Abdelkrim A, Tribout T, Martin O, Boichard D, Ducrocq V, Friggens NC. Exploring simultaneous perturbation profiles in milk yield and body weight reveals a diversity of animal responses and new opportunities to identify resilience proxies. *J Dairy Sci* 2021b;104:459–70. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18537>.

Berry DP, Buckley F, Dillon P, Evans RD, Rath M, Veerkamp RF. Estimation of genotype×environment interactions, in a grass-based system, for milk yield, body condition score, and body weight using random regression models. *Livest Prod Sci* 2003;83:191–203. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00098-8).

Bidan F, Bluet B, Bossis N, Arnal M, Clément V, Legris M, et al. Les lactations longues en élevage caprin Les éléments-clés pour les maîtriser. 2024.

Bidan F, De Crémoux R, Legris M, Bluet B, Clement V, Arnal M. Caractérisation des courbes de production des chèvres en lactation longue Characterization of production curves of extended lactation goats. *Rencontres Recherches Ruminants* 2022; 26 :543.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P, Chilliard Y. Adaptive abilities of the females and sustainability of ruminant livestock systems. A review. *Anim Res* 2006;55:489–510. <https://doi.org/10.1051/animres:2006040>.

Blanc F, Ollion E, Puillet L, Delaby L, Ingrand S, Tichit M, et al. Principles for a quantitative evaluation of robustness at the animal and herd levels. *Proc 20th Rencontres Recherches Ruminants* 2013;20:265–72.

Bossis N, Legarto J, Guinamard C. Inventory of fixtures of food autonomy in French goat herds. *Rencontres Recherches Ruminants* 2014;21:86550.

Branca A. Effet de l'état corporel sur différents paramètres reproductifs chez la chèvre Sarde après insémination artificielle. In : Ben Salem H. (ed.), Nefzaoui A. (ed.), Morand-Fehr P. (ed.). *Nutrition and feeding strategies of sheep and goats under harsh climates*. Zaragoza : CIHEAM, 2004. p. 73-77. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 59). 9. Seminar of the Sub-Network on Nutrition of the FAO-CIHEAM Inter-Regional Cooperative Research and Development Network on Sheep and Goats, 2001/11/08-10, Hammamet (Tunisia). <http://om.ciheam.org/om/pdf/a59/04600010.pdf>.

Britt JH. Impacts of Early Postpartum Metabolism on Follicular Development and Fertility. *Am Assoc Bov Pract Conf Proc* 1992:39-43. <https://doi.org/10.21423/aabppro19916706>.

Brunschwig P, Devun J. L'autonomie alimentaire des troupeaux bovins en France: état des lieux et perspectives 2012:1-2.

Buckley F, O'Sullivan K, Mee JF, Evans RD, Dillon P. Relationships among milk yield, body condition, cow weight, and reproduction in spring-calved Holstein-Friesians. *J Dairy Sci* 2003;86:2308-19. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(03\)73823-5](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(03)73823-5).

Butler WR, Smith RD. Interrelationships Between Energy Balance and Postpartum Reproductive Function in Dairy Cattle. *J Dairy Sci* 1989;72:767-83. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79169-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79169-4).

Butler WR. Energy balance relationships with follicular development ovulation and fertility in postpartum dairy cows. *Livest Prod Sci* 2003;83:211-8. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00112-X).

Butler WR. Nutritional interactions with reproductive performance in dairy cattle. *Anim Reprod Sci* 2000;60-61:449-57. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(00)00076-2).

Castañeda-Bustos VJ, Montaldo HH, Valencia-Posadas M, Shepard L, Pérez-Elizalde S, Hernández-Mendo O, et al. Linear and nonlinear genetic relationships between type traits and productive life in US dairy goats. *J Dairy Sci* 2017;100:1232-45. <https://doi.org/10.3168/JDS.2016-11313>.

Chagas LM, Bass JJ, Blache D, Burke CR, Kay JK, Lindsay DR, et al. Invited review: New perspectives on the roles of nutrition and metabolic priorities in the subfertility of high-producing dairy cows. *J Dairy Sci* 2007;90:4022-32. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-852>.

Chanvallon A, de Crémoux R, Piacere A, Ribaud D. Evolution de la fertilité à l'IA chez les chèvres de 2004 à 2010 Evolution of AI fertility in dairy goats from 2004 to 2010 2013;75595. *Rencontres Recherches Ruminants* 2013;20.

Chemineau P, Delgadillo J. Reproductive neuroendocrinology in the caprine species. *Prod Anim INRA* 1994;7:315–26.

Chemineau P, Malpoux B, Brillard JP, Fostier A. Saisonnalité de la reproduction et de la production chez les poissons, oiseaux et mammifères d'élevage. *Prod Anim* 2009;22:77–90. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.2.3336>.

Chemineau P, Malpoux B, Delgadillo JA, Guérin Y, Ravault JP, Thimonier J, et al. Control of sheep and goat reproduction: Use of light and melatonin. *Anim Reprod Sci* 1992;30:157–84. [https://doi.org/10.1016/0378-4320\(92\)90010-B](https://doi.org/10.1016/0378-4320(92)90010-B).

Chemineau P. Maîtrise de la reproduction des mammifères d'élevage. *Prod Anim* 1996;9:5–15. <https://productions-animales.org/article/view/4079>

Cobby JM, Le Du YLP. On fitting curves to lactation data. *Anim Prod* 1978;26:127–33. <https://doi.org/10.1017/S0003356100039532>.

Cole JB, Null DJ. Genetic evaluation of lactation persistency for five breeds of dairy cattle. *J Dairy Sci* 2009;92:2248–58. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1825>.

Contreras-Jodar A, Salama AAK, Hamzaoui S, Vailati-Riboni M, Caja G, Loor JJ. Effects of chronic heat stress on lactational performance and the transcriptomic profile of blood cells in lactating dairy goats. *J Dairy Res* 2018;85:423–30. <https://doi.org/10.1017/S0022029918000705>.

Cutullic E, Delaby L, Gallard Y, Disenhaus C. L'effet de la stratégie d'alimentation sur la reproduction des vaches laitières varie selon la race et les différentes phases du cycle de reproduction. *Rencontres Recherches Ruminants* 2010;17:149–52.

Cutullic E, Delaby L, Gallard Y, Disenhaus C. Towards a better understanding of the respective effects of milk yield and body condition dynamics on reproduction in Holstein dairy cows. *Animal*, vol. 6, Elsevier; 2012, p. 476–87. <https://doi.org/10.1017/S175173111100173X>.

Das R, Sailo L, Verma N, Bharti P, Saikia J, Imtiwati, et al. Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Vet World* 2016;9:260–8. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.260-268>.

De Crémoux R, Legris M, Clément V. Evaluation of careers and performances of goats with extended lactations. *Small Rumin Res* 2024;231. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2024.107198>.

De Santiago-Miramontes MA, Malpaux B, Delgadillo JA. Body condition is associated with a shorter breeding season and reduced ovulation rate in subtropical goats. *Anim Reprod Sci* 2009;114:175–82. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2008.09.001>.

De Santiago-Miramontes MA, Rivas-Muñoz R, Muñoz-Gutiérrez M, Malpaux B, Scaramuzzi RJ, Delgadillo JA. The ovulation rate in anoestrous female goats managed under grazing conditions and exposed to the male effect is increased by nutritional supplementation. *Anim Reprod Sci* 2008;105:409–16. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.11.008>.

De Vries A, Marcondes MI. Review: Overview of factors affecting productive lifespan of dairy cows. *Animal* 2020;14:s155–64. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003264>.

Dekkers JCM, Ten Hag JH, Weersink A. Economic aspects of persistency of lactation in dairy cattle. *Livest Prod Sci* 1998;53:237–52. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(97\)00124-3](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(97)00124-3).

Delgado-Pertíñez M, Guzmán-Guerrero JL, Caravaca FP, Castel JM, Ruiz FA, González-Redondo P, et al. Effect of artificial vs. natural rearing on milk yield, kid growth and cost in Payoya autochthonous dairy goats. *Small Rumin Res* 2009;84:108–15. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.06.014>.

Dhanao MS. A note on an alternative form of the lactation model of Wood. *Anim Prod* 1981;32:349–51. <https://doi.org/10.1017/S0003356100027276>.

Dijkstra J, France J, Dhanao MS, Maas JA, Hanigan MD, Rook AJ, et al. A Model to Describe Growth Patterns of the Mammary Gland during Pregnancy and Lactation. *J Dairy Sci* 1997;80:2340–54. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76185-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X).

Disenhaus C, Kerbrat S, Philipot JM. La production laitière des 3 premières semaines est négativement associée avec la normalité de la cyclicité chez la vache laitière. *Rencontres Recherches Ruminants* 2002;9:147–50.

Diskin MG, Mackey DR, Roche JF, Sreenan JM. Effects of nutrition and metabolic status on circulating hormones and ovarian follicle development in cattle. *Anim Reprod Sci* 2003;78:345–70. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(03\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(03)00099-X).

Diskin MG, Morris DG. Embryonic and Early Foetal Losses in Cattle and Other Ruminants. *Reprod Domest Anim* 2008;43:260–7. <https://doi.org/10.1111/J.1439-0531.2008.01171.X>.

Dubois P, Freret S, Charbonnier G, Humblot P, Ponsart C. Influence des paramètres laitiers sur la régularité de cyclicité post-partum et les performances de reproduction en race Prim' Holstein. *Rencontres Recherches Ruminants* 2006;13.

Ducrocq V, Quaas RL, Pollak EJ, Casella G. Length of Productive Life of Dairy Cows. 2. Variance Component Estimation and Sire Evaluation. *J Dairy Sci* 1988;71:3071–9. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79907-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79907-5).

Dumont B, Puillet L, Martin G, Savietto D, Aubin J, Ingrand S, et al. Incorporating Diversity Into Animal Production Systems Can Increase Their Performance and Strengthen Their Resilience. *Front Sustain Food Syst* 2020;4:1–15. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>.

Eliance. Rapport d'activité 2023.

Ezanno P. 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. *Ecol Modell* 2005;188:470–82. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.02.016>.

Fatet A, LeBoeuf B, Freret S, Druxart X, Bodin L, Caillat H, et al. L'insémination dans les filières ovines et caprines. *Rencontres Recherches Ruminants* 2008;15:355–8.

Fatet A, Pellicer-Rubio MT, Leboeuf B. Reproductive cycle of goats. *Anim Reprod Sci* 2011;124:211–9. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.08.029>.

Fidelle F, Arranz JM, Landagaray F, Sallato O, Mendez HI, Soulas C, et al. Un partenariat technique avec les éleveurs de brebis laitières dans les Pyrénées Atlantiques pour adapter les pratiques et réussir l'insémination animale A technical partnership with dairy sheep breeders to adapt practices and improve fertility after artificial insemination in the Pyrénées Atlantiques. *Rencontres Recherches Ruminants* 2015; 22 :203–6.

Forcada F, Abecia JA, Sierra I. Seasonal changes in oestrus activity and ovulation rate in Rasa Aragonesa ewes maintained at two different body condition levels. *Small Rumin Res* 1992;8:313–24. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(92\)90212-M](https://doi.org/10.1016/0921-4488(92)90212-M).

Forsythe WC, Rykiel EJ, Stahl RS, Wu H i., Schoolfield RM. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecol Modell* 1995;80:87–95. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00034-F](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00034-F).

Foster DL, Yellon SM, Olster DH. Internal and external determinants of the timing of puberty in the female. *J Reprod Fertil* 1985;75:327–44. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0750327>.

France Génétique Elevage. Dispositif Génétique Chiffres clés Ruminants, 2022.

Freret S, Salvetti P, Gatien J, Humblot P, Ponsart C. Facteurs de variation de la fertilité en première IA chez les vaches Prim'Holstein. *Rencontres Recherches Ruminants* 2011;18.

Freret S, Philippe P, Brun T, Legarto J, Clement V, Bidan F, et al. Facteurs de variation de la fertilité après insémination animale et lors des retours en chaleurs chez la chèvre : caractéristiques individuelles , production laitière et conduite alimentaire. Factors influencing fertility after artificial insemination and natural services in goats : individual characteristics, milk production and feeding strategy. *Rencontres Recherches Ruminants* 2018:393–6.

Friggens NC, Emmans GC, Veerkamp RF. On the use of simple ratios between lactation curve coefficients to describe parity effects on milk production a. vol. 62. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00110-4](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00110-4).

Friggens NC. Body lipid reserves and the reproductive cycle: towards a better understanding. *Livest Prod Sci* 2003;83:219–36. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00111-8](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00111-8).

Friggens NC, Berg P, Theilgaard P, Korsgaard IR, Ingvarsen KL, Løvendahl P, et al. Breed and parity effects on energy balance profiles through lactation: evidence of genetically driven body energy change. *J Dairy Sci* 2007;90:5291–305. <https://doi.org/10.3168/JDS.2007-0173>.

Friggens NC, Disenhaus C, Petit H V. Nutritional sub-fertility in the dairy cow: towards improved reproductive management through a better biological understanding. *Animal* 2010;4:1197–213. <https://doi.org/10.1017/S1751731109991601>.

Friggens NC, Blanc F, Berry DP, Puillet L. Review: Deciphering animal robustness. A synthesis to facilitate its use in livestock breeding and management. *Animal* 2017;11:2237–51. <https://doi.org/10.1017/S175173111700088X>.

Furstoss V, David I, Fatet A, Boissard K, Clément V, Bodin L. Genetic and non-genetic factors related to the success of artificial insemination in dairy goats. *Animal* 2015;9:1935–42. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001500>.

Gafsi N, Martin O, Bidan F, Grimard B, Puillet L. Diversity of performance patterns in dairy goats: multi-scale analysis of milk yield, body condition score and body weight trajectories 2024. <https://doi.org/doi/10.57745/C1XPQ2>.

Gafsi N, Martin O, Bidan F, Grimard B, Puillet L. Diversity of performance patterns in dairy goats: multi-scale analysis of milk yield, body condition score and body weight trajectories_Data_and_R_code 2023. <https://doi.org/doi/10.57745/C1XPQ2>.

Gallego-Calvo L, Gatica MC, Guzmán JL, Zarazaga LA. Role of body condition score and body weight in the control of seasonal reproduction in Blanca Andaluza goats. *Anim Reprod Sci* 2014;151:157–63. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.10.011>.

Garnsworthy PC, Topps JH. The effect of body condition of dairy cows at calving on their food intake and performance when given complete diets. *Anim Prod* 1982;35:113–9. <https://doi.org/10.1017/S0003356100000878>.

Garnsworthy PC, Jones GP. The influence of body condition at calving and dietary protein supply on voluntary food intake and performance in dairy cows. *Anim Prod* 1987;44:347–53. <https://doi.org/10.1017/S0003356100012277>.

Garnsworthy PC, Sinclair KD, Webb R. Integration of physiological mechanisms that influence fertility in dairy cows. *Animal* 2008;2:1144–52. <https://doi.org/10.1017/S1751731108002358>.

Gautier J-M, Corbière F, Caramelle-Holtz E, Bossis N. Collection Théma: La réforme et la mortalité des chèvres. *Inst l'élevage* 2012:1–12.

GEB-Institut de l'Élevage. Les Chiffres Clés du GEB-caprin 2020-Productions lait et viande 2020.

GEB-Institut de l'Élevage. Les Chiffres Clés du GEB-caprin 2023-Productions lait et viande 2023.

Gipson TA, Grossman M. Lactation curves in dairy goats: a review. *Small Rumin Res* 1990;3:383–96. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(90\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0921-4488(90)90019-3).

GRC. La physiologie de la reproduction caprine 2012:1–8.

