



Capacité des doubles troupeaux herbagers bovins laitiers-bovins allaitants a concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une flexibilité accrue de fonctionnement

Zakary Diakite

► To cite this version:

Zakary Diakite. Capacité des doubles troupeaux herbagers bovins laitiers-bovins allaitants a concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une flexibilité accrue de fonctionnement. Sciences de l'Homme et Société. 2018. Français. NNT : . tel-02791476

HAL Id: tel-02791476

<https://hal.inrae.fr/tel-02791476>

Submitted on 5 Jun 2020

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.

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

Spécialité : Agronomie, Economie et Gestion de l'Environnement

**Ecole Doctorale des Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement
(ED SVSAE, ED 65)**

Présentée par :

Zakary Rodrigue DIAKITE

**CAPACITE DES DOUBLES TROUPEAUX HERBAGERS BOVINS LAITIERS –
BOVINS ALLAITANTS A CONCILIER UNE MEILLEURE VALORISATION
DU PARCELLAIRE AVEC UNE FLEXIBILITE ACCRUE DE FONCTIONNEMENT**

Soutenue le 17 décembre 2018 devant la commission d'Examen

Composition du jury :

Laurent RIEUTORT	Président	Professeur UCA, UMR territoires, IADT
Aude RIDIER	Rapporteur	Maître de Conférences UMR SMART-LERECO
Philippe LESCOAT	Rapporteur	Professeur AgroParisTech, UMR SAD-APT
Magali JOUVEN	Rapporteur	Maître de Conférences Sup Agro, UMR SELMET
Florence GARCIA	Examineur	Ingénieure de Recherche INRA, UMR Pegase
Claire MOSNIER	Examineur	Chargée de recherches INRA, UMR Herbivores
René BAUMONT	Directeur de thèse	Directeur de Recherche INRA, UMR Herbivores
Gilles BRUNSCHWIG	Directeur de thèse	Professeur VetAgro-Sup, UMR Herbivores

Thèse préparée au sein de l'Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores, 1213, INRA-VetAgro Sup

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

Spécialité : Agronomie, Economie et Gestion de l'Environnement

**Ecole Doctorale des Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement
(ED SVSAE, ED 65)**

Présentée par :

Zakary Rodrigue DIAKITE

**CAPACITE DES DOUBLES TROUPEAUX HERBAGERS BOVINS LAITIERS –
BOVINS ALLAITANTS A CONCILIER UNE MEILLEURE VALORISATION
DU PARCELLAIRE AVEC UNE FLEXIBILITE ACCRUE DE FONCTIONNEMENT**

Soutenue le 17 décembre 2018 devant la commission d'Examen

Composition du jury :

Laurent RIEUTORT	Président	Professeur UCA, UMR territoires, IADT
Aude RIDIER	Rapporteur	Maître de Conférences UMR SMART-LERECO
Philippe LESCOAT	Rapporteur	Professeur AgroParisTech, UMR SAD-APT
Magali JOUVEN	Rapporteur	Maître de Conférences Sup Agro, UMR SELMET
Florence GARCIA	Examineur	Ingénieure de Recherche INRA, UMR Pegase
Claire MOSNIER	Examineur	Chargée de recherches INRA, UMR Herbivores
René BAUMONT	Directeur de thèse	Directeur de Recherche INRA, UMR Herbivores
Gilles BRUNSCHWIG	Directeur de thèse	Professeur VetAgro-Sup, UMR Herbivores

Thèse préparée au sein de l'Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores, 1213, INRA-VetAgro Sup

A Ma MAMAN

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements sont à l'endroit de Claire MOSNIER et mes directeurs de thèse Gilles BRUNSCHWIG et René BAUMONT qui m'ont permis de faire cette thèse. Leur assistance, clairvoyance et rigueur ont été d'une aide précieuse.

Je remercie les membres de mon comité de pilotage de thèse Laurence PUILLET, Vincent MANNEVILLE, Audrey MICHAUD, pour leurs orientations et plus particulièrement Michael CORSON dont l'aide et les interactions ont été déterminantes pour finaliser la thèse.

Je tiens à remercier Aurélie WILFART qui avec Michael CORSON m'ont permis d'intégrer le monde de la recherche et dont les encouragements furent capitaux.

Mes pensées vont également vers mes professeurs de AgroParisTech partant de Gabriel LANG, Stéphane DE CARA à Jean-Christophe BUREAU ainsi que tous mes enseignants d'AgroParisTech et de l'INP-HB (Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro « Côte d'Ivoire ») de qui je tiens des compétences techniques et scientifiques qui m'ont beaucoup servi.

Je remercie tous mes collaborateurs de VetAgro Sup pour leur accueil en particulier les thésards et les informaticiens pour les pauses café et les déjeuners assez rigolos... sans oublier les secrétaires du D1 pour leur disponibilité et surtout Alexia ARNAUD-DUPONT pour sa fraternité.

Merci à toute l'équipe COMETE « Conception, Modélisation et Evaluation des sysTèmes d'Elevage d'herbivores » ainsi qu'à tous mes contacts de l'INRA de Theix (thésards, chercheurs...) pour leur accueil et leur gentillesse.