GRC. Le choix des chèvres pour l'insémination Fiche 2c PRINCIPE DE TRI 4 étapes de tri 2023.

GRC. Le choix des chèvres pour l'insémination Fiche 2c PRINCIPE DE TRI 4 étapes de tri 2023a.

GRC. Le programme lumineux (PL) pour le désaisonnement de la reproduction Fiche 1a 2023b:1–4.

Grimard B, Freret S, Chevallier A, Pinto A, Ponsart C, Humblot P. Genetic and environmental factors influencing first service conception rate and late embryonic/foetal mortality in low fertility dairy herds. *Anim Reprod Sci* 2006;91:31–44. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.03.003>.

Grossman M, Hartz SM, Koops WJ. Persistency of lactation yield: A novel approach. *J Dairy Sci* 1999;82:2192–7. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75464-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75464-0).

Gupta M, Kumar S, Dangi S, Jangir B. Physiological, Biochemical and Molecular Responses to Thermal Stress in Goats. *Int J Livest Res* 2013;3:27. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20130502081121>.

Han R, Mourits M, Steeneveld W, Hogeveen H. The association of herd performance indicators with dairy cow longevity: An empirical study. *PLoS One* 2022;17:1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278204>.

Hayden TJ, Thomas CR, Forsyth IA. Effect of Number of Young Born (Litter Size) on Milk Yield of Goats: Role for Placental Lactogen. *J Dairy Sci* 1979;62:53–7. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83201-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83201-4).

Hempstalk K, McParland S, Berry DP. Machine learning algorithms for the prediction of conception success to a given insemination in lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 2015;98:5262–73. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8984>.

Henry BK, Eckard RJ, Beauchemin KA. Review: Adaptation of ruminant livestock production systems to climate changes. *Animal* 2018;12:S445–56. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001301>.

Inosys-Réseaux d'élevage Caprins P-CM et L et bretagne. Améliorer la longévité des troupeaux caprins. 2013.

Inra 2018. Inra, 2018. Alimentation des ruminants 2018:728 p.

Institut de l'élevage-Capgènes. Campagne d'ia 2022 - statistiques nationales 2022:2016–7.

Institut de l'élevage. Résultats de Contrôle laitier Caprin 2022:7823–30.

Institut de l'élevage. Économie de l'élevage caprins 2023.

Institut de l'élevage. Économie de l'élevage caprins 2024.

Ithurbide M, Huau C, Palhière I, Fassier T, Friggens N, Rupp R. Selection on functional longevity in a commercial population of dairy goats translates into significant differences in longevity in a common farm environment. *J Dairy Sci* 2022;105:4289–300. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21222>.

Johnson L, Fabre Nys C, Chanvallon A, François D, Fassier T, Menassol J, et al. The Effect of Short-Term Nutritional Supplementation and Body Condition on the Pituitary and Ovarian Responses of Anoestrous Ewes to the "Ram Effect." *J Vet Sci Technol* 2011;S2. <https://doi.org/10.4172/2157-7579.s2-001>.

Kern EL, Cobuci JA, Costa CN, Ducrocq V. Survival analysis of productive life in Brazilian holstein using a piecewise Weibull proportional hazard model. *Livest Sci* 2016;185:89–96. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2016.01.019>.

Kotrlik JW, Atherton JC, Williams HA, Khata Jabor M. Reporting and Interpreting Effect Size in Quantitative Agricultural Education Research. *J Agric Educ* 2011;52:132–42. <https://doi.org/10.5032/jae.2011.01132>.

Laird, A.K., 1966. Dynamics of embryonic growth. *Growth* 30, 263-275.

Le Cozler Y, Peccatte JR, Porhiel JY, Brunschwig P, Disenhaus C. Pratiques d'élevages et performances des génisses laitières: État des connaissances et perspectives. *Prod Anim* 2009;22:303–16. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.4.3356>.

Le Frileux Y., Pommaret A., Hervieu J., Morand-Fehr P., Brousseau J.Y., Coutineau H., Dunord M., Dupont J.-P., Grimault Y., Broqua B., Vanquackebeke E. Analyse de profils de l'état corporel des chèvres conduites dans différents systèmes d'alimentation. In : Purroy A. (ed.). *Body condition of sheep and goats: Methodological aspects and applications*. Zaragoza : CIHEAM, 1995. p. 151-160. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 27). Seminar of the Working Group on Body Condition of Sheep and Goats of the FAO/CIHEAM Network on Sheep and Goats, 24-31 Mar 1994, Zaragoza (Spain). <http://om.ciheam.org/om/pdf/a27/96605604.pdf>

Leboeuf B, Delgadillo JA, Manfredi E, Piacere A, Clement V, Martin P, et al. Place de la maîtrise de la reproduction dans les schémas de sélection en chèvres laitières. *Prod Anim* 2008;21:391–402. <https://doi.org/10.20870/PRODUCTIONS-ANIMALES.2008.21.5.3414>.

Lerch S, De La Torre A, Huau C, Monziols M, Xavier C, Louis L, et al. Estimation of dairy goat body composition: A direct calibration and comparison of eight methods. *Methods* 2021;186:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.014>.

Leroy JLMR, Van Soom A, Opsomer G, Bols PEJ. The consequences of metabolic changes in high-yielding dairy cows on oocyte and embryo quality. *Animal* 2008;2:1120–7. <https://doi.org/10.1017/S1751731108002383>.

Lopez H, Satter LD, Wiltbank MC. Relationship between level of milk production and estrous behavior of lactating dairy cows. *Anim Reprod Sci* 2004;81:209–23. <https://doi.org/10.1016/J.ANIREPROSCI.2003.10.009>.

Lurette A, Freret S, Chanvallon A, Experton C, Frappat B, Gatien J, et al. La gestion de la reproduction en élevages ovins et caprins, conventionnels et biologiques: état des lieux, intérêt et acceptabilité de nouveaux outils dans six bassins de production en France. *INRA Prod Anim* 2016;29:163–84. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2016.29.3.2958>.

López S, France J, Odongo NE, McBride RA, Kebreab E, Alzahal O, et al. On the analysis of Canadian Holstein dairy cow lactation curves using standard growth functions. *J Dairy Sci* 2015;98:2701–12. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8132>.

Macé T, González-García E, Carrière F, Douls S, Foulquié D, Robert-Granié C, et al. Intra-flock variability in the body reserve dynamics of meat sheep by analyzing BW and body condition score variations over multiple production cycles. *Animal* 2019;13:1986–98. <https://doi.org/10.1017/S175173111800352X>.

Macé T, González-García E, Kövér G, Hazard D, Taghipoor M. PhenoBR: a model to phenotype body condition dynamics in meat sheep. *Animal* 2023;17:100845. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100845>.

Macé T, González-García E, Pradel J, Parisot S, Carrière F, Douls S, et al. Genetic analysis of robustness in meat sheep through body weight and body condition score changes over time. *J Anim Sci* 2018;96:4501–11. <https://doi.org/10.1093/jas/sky318>.

Malher X, Seegers H, Beaudeau F. Culling and mortality in large dairy goat herds managed under intensive conditions in western France. *Livest Prod Sci* 2001;71:75–86. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00242-1).

Markusfeld O, Galon N, Ezra E. Body condition score, health, yield and fertility in dairy cows. *Vet Rec* 1997;141:67–72. <https://doi.org/10.1136/vr.141.3.67>.

Martin C, Morgavi D, M. Doreau M, Jouany JP. Comment réduire la production de méthane chez les ruminants?. *Fourrages*, 2006, 187, pp.283-300. hal-02658253

Martin O, Sauvant D. A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life function priorities and genetic scaling. *Animal* 2010;4:2030–47. <https://doi.org/10.1017/S1751731110001357>.

Martin O, Ben Abdelkrim A. Detecting perturbations in dairy cows liveweight trajectories, 70th EAAP Annual Meeting, Ghent, Belgium (hal-03190731) 2019.

Martin, O. and Sauvant, D., 2002. Metaanalysis of Input/Output Kinetics in Lactating Dairy Cows. *J Dairy Sci* 85(12):3363–3381. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74424-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74424-X).

Mellado M, Cantú L, Suárez JE. Effects of body condition, length of breeding period, buck:Doe ratio, and month of breeding on kidding rates in goats under extensive conditions in arid zones of Mexico. *Small Rumin Res* 1996;23:29–35. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(96\)00896-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(96)00896-6).

Mellado M, Valdez R, Lara LM, García JE. Risk factors involved in conception, abortion, and kidding rates of goats under extensive conditions. *Small Rumin Res* 2004;55:191–8. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2003.10.016>.

Mellado M, Valdéz R, García JE, López R, Rodríguez A. Factors affecting the reproductive performance of goats under intensive conditions in a hot arid environment. *Small Rumin Res* 2006;63:110–8. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.02.016>.

Michel A, Ponsart C, Freret S, Humblot P. Influence de la conduite de la reproduction sur les résultats à l'insémination en période de pâturage. *Rencontres Recherches Ruminants* 2003;10:131–4.

Morand-Fehr P, Hervieu J. Apprécier l'état corporel des chèvres. Intérêt et méthode. *La Chèvre* 1999;231:22–5.

NRC. *A Guide to Environmental Research on Animals*. National Academy of Sciences; 1971.

Nebel RL, McGilliard ML. Interactions of high milk yield and reproductive performance in Dairy Cows. *J Dairy Sci* 1993;76:3257–68. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(93\)77662-6](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(93)77662-6).

Ollion E, Ingrand S, Delaby L, Trommenschlager JM, Colette-Leurent S, Blanc F. Assessing the diversity of trade-offs between life functions in early lactation dairy cows. *Livest Sci* 2016;183:98–107. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2015.11.016>.

Opsomer G, Gröhn YT, Hertl J, Coryn M, Deluyker H, De Kruif A. Risk factors for post partum ovarian dysfunction in high producing dairy cows in Belgium: A field study. *Theriogenology* 2000;53:841–57. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00234-X).

Palhière I, Oget C, Rupp R. Functional longevity is heritable and controlled by a major gene in French dairy goats. *Proc World Congr Genet Appl to Livest Prod* 11-16 Febr 2018 2018:165.

Pellicer-Rubio M-T, Ferchaud S, Freret S, Tournadre H, Fatet A, Boulat S, et al. Available methods for the control of reproduction in domestic mammals and their interest for organic animal production. *Prod Anim* 2009;22:255–70.

Pellicer-Rubio M-T, Boissard K, Grizel J, Vince S, Fréret S, Fatet A, et al. Vers une maîtrise de la reproduction sans hormones chez les petits ruminants. *INRA Prod Anim* 2019;32:51–66. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2436>.

Perrot C. Eleveur/se de chèvres: une exception agricole? 9èmes Journées Tech Caprines 2024.

Pinto A, Bouca P, Chevallier A, Freret S, Grimard B, Humblot P. Sources de variation de la fertilité et des fréquences de mortalité embryonnaire chez la vache laitière. *Rencontres Recherches Ruminants* 2000;7.

Pollott GE, Gootwine E. A genetic analysis of complete lactation milk production in Improved Awassi sheep. *Livest Prod Sci* 2001;71:37–47. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00239-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00239-1).

Pollott GE. A biological approach to lactation curve analysis for milk yield. *J Dairy Sci* 2000;83:2448–58. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75136-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8).

Ponsart C, Leger T, Dubois P, Charbonnier G, Freret S, Humblot P. Identification de profils de note d'état caractérisant des primipares et des multipares de race Prim'Holstein et relations avec le délai de mise à la reproduction. *Rencontres Recherches Ruminants* 2006;13:288.

Poppe M, Veerkamp RF, van Pelt ML, Mulder HA. Exploration of variance, autocorrelation, and skewness of deviations from lactation curves as resilience indicators for breeding. *J Dairy Sci* 2020;103:1667–84. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17290>.

Pryce JE, Coffey MP, Simm G. The relationship between body condition score and reproductive performance. *J Dairy Sci* 2001;84:1508–15. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70184-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70184-1).

Pryce JE, Royal MD, Garnsworthy PC, Mao IL. Fertility in the high-producing dairy cow. *Livest Prod Sci* 2004;86:125–35. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00145-3](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00145-3).

Puillet L, Martin O. A dynamic model as a tool to describe the variability of lifetime body weight trajectories in livestock females. *J Anim Sci* 2017;95:4846–56. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1803>.

Puillet, L. and Martin, O., 2017. A dynamic model as a tool to describe the variability of lifetime body weight trajectories in livestock females. *Journal of Animal Science* 95(11): 4846–4856.

Pulina G. *Dairy Sheep Nutrition*. vol. 122. 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2005.00543.x>.

Rhind SM, Doney JM, Gunn RG, Leslie ID. Effects of body condition and environmental stress on ovulation rate, embryo survival, and associated plasma follicle stimulating hormone, luteinizing hormone, prolactin and progesterone profiles in Scottish Blackface ewes. *Anim Prod* 1984;38:201–9. <https://doi.org/10.1017/S0003356100002191>.

Riggio V, Maizon DO, Portolano B, Bovenhuis H, van Arendonk JAM. Effect of somatic cell count level on functional longevity in Valle del Belice dairy sheep assessed using survival analysis. *J Dairy Sci* 2009;92:6160–6. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1316>.

Robinson JJ, Ashworth CJ, Rooke JA, Mitchell LM, McEvoy TG. Nutrition and fertility in ruminant livestock. *Anim Feed Sci Technol* 2006;126:259–76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.08.006>.

Roche JR, Friggens NC, Kay JK, Fisher MW, Stafford KJ, Berry DP. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *J Dairy Sci* 2009;92:5769–801. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431>.

Roche JR, Macdonald KA, Burke CR, Lee JM, Berry DP. Associations Among Body Condition Score, Body Weight, and Reproductive Performance in Seasonal-Calving Dairy Cattle. *J Dairy Sci* 2007;90:376–91. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)72639-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72639-5).

Roche JR, Macdonald KA, Burke CR, Lee JM, Berry DP. Associations among body condition score, body weight, and reproductive performance in seasonal-calving dairy cattle. *J Dairy Sci* 2007;90:376–91. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)72639-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72639-5).

Roumeas A, Gaudilliere N, Dubief F, Adam H, P-e B, Delaby L, et al. Pic de lactation , persistance et lien avec les performances de reproduction de vaches Montbéliarde en Franche-Comté Lactation peak and persistency of Montbeliarde cows in Franche-Comté and relationships with reproductive traits *Rencontres Recherches Ruminants* 2014:5–8.

Royal MD, Darwash AO, Flint APF, Webb R, Woolliams JA, Lamming GE. Declining fertility in dairy cattle: changes in traditional and endocrine parameters of fertility. *Anim Sci* 2000;70:487–501. <https://doi.org/10.1017/S1357729800051845>.

Rupp R, Clément V, Piacere A, Robert-Granié C, Manfredi E. Genetic parameters for milk somatic cell score and relationship with production and udder type traits in dairy Alpine and Saanen primiparous goats. *J Dairy Sci* 2011;94:3629–34. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3694>.

Safayi S, Theil PK, Elbrønd VS, Hou L, Engbæk M, Nørgaard J V., et al. Mammary remodeling in primiparous and multiparous dairy goats during lactation. *J Dairy Sci* 2010;93:1478–90. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2422>.

Salama AAK, Caja G, Hamzaoui S, Badaoui B, Castro-Costa A, Façanha DAE, et al. Different levels of response to heat stress in dairy goats. *Small Rumin Res* 2014;121:73–9. <https://doi.org/10.1016/j.SMALLRUMRES.2013.11.021>.

Samoré AB, Rizzi R, Rossoni A, Bagnato A. Genetic parameters for functional longevity, type traits, somatic cell scores, milk flow and production in the Italian Brown Swiss. *Ital J Anim Sci* 2010;9:145–52. <https://doi.org/10.4081/ijas.2010.e28>.

Santucci PM, Maestrini O. Body conditions of dairy goats in extensive systems of production: method of estimation. *Ann Zootech* 1985;34:473–4. <https://doi.org/10.1051/animres:19850409>.

Sartori R, Bastos MR, Wiltbank MC. Factors affecting fertilisation and early embryo quality in single- and superovulated dairy cattle. *Reprod Fertil Dev* 2010;22:151–8. <https://doi.org/10.1071/RD09221>.

Sartori R, Sartor-Bergfelt R, Mertens SA, Guenther JN, Parrish JJ, Wiltbank MC. Fertilization and early embryonic development in heifers and lactating cows in summer and lactating and dry cows in winter. *J Dairy Sci* 2002;85:2803–12. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74367-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74367-1).

Sauvant D, Giger-Reverdin S, Meschy F, Puillet L, Schmidely P. Actualisation des recommandations alimentaires pour les chèvres laitières. *Prod Anim* 2012;25:259–76. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.3.3214>.

Sauvant D. Modelling homeostatic and homeorhetic regulations in lactating animals. *Livest Prod Sci* 1994;39:105–13. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90162-7](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90162-7).

Scaramuzzi RJ, Campbell BK, Downing JA, Kendall NR, Khalid M, Muñoz-Gutiérrez M, et al. A review of the effects of supplementary nutrition in the ewe on the concentrations of reproductive and metabolic hormones and the mechanisms that regulate folliculogenesis and ovulation rate. *Reprod. Nutr. Dev.*, vol. 46, *Reprod Nutr Dev*; 2006, p. 339–54. <https://doi.org/10.1051/rnd:2006016>.

Scilab (Version 6.1.1). Scilab Consortium, 2023.

Sejian V, Maurya VP, Naqvi SMK, Kumar D, Joshi A. Effect of induced body condition score differences on physiological response, productive and reproductive performance of Malpura ewes kept in a hot, semi-arid environment. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2010;94:154–61. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2008.00896.x>.

Serradilla J.M., Sanchez-Palma A., Micheo J.M. Preliminary analysis of the possibility of including longevity as a breeding goal of Malagueña goats. In : Gabiña D. (ed.), Bodin L. (ed.). *Data collection and definition of objectives in sheep and goat breeding programmes: New prospects*. Zaragoza : CIHEAM, 1997. p. 207-219. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 33). Meeting of the FAO-CIHEAM Network of Cooperative Research on Sheep and Goats and Subnetwork on Animal Resources, 9-11 Mar 1997, Toulouse (France). <http://om.ciheam.org/om/pdf/a33/97606011.pdf>

Silanikove N, Koluman DN. Impact of climate change on the dairy industry in temperate zones: Predications on the overall negative impact and on the positive role of dairy goats in adaptation to earth warming. *Small Rumin Res* 2015;123:27–34. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.11.005>.

Silanikove N. The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Rumin Res* 2000;35:181–93. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(99\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(99)00096-6).

Tedeschi LO, Fox DG, Kononoff PJ. A dynamic model to predict fat and protein fluxes and dry matter intake associated with body reserve changes in cattle. *J Dairy Sci* 2013;96:2448–63. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6070>.

Thorup VM, Edwards D, Friggens NNC. On-farm estimation of energy balance in dairy cows using only frequent body weight measurements and body condition score. *J Dairy Sci* 2012;95:1784–93. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4631i>.

Thorup VM, Højsgaard S, Weisbjerg MR, Friggens NC. Energy balance of individual cows can be estimated in real-time on farm using frequent liveweight measures even in the absence of body condition score. *Animal* 2013;7:1631–9. <https://doi.org/10.1017/S1751731113001237>.

Tichit M, Ingrand S, Moulin CH, Cournut S, Lasseur J, Dedieu B. Analyser la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices: Intérêts pour modéliser le fonctionnement du troupeau en élevage allaitant. *Prod Anim* 2004;17:123–32. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2004.17.2.3560>.

Tomassone, R., Dervin, C. and Masson, J.P., 1993. *Biométrie: modélisation de phénomènes biologiques*. Masson, Paris.

Tukey JW. Exploratory Data Analysis (Book Section). *Explor Data Anal* 1977:61–100. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7976-6>.

Viñoles C. Effect of nutrition on follicle development and ovulation rate in the ewe. *Dep Clin Chem* 2003;PhD:120.

Walsh SW, Williams EJ, Evans ACO. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. *Anim Reprod Sci* 2011;123:127. <https://doi.org/10.1016/J.ANIREPROSCI.2010.12.001>.

Waltner SS, McNamara JP, Hillers JK. Relationships of Body Condition Score to Production Variables in High Producing Holstein Dairy Cattle. *J Dairy Sci* 1993;76:3410–9. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77679-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77679-1).

Wathes DC, Pollott GE, Johnson KF, Richardson H, Cooke JS. Heifer fertility and carry over consequences for life time production in dairy and beef cattle. *Animal* 2014;8:91–104. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000755>.

West, G.B., Brown, J.H. and Enquist, B.J., 2001. A general model for ontogenetic growth. *Nature* 413(6856), 628–631. <https://doi.org/10.1038/35098076>.

Wilmink JBM. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. *Livest Prod Sci* 1987;16:335–48. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(87\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0301-6226(87)90003-0).

Wood PDP. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* 1967;216:164–5. <https://doi.org/10.1038/216164a0>.

Yilmaz M, Altin T, Karaca O, Cemal I, Bardakcioglu HE, Yilmaz O, et al. Effect of body condition score at mating on the reproductive performance of Kivircik sheep under an extensive production system. *Trop Anim Health Prod* 2011;43:1555–60. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9841-1>.

Zamuner F, DiGiacomo K, Cameron AWN, Leury BJ. Effects of month of kidding, parity number, and litter size on milk yield of commercial dairy goats in Australia. *J Dairy Sci* 2020;103:954–64. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17051>.

Zarazaga LA, Gatica MC, Gallego-Calvo L, Celi I, Guzmán JL. The timing of oestrus, the preovulatory LH surge and ovulation in Blanca Andaluza goats synchronised by intravaginal progestagen sponge treatment is modified by season but not by body condition score. *Anim Reprod Sci* 2014;146:170–5. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.02.012>.

Zarazaga LA, Guzmán JL, Domínguez C, Pérez MC, Prieto R. Effect of plane of nutrition on seasonality of reproduction in Spanish Payoya goats. *Anim Reprod Sci* 2005;87:253–67. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2004.11.004>.

Ziadi C, Sánchez JP, Sánchez M, Morales R, Molina A. Survival analysis of productive life in Florida dairy goats using a Cox proportional hazards model. *J Anim Breed Genet* 2023;140:431–9. <https://doi.org/10.1111/JBG.12769>.

1. ANNEXE 1 : APPENDICES SUPPLEMENTAIRES DU CHAPITRE 2

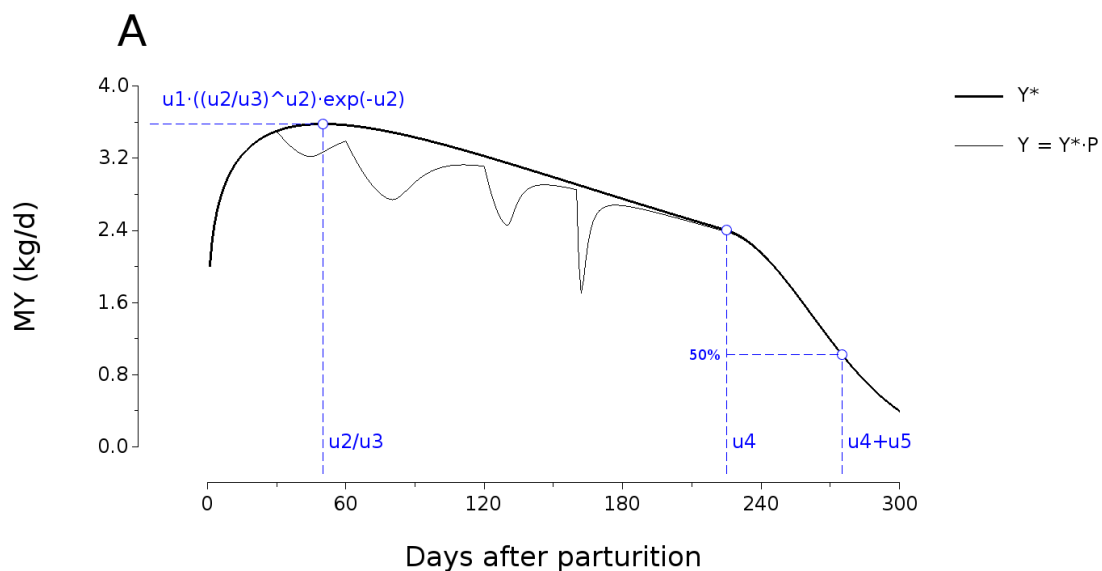
SUPPLEMENTARY ONLINE APPENDIX

Appendix A. Models of phenotypic trajectories 181
Appendix B. Complementary results for the phenotypic trajectories characterization 194
Appendix C. Complementary results for the phenotypic trajectories associations 198

APPENDIX A. MODELS OF PHENOTYPIC TRAJECTORIES

Milk yield

The model fitted to time series data of milk yield was derived from the lactation model with explicit representation of perturbations proposed by Ben Abelkrim et al., (2021). This perturbed lactation model (PLM) is based on the combination of an unperturbed lactation model and a perturbation model (respectively Y^* and P in Figure II.10A). The unperturbed lactation model describes a theoretical lactation curve, assumed to reflect the potential production trajectory of the lactating female. The perturbation model describes all the deviations (π_i in Figure II.10B) from the unperturbed lactation model, assumed to reflect a loss compared to the potential.



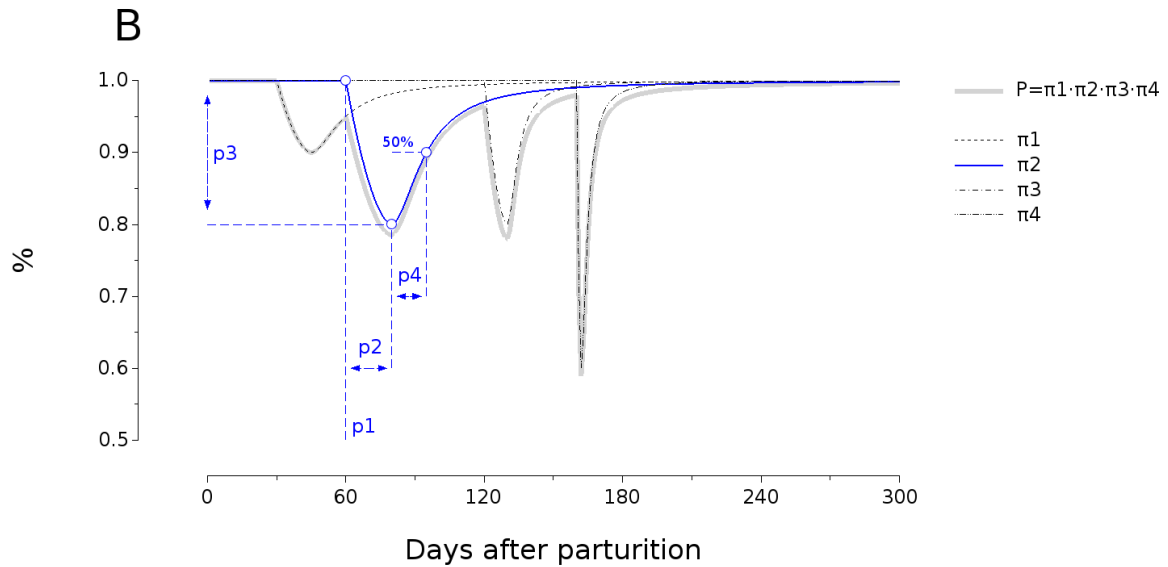


Figure 0.1 Perturbed lactation model. A. Unperturbed lactation model (Y^*) and perturbed lactation model (Y). B. Perturbation model (P) as the product of n individual perturbations ($\pi_{i=1:n}$). Illustration with parameters: $\mathbf{u}_{1:5} = \{2, 0.2, 0.004, 225, 50\}$, $\mathbf{p}_{1:4(1)} = \{30, 15, 0.1, 15\}$, $\mathbf{p}_{1:4(2)} = \{60, 20, 0.2, 15\}$, $\mathbf{p}_{1:4(3)} = \{120, 10, 0.2, 5\}$ and $\mathbf{p}_{1:4(4)} = \{160, 2, 0.4, 3\}$.

In the original version of PLM, the unperturbed lactation model was the model of Wood (1967) and each perturbation was modelled by way of a 3-compartment model representing the dynamics of the proportion of milk withdrawn from the theoretical unperturbed yield.

In the present PLM version, we added a late lactation decrease to the model of Wood and we substituted the perturbation model by a mathematical function describing a sequence of collapse and recovery (Martin and Ben Abdelkrim, 2019).

Perturbed lactation model

The dynamics of daily milk yield (Y_t , in kg/d) during lactation (Figure II.10A) is given by

$$Y_t = Y_t^* \cdot P_t$$

where t is the time after parturition in days, Y_t^* (in kg/d) is the theoretical unperturbed dynamics of milk yield along the lactation, and P_t (%) describes deviations from the lactation model.

Theoretical unperturbed model

The unperturbed model is given by

$$Y_t^* = \mathbf{u}_1 \cdot t^{\mathbf{u}_2} \cdot \exp(-\mathbf{u}_3 \cdot t) \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2)}{\mathbf{u}_5^2} \cdot z_t \cdot (t - \mathbf{u}_4)^2\right)$$

where

$$z_t = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq \mathbf{u}_4 \\ 0 & \text{if } t < \mathbf{u}_4 \end{cases}$$

and where \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 and \mathbf{u}_3 are positive parameters of the Wood model determining the shape of the lactation curve, \mathbf{u}_4 is the starting time of the late lactation decrease (in days after parturition) and \mathbf{u}_5 is the time of half decrease (in days after \mathbf{u}_4).

The component $\exp\left(-\frac{\ln(2)}{\mathbf{u}_5^2} \cdot z_t \cdot (t - \mathbf{u}_4)^2\right)$ corresponds to a decreasing sigmoid function from 1 to 0 derived from the Rayleigh model (Tomassone et al., 1993).

Perturbation model

The perturbation model is given by

$$P_t = \prod_{i=1}^{i=n} \pi_{t(i)}$$

where n is the total number of perturbations over lactation and $\pi_{t(i)}$ is the perturbation model for the single i^{th} perturbation given by

$$\pi_{t(i)} = \begin{cases} 1 - \mathbf{p}_{3(i)} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{t_{c(i)}}{\mathbf{p}_{2(i)}} \right)^x \right] & \text{if } t_{c(i)} < \mathbf{p}_{2(i)} \\ 1 - \mathbf{p}_{3(i)} \cdot \left[1 - \left(\frac{t_{r(i)}^\rho}{t_{r(i)}^\rho + \mathbf{p}_{4(i)}^\rho} \right) \right] & \text{if } t_{c(i)} \geq \mathbf{p}_{2(i)} \end{cases}$$

where $t_{c(i)}$ is the number of days in collapse after the start of the i^{th} perturbation and is given by

$$t_{c(i)} = \begin{cases} 0 & \text{if } t < \mathbf{p}_{1(i)} \\ t - \mathbf{p}_{1(i)} & \text{if } t \geq \mathbf{p}_{1(i)} \end{cases}$$

and where $t_{r(i)}$ is the number of days in recovery after the nadir of the i^{th} perturbation given by

$$t_{r(i)} = t_{c(i)} - \mathbf{p}_{2(i)}$$

and with parameters:

- $\mathbf{p}_{1(i)}$: time of start of the i^{th} perturbation in days after parturition ($\mathbf{p}_{1(i)} > 0$)
- $\mathbf{p}_{2(i)}$: time of nadir of the i^{th} perturbation in days after $\mathbf{p}_{1(i)}$ ($\mathbf{p}_{2(i)} > 0$)
- $\mathbf{p}_{3(i)}$: dimensionless intensity of the i^{th} perturbation ($\mathbf{p}_{3(i)} \in [0; 1]$)
- $\mathbf{p}_{4(i)}$: time of half recovery of the i^{th} perturbation in days after $\mathbf{p}_{2(i)}$ ($\mathbf{p}_{4(i)} > 0$)

Model fitting

The fitting procedure of PLM allows (1) to infer a potential lactation curve from milk yield time series data and (2) to detect and characterize perturbations corresponding to deviations above the potential lactation curve.