Tous mes remerciements à ma famille DIAKITE pour son soutien depuis la Côte d'Ivoire avec une pensée spéciale pour ma mère CAMARA Madama et ma chérie YAPI Chiépo Estelle-Pamela.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SUMMARY	IX
RESUME	-XIII
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE	3
1. Avant-propos	3
2. Contexte général et problématique	4
3. Hypothèses et Objectifs de la thèse	6
4. Approche	7
5. Structure de la thèse	8
CHAPITRE II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	11
1. L'élevage bovin et les zones de montagnes à fort potentiel herbager	11
1.1 Les produits d'élevage bovin	11
1.2 Zones de montagne : zones à fort potentiel herbager	12
1.3 Systèmes bovins mixtes herbivores de moyenne montagne.	13
1.4 Autonomie fourragère et alimentaire en élevages bovins herbagers.....	15
1.5 Gestion des systèmes d'élevages dans les zones contraignantes	17
2. Flexibilité des systèmes d'élevage	18
2.1 Les différentes catégories d'aléas	21
2.2 Gestion des aléas économiques et aléas de prix.....	23
3. La question de la durabilité des systèmes d'élevage bovin.....	24
3.1 Agroécologie et systèmes bovins mixtes herbagers.....	24
3.2 La biodiversité des végétations de prairie	25
3.3 Durabilité des systèmes d'élevage	27
4. La simulation comme méthode d'exploration des systèmes d'élevage	28
4.1 Les outils d'évaluation des systèmes de production agricole	28

4.2	Les modèles de simulation	30
4.2.1	Modèles dynamiques et modèles statiques.....	30
4.2.2	Spécificités des modèles.....	31
4.2.3	Modèles économiques	32
4.2.4	Les modèles d'optimisation bioéconomiques	32
5.	Conclusion.....	34
CHAPITRE III : OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODOLOGIE GENERALE		37
1.	Objectifs scientifiques	37
1.1	Développement de la question de recherche.....	37
1.2	Trois hypothèses de thèse.....	39
1.3	Trois axes de la thèse	40
1.4	Dispositifs de mise en œuvre.....	44
2.	Méthodologie générale : stratégie adoptée.....	46
2.1	Enquête exploratoire	46
2.2	Démarche de la thèse	47
2.3	Choix du modèle support : Orfee.....	49
2.4	Les systèmes de production étudiés : les cas-types.....	50
2.5	Plan d'expérience général	51
2.6	Résultats attendus.....	53
CHAPITRE IV : LE MODELE ORFEE ET SON ADAPTATION A LA QUESTION DE RECHERCHE		57
1.	Modèle Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment).....	57
1.1	Description globale.....	57
1.1.1	Activités animales et principaux produits.....	58
1.1.2	Démographie des troupeaux.....	60
1.1.3	Alimentation	60

1.1.4	La fonction objective : Le résultat courant	60
1.1.5	Quelques contraintes d'optimisation	61
1.2	Implémentation	61
2.	Adaptation du modèle support pour traiter les questions abordées.....	63
2.1	Intégration de l'hétérogénéité du parcellaire	63
2.1.1	Les types de prairie pour représenter les zones de montagne.....	64
2.1.2	Les valeurs alimentaires.....	64
2.1.3	Les itinéraires techniques (ITK*)	65
2.1.4	Intégration d'éléments relatifs aux différents types de prairie.....	65
2.2	Intégration des contraintes géographiques	73
2.2.1	Paramètres utilisés pour la prise en compte des pentes et distances....	73
2.2.2	Intégration des contraintes de pentes déterminant la possibilité de fauche ou de pâturage des prairies	74
2.2.3	Intégration des contraintes pour matérialiser les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation.....	75
3.	Paramétrage du modèle Orfee	76
3.1	Les cas-types	76
3.2	Données	76
3.3	Spécification des modalités de simulation : état des paramètres.....	79
4.	Evaluation du modèle Orfee avec les adaptations apportées	79
4.1	Les valeurs observées pour le calibrage du modèle.....	80
4.2	Résultats de simulations basée sur les spécifications des paramètres fixes et optimisés.....	82
4.2.1	Production végétale et alimentation.....	82
4.2.2	Les récoltes de fourrage par UGB	83
4.2.3	La production animale	85
4.2.4	Les résultats économiques	88
4.2.5	Achats et ventes	89

4.3	Résultats globaux de l'évaluation du modèle Orfee après adaptation	90
5.	Conclusion.....	90
CHAPITRE V : Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne		
		92
1.	Introduction.....	95
2.	Materials and methods.....	97
2.1.	Model overview.....	98
2.2.	Adaptation of the model to mountain areas.....	98
2.1.1	Integration of elements related to different types of grassland.	98
2.1.2	Geographic constraints	100
2.3.	Farm types.....	101
2.4.	Experimental design.....	102
2.5.	Parameters and scenarios	103
2.6.	Model settings and evaluation	104
2.7.	Criteria analyzed for herds compositions analysis	105
3.	Results.....	106
3.1	Evaluation of the ability of the model to represent mixed milk/meat bovine herd systems.....	106
3.2	Effect of herd cattle type mixes on production, feeding and grazed grass utilization rate.....	107
3.3	Animal products: meat and milk production	107
3.4	Grass and concentrate consumption.....	108
3.5	Grazed grass utilization rate	109
3.6	Economic performance	109
4.	Discussion	110
4.1	Modelling approach.....	110
4.2	Grazed grass utilization.....	111

4.3	Production, economy and work	112
5.	Conclusion.....	113
CHAPITRE VI : Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix		
		122
1.	Introduction.....	125
2.	MATERIALS AND METHODS.....	127
2.1	Model description	127
2.2	Production systems studied	129
2.3	Experimental design for price variations.....	130
2.4	Sensitivity Indexes.....	130
2.4.1	Local sensitivity analysis to observe changes in the number of AU and sensitivity of net profit to individual prices	131
2.4.2	Metamodel construction	131
▪	General metamodel.....	131
▪	Example of estimating the elasticity of net profit to milk price	132
3.	Results.....	132
3.1	Reference values of technical data.....	132
3.2	Farm potential to adapt stocking rate in the face of price variations	133
3.3	Sensitivity of net profit to price variations	133
3.3.1	Profit response to individual and interacting price variations	133
3.3.2	Sensitivity of net profit to price variations	134
4.	Discussion	135
4.1	Local and global sensitivity indices.....	135
4.2	Influence of case-study farm characteristics on results	135
4.3	Potential of farms to adapt to price fluctuations	135
4.4	Cost effectiveness of mixed cattle systems to reduce variability in net profit	
	136	
5.	Conclusion.....	137

CHAPITRE VII : Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers : Analyse environnementale des systèmes bovins mixtes	158
1. Introduction.....	162
2. Matériel et méthodes	163
2.1 Modèle et systèmes de production utilisés.....	163
2.1.1 Description du modèle.....	163
2.1.2 Les systèmes de production étudiés	165
2.2 Évaluation environnementale.....	167
2.2.1 Impacts environnementaux : consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre	167
2.2.2 Evolution des services écosystémiques	168
2.2.3 Utilisation de la biomasse.....	176
3. Résultats.....	177
3.1 Émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie	177
3.2 Services écosystémiques	180
3.3 Utilisation de la biomasse	182
4. Discussion	182
4.1 Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre.....	182
4.2 Services écosystémiques et Utilisation de la biomasse.....	184
5. Conclusion.....	186
CHAPITRE VIII : DISCUSSION GENERALE	195
1. Dispositif expérimental.....	195
1.1 Le modèle d'optimisation bioéconomique	195
1.1.1 Choix de la modélisation au dépend des expérimentations terrain	195
1.1.2 Intérêt du modèle bioéconomique Orfee et son adaptation	196
1.2 Systèmes explorés et scénarios : enquête vs cas-types	197
1.3 Représentativité du modèle et domaine de validité	198

2. Durabilité des systèmes bovins mixtes herbagers.....	199
2.1 Valorisation du potentiel herbager en montagne	199
2.2 Flexibilité et avantages des systèmes bovins mixtes.....	202
CHAPITRE IX : CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	207
1. Conclusion.....	207
2. Perspectives.....	209
2.1 Charge de travail et élevage bovin mixte	209
2.2 Évolution et préservation des services écosystémiques	210
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES	211
REALISATIONS SCIENTIFIQUES	237
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	243
LISTE DES ILLUSTRATIONS	247
ANNEXES	253

SUMMARY

Permanent pastures represent potential reservoirs of forage and cover more than 66% of the area of mountain zones, such as the Massif Central, where they cover nearly 80% of the agricultural area of the Auvergne region. Nonetheless, these zones have strong natural limitations that make it difficult to use herbage resources. Geographic characteristics of fields and farm organization must thus be considered in more detail in the management of forage areas to improve pasture-based livestock systems functioning. Simultaneous production of dairy and beef cattle herds (i.e. “mixed dairy-beef cattle systems”) falls within the scope of agroecological approaches and may appear as factor favoring the functioning of cattle systems with greater forage autonomy and better economic and environmental performances. In addition, a high degree of forage autonomy at the farm scale seems to ensure improvement in the economic performance of farms, decreasing in particular the use of concentrated feed. Also, increased diversity of pastures vegetation seems to make them easier to exploit and increase the resistance of the forage system to climate variations.

In this thesis, we analyzed and modeled the functioning of these mixed dairy-beef cattle systems to explore compromises between livestock management and the production level of the herds, overall forage autonomy, use of the geographical diversity, level and variability of profits and sustainability of pasture use.

To address this issue, we tested three hypotheses:

- I. Mixed dairy-beef cattle systems use grazed herbage better than specialized cattle systems (dairy or beef) in zones with constraints while maintaining good economic performance.
- II. Under conditions of optimal economic functioning, mixed dairy-beef cattle systems adapt better to price variations, generating more stable and higher profits, than specialized cattle systems.
- III. Mixed dairy-beef cattle systems use biomass well, with better environmental performances, while conserving ecosystem services of the vegetation.

From these hypotheses, three study axes were developed:

- (1) Ability of mixed dairy-beef cattle systems to optimize use of geographic diversity by grazing herbage in mountain livestock systems

- (2) Adaptation and stability of profits of mixed dairy-beef cattle systems in the face of price variations
- (3) Conservation of ecosystem services and decrease of environmental impacts of mixed dairy-beef cattle systems

The method used was based on simulation under conditions of optimal economic functioning of farms. We used the bioeconomic optimization model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment), developed to assess livestock systems that can grow cash crops in France, based on data from two farms in a steady state (case studies BL18 and BL22 from the French livestock-network database DIAPASON). Orfee was adapted to consider geographic constraints and field heterogeneity based on the French typology of permanent prairies. We then used the model to predict the best equilibria, corresponding to optimal conditions of functioning of farms, represented by the two case studies in five scenarios (100D, 75D, 50D, 25D and 0D, where D represents the percentage of dairy cattle in the herd). Methods of exploration and analysis (experimental design, sensitivity analysis, statistical analysis, metamodeling, comparison of environmental performances, juxtaposition of pasture typologies) with the simulations yielded robust biotechnical and economic indicators for assessing mixed dairy-beef cattle systems in mountain zones.