The fitting procedure was implemented in Scilab by way of an iterative sequential fitting algorithm in current development (Martin, personal communication). In brief, the algorithm screens the time series data from parturition to the end of lactation and repeatedly try to improve the root mean square error with additional perturbations. This algorithm integrates a learning protocol of the error distribution used to evaluate

if a deviation from the theoretical curve is a plausible deviation or within the range of normal expected variability.

The final estimates for a given milk yield time series dataset concern:

- Parameters characterizing the shape of the unperturbed lactation curve: \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 , \mathbf{u}_3 , \mathbf{u}_4 and \mathbf{u}_5 .
- The total number of detected perturbation: n
- For each single i^{th} perturbation, parameters characterizing the shape of the perturbation: $\mathbf{p}_{1(i)}$, $\mathbf{p}_{2(i)}$, $\mathbf{p}_{3(i)}$ and $\mathbf{p}_{4(i)}$

In addition, the percentage of milk loss (in %) was calculated as: $\frac{Y_t^* - Y_t}{Y_t^*} = 1 - P_t$.

Body weight

The model fitted to monthly time series data of body weight was the model of Grossman et al. (1999) (see **Body Condition Score**). The model fitted to daily time series data of body weight was the Unperturbed Weight Model (UWM) proposed by Martin and Ben Abdelkrim (2019). UWM describes body weight dynamics over a fitting window ranging from d_{bef} days before parturition p to d_{aft} days after parturition $p + 1$ (Figure II.11A).

UWM is based on the decomposition of body weight changes into:

1. overall increase over lifetime (ontogenic growth)
2. marginal loss or gain during reproductive cycles (phenotypic modulation of reserves)
3. depletion/repletion sequence during reproductive cycles (teleonomic use of reserves)
4. gravid uterus extra-weight during pregnancy (gestational load)

3.1.1.1. Required input parameters

For each dataset corresponding to one lactation, the following input parameters were required:

- p : parity (parturition number; positive non-zero integer)
- t_{p1} : age in days at parturition p
- t_{p2} : age in days at parturition $p + 1$
- t_{c1} : age in days at conception before parturition p
- t_{c2} : age in days at conception before parturition $p + 1$
- w_0 : maternal birth weight (in kg)
- w_1 : litter weight (in kg) at parturition p

- w_2 : litter weight (in kg) at parturition $p + 1$

If unknown, ages at conception were estimated using a standard gestation length of 150 days such as: $t_{c1} = t_{p1} - 150$ and $t_{c2} = t_{p2} - 150$.

If no conception occurred after parturition p (e.g., in case of culling), t_{p2} was set as the age at last data record and w_2 is set to zero.

If unknown, maternal birth weight was estimated such as $w_0 = 0.036 \cdot \overline{BW}$, where \overline{BW} was the average BW over lactation (Puillet and Martin, 2017).

If unknown, litter weights are set to $w_1 = 4.6$ and/or $w_2 = 4.6$ which corresponds to the median litter weight in dataset.

The fitting window was set to from $d_{bef} = 90$ days before parturition p to $d_{aft} = 50$ days after parturition $p + 1$.

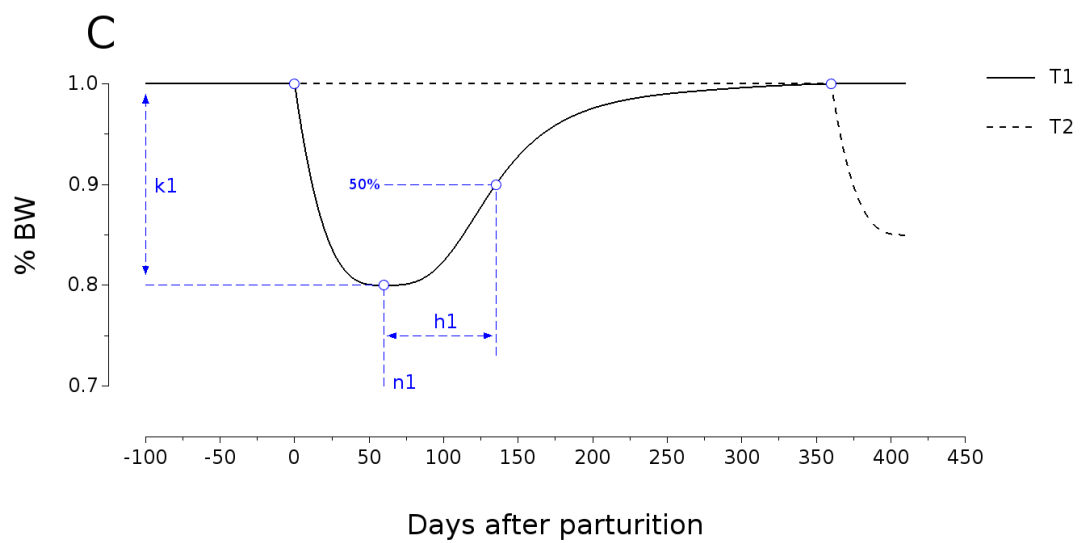
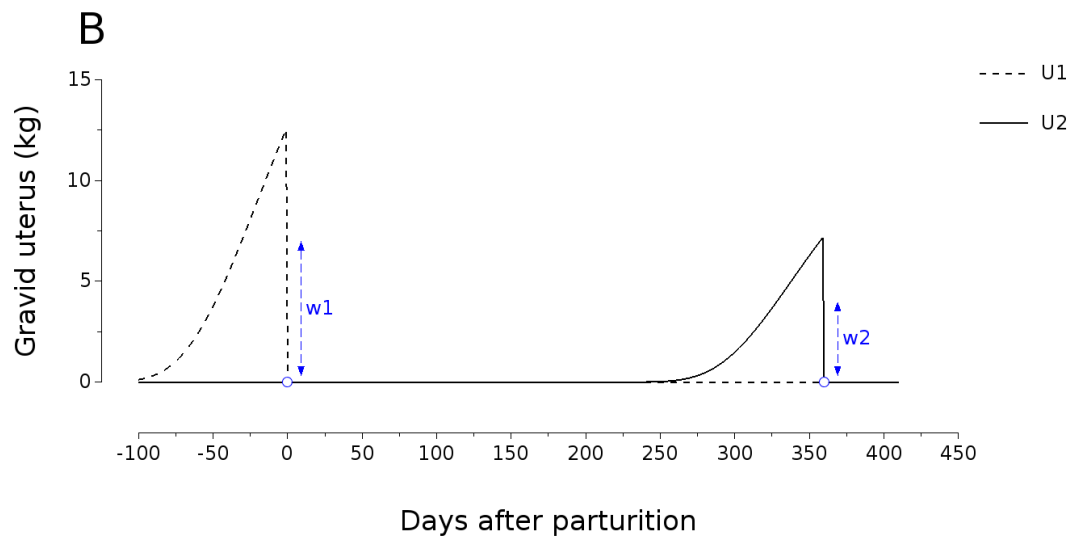
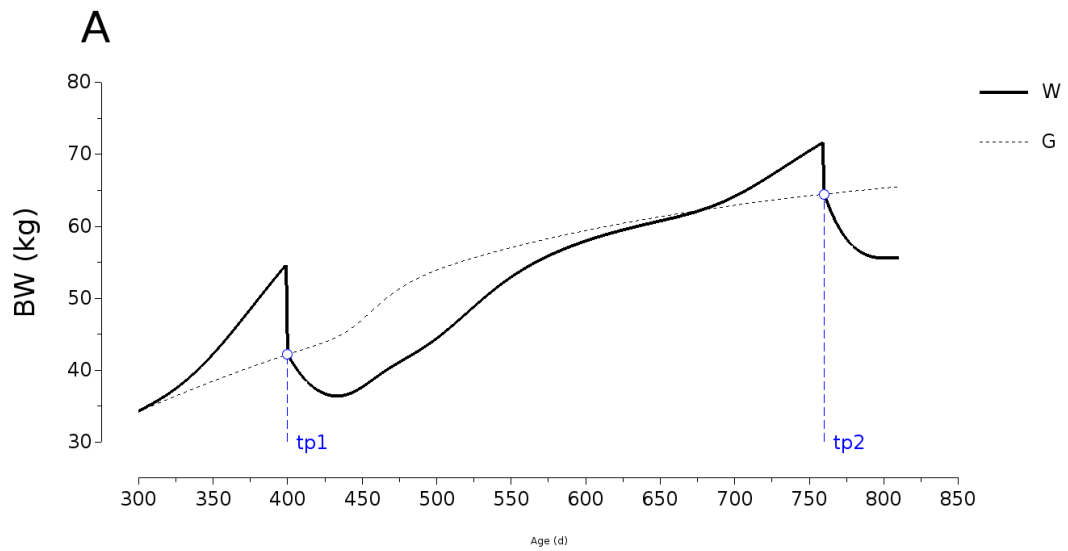


Figure 0.2 Body Weight Model. A. Weight model (W) integrating a growth function with phenotypic modulation of reserves (G). B. Gravid uterus weight model before parturition p (U_1) and before parturition $p + 1$ (U_2). C. Body reserves depletion/repletion sequence after parturition p (T_1) and after parturition $p + 1$ (T_2). Illustration with parameters: $p = 1$, $t_{p1:2} = \{400, 760\}$, $t_{c1:2} = \{250, 610\}$, $w_{0:2} = \{4, 7, 4\}$, $m_{1:2} = \{60, 70\}$, $n_{1:2} = \{60, 50\}$, $k_{1:2} = \{0.20, 0.15\}$, $h_{1:2} = \{75, 50\}$.

Fitted parameters

For each dataset, estimated model parameters determining body weight curve are:

- m_1 : asymptotic mature body weight (in kg) at parturition p
- m_2 : asymptotic mature body weight (in kg) at parturition $p + 1$
- n_1 : time of nadir (i.e., min weight) in days after parturition p
- k_1 : intensity of depletion (ranging from 0 to 1) after parturition p
- h_1 : time of half repletion in days after nadir after parturition p
- n_2 : time of nadir (i.e., min weight) in days after parturition $p + 1$
- k_2 : intensity of depletion (ranging from 0 to 1) after parturition $p + 1$
- h_2 : time of half repletion in days after nadir after parturition $p + 1$

Weight model

The dynamics of body weight (W_t , in kg) from 90 days before parturition p to 50 days after parturition $p + 1$ (Figure II.11) is given by

$$W_t = G_t \cdot \prod_{i=1}^{i=2} T_t^i + \sum_{i=1}^{i=2} U_t^i$$

where:

- t is the age in days
- G_t (in kg) is a lifetime scale growth function integrating phenotypic modulation of reserves over lactation
- T_t^i (dimensionless) is a reserves depletion/repletion function over lactation after parturition p ($i = 1$) and after parturition $p + 1$ ($i = 2$)
- U_t^i (in kg) is a gravid uterus weight function before parturition p ($i = 1$) and before parturition $p + 1$ ($i = 2$)

Growth function with phenotypic modulation of reserves

The growth function is derived from the model of West et al. (2001) in which the original asymptotic constant mature weight is assumed to change from parturition p to parturition $p + 1$ by way of a sigmoid shift (Hill function). This shift (Figure II.11A) is assumed to represent a phenotypic modulation of body reserves. This modified version of the model of West with a dynamic asymptote is used as the baseline model around which dynamic changes occur during reproductive cycles.

The growth function G_t is given by

$$G_t = M_t \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{w_0}{M_t} \right)^{1/4} \right] \cdot \exp \left(- \frac{\tau}{4 \cdot (M_t \cdot 10^3)^{1/4}} \cdot t \right) \right\}^4$$

where $\tau = 0.276$ (parameter value for cow in West et al (2001) and where the dynamic asymptote M_t is given by

$$M_t = m_1 + (m_2 - m_1) \cdot \frac{(d_t^1)^5}{(d_t^1)^5 + n_1^5}$$

where d_t^1 is the time in days after parturition p given by

$$d_t^1 = \begin{cases} 0 & \text{if } t < t_{p1} \\ t - t_{p1} & \text{if } t \geq t_{p1} \end{cases}$$

Gravid uterus weight function

The gravid uterus weight function (Figure II.11B) is derived from the model of Laird (1966). The same function is used before parturition p and before parturition $p + 1$ and is given by ($i = 1$ before parturition p or $i = 2$ before parturition $p + 1$)

$$U_t^i = \begin{cases} \frac{o}{\gamma} \cdot \exp \left\{ -\frac{\ln\left(\frac{o}{w_i}\right)}{1 - \exp(-\alpha \cdot (t_{pi} - t_{ci}))} \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot p_t^i)] \right\} & \text{if } t \in [t_{ci}; t_{pi}[\\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

where p_t^i is the number of n days in pregnancy before parturition given by

$$p_t^i = \begin{cases} t - t_{ci} & t \in [t_{ci}; t_{pi}[\\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

with $o = 0.0000035$ and $\alpha = 0.0209$ (parameters for sheep in Laird (1966))

and $\gamma = 0.55$ (proportion of fetus weight in uterus weight used in Puillet and Martin (2017)).

Body reserves depletion/repletion sequence over lactation

The change of body reserves (Figure II.11C) is described through a teleonomic depletion/repletion sequence after parturition p ($i = 1$) and after parturition $p + 1$ ($i = 2$) and is given by

$$T_t^i = R_t^i \cdot (1 - S_t^i) + S_t^i$$

where S_t^i is a forcing function derived from the gravid uterus weight function (see § Gravid uterus weight function) designed to set $S_{t=t_{pi}}^i = 1$ and given by

$$S_t^i = \begin{cases} \frac{\gamma \cdot U_t^2}{w_2} & \text{if } t < t_{p2} \\ 1 & \text{if } t \geq t_{p2} \end{cases}$$

and $S_t^2 = 0$,

and where

$$R_t^i = \begin{cases} 1 - k_i \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{d_t^i}{n_i} \right)^\delta \right] & \text{if } d_t^i < n_i \\ 1 - k_i \cdot \left[1 - \left(\frac{(d_t^i - n_i)^\rho}{(d_t^i - n_i)^\rho + h_i^\rho} \right) \right] & \text{if } d_t^i \geq n_i \end{cases}$$

where d_t^i is the time in days after parturition given by

$$d_t^i = \begin{cases} 0 & \text{if } t < t_{pi} \\ t - t_{pi} & \text{if } t \geq t_{pi} \end{cases}$$

and with $\delta = \rho = 10^{1/2}$.

Model fitting

The fitting procedure was implemented in R with the minpack.lm package (version 1.2.2) performing non-linear least squares regression. Minimum and maximum parameter bounds were defined as followed:

- $m_i \in [45; 150]$
- $n_i \in [1; 300]$
- $k_i \in [0; 1]$
- $h_i \in [5; 250]$

For simplification, h_2 was not estimated during the fitting procedure and set to $h_2 = h_1$. Estimation of parameters was repeated 20 times and the iteration that minimized the Residual Sum of Square was kept for each lactation.

Body condition score

The model fitted to monthly time series data of body condition score (and monthly time series data of body weight) was the model of Grossman et al. (1999). This model described the dynamics through three intersecting straight lines with a smoothing logistic transition (Figure II.12).

Model

The triphasic Grossman model allows to cut the lactation period into three stages (i.e, early, middle and late) and is given by

$$B_t = B_M + k_E \cdot (t - t_1) - r \cdot k_E \cdot \ln \left[\frac{\exp\left(\frac{t}{r}\right) + \exp\left(\frac{t_1}{r}\right)}{1 + \exp\left(\frac{t_1}{r}\right)} \right] + r \cdot k_L \cdot \ln \left[\frac{\exp\left(\frac{t}{r}\right) + \exp\left(\frac{t_1 + L}{r}\right)}{1 + \exp\left(\frac{t_1 + L}{r}\right)} \right]$$

with constant r defining the transition of the smoothing set to $r = 1$ (see Martin and Sauvant, 2002),

and with fitted parameters

- B_M : plateau value in middle stage (in kg BW or BCS)
- k_E : slope in early stage (in kg BW/d or BCS/d)
- k_L : slope in late stage (in kg BW/d or BCS/d)
- t_1 : upper bound of early stage (in d)
- L : length of the middle stage (in d)

Fitting

The fitting procedure was implemented in R with the `minpack.lm` package (version 1.2.2) performing non-linear least squares regression. Minimum and maximum parameter bounds were defined as followed:

- $B_M \in [0; +\infty]$
- $k_E \in [-\infty; +\infty]$
- $k_L \in [-\infty; +\infty]$
- $t_1 \in [d_2; d_{last}]$, where d_2 and d_{last} are the time of 2nd and last records respectively
- $L \in [d_{max}; d_{last}]$, where d_{max} is the maximum interval between two records

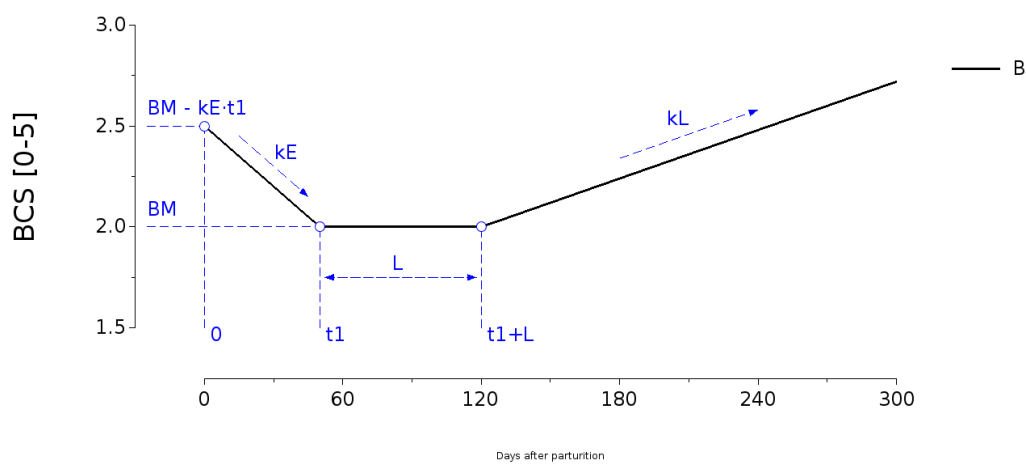


Figure 0.3 Grossman Model applied to Body Condition Score. Illustration with parameters $B_M = 2$, $k_E = -0.01$, $k_L = 0.004$, $t_1 = 50$ and $L = 70$.

APPENDIX B. COMPLEMENTARY RESULTS FOR THE PHENOTYPIC TRAJECTORIES CHARACTERIZATION

Distribution of goats by breed and farm for milk yield clusters

Table 0.1 Distribution of goats by breed and farm within MY clusters in primiparous goats.

Indicator	$Y^{P_{L-}}$ ¹ n = 273	$Y^{P_{L+}}$ n = 163	$Y^{P_{M-}}$ n = 459	Y^{P_H} n = 262
Breed-Farm				
Alpine-Pradel	121 (18.8% ²)	111 (17.2%)	249 (38.6%)	164 (25.4%)
Alpine-Grignon	87 (31.1%)	18 (6.4%)	136 (48.6%)	39 (13.9%)
Saanen-Grignon	65 (28.0%)	34 (14.7%)	74 (31.9%)	59 (25.4%)

¹ $Y^{P_{L+}}$ = Low milk yield and high persistency profile; $Y^{P_{L-}}$ = Low milk yield and low persistency profile; $Y^{P_{M-}}$ = Medium milk yield and low persistency profile; Y^{P_H} = High milk yield and a medium persistency profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Table 0.2 Distribution of goats by breed and farm within MY clusters in multiparous goats.

Indicator	$Y^{m_{M+}}$ ¹ n = 741	$Y^{m_{M-}}$ n = 740	Y^{m_H} n = 783
Breed-Farm			
Alpine-Pradel	423 (27.5% ²)	494 (32.1%)	620 (40.4%)
Alpine-Grignon	163 (38.0%)	165 (38.6%)	100 (23.4%)
Saanen-Grignon	155 (51.8%)	81 (27.1%)	63 (21.1%)

¹ $Y^{m_{M+}}$ = Medium milk yield and high persistency; $Y^{m_{M-}}$ = Medium milk yield and a low persistency; Y^{m_H} = High milk yield and a medium persistency.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Distribution of goats by breed and farm for body weight clusters

Table 0.3 Distribution of goats by breed and farm within BW clusters in primiparous goats.

Indicator	W ^p _L ¹	W ^p _{H+}	W ^p _{H-}
	n = 418	n = 312	n = 264
Breed-Farm			
Alpine-Pradel	252 (44.5%) ²	253 (44.6%)	62 (10.9%)
Alpine-Grignon	114 (49.4%)	32 (13.9%)	85 (36.7%)
Saanen-Grignon	52 (26.5%)	27 (13.8%)	117 (59.7%)

¹W^p_L = Low body weight and low depletion profile; W^p_{H+} = High body weight and high depletion profile; W^p_{H-} = High body weight and low depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Table 0.4 Distribution of goats by breed and farm within BW clusters in multiparous goats.

Indicator	W ^m _L ¹	W ^m _{H+}	W ^m _{H-}
	n = 835	n = 513	n = 583
Breed-Farm			
Alpine-Pradel	508 (40.8%) ²	423 (33.9%)	315 (25.3%)
Alpine-Grignon	226 (56.2%)	46 (11.5%)	130 (32.3%)
Saanen-Grignon	101 (35.7%)	44 (15.5%)	138 (48.8%)

¹W^m_L = Low body weight and low depletion profile; W^m_{H+} = High body weight and high depletion profile; W^m_{H-} = High body weight and low depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Distribution of goats by breed, farm and parity for body condition score clusters

Table 0.5 Distribution of goats by breed and farm within lumbar BCS clusters.

Indicator	LU _{M+} ¹ n = 437	LU _M n = 459	LU _{H+} n = 572
Breed-Farm			
Alpine-Pradel	362 (29.6% ²)	344 (28.2%)	515 (42.2%)
Alpine-Grignon	42 (34.7%)	62 (51.2%)	17 (14.1%)
Saanen-Grignon	33 (26.2%)	53 (42.1%)	40 (31.7%)

¹LU_{M+} =Medium lumbar body condition score and depletion profile; LU_M =Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+} =High lumbar body condition score and depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Table 0.6 Distribution of goats by breed and farm within sternal BCS clusters.

Indicator	ST _{M+} ¹ n = 489	ST _M n = 708	ST _{H+} n = 433
Breed-Farm			
Alpine-Pradel	469 (34.8% ²)	666 (49.4%)	213 (15.8%)
Alpine-Grignon	13 (9.0%)	29 (20.0%)	103 (71.0%)
Saanen-Grignon	7 (5.1%)	13 (9.5%)	117 (85.4%)

¹ST_{M+} =Medium sternal body condition score and depletion profile; ST_M =Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} =High sternal body condition score and depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Table 0.7 Distribution of goats by parity within lumbar BCS clusters.

Indicator	LU _{M+} ¹ n = 437	LU _M n = 459	LU _{H+} n = 572
Parity			
Primiparous	164 (34.3% ²)	147 (30.8%)	167 (34.9%)
Multiparous	273 (27.6%)	312 (31.5%)	405 (40.9%)

¹LU_{M+} =Medium lumbar body condition score and depletion profile; LU_M =Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+}= High lumbar body condition score and depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

Table 0.8 Distribution of goats by parity within sternal BCS clusters.

Indicator	ST _{M+} ¹ n = 489	ST _M n = 708	ST _{H+} n = 433
Parity			
Primiparous	172 (33.3% ²)	212 (41.1%)	132 (25.6%)
Multiparous	317 (28.5%)	496 (44.5%)	301 (27.0%)

¹ST_{M+} =Medium sternal body condition score and depletion profile; ST_M =Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} =High sternal body condition score and depletion profile.

²Proportions of goats by breed and farm in row.

APPENDIX C. COMPLEMENTARY RESULTS FOR THE PHENOTYPIC TRAJECTORIES ASSOCIATIONS

Association between milk yield and lumbar BCS trajectories

For primiparous, the association between MY and lumbar BCS profiles is shown in Table II.24. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.18. The association Y^P_{M-} with LU_{M+} gathered the highest proportion of goats with 15.7% of the population followed by the association Y^P_H with LU_{H+} and Y^P_{M-} with LU_{H+} that gathered 11.8 % of the population. The association Y^P_{L+} with LU_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 2.0 % of the populations. The remain 58.7 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Table 0.9 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous goats affected to MY and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Lumbar BCS profile						Total	
	LU _{M+} ²		LU _M		LU _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%		
Y ^P _{L-} ²	21	4.8	36	8.2	31	7.0	88	20.0
Y ^P _{L+}	9	2.0	30	6.8	21	4.8	60	13.6
Y ^P _{M-}	69	15.7	43	9.8	52	11.8	164	37.3
Y ^P _H	49	11.1	27	6.1	52	11.8	128	29.1
Total	148	33.6	136	30.9	156	35.5	440	100.0

¹% = proportion of goats among the 440 primiparous goats.

²Y^P_{L+}= Low milk yield and high persistency profile; Y^P_{L-}= Low milk yield and low persistency profile; Y^P_{M-}= Medium milk yield and low persistency profile; Y^P_H= High milk yield and a medium persistency profile; LU_{M+}=Medium lumbar body condition score and depletion profile; LU_M=Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+}=High lumbar body condition score and depletion profile.

For multiparous, the association between MY and lumbar BCS profiles is shown in Table II.25. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.14. The association Y^m_H with LU_{M+} gathered the highest proportion of goats with 14.7% of the population followed by the association Y^m_H with LU_{H+} with 14.2 % of the population. The association Y^m_{M+} with LU_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 4.4 % of the population. The remain 66.7 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Table 0.10 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous goats affected to MY and BCS lumbar profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Lumbar BCS profile						Total	
	LU _{M+} ²		LU _M		LU _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
Y ^m _{M+} ²	39	4.4	90	10.3	122	13.9	251	28.6
Y ^m _{M-}	78	8.9	84	9.6	119	13.6	281	32.0
Y ^m _H	129	14.7	92	10.5	125	14.2	346	39.4
Total	246	28.0	266	30.3	366	41.7	878	100.0

¹% = proportion of goats among the 878 multiparous goats.

²Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency; Y^m_{M-} = Medium milk yield and a low persistency;

Y^m_H = High milk yield and a medium persistency; LU_{M+} = Medium lumbar body condition score and depletion profile; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion profile.

Association between milk yield and sternal BCS trajectories

For primiparous, the association between MY and sternal BCS profiles is shown in Table II.26. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.19. The association Y^p_{M-} with ST_{M+} gathered the highest proportion of goats with 14.0% of the population followed by the association Y^p_{M-} with ST_M with 13.6 % of the population. The association Y^p_{L+} with ST_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 1.9 % of the population. The remain 70.5 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Table 0.11 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous goats affected to MY and sternal BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Sternal BCS profile							
	ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		Total	
	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
Y ^p _{L-} ²	17	3.5	39	8.1	32	6.7	88	18.4
Y ^p _{L+}	9	1.9	41	8.6	22	4.6	72	15.0
Y ^p _{M-}	67	14.0	65	13.6	39	8.1	171	35.7
Y ^p _H	64	13.4	52	10.9	32	6.7	148	30.9
Total	157	32.8	197	41.1	125	26.1	479	100.0

¹ % = proportion of goats among the 479 primiparous goats.

² Y^p_{L+} = Low milk yield and high persistency profile; Y^p_{L-} = Low milk yield and low persistency profile; Y^p_{M-} = Medium milk yield and low persistency profile; Y^p_H = High milk yield and a medium persistency profile; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion profile; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion profile.

For multiparous, the association between MY and sternal BCS profiles is shown in Table II.27. The Chi² test was significant (P<0.001) with a Cramer's V of 0.14. The association Y^m_H with ST_{M-} gathered the highest proportion of goats with 18.0% of the population followed by the association Y^m_H with ST_{M+} with 15.1 % of the population. The association Y^m_{M+} with ST_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 4.2 % of the population. The remain 62.7 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Tableau 0.12 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to MY and BCS sternal profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Milk yield profile	Sternal BCS profile						Total	
	ST _{M+} ²		ST _M		ST _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%	n	%
Y ^m _{M+} ²	41	4.2	136	13.9	90	9.2	267	27.3
Y ^m _{M-}	91	9.3	122	12.5	90	9.2	303	31.0
Y ^m _H	148	15.1	176	18.0	83	8.5	407	41.7
Total	280	28.7	434	44.4	263	26.9	977	100.0

¹ % = proportion of goats among the 977 multiparous goats.

² Y^m_{M+} = Medium milk yield and high persistency; Y^m_{M-} = Medium milk yield and a low persistency; Y^m_H = High milk yield and a medium persistency; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion profile; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion profile; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion profile.

Association between body weight and lumbar BCS trajectories

For primiparous, the association between BW and lumbar BCS profiles was shown in Table II.28. The Chi² test was significant (P = 0.014) with a Cramer's V of 0.12. The association W^p_{H+} with LU_{H+} gathered the highest proportion of goats with 17.7 % of the population followed by the association W^p_{L-} with LU_{M+} with 15.6 % of the population. The association W^p_{H-} with LU_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 3.1 % of the population. The remain 63.6 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Table 0.13 Contingency table displaying the frequency of individual primiparous lactations affected to BW and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Body weight profile	Lumbar BCS profile						Total	
	LU _{M+} ²		LU _M		LU _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%		
W ^p _{L-} ²	66	15.6	47	11.1	58	13.7	171	40.3
W ^p _{H+}	64	15.1	43	10.1	75	17.7	182	42.9
W ^p _{H-}	13	3.1	28	6.6	30	7.1	71	16.7
Total	143	33.7	118	27.8	163	38.4	424	100.0

¹% = proportion of goats among the 424 primiparous goats.

²W^p_{L-} = Low body weight and low depletion profile; W^p_{H+} = High body weight and high depletion profile; W^p_{H-} = High body weight and low depletion profile; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion profile

For multiparous, the association between BW and lumbar BCS profiles was shown in Table II.29. The Chi² test was significant ($P < 0.001$) with a Cramer's V of 0.13. The association W^m_{L-} with LU_M gathered the highest proportion of goats with 15.2 % of the population followed by the association W^m_{H+} with LU_{H+} with 15.1 % of the population. The association W^m_{H-} with LU_{M+} gathered the lowest proportion of goats with 4.3 % of the population. The remain 65.4 % of the population was almost equally distributed between profiles.