Based on the results, mixed dairy-beef cattle systems with 25-50% dairy cattle maximize the use of grazed herbage in zones with constraints on mechanization and access of dairy cows to pastures. These systems also have a greater ability to adapt to economic variations, with better levels of animal production and more attractive and less variable economic performances than those of specialized cattle systems. These systems also have interesting environmental performances (greenhouse gas emissions, energy use and conservation of ecosystem services related to vegetative cover).

Overall, mixed dairy-beef cattle systems, especially those with 50% dairy cattle, favor higher efficiency and greater forage autonomy, while ensuring higher flexibility and better environmental performances, than specialized cattle systems.

This study also provided a simulation model (an adaptation of Orfee) that represents field heterogeneity and geographic characteristics of mountain zones when assessing performances of pasture-based livestock systems.

Keywords: simulation model, bioeconomic optimization, mixed cattle systems, field arrangement, pastures, grazing, case study, typology, dairy cattle, beef cattle, profit, adaptation, flexibility, sustainability, ecosystem services, biomass

RESUME

Les prairies permanentes constituent des réservoirs potentiels d'alimentation fourragère et occupent plus de 2/3 des surfaces dans les zones de montagne à l'instar du Massif central où elles représentent près de 80% de la surface agricole auvergnate. Toutefois ces zones présentent de fortes contraintes naturelles qui rendent difficile la valorisation des ressources en herbe. Les caractéristiques géographiques des parcelles et la structure des exploitations doivent donc être mieux prises en compte dans la gestion des surfaces fourragères pour améliorer le fonctionnement des systèmes d'élevage bovins herbagers. La conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants, s'inscrit dans une démarche relevant de l'agroécologie et qui peut apparaître comme un facteur favorable au fonctionnement des systèmes d'élevage bovins avec une plus grande autonomie fourragère et de meilleures performances économiques et environnementales. Par ailleurs, un haut niveau d'autonomie fourragère à l'échelle de l'exploitation semble être un gage d'amélioration de la performance économique des exploitations en limitant notamment l'utilisation d'aliments concentrés. D'autre part la diversité des végétations de prairies semble favoriser leur souplesse d'exploitation et la résistance du système fourrager aux aléas climatiques.

Dans cette thèse nous avons analysé et modélisé le fonctionnement de ces systèmes d'élevage mixtes avec doubles troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants pour explorer les compromis entre conduite d'élevage et niveau de production des troupeaux, autonomie fourragère globale, valorisation de la diversité géographique, niveaux et variabilité des profits et durabilité de l'utilisation des prairies.

Pour répondre à cette problématique nous avons testé trois hypothèses :

- I. La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les systèmes bovins spécialisés dans les zones de contraintes tout en maintenant de bonnes performances économiques.
- II. Dans des conditions optimisées de fonctionnement économiques, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés.

- III. Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations.

Ces hypothèses ont été déclinées en trois axes d'étude :

- (1) - Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne
- (2) - Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix
- (3) - Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant

La méthodologie employée s'est appuyée sur des simulations dans les conditions de fonctionnement économique optimales des exploitations. Nous avons utilisé le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) développé pour explorer les systèmes d'élevages, pouvant comporter des cultures de rente en France, associé à des données d'exploitations en régime de croisière (choix des cas-types BL18 et BL22) issues de la base de données des exploitations, baptisée DIAPASON. Le modèle a été adapté pour prendre en compte les contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcellaires basée sur la typologie française des prairies permanentes. Nous avons ainsi souhaité observer les meilleurs équilibres correspondants aux conditions optimales de fonctionnement des exploitations représentées par deux cas-types déclinés selon cinq scénarios (D% étant le pourcentage d'UGB bovin laitier avec la différence en UGB bovin allaitant) : scénarios 100D, 75D, 50D, 25D et 0D. Des méthodes d'exploration et analyses (Plans d'expérience, Analyse de sensibilité, Analyse statistique, métamodélisation, comparaison des performances environnementales, juxtaposition de typologies de prairie) ont permis via les simulations d'obtenir des indicateurs biotechniques et économiques robustes pour évaluer les systèmes bovins mixtes herbagers dans les zones de montagnes.

Selon les résultats obtenus, les systèmes bovins mixtes intégrant de 25 à 50% d'UGB bovin laitier, maximisent la valorisation de l'herbe par pâturage dans les zones soumises à des contraintes de mécanisation et d'accès aux vaches laitières. Ces

systèmes d'exploitation présentent également les meilleures capacités d'adaptions aux aléas économiques avec de bonnes productions animales, des performances économiques intéressantes et moins variables, comparées aux systèmes bovins spécialisés. Ces systèmes présentent également d'intéressantes performances environnementales (émissions de gaz à effet de serre, efficience énergétique et la préservation services écosystémiques liées aux couverts végétaux).

Globalement les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant, et plus particulièrement les systèmes équilibrés entre troupeau bovins laitiers et troupeau bovins allaitants, favorisent une meilleure efficience et une meilleure autonomie alimentaire tout en garantissant un bon niveau de flexibilité et de bonnes performances environnementales comparés aux systèmes bovins spécialisés.

Nos travaux ont fourni par ailleurs un simulateur (Orfee adapté par nos soins) à même de prendre en compte l'hétérogénéité du parcellaire et les caractéristiques géographiques des zones de montagnes dans l'évaluation les performances des systèmes d'élevage herbagers.

Mots clés : modèle de simulation, optimisation bioéconomique, systèmes bovin mixte, parcellaire, prairie, pâturage, cas-type, typologie, bovin laitier, bovin allaitant, profit, adaptation, flexibilité, durabilité, services écosystémiques, biomasse

CHAPITRE I.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

1. Avant-propos

L'UMR1213 Herbivores « Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores » dans laquelle j'ai réalisé ma thèse conduit des recherches pour un élevage d'herbivores performant aux plans économique et environnemental, valorisant des fourrages et d'autres ressources non compétitives avec l'alimentation humaine, et en phase avec les attentes sociétales (bien-être animal, qualité des produits). Les travaux de L'UMR1213 Herbivores portent sur la compréhension des fonctions animales ainsi que les impacts des pratiques d'élevage sur l'animal et l'environnement. La thèse s'inscrit dans la lignée des travaux réalisés à l'UMR1213 Herbivores notamment sur les thématiques traitées par l'équipe COMETE « Conception, Modélisation et Evaluation des systèmes d'Elevage d'herbivores ». L'équipe COMETE étudie les systèmes d'élevage et leurs composantes (troupeau et lots d'animaux, productions de fourrages et de céréales, moyens de production, pratiques de production), avec un accent sur les systèmes herbagers en zones défavorisées ou de montagne, dont les systèmes mixtes combinant plusieurs espèces ou productions (animaux, végétaux). L'équipe COMETE évalue la dynamique des performances (stabilité, résilience...) en réponse aux changements et/ou aléas économiques, climatiques et biologiques, et analyse les synergies ou les compromis entre les services écosystémiques. La modélisation est utilisée pour concevoir et évaluer des systèmes ex-ante, et comprendre et tester les compromis. L'évaluation de la durabilité de systèmes d'élevage repose sur les indicateurs de pratiques ou des performances (observés et/ou modélisés) qui sont intégrés dans les évaluations multicritères. La thèse intervient dans le cadre du Contrat de Plan Etat Région 2015-2020 (CPER 2015-2020) destiné au développement du territoire auvergnat, elle a pour but d'élaborer des solutions innovantes d'évolution des élevages bovin sur le territoire auvergnat. Le travail réalisé au cours de cette thèse s'articule autour des mots clé suivant : modèle de simulation, optimisation bioéconomique, systèmes bovin mixte, parcellaire, prairie, pâturage, cas-type, typologie, bovin laitier, bovin allaitant, profit, adaptation, flexibilité, durabilité, services écosystémiques, biomasse.

2. Contexte général et problématique

Plus de la moitié du territoire Français est utilisée à des fins agricoles (Farruggia *et al.*, 2008) et les prairies permanentes représentent environ 1/3 des surfaces agricoles utiles (Le Gall *et al.*, 2007). Les prairies permanentes constituent des réservoirs potentiels de fourrages et occupent plus de 2/3 des surfaces dans les zones de pleine montagne (Agreste, 2011 : www.agreste.agriculture.gouv.fr) à l'instar du Massif central avec près de 80% de la surface agricole auvergnate (Agreste, 2011 : www.agreste.agriculture.gouv.fr). La surface moyenne des élevages bovins du Massif central a augmenté ces dernières décennies alors que la main-d'œuvre est restée stable, on a 56 ha et 1,9 UTA en 2000 vs 68 ha et 1,9 UTA en 2007 en moyenne par exploitation orientée bovin lait (Agreste, 2008 : www.agreste.agriculture.gouv.fr). Même si ces zones sont riches en ressources herbagères il s'agit toutefois de zones à fortes contraintes naturelles. Dans ce contexte, les agriculteurs ont à gérer des parcelles de plus en plus éclatées par la pression foncière et des surfaces toujours plus éloignées et hétérogènes. Les agriculteurs présents dans les zones de montagne doivent faire face à de nombreuses contraintes structurelles. Les caractéristiques des parcelles couramment identifiées comme contraignantes pour leur utilisation sont la distance au siège d'exploitation, la surface, la pente et l'altitude (Brunschwig *et al.*, 2006; Garcia-Launay *et al.*, 2012). La distance au siège et la surface sont des éléments clés de l'attribution d'une parcelle au pâturage des vaches laitières qui rejoignent la salle de traite deux fois par jour (Andrieu *et al.*, 2007). La pente et l'altitude sont des déterminants de l'usage des parcelles en zone de montagne (Fleury *et al.*, 1996; Andrieu *et al.*, 2007). Les contraintes se cumulent souvent sur les parcelles des exploitations de montagne, réduisant ainsi la gamme et la saisonnalité des utilisations possibles. La fréquence et l'ampleur des aléas climatiques compliquent aussi de plus en plus la gestion de la production fourragère et du pâturage (Baumont *et al.*, 2008; Mosnier, 2009). Les conséquences de ces contraintes peuvent être lourdes en termes de charges de structure (coûts et temps de déplacements...), voire d'adéquation entre la production fourragère et les besoins des animaux au cours de la saison. La diversité géographique des zones de montagnes ne joue pas en faveur de la valorisation des parcelles (Fleury *et al.*, 1996). Les caractéristiques géographiques des parcelles doivent donc être mieux prises en compte dans la gestion des surfaces fourragères pour améliorer le fonctionnement de ces exploitations.