Table 0.14 Contingency table displaying the frequency of individual multiparous lactations affected to BW and lumbar BCS profile clusters (see section 2 for clustering methodology).

Body weight profile	Lumbar BCS profile						Total	
	LU _{M+} ²		LU _M		LU _{H+}		n	%
	n	% ¹	n	%	n	%		
W ^m _{L-} ²	106	12.3	131	15.2	118	13.7	355	41.2
W ^m _{H+}	97	11.3	75	8.7	130	15.1	302	35.1
W ^m _{H-}	37	4.3	58	6.7	109	12.7	204	23.7
Total	240	27.9	264	30.7	357	41.5	861	100.0

¹ % = proportion of goats among the 861 multiparous goats.

² W^m_{L-} = Low body weight and low depletion profile; W^m_{H+} = High body weight and high depletion profile; W^m_{H-} = High body weight and low depletion profile; LU_M = Medium lumbar body condition score and low depletion profile; LU_{H+} = High lumbar body condition score and depletion profile

2. ANNEXE 2 : MATERIELS ET METHODES SUPPLEMENTAIRE DU CHAPITRE 3

SUPPLEMENTARY MATERIAL: EXPLORING HOW MILK PRODUCTION, BODY WEIGHT AND BODY CONDITION DYNAMICS AFFECT REPRODUCTIVE SUCCESS AFTER ARTIFICIAL INSEMINATION IN DAIRY GOATS

N. Gafsi^{a,b}, O. Martin^a, F. Bidan^b, B. Grimard^c, L. Puillet^a

^aUniversité Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

^bInstitut de l'Élevage, F-75595 Paris, France

^cUniversité Paris-Saclay, INRAE, ENVA UMR BREED, F-78350, Jouy-en-Josas, France

Corresponding author: Nicolas GAFSI. Email: nicolas.gafsi@outlook.fr

Table 0.15 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and phenotypic lactation curves of MY, BW and BCS_S in goats (n=638).

Variables		n	Fertility (%)	Percent	p-value
Parity	1	309	74.1	48.0	0.37
	2+	329	69.7	52.0	
Lactation stage _{AI}	<200	68	69.1	11.0	0.23
	[200;215[	443	74.2	69.0
	≥215	127	64.5	20.0	
Breed	Alpine	609	72.0	95.5	0.67
	Saanen	29	65.5	4.5	
AI success _{n-1}	0	18	66.7	2.8	0.81
	1	241	72.6	38.0	
	NC	379	71.5	59.0	
THI _{max}	<80	515	72.0	81.0	0.74
	≥80	123	70.7	19.0	
Clusters of MY ¹	Y ^p _H	100	71.0	16.0	0.088
	Y ^m _H	113	66.4	18.0	
	Y ^p _L	47	87.2	7.4	

	Y_{L+}^p	42	61.9	6.6	
	Y_{M-}^p	120	75.8	19.0	
	Y_{M-}^m	90	75.6	14.0	
	Y_{M+}^p	126	68.3	20.0	
Clusters of BW ¹					0.58
	W_{H-}^p	36	66.7	5.6	
	W_{H-}^m	50	58.0	7.8	
	W_{H+}^p	132	76.5	21.0	
	W_{H+}^m	96	74.0	15.0	
	W_{L-}^p	141	73.8	22.0	
	W_{L-}^m	183	70.5	29.0	
Clusters of sternal BCS ¹					0.13
	ST_{H+}	151	68.9	24.0	
	ST_M	294	75.2	46.0	
	ST_{M+}	193	68.9	30.0	

¹ Y_{L-}^p = Low milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_{M-}^p = Medium milk yield and low persistency cluster for primiparous; Y_{H+}^p = High milk yield and a medium persistency cluster for primiparous; Y_{M+}^m = Medium milk yield and high persistency cluster for multiparous; Y_{M-}^m = Medium milk yield and a low persistency cluster for multiparous; Y_{H+}^m = High milk yield and a medium persistency cluster for multiparous; W_{L-}^p = Low body weight and low depletion cluster in primiparous; W_{H+}^p = High body weight and high depletion cluster in primiparous; W_{H-}^p = High body weight and low depletion cluster in primiparous; W_{L-}^m = Low body weight and low depletion cluster in multiparous; W_{H+}^m = High body weight and high depletion cluster in multiparous; W_{H-}^m = High body weight and low depletion cluster in multiparous; ST_{M+} = Medium sternal body condition score and depletion cluster; ST_M = Medium sternal body condition score and low depletion cluster; ST_{H+} = High sternal body condition score and depletion cluster.

Table 0.16 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and synthetic indicators of MY and BW in goats (n=1359).

Variables	n	Fertility (%)	Percent	p-value
Parity				0.081
1	605	70.0	45.0	
2+	754	65.6	55.0	
Lactation stage _{AI}				0.003
<200	274	62.4	20.0	
[200;215[	757	71.6	56.0	
≥215	328	62.8	24.0	
Breed				0.33
Alpine	1,212	68.2	89.0	
Saanen	147	63.2	11.0	

AI success _{n-1}					0.53
	0	48	64.6	3.5	
	1	494	69.8	36.0	
	NC	817	66.5	60.0	
TH _{I_{max}}					0.91
	<80	1,147	67.4	84.0	
	≥80	212	68.9	16.0	
MY _{peak} (kg/d) ¹					0.31
	<3.75	446	70.4	33.0	
	[3.75; 4.54[	466	66.5	34.0	
	≥4.54	447	66.0	33.0	
MY ₂₁₀ (kg/d)					0.010
	<2.75	450	70.7	33.0	
	[2.75; 3.36[	440	69.8	32.0	
	≥3.36	469	62.7	35.0	
SumMY (kg)					0.17
	<806.4	454	70.5	33.0	
	[806.4;973.9[	447	67.8	33.0	
	≥973.9	458	64.6	34.0	
Persistency (%)					<0.001
	<-36.7	444	75.0	33.0	
	[-36.7;-26.1[	461	72.7	34.0	
	≥-26.1	454	55.3	33.0	
Peak time (d)					0.91
	<42	443	67.3	33.0	
	[42;63[	457	67.8	34.0	
	≥63	459	67.8	34.0	
BW _k					0.11
	<54.6	451	70.7	33.0	
	[54.6;67.2[	445	68.0	33.0	
	≥67.2	463	64.1	34.0	
BW ₂₁₀					0.063
	<54.7	450	70.9	33.0	
	[54.7;63.8[	453	68.2	33.0	
	≥63.8	456	63.8	34.0	
BW _{min}					0.007
	<50.0	451	72.7	33.0	
	[50.0;60.0[	448	67.4	33.0	
	≥60.0	460	62.8	34.0	
Dep_speed _{k-}					0.95
>30					
	<-0.16	468	68.4	34.0	
	[-0.16;-0.07[	411	66.7	30.0	
	≥-0.07	480	67.8	35.0	
Rep_speed ₁₈₀₋					<0.001
>210					

<0.03	478	61.7	35.0
[0.03;0.05[	332	65.4	24.0
≥0.05	549	74.1	40.0

¹ SumMY = sum of daily milk yield values over 250 days; MY_{peak} = highest milk yield value; MY₂₁₀ = milk yield value at 210 days; Peak time = time of the highest milk yield value; Persistency = $(MY_{250} - MY_{150}) / MY_{150} \times 100$; BW_k = body weight at kidding; BW_{min} = minimum body weight; BW₂₁₀ = body weight at 210 days; Dep_speed_{k→30} = $(BW_{30} - BW_k) / 30$; Rep_speed_{180→210} = $(BW_{210} - BW_{180}) / 30$.

Table 0.17 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and model parameters of MY in goats (n=1731).

Variables	n	Fertility (%)	Percent	p-value
Parity				0.072
1	758	69.4	44.0	
2+	973	65.3	56.0	
Lactation stage _{AI}				0.011
<200	348	62.1	20.0	
[200;215[	903	70.7	52.0	
≥215	480	64.0	28.0	
Breed				0.12
Alpine	1,546	67.7	89.0	
Saanen	185	61.6	11.0	
AI success _{n-1}				0.38
0	61	60.7	3.5	
1	641	69.3	37.0	
NC	1,029	66.1	59.0	
THI _{max}				0.97
<80	1,456	66.7	84.0	
≥80	275	69.0	16.0	
a ¹				0.38
<1.98	567	70.0	33.0	
[1.98;2.77[	579	66.0	33.0	
≥2.77	585	65.3	34.0	
b				0.45
<0.15	572	64.3	33.0	
[0.15;0.21[	609	68.5	35.0	
≥0.21	550	68.4	32.0	
c				0.003
<0.0026	570	63.3	33.0	
[0.0026;0.0034[	563	66.3	33.0	
≥0.0034	598	71.4	35.0	
d				<0.001
<183.4	573	69.1	33.0	
[183.4;219.4[	568	75.2	33.0	
≥219.4	590	57.3	34.0	
e				0.033
<92.8	570	66.3	33.0	
[92.8;118.4[	574	70.6	33.0	
≥118.4	587	64.4	34.0	
Loss(%) ²				0.039
<5.18	570	63.0	33.0	
[5.18;9.22[	571	69.2	33.0	
≥9.22	590	69.0	34.0	
N_p				0.055

<6	555	65.6	32.0
[6;8[	406	72.4	23.0
≥8	770	65.3	44.0

¹ Revised Wood model parameters: **a** = mean level at the beginning of lactation ; **b** = rate of milk increase before the peak; **c** = decrease rate after the peak; **d** = time of late decrease of milk ; **e** = time of half decrease of milk.

² Perturbed lactation model parameters: **Loss** = difference between total milk production calculated with unperturbed model and perturbed model , **N_p** = number of perturbations.

Table 0.18 Univariate analysis between AI success, common factors known to affect AI and model parameters of sternal BCS in goats (n=795).

Variables	n	Fertility (%)	Percent	p-value
Parity				0.23
1	373	71.6	47.0	
2+	422	67.5	53.0	
Lactation stage _{AI}				0.048
<200	92	64.1	12.0	
[200;215[	495	73.1	62.0	
≥215	208	63.0	26.0	
Breed				0.39
Alpine	753	70.0	95.0	
Saanen	42	59.5	5.3	
AI success _{n-1}				0.50
0	22	59.1	2.8	
1	312	70.8	39.0	
NC	461	69.0	58.0	
THI _{max}				0.89
<80	668	69.2	84.0	
≥80	127	70.9	16.0	
B_M^1				0.001
<2.5	87	54.0	11.0	
[2.5;2.75[	197	76.6	25.0	
≥2.75	511	69.3	64.0	
k_E				0.17
<-0.01	247	66.0	31.0	
[-0.01;-0.005[	250	69.6	31.0	
≥-0.005	298	72.1	37.0	
k_L				0.11
<0.002	309	73.1	39.0	
[0.002;0.004[	274	65.3	34.0	
≥0.004	212	69.3	27.0	
t_1				0.47
<39.0	261	69.7	33.0	
[39.0;66.4[	263	67.7	33.0	
≥66.4	271	70.8	34.0	
L				0.85
<76.0	257	70.8	32.0	
[76.0;166.5[	267	68.1	34.0	
≥166.5	271	69.4	34.0	

¹ Grossman model parameters: B_M = plateau value in middle stage (in kg BW or BCS) k_E = slope in early stage (in kg BW/d or BCS/d) k_L = slope in late stage (in kg BW/d or BCS/d); t_1 = upper bound of early stage (in d); L = length of the middle stage (in d)

3. ANNEXE 3 : RESUME DES COMMUNICATIONS ORALES EN CONGRES SCIENTIFIQUES

Dynamic interplay between reproduction, milk production, body reserves in Alpine goats

N. Gafsi^{1,2}, F. Bidan¹, B. Grimard³, M. Legris¹, O. Martin², L. Puillet²

¹ Institut de l'Elevage, F-75595 Paris Cedex 12

² Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR MoSAR, F-75005 Paris

³ Université Paris-Saclay, INRAE, ENVA UMR 1198 BREED, F-78 350, Jouy-en-Josas

Variability in reproductive performance is a key aspect in dairy goat herds: it affects the distribution of physiological stages and therefore the way animals will respond to their environmental conditions (resource availability, thermal environment) both in terms of milk production (MP) and body reserves utilization. As a feedback, next reproductive cycle can be affected. The whole lifetime trajectory is thus dependent on the dynamic interplay between reproduction, MP and body reserves. Understanding this interplay is a crucial issue to optimize feeding and reproductive management strategies, given the current constraints imposed by the environment and the future constraints linked to climate change impact. The objective of this work was to evaluate the impact of MP and body reserves utilization on the success at artificial insemination (AI) in dairy goats. Routine data from an experimental station in South France (Le Pradel, French Livestock Institute) were used. The dataset included 574 Alpine goats (1096 lactations from parity 1 to 9) inseminated over 25 years (1996 to 2021). The AI success of each goat was calculated using the interval between AI and next kidding (an interval of 160 days or less is considered as success at AI). A logistic regression model was used to analyse the relationships between AI success and parity, stage of lactation at AI, failure at previous AI, maximum temperature and THI (Temperature Humidity Index) measured around AI, maximum MP during lactation, MP around AI, somatic cell count around AI, variation of MP 6 weeks before AI, body weight (BW) and body condition score (BCS) around AI and variation of BW and BCS 12 weeks before AI. Average AI success was 69% (+/- 11%). AI success was significantly affected by MP around AI, lumbar BCS around AI, lumbar BCS dynamic before AI and maximum temperature. In contrast, classical factors of variation in AI success such as lactation rank, previous AI success or THI had no effect. These results will contribute to identify animals that best cope with environmental constraints and better manage animals at risk of reproductive failure.

A good start for a good productive life as a dairy goat

N. Gafsi^{1,2}, F. Bidan¹, B. Grimard³, M. Legris¹, O. Martin², L. Puillet²

¹ Institut de l'Élevage, F-75595 Paris Cedex 12

² Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR MoSAR, F-75005 Paris

³ Université Paris-Saclay, INRAE, ENVA UMR 1198 BREED, F-78 350, Jouy-en-Josas

Increasing longevity in dairy goats enables to reduce replacement costs and increase individual milk yield. How to early identify candidate goats for a long productive lifetime? Primiparous goats have an increased risk of being culled due to supplementary needs for growth. They also must produce milk and safeguard body reserves for health and reproduction, but energy can't be maximized for each biological function. Assessing diversity of phenotypic trajectories (e.g., milk yield (MY), body weight (BW)) is an interesting way to understand interactions and priorities among biological functions. The objective of this work was to evaluate associations between MY and BW trajectories in primiparous goats and seek for unfavorable associations that lead to culling. Routine data from an experimental station in South France (Le Pradel, French Livestock Institute) were used. The dataset included 655 Alpine primiparous goats from 1996 to 2021. Culling dates and data of the next lactation were provided. Weekly MY records were fitted using the Wood model and monthly BW records were fitted using the Grossman multiphasic model. After fitting procedure, level, and speed indicators for MY and BW were calculated to summarize each individual trajectory. Principal component analysis was performed on MY and BW indicators separately to generate clusters of dynamic profiles. Chi² test was performed on MY and BW clusters. Three clusters were identified for both MY ("low peak yield-high persistency" (7%), "middle peak yield-low persistency" (33%), "high peak yield-low persistency" (60%)) and BW ("growth" (14%), "intense depletion-longer repletion" (30%), "intense depletion-fast repletion" (56%)). Nine profiles, characterized by combination of one MY and one BW cluster, were established and 76 % of goats were mainly in four profiles suggesting a typology of energy partitioning among these functions. The highest milking goats with intense depletion and fast repletion have 49 % risk of being culled at the end of their first parity. These results open the perspective to identify animal profiles that are economically interesting for breeders because they will be able to go through several lactations.