Par ailleurs les aléas climatiques rendent difficile la gestion de la production fourragère et du pâturage (Baumont *et al.*, 2008; Mosnier, 2009) et les aléas économiques qui interviennent à travers la variation des prix des produits et l'évolution des conjonctures économiques peuvent menacer la capacité de ces exploitations à dégager un revenu stable. Les prix des intrants utilisés dans les systèmes de production ont augmenté de 35 % en moyenne entre 2005 et fin 2012 en France (Chatellier *et al.*, 2013). La variabilité des prix des intrants et des produits a augmenté en raison de politiques commerciales plus libérales. Les aléas économiques constituent ainsi une source de variabilité des profits des exploitations qui peut menacer leur pérennité. La capacité des systèmes d'élevage à résister et à s'adapter aux aléas, que ces derniers soient naturels ou économiques, (Reix, 1997; Sauvart and Perez, 2010) notamment la flexibilité des systèmes s'avère essentielle pour leur durabilité économique. De plus les préoccupations autour de la durabilité de l'agriculture émergent depuis les années 1980 (Landais, 1998). Les réglementations environnementales interviennent avec le problème de préservation des ressources naturelles et de changement climatique qui devient de plus en plus préoccupant. Les exploitations se trouvent ainsi engagées dans des démarches de signes de qualités et contraintes par des cahiers de charge. Le respect de l'environnement et l'utilisation durable des prairies permanentes suppose une préservation de la biodiversité lors de leur exploitation dans les exploitations (PDRN : Plan de Développement Rural National, version 2001).

La conduite simultanée d'un troupeau bovins laitiers et d'un troupeau bovins allaitants dans une même exploitation permet d'exploiter avec une plus grande efficacité les surfaces de potentiels différents dans des zones de montagne. La diversité animale, végétale et géographique associée aux exploitations conduisant des doubles troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants correspond plus étroitement aux principes de l'agroécologie. Ces systèmes peuvent alors apparaître comme ayant une meilleure résilience globale, dans un contexte d'augmentation de la fréquence des aléas. Un haut niveau d'autonomie fourragère à l'échelle de l'exploitation semble un gage d'amélioration de la performance économique des exploitations et limite l'utilisation d'aliments concentrés. La diversité des prairies semble favoriser leur souplesse d'exploitation et la résistance du système fourrager à des aléas climatiques.

Dans ce contexte, il est important de pouvoir explorer les systèmes bovins herbagers sous contraintes pour déterminer les compromis qu'il est possible d'atteindre entre

niveau de production, autonomie fourragère, flexibilité des systèmes et préservation de l'environnement. L'autonomie fourragère, la flexibilité des systèmes d'élevages face aux aléas économiques et leur capacité à préserver l'environnement sont des composantes essentielles à réunir pour garantir la rentabilité et la durabilité des systèmes d'élevage bovins en zones contraignantes. Les capacités systèmes associant troupeaux bovins laitier et bovins allaitant à concilier valorisation du parcellaire, diversité animale, végétale et géographique et une résilience fonctionnement accrue est à regarder de près.

3. Hypothèses et Objectifs de la thèse

La question générale qui se pose est de savoir : quelles sont les capacités des doubles troupeaux bovins laitiers bovins - allaitants herbagers à concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une plus grande diversité biologique et une résilience accrue de fonctionnement ?

Pour répondre cette question, nous proposons trois Hypothèses :

Hypothèse 1 : La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les systèmes bovins spécialisés dans les zones de montagnes tout en maintenant de bonnes performances économiques.

Hypothèse 2 : Dans des conditions optimisées de fonctionnement économiques, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés.

Hypothèse 3 : Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations par comparaison avec les systèmes bovins spécialisés.

Afin de tester ces hypothèses il est nécessaire d'explorer les systèmes bovins herbagers pour d'identifier les modes de conduite et d'organisation structurelle des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers qui permettraient une meilleure valorisation des parcellaires hétérogène et contraignant et de faire face aux aléas notamment économiques tout en respectant l'environnement.

L'accent sera ainsi mis sur l'analyse des modes de conduite afin d'identifier ceux qui favorisent une efficience et une autonomie alimentaire tout en garantissant un bon niveau de flexibilité et de bonnes performances environnementales aux systèmes bovin herbagers. Il s'agit de l'évaluation des effets des caractéristiques agronomiques et géographiques des parcellaires en interaction avec des modes de conduite appliqués aux troupeaux et/ou aux systèmes fourragers.

L'enjeu est de proposer des systèmes d'élevages herbagers durables à travers l'identification de systèmes dotés à la fois d'une meilleure autonomie alimentaire, d'une meilleure viabilité et d'une plus grande durabilité environnementale. Ce travail permettra parallèlement de disposer d'un simulateur à même d'évaluer les performances de production, économiques et environnementales des systèmes d'élevages bovins herbagers, et d'en percevoir les variations en fonction des modifications de leur organisation interne ou du contexte extérieur. Contrairement à de nombreux travaux de modélisation où les modèles élaborés sont utilisés temporairement avec un usage restreint à des nouveaux problèmes et un temps d'utilisation qui s'expire avec l'évolution du problème, on s'efforce d'adapter un modèle préexistant pour aboutir à un modèle générique et multifonctionnel permettant l'exploration des systèmes d'élevage bovins herbagers en zones de montagnes et valable pour les polycultures élevages.

4. Approche

Nous nous inscrivons dans une démarche d'analyse multicritères pour la recherche de compromis entre les performances biotechniques, économiques et environnementales des systèmes d'élevage bovins dans les zones de montagne d'où l'usage de la modélisation pour l'exploration de systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant. Notre expérience consiste à nous appuyer sur un plan d'expérience présentant une gamme de répartitions (cinq) entre troupeau laitier et allaitant pour explorer des fermes représentatives de systèmes réels à l'aide du modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017). Préalablement adapté à la zone d'étude (Massif central, France). Ce dernier devrait prendre en compte l'hétérogénéité du parcellaire, les caractéristiques géographiques de la zone d'études et pourrait faire objet d'amélioration continue vu l'utilisation de GAMS (General Algebraic Modeling System)

(McCarl *et al.*, 2004) qui permet la modification du modèle de façon simple sécurisée et continue.

5. Structure de la thèse

Le Chapitre (I) du manuscrit est consacré à l'introduction générale qui définit le contexte général et la problématique de la thèse, l'approche utilisée et la structure du manuscrit. Le chapitre d'introduction est suivi du chapitre (II) sur la synthèse bibliographique. Ensuite le chapitre (III) qui est consacré à la définition des objectifs scientifiques et à la méthodologie générale de la thèse. Cette partie implique la description des systèmes explorés et le plan d'expérience général servant de support pour les analyses. Le Chapitre (IV) est exclusivement consacré aux aspects techniques de la thèse à savoir le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee et son adaptation à la question de recherche. Le manuscrit se décline ensuite en trois axes d'étude à travers lesquels on vérifie chacune des hypothèses de la thèse. Les axes (1), (2) et (3) d'étude sont respectivement développés dans les chapitres (V), (VI) et (VII). Une introduction en début de chacun de ces chapitres rappelle l'objectif de l'axe d'étude et situe la démarche scientifique. Le manuscrit se poursuit avec le chapitre (VIII) consacré à la discussion générale avant de se terminer par le chapitre (IX) à savoir la conclusion générale et les perspectives.

CHAPITRE II.

Synthèse bibliographique

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Aborder la problématique sur les « Capacités des doubles troupeaux bovins laitiers bovins allaitants herbagers à concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une plus grande diversité biologique et une résilience accrue de fonctionnement » implique une synthèse bibliographique autour de quatre aspects :

- (1) - L'élevage bovin et les zones de montagnes à fort potentiel herbager
- (2) - La flexibilité des systèmes d'élevage bovin et les aléas
- (3) - La question de la durabilité des systèmes d'élevage bovin
- (4) - La simulation comme méthode d'exploration des systèmes d'élevage

La synthèse situe l'intérêt des produits bovins dans l'alimentation humaine et celle des zones de montagnes vis-à-vis de l'élevage bovin. Cela permet d'appréhender le potentiel des zones de montagnes, le fonctionnement des systèmes d'élevage bovins herbagers. La flexibilité des systèmes d'élevage bovins herbagers est abordée parallèlement aux aléas avant de définir les conditions et les principes nécessaires à leur durabilité. On appréhende ainsi les concepts de flexibilité, de biodiversité, d'agroécologie et de durabilité des systèmes d'élevage bovins avant de s'intéresser aux outils et les méthodes d'exploration de ces systèmes.

1. L'élevage bovin et les zones de montagnes à fort potentiel herbager

1.1 Les produits d'élevage bovin

L'augmentation de la population mondiale de 6.5 milliard d'habitant à 9,6 milliards d'ici 2050 (Nations Unies, 2012) suscite une augmentation de la demande en produit agricoles destinées à l'alimentation humaine (Bank, 2007). Parmi les produits agricoles les plus convoités, les produits animaux occupent une place de choix. Afin de satisfaire les besoins en viande des populations entre 1984 et 2009 une augmentation 45% des effectifs des vaches à viande de races spécialisées en France a été nécessaire (Pflimlin *et al.*, 2009). La France est passée ainsi de 2,9 millions à 4,2 millions de bovins dédiés à la production de viande en 25 ans. Cette augmentation des effectifs s'est poursuivie avec l'évolution des besoins des populations en produits carnés et plus particulièrement les politiques agricoles instaurant des quotas laitiers et des primes à la vache allaitante. La consommation mondiale de produits d'origine animale en particulier de la viande bovine, devrait augmenter de 50% d'ici 2050 (Thornton, 2010). Par ailleurs le lait est l'un des produits animaux les plus convoités par les

populations. En effet le lait est un produit alimentaires très nourrissant vu sa richesse en éléments minéraux (Desjeux, 1993), en matière grasse et protéique (38 g/L de matière grasse et 32 g/L de matière protéique) (Chatellier *et al.*, 2013). La moyenne mondiale de consommation de lait atteint 105 kg équivalent lait par habitant par année (Chatellier *et al.*, 2013). La croissance démographique devrait augmenter la consommation de lait de 57 % entre 2000 et 2030 (Gerber *et al.*, 2013). Vu la diversité des territoires, des systèmes de production et des produits laitiers sur le territoire, la France fait preuve d'un fort potentiel de production de lait, avec 23,9 milliards de litres de lait produit (Chatellier *et al.*, 2013). De vastes territoires en France s'avèrent favorables à l'élevage des herbivores et plus particulièrement de l'élevage bovin. En France les exploitations agricoles se situent majoritairement dans les zones à fort potentiel herbagers notamment les zones de montagnes. L'agriculture de montagne avec son orientation naturelle vers la production de fourrages est largement orientée vers la production herbivore (Chatellier and Guyomard, 2008) notamment la production bovine avec 40% d'exploitations en bovins allaitants et 33% d'exploitations en bovins laitiers (AGRESTE, 2011).