Relations entre fertilité à l'insémination artificielle, dynamique de production laitière, réserves corporelles et stress thermique chez la chèvre laitière de race Alpine

GAFSI N. (1) (2), BIDAN F. (1), GRIMARD B. (3), LEGRIS M. (1), MARTIN O. (2), PUILLET L. (2)

(1) Institut de l'Élevage, 149, rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

(2) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 75005 Paris, France

(3) Université Paris-Saclay, INRAE, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, UMR 1198 BREED, Domaine de Vilvert, 78 350, Jouy-en-Josas, France

RESUME

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'impact de la dynamique de production laitière et des réserves corporelles sur la fertilité à l'insémination artificielle (IA) chez la chèvre en analysant la base de données de la station expérimentale du Pradel (1 138 lactations, 595 chèvres de race Alpine pendant 24 campagnes de production de 1996 à 2020). Le critère retenu pour la réussite à la reproduction d'une chèvre pour une campagne d'insémination est l'intervalle entre l'IA et la mise-bas suivante : un intervalle inférieur ou égal à 160 jours qualifie la réussite de l'IA. Un modèle mixte de régression logistique a été utilisé pour analyser les relations entre la réussite à la reproduction et les caractéristiques individuelles des chèvres (rang de lactation, stade de lactation à l'IA, échec à l'IA précédente), les données climatiques (température et index température humidité (THI) maximal) enregistrées dans une station météorologique proche de la station, et les données de production laitière (PL) et d'état corporel (poids vif (PV) et note d'état corporel (NEC)). Les effets de la PL ont été analysés avec des indicateurs statiques (PL autour de l'IA, taux butyreux, taux protéique, cellules somatiques) et dynamiques (évolution de la PL dans le mois et demi qui précède l'IA). La même stratégie a été adoptée pour le PV et la NEC (sternale et lombaire) avec des indicateurs autour de l'IA et des indicateurs dynamiques avant IA (évolution dans les trois mois et demi qui précèdent l'IA). Sur les 24 années étudiées, la fertilité à l'IA a été en moyenne de 69,6 % ($\pm 11,0$ %). Les facteurs habituellement observés de variation de la fertilité à l'IA (comme l'échec à l'IA précédente, le stade de lactation à l'IA et la parité) ainsi que les valeurs maximales de THI et de température autour de l'IA n'ont pas présenté d'effets significatifs sur la fertilité à l'IA. Avec un stade de lactation moyen à l'IA de 210 jours (± 8 jours), la PL autour de l'IA a eu tendance à affecter ($p=0,059$) la fertilité à l'IA. La NEC lombaire autour de l'IA a affecté significativement la fertilité à l'IA ($p=0,007$). L'évolution de la note lombaire a affecté significativement la fertilité à l'IA uniquement chez les primipares, avec de moins bons résultats pour des chèvres en gain par rapport à des chèvres en stabilité ou en perte d'état corporel ($p=0,002$). L'évolution de la note sternale a eu tendance à affecter la réussite à l'IA uniquement chez les multipares, avec de moins bons résultats pour des chèvres en perte d'état corporel par rapport à des chèvres en stabilité ou en gain ($p=0,079$). Ces résultats ouvrent la perspective d'identification d'animaux à risque d'échec de reproduction à l'IA. Ils permettront d'améliorer la prédiction de la réussite à la reproduction en fonction des interactions entre réserves corporelles et production laitière chez la chèvre laitière. Ces connaissances alimenteront un simulateur de fonctionnement d'un troupeau caprin existant et permettront de mieux caractériser les interactions entre conduite de l'alimentation et de la reproduction à l'échelle du troupeau.

Relationships between fertility after artificial insemination, milk production dynamics, body reserves and heat stress in Alpine dairy goats

GAFSI N. (1) (2), BIDAN F. (1), GRIMARD B. (3), LEGRIS M. (1), MARTIN O. (2), PUILLET L. (2)

(1) Institut de l'Élevage, 149, rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

SUMMARY

The objective of this work was to evaluate the impact of milk production and body reserves dynamics on fertility after artificial insemination (AI) in goats by analysing the database of the Pradel experimental station (1 138 lactations, 595 Alpine goats during 24 production campaigns from 1996 to 2020). The criterion of reproductive success of a goat for an insemination event was measured with the interval between AI and the next kidding (an interval less than or equal to 160 days qualified an AI success). A mixed logistic regression model was used to analyse the relationships between reproductive success and individual goat characteristics (parity, lactation stage at AI, previous AI failure), climatic data (temperature and maximum Temperature Humidity Index (THI)) recorded at an outdoor weather station close to the farm, milk production (MP) and body condition data (body weight (BW) and body condition score (BCS)). The effects of MP were analysed with static indicators (production around AI, fat and protein contents, somatic cells) and dynamic indicators (change in MP within a month and a half before AI). The same strategy was adopted for BW and BCS (sternal and lumbar) with static indicators around AI and dynamic indicators before AI (change within three and a half months before AI). Over the 24 years studied, fertility after AI averaged 69,6% ($\pm 11,0$ %). Factors usually known for affecting fertility after AI (such as previous AI failure, lactation stage at AI and parity), maximum temperature and THI around AI did not show significant effects. With a mean lactation stage at AI of 210 days (± 8 days), MP around AI tended to affect fertility after AI ($p=0,059$). Lumbar BCS around AI significantly affected fertility after AI ($p=0,007$). Change of lumbar score significantly affected fertility after AI only in primiparous goats, with poorer results for goats gaining body condition versus goats with stable or decreasing body condition ($p=0,002$). Change of sternal score tended to affect fertility after AI only in multiparous goats, with poorer results for goats with decreasing body condition compared to goats with stable or increasing body condition ($p=0,079$). These results open perspectives of identifying animals at risk of reproductive failure at AI. They can be used to improve the prediction of reproductive success of dairy goats based on interactions between milk production and body reserves. This

knowledge will support to developing an existing goat herd simulator to better characterize the interactions between feeding and reproductive management strategies at herd scale.

INTRODUCTION

En systèmes caprins laitiers, comme dans les autres espèces, les causes d'échec de reproduction sont multifactorielles et peuvent dégrader les résultats de fertilité. Dans le cas de l'insémination artificielle (IA), des études ont pu mettre en évidence certains facteurs de variations de réussite (parité, stade de lactation à l'IA, période d'insémination, échec à la précédente IA, niveau de production laitière au moment de l'IA) (Chanvallon *et al.*, 2013 ; Furstoss *et al.*, 2015 ; Freret *et al.*, 2018). D'autres auteurs ont montré un effet de l'état corporel sur des paramètres reproductifs plus fins (taux d'ovulation, pic de LH (Luteinizing Hormone)) indépendamment des caractéristiques animales et de la production laitière (Branca, 2004; De Santiago-Miramontes *et al.*, 2009; Zarazaga *et al.*, 2014). Les relations entre réserves corporelles, production laitière et réussite à la reproduction ont été explorées chez les vaches laitières (Friggens *et al.*, 2010 ; Cutullic *et al.*, 2012 ; Bedere *et al.*, 2016), en revanche, à notre connaissance il n'existe pas d'étude chez les caprins. L'objectif de cette étude est de proposer une analyse multivariée de la fertilité à l'IA en lien avec les caractéristiques animales, les données climatiques, et les données relatives à la dynamique des réserves corporelles et de la production laitière.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. ORIGINE DES DONNEES

Les données individuelles utilisées (caractéristiques des chèvres, données de production laitière, de réserves corporelles et de reproduction) provenaient des chèvres de race Alpine inséminées à la station expérimentale du Pradel en Ardèche sur la période 1996-2020.

Les données météorologiques ont été extraites de bases de données nationales SAFRAN via l'application web SICLIMA.

1.2. CONDUITE DE LA REPRODUCTION

L'IA des chèvres se déroulait chaque année sur la première quinzaine d'août, et était précédée d'un traitement hormonal de synchronisation de l'œstrus et de l'ovulation (Groupe Reproduction Caprine, 2013a). Deux méthodes d'IA étaient pratiquées au Pradel : en semence congelée (77 % du troupeau inséminé) ou en semence fraîche issue des boucs de l'exploitation. Seules les chèvres inséminées en congelées ont été conservées pour cette étude. La fertilité à l'IA d'une chèvre a été définie par une variable binaire (0 en cas d'échec et 1 en cas de réussite). Elle a été calculée grâce à l'intervalle entre l'IA et la mise-bas suivant la mise à la reproduction comme proposé par Chanvallon *et al.*, (2013). Si cet intervalle est inférieur à 140 jours, il y a eu fécondation mais la gestation n'a pas atteint son terme. Si cet intervalle est compris entre 140 et 160 jours alors il y a eu fécondation sur IA. Si cet intervalle dépassait 160 jours, nous avons considéré qu'il s'agissait d'un échec à l'IA. Le stade de lactation au moment de l'IA (intervalle entre la mise-bas précédente et l'IA) et l'échec à l'IA précédente ont également été déterminés.

1.3. INDICATEURS DE PRODUCTION LAITIERE

Un indicateur statique de production laitière (PL) a été calculé comme la PL hebdomadaire la plus proche de l'IA (en moyenne $3,0 \pm 3,4$ jours en valeur absolue autour de l'IA). Des indicateurs de qualité du lait les plus proches de l'IA

ont également été retenus ($4,0 \pm 6,0$ jours en valeur absolue autour de l'IA) : TB (Taux butyreux), TP (Taux protéique), rapport TB/TP et CCS (concentration en cellules somatiques du lait). La dynamique de PL avant IA a été caractérisée avec un indicateur correspondant à la différence entre la mesure de PL précédant l'IA la plus proche ($5,5 \pm 4,0$ jours) et la mesure distante d'environ un mois et demi de l'IA ($47,0 \pm 4,0$ jours).

1.4. INDICATEURS DES RESERVES CORPORELLES

Le poids vif (PV) et la note d'état corporel (NEC) étaient mesurés tous les 28 jours environ. La NEC était évaluée au niveau des régions lombaire et sternale sur une échelle de 0 à 5 points (Morand-Fehr et Hervieu, 1999). Par analogie avec les données de PL, les indicateurs statiques de PV et de NEC ont été retenus sur la base des mesures les plus proches de l'IA (en moyenne $11,0 \pm 6,0$ jours en valeur absolue autour de l'IA). Des indicateurs dynamiques de PV et de NEC ont été calculés comme la différence entre la dernière mesure au contrôle le plus proche précédant l'IA ($17,0 \pm 10,0$ jours) et la mesure précédente, distante de l'IA d'environ trois mois et demi ($110,0 \pm 15,0$ jours).

1.5. INDICATEURS DE STRESS THERMIQUE

L'indicateur de stress thermique (THI : Temperature Humidity Index) a été calculé selon la formule suivante (Srivastava *et al.*, 2021) :

$THI = (1,8 \times T + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times HR) \times (1,8 \times T - 26,8)]$ avec T la température ambiante en °C et HR l'humidité relative en % (NRC, 1971).

Les valeurs maximales obtenues pour le THI et la température les plus proches de l'IA (5 jours autour de l'IA) ont été utilisées.

1.6. ANALYSES STATISTIQUES

L'ensemble des analyses a été conduite avec le logiciel RStudio® (RStudio Desktop 2022.02.3). Les effets de la production laitière, des réserves corporelles, des caractéristiques animales et du stress thermique ont été explorés à l'aide d'un modèle mixte de régression logistique (procédure glmer) incluant l'année comme effet aléatoire. Les effets fixes pris en compte dans le modèle sont les caractéristiques animales, les indicateurs de production laitière, de réserves corporelles et de stress thermique. Une analyse univariée préliminaire a permis d'écarter certaines variables ne présentant aucun effet sur la fertilité à l'IA. Les variables restantes ont été utilisées dans une procédure automatique de sélection de modèles, permettant d'aboutir à un modèle optimal (minimisation du critère d'AIC (Akaike Information Criterion)). Les seules variables imposées lors de la procédure de sélection de modèles sont la parité et le stade de lactation à l'IA. Des interactions d'ordre 1 ont été testées : parité * PL à l'IA, parité * variation de PL avant l'IA, parité * PV à l'IA, parité*variation de PV avant l'IA, parité* NEC à l'IA, parité * variation de NEC avant l'IA, parité * stade de lactation à l'IA, PV à l'IA * NEC à l'IA. Les comparaisons entre modalités ont fait l'objet d'un test de Tukey-Kramer. Un facteur est considéré comme significatif si $p < 0,05$. Une tendance est considérée si p est entre 0,05 et 0,10.

2. RESULTATS

2.1. CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON

L'échantillon était constitué de 1 138 lactations de 595 chèvres sur la période 1996-2020. Le rang de lactation s'étendait de 1 à 9 avec une moyenne de 2,0 (\pm 1,2). Autour de l'IA, les chèvres produisaient en moyenne 2,7 \pm 0,7 kg lait avec un PV moyen de 59,0 \pm 9,3 kg, une NEC moyenne lombaire et sternale à l'IA de 2,6 \pm 0,3 et 3,0 \pm 0,3 respectivement. Elles ont été inséminées en moyenne à 210,1 \pm 8,4 jours de lactation. Sur la période 1996-2020, la fertilité à l'IA moyenne de l'échantillon a été de 69,6% (28 à 85% selon les années). Les résultats du modèle sont présentés dans le tableau 1.

2.2. EFFETS DES CARACTERISTIQUES ANIMALES ET DES DONNEES CLIMATIQUES

Le **THI maximal à l'IA**, l'**échec à l'IA précédente** et l'interaction **parité * stade de lactation à l'IA** n'ont pas été retenus dans le modèle optimal car ils n'ont pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA. La **parité** n'a pas été un facteur de variation de la fertilité à l'IA car elle n'a pas été différente entre les primipares (69,3%) et les multipares (67,0%). Le **stade de lactation à l'IA** a eu tendance à affecter la fertilité à l'IA ($p=0,055$). Les chèvres inséminées entre 205 et 215 jours ont présenté une meilleure fertilité que celles inséminées à moins de 205 jours (71,3% vs 62,1%, $p=0,042$). La **température maximale à l'IA** n'a pas eu d'effets sur la fertilité ($p=0,142$).

2.3. EFFET DES INDICATEURS RELATIFS AUX RESERVES CORPORELLES

Le **PV à l'IA** a présenté un effet significatif sur la fertilité à l'IA sans différences significatives entre modalités. La **variation de PV avant l'IA**, et les interactions **parité * PV à l'IA** et **parité*variation de PV avant l'IA** n'ont pas été retenues dans le modèle optimal car ils n'ont pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA. La **NEC lombaire à l'IA** a présenté un effet significatif sur la fertilité à l'IA ($p=0,007$). Les chèvres ayant une $NEC \leq 2,25$ ont présenté une fertilité à l'IA plus faible que celles ayant une NEC comprise entre]2,25 ; 2,75] (63,2% vs 73,4%, $p=0,011$). L'interaction **parité * variation de note lombaire** a présenté un effet significatif sur la fertilité à l'IA ($p=0,002$). Il existe des différences significatives de fertilité entre modalités pour les primipares. Celles en gain de note lombaire ($>+0,25$ points de note) dans les trois mois et demi précédant l'IA ont présenté de moins bons résultats de fertilité à l'IA que celles en perte d'état ($<-0,25$ points de note) ($p=0,005$) ou en stabilité d'état (54,1% vs 79,0% vs 76,2%, $p<0,001$). En revanche pour les multipares, il n'y a pas eu d'effets de la variation de note lombaire sur la fertilité à l'IA. La **NEC sternale à l'IA** n'a pas été retenue dans le modèle optimal car elle n'a pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA. L'interaction **parité * variation de note sternale** a présenté une tendance sur la fertilité à l'IA ($p=0,079$). Les multipares en gain d'état sternal ont présenté de meilleurs résultats de fertilité que celles en perte (76,4% vs 54,6%, $p=0,003$). Les multipares en stabilité d'état sternal ont eu une meilleure fertilité que les chèvres en perte (71,8% vs 54,6% $p=0,009$). En revanche, la variation de note sternale n'a pas eu d'effets sur la fertilité chez les primipares.

2.4. EFFET DES INDICATEURS DE PRODUCTION LAITIERE

Les indicateurs de qualité du lait (TB, TP, TB/TP et CCS)

n'ont pas été retenus après l'étape d'analyse univariée.

La **PL à l'IA** a eu tendance à affecter la fertilité à l'IA ($p=0,059$). Les chèvres qui produisaient le plus au moment de l'IA ($>3,2$ kg) ont eu tendance à avoir une fertilité plus faible que celles qui produisaient le moins au moment de l'IA ($\leq 2,3$ kg) (61,7% vs 72,8%, $p=0,059$). L'interaction **parité*PL à l'IA** n'a pas été retenue dans le modèle optimal car elle n'a pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA.

La **variation de PL avant l'IA** n'a pas été retenue dans le modèle optimal car elle n'avait pas d'effets significatifs sur la fertilité à l'IA. L'interaction **parité * variation de PL avant l'IA** n'a pas été retenue dans le modèle optimal car elle n'a pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA.

3. DISCUSSION

Dans le cadre de la conduite de la reproduction au Pradel, la sélection des chèvres pour favoriser la fertilité avec la semence congelée porte ses fruits. En effet, le stade de lactation au moment de l'IA n'a présenté qu'une tendance qui est cohérente avec la littérature (Chanvallon *et al.*, 2013; Furstoss *et al.*, 2015; Freret *et al.*, 2018).

L'échec à l'IA précédente ne ressortait pas significative, à l'inverse d'autres études (Chanvallon *et al.*, 2013; Freret *et al.*, 2018).

Le Pradel respecte bien les recommandations pour la mise à la reproduction (Groupe Reproduction Caprine, 2013b) ce qui peut expliquer que les critères stade de lactation à l'IA et échec à l'IA précédente n'ont pas d'effets significatifs sur la fertilité à l'IA. Cela suggère qu'un bon respect de ces recommandations sur les femelles à inséminer améliore les résultats de fertilité.

De même la parité n'a pas eu d'effets sur la fertilité à l'IA contrairement à ce qui a pu être observé (Chanvallon *et al.*, 2013; Freret *et al.*, 2018).

Les valeurs maximales de température et de THI autour de l'IA n'ont pas eu d'effets significatifs sur la fertilité à l'IA. Dans notre étude, la température est mesurée par une station météorologique à l'extérieur de la ferme et non en bâtiment. Il est donc possible que l'exposition des animaux au stress thermique ne soit pas bien évaluée. Les indicateurs et les seuils (32°C pour la température et 80 pour le THI) choisis n'ont pas été discriminants. Certains auteurs suggèrent que les chèvres commencent à expérimenter un stress thermique au-dessus de 25°C (Kadzere *et al.*, 2002), d'autres considèrent un seuil de tolérance beaucoup plus haut entre 35°C et 40°C (Salama *et al.*, 2014; Sejian *et al.*, 2021) car la chèvre serait capable de mieux dissiper la chaleur du fait de son petit gabarit. Il n'y a donc pas de réel consensus en termes de seuil critique pour la température/THI pour la chèvre. Dans un contexte de changement climatique, la prise en compte du stress thermique dans l'analyse de la réussite à la reproduction est nécessaire et mérite plus d'investigations.

Le niveau de PL au moment de l'IA n'a présenté qu'une tendance sur la fertilité à l'IA qui est en accord avec ce qui a déjà été observé chez la chèvre (Arrebola *et al.*, 2014; Freret *et al.*, 2018) et chez la vache laitière (Michel *et al.*, 2003 ; Grimard *et al.*, 2006; Freret *et al.*, 2011) avec un effet délétère d'un haut niveau de production autour de la période de reproduction sur la fertilité. Cette tendance et l'absence de significativité pourraient être liés aux bonnes pratiques du Pradel sur le choix des chèvres à la mise à la reproduction.

Le PV à l'IA a présenté un effet significatif sans différences significatives entre modalités. La non significativité observée entre modalités est surprenante et est probablement liée aux classes établies ainsi qu'à la correction de p-value lors des comparaisons de Tukey-Kramer. Ce PV à l'IA est difficile à interpréter car les plus légères présentent une meilleure fertilité que les plus lourdes, la NEC est probablement plus pertinente que le PV.

La note lombaire peut être un bon critère d'évaluation des réserves corporelles du troupeau. En effet, la note lombaire ressortait dans nos analyses comme un indicateur de fertilité sur l'ensemble des animaux quelle que soit leur parité : pas d'interaction parité * note lombaire à l'IA. Ces résultats sont en cohérence avec ceux observés par Le Frileux *et al.*, (1995) qui indiquent que l'évolution de celle-ci est principalement liée au stade physiologique de la chèvre indépendamment de son âge. La baisse de fertilité observée chez les chèvres avec les notes les plus basses peut s'expliquer par une réponse au traitement hormonal moins efficace, résultats déjà observés chez la brebis (Sejian *et al.*, 2010) et chez la vache (de Graaff et Grimard 2018). L'état corporel peut également affecter le taux Page 3 sur 5
L'étude menée par Fidelle *et al.*, (2015), sur des brebis laitières a montré que celles ayant une NEC à l'IA >3 présentaient de meilleurs taux de mises-bas sur IA que celles ayant une NEC à l'IA <2. Chez la chèvre laitière, l'étude menée par Mellado *et al.*, (2004) a montré que la NEC au moment de la reproduction était positivement corrélée avec le taux de mises-bas et négativement corrélée au taux d'avortement. Les chèvres ayant une NEC <1,5 avaient trois fois moins de chance de mettre-bas par rapport à celles ayant une NEC plus élevée.

Chez les primipares, le gain de note lombaire a été défavorable à la fertilité à l'IA. Une hypothèse pour expliquer ce résultat est que les primipares qui reconstituaient leurs réserves lipidiques étaient également en croissance. Cette fonction biologique serait donc physiologiquement prioritaire au détriment de la reproduction (Mellado *et al.*, 2006, 2004). En revanche, la variation de note lombaire n'a pas eu d'effets chez les multipares. Concernant la variation de note sternale, les multipares en perte d'état corporel sternal ont eu tendance à présenter de moins bons résultats de fertilité que celles en stabilité ou gain d'état corporel sternal. Chez les brebis laitières, celles qui perdent de l'état sont sujettes à des pertes embryonnaires plus importantes (Fidelle *et al.*, 2015). Ces observations sur la variation d'état corporel sont cohérentes avec celles de Viñoles (2003) : l'augmentation du poids vif et de l'état corporel dans les trois mois qui précèdent la reproduction favorisent une augmentation du taux d'ovulation chez les brebis laitières. En revanche, la variation de note sternale ne semblait pas avoir d'effets chez les primipares. Chez la chèvre, le tissu adipeux a tendance à se déposer au niveau sternal et à augmenter avec l'âge (Le Frileux *et al.*, 1995). Parallèlement les animaux deviennent plus productifs, il est donc possible que l'effet de la variation de note sternale sur la fertilité à l'IA, liée à une mobilisation/reconstitution des réserves plus importante, soit plus marqué chez les multipares par rapport aux primipares. Ces résultats sont à considérer avec prudence car les indicateurs choisis pour refléter une trajectoire biologique sont assez sommaires. Entre autre, ils ne permettent pas de rendre compte des différences de cinétique de mobilisation/reconstitution pour les sites sternaux et lombaires (Le Frileux *et al.*, 1995; Morand-Fehr et Hervieu, 1999). Une approche par modéli-

sation des courbes de PV, de NEC et de PL pourra apporter plus de précisions et confirmer ou non ces hypothèses.

CONCLUSION

Au Pradel, le choix des femelles à inséminer en amont de la mise à la reproduction conduit à de bons résultats de fertilité à l'IA et une maîtrise d'un certain nombre de facteurs de risques d'échecs de reproduction. La valorisation de données temporelles grâce à une analyse multifactorielle a permis de quantifier l'effet de facteurs statiques et dynamiques sur la fertilité à l'IA. Les indicateurs relatifs aux réserves corporelles ont eu des effets sur la fertilité à l'IA. Afin de mieux caractériser la dynamique de production laitière et des réserves corporelles, une approche trajectoire à l'échelle lactation par modélisation de courbe de poids, de note d'état corporelle et de lait pourra servir d'appui pour confirmer ou non certains résultats. Les éléments de cette publication et les approches trajectoires à venir, pourront servir à améliorer la prédiction de la réussite à la reproduction d'un simulateur troupeau déjà existant (Puillet *et al.*, 2010) et ainsi mieux caractériser les interactions entre les pratiques d'alimentation et de reproduction dans une finalité d'améliorer le conseil dans le pilotage des troupeaux caprins.

Les auteurs remercient Alain Pommaret (Le Pradel) et Claire Boyer (Institut de l'Élevage) pour la fourniture des données et l'ensemble des informations sur la conduite de la reproduction, et le personnel de la ferme expérimentale du Pradel qui a contribué à la collecte de données sur 24 années.

Arrebola F, González O, Torres R, Abecia JA. 2014 Anim Prod Sci, 54 : 356–62.

Bedere, N., Delaby, L., Ducrocq, V., Leurent-Colette, S., Disenhaus, C., 2016. J. Dairy Sci. 99, 1266–1276.

Branca A. 2004. Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 59, p. 73-77

Chanvallon A., Coyral-Castel S., de Crémoux R., Piacere A., Ribaud D., 2013. Rencontres Rech Ruminants, 20, 376.

Cutullic E, Delaby L, Gallard Y, Disenhaus C., 2012 Animal, vol. 6, Elsevier; p. 476–87.

de Graaff, W., Grimard, B., 2018. Theriogenology 112, 34–43.

De Santiago-Miramontes, M.A., Malpaux, B., Delgadillo, J.A., 2009. Anim. Reprod. Sci. 114, 175–182.

Fidelle F., Arranz J.M., Landagaray F., Sallato O., Mendez H.I., Soulas C., Fatet A., Fréret S. 2015. Rencontres Rech Ruminants, 22, 203-206.

Freret S, Salvetti P, Gatien J, Humblot P, Ponsart C. 2011 Rencontres Rech Ruminants; 18, 89-92.

Freret S, Philippe P, Brun T, Legarto J, Clément V, Bidan F. 2018. Rencontres Rech Ruminants, 24, 393–6.

Friggens NC, Disenhaus C, Petit H V., 2010. Animal 2010;4:1197–213.

Furstoss V, David I, Fatet A, Boissard K, Clément V, Bodin L, 2015. Animal, 9 :12, 1935-1942.

Groupe Reproduction Caprine. 2013a: Fiche technique : Le traitement hormonal d'induction et de synchronisation de l'oestrus en vue d'une IA, Collection l'Essentiel (CR n°0013 31 018), 4 p1–41–4.

Groupe Reproduction Caprine 2013b: Fiche technique : Le choix des chèvres et l'organisation du chantier d'IA. Institut de l'élevage, Collection l'Essentiel (CR n°0013 31 019), 4 p1–4.

Grimard B, Freret S, Chevallier A, Pinto A, Ponsart C,

Humblot P. 2006 Anim Reprod Sci ;91:31–44.
 Kadzere, C.T., Murphy, M.R., Silanikove, N., Maltz, E., 2002. Livest. Prod. Sci. 77, 59–91.
 Le Frileux, Y., Pommaret, A., Hervieu, J., Morand-Fehr, P., Brousseau, J.Y., Coutineau, H., Dunord, M., Dupont, J.-P., Grimault, Y., Broqua, B., Vanquackebeke, E., 1995. Body Cond. sheep goats Methodol. Asp. Appl. 160, 151–160.
 Mellado, M., Valdez, R., Lara, L.M., García, J.E., 2004. Small Rumin. Res. 55, 191–198.
 Mellado, M., Valdéz, R., García, J.E., López, R., Rodríguez, A., 2006. Small Rumin. Res. 63, 110–118.
 Michel A, Ponsart C, Freret S, Humblot P. 2003 Rencontres Rech Ruminants;10:131–4.
 Morand-Fehr, P., Hervieu, J., 1999. La chèvre 231, 22–25.
 NRC, 1971. *NA o. Sciences, ed, Washington, DC.*
 Puillet L, Martin O, Sauvart D, Tichit M., 2010. Animal 2010;4:2084–98.
 Salama, A.A.K., Caja, G., Hamzaoui, S., Badaoui, B., Castro-Costa, A., Façanha, D.A.E., Guilhermino, M.M., Bozzi, R., 2014. Small Rumin. Res. 121, 73–79.
 Sejian, V., Maurya, V.P., Naqvi, S.M.K., Kumar, D., Joshi, A., 2010. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl). 94, 154–161.
 Sejian, V., Silpa, M. V., Reshma Nair, M.R., Devaraj, C., Krishnan, G., Bagath, M., Chauhan, S.S., Suganthi, R.U., Fonseca, V.F.C., König, S., Gaughan, J.B., Dunshea, F.R., Bhatta, R., 2021. Animals ;11;4.
 Srivastava A, Yadav P, Mahajan A, Anand M, Yadav S, Madan AK, et al. 2021 J Therm Biol;96:102845.
 Viñoles C. 2003. Department of Clinical Chemistry;PhD:120
 Zarazaga LA, Gatica MC, Gallego-Calvo L, Celi I, Guzmán JL. 2014 Anim Reprod Sci;146:170–5.

Tableau 1 : Modèle sur les variables retenues sur fertilité estimées à l'IA sur 1138 lactations (les modalités ayant des lettres différentes sont statistiquement significatives, les modalités ayant des chiffres différents sont des tendances observées)

Variable	Modalités	Effectif (n = 1,138 lactations)	Fertilité IA (%)
Stade de lactation à l'IA (p=0,055)	<205	167	62,1 ¹
	[205 ; 215[	736	71,3 ²
	≥215	235	71,1 ¹²
Parité (p=0,926)	1 = primipares	534	69,3
	2+ = multipares	604	67,0
Température à l'IA (°C) (p=0,142)	≤32	777	71,2
	>32	361	64,9
NEC Lombaire IA (p=0,007)	≤2,25	239	63,2 ^a
	]2,5 ; 2,75]	768	73,4 ^b
	≥3	131	67,8 ^{ab}
PV à l'IA (kg) (p=0,031)	≤52	290	72,1
	]52 ; 65]	564	62,0
	>65	284	70,5
PL à l'IA (kg/j) (p=0,059)	≤2,3	390	72,8 ¹
	]2,3 ; 3,2]	537	69,5 ¹²
	>3,2	211	61,7 ²
Variation de note lombaire : Parité (p=0,002)	Gain :1	173	54,1 ^a
	Perte : 1	96	79,0 ^b
	Stabilité :1	265	76,2 ^b
	Gain : 2+	192	67,6
	Perte : 2+	67	73,3
	Stabilité : 2+	345	64,0
Variation de note sternale : Parité (p=0,079)	Perte : 1	100	70,9
	Gain :1	168	70,9
	Stabilité :1	266	70,4
	Perte : 2+	81	54,6 ^a
	Gain : 2+	185	76,4 ^b
	Stabilité : 2+	338	71,8 ^b