1.2 Zones de montagne : zones à fort potentiel herbager

Plus de la moitié du territoire Français est utilisé à des fin agricoles (Farruggia *et al.*, 2008). La couverture végétale utilisée pour l'agriculture est largement constituée de prairies permanentes qui représentent en moyenne 30% de la SAU en France (Pottier *et al.*, 2012). Ces végétations sont fortement concentrées dans les zones de montagne à l'instar de la région auvergnate située au cœur du Massif central. Le tiers (environ 38%) des surfaces en prairie permanente en France se situent en zone de montagne (Chatellier and Guyomard, 2008). Et les prairies permanentes occupent environ 80% de la surface agricole auvergnate (AGRESTE, 2015). Les zones de montagne s'avèrent ainsi des réservoirs potentiels d'aliments fourragers. En dépit de la richesse de ces zones en ressources herbagères, elles sont caractérisées par de fortes contraintes naturelles pour les pratiques agricoles autres que l'élevage. Les agriculteurs sont régulièrement confrontés à des difficultés d'accessibilité à travers les contraintes d'obstacles, de distances, de pentes et d'altitude (Brunschwig *et al.*, 2006; Andrieu *et al.*, 2007). Toutefois ces territoires sont prisés pour l'élevage des herbivores avec plus de 1765 exploitations bovines dans le Massif central (RA, 2010). L'élevage est de plus en plus soumis à des phénomènes d'extensification avec 1,9 UTA pour

56 ha en 2000 et 1,9 UTA pour 68 ha 2007. Les zones montagneuses avec leur fort potentiel en ressources herbagères et une diversité géographique accentuée sont de plus en plus occupées par les systèmes d'élevages herbivores en particulier des élevages bovins avec le phénomène d'extensification. Cependant la diversité géographique des zones de montagnes ne joue pas toujours en faveur de la valorisation des parcellaires (Fleury *et al.*, 1996) contrairement à la diversité végétale qui est plus rentable au pâturage avec les prairies diversifiées (Schläpfer *et al.*, 2002). La conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et allaitants semble être une solution pour valoriser ces diversités.

1.3 Systèmes bovins mixtes herbivores de moyenne montagne.

De nombreux élevages en montagne combinent conduite simultanée d'un troupeau laitier et d'un troupeau allaitant en vue de mieux valoriser le parcellaire tout en dégagant un bon revenu (Cournut *et al.*, 2012). Les systèmes d'élevage bovins combinant bovin laitiers et bovin allaitant sont les plus rependus dans les zones de montagne : 75% des élevages mixtes avec lait en Auvergne sont des élevages mixtes bovin lait-viande (RA, 2010). La particularité de ces types d'élevages est qu'ils sont plus mis en œuvre dans des zones contraignantes et focalisés sur la valorisation des prairies. En effet la conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et allaitants est susceptible de mieux valoriser la diversité géographique et agronomique des zones de montagnes. Ces diversités se matérialisent par le fait que les parcelles diffèrent selon le type de végétation définie d'après leur valeur agronomique (Ansquer *et al.*, 2004) et selon leur caractéristiques topographiques (altitudes, exposition, profondeur du sol) et topologique. Hormis la charge de travail engendrée par l'association de plusieurs troupeaux avec des besoins différents ajouté à la complexité d'organisation liée à la fois aux troupeaux et au terrain, la pratique des systèmes bovins mixtes dans les zones de montagnes présente de nombreux avantages. Il s'agit principalement de la complémentarité des deux troupeaux qui permet de mieux valoriser les ressources herbagères, notamment grâce au troupeau allaitant, qui est moins exigeant en termes de qualité de l'herbe et peut être déplacé dans des parcelles éloignées de l'étable (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig *et al.*, 2006; Andrieu *et al.*, 2007). La conduite simultanée de deux troupeaux donne ainsi un avantage permettant d'exploiter avec une forte efficacité les surfaces de différents potentiels. L'association de troupeaux laitier et allaitant permet le bon ajustement des interactions entre les animaux et les

ressources disponibles (Cournut *et al.*, 2012). Les systèmes d'élevage en question bénéficient d'une diversité sur le plan animal et végétal qui s'apparente au principe fondamental de l'agroécologie à savoir le maintien d'une diversité d'espèces et de génétique dans l'espace et le temps, mais aussi d'une structure d'écosystème complexe. La conduite simultanée d'un troupeau laitier et d'un troupeau allaitant donne un avantage comparatif permettant d'exploiter avec une plus grande efficacité les surfaces de potentiels différents, en y faisant pâturer des animaux ayant des besoins différents. En dépit des contraintes d'ordre agronomiques et géographique à savoir l'éloignement, pente, manque de possibilité de mécanisation, accès difficile, la portance, accès au point d'eau des animaux au pâturage (Garcia-Launay *et al.*, 2012), la gestion des troupeaux bovins mixtes (laitiers et allaitants) peut être une solution pour atteindre des performances économiques équilibrées et stables (Cournut *et al.*, 2012). Les systèmes bovins mixtes herbagers s'inscriraient dans une démarche relevant de l'agroécologie (Dumont and Bernuès, 2014; Thomas *et al.*, 2014). Généralement l'élevage simultané de plusieurs espèces réduit les risques climatiques, sanitaires et économique (Bonaudo *et al.*, 2014). La gestion spatio-temporelle de la diversité des ressources et de la complémentarité des animaux peut permettre de renforcer la résilience des services écosystémiques à des aléas climatiques et économiques (Tichit *et al.*, 2011). Toutefois, ces éléments théoriques demandent à être confirmés et il est intéressant d'explorer les systèmes mixtes pour déterminer les niveaux de diversité animale permettant une plus grande efficacité alimentaire avec des meilleures performances économiques et environnementales tout en préservant l'environnement et la productivité des systèmes étudiés.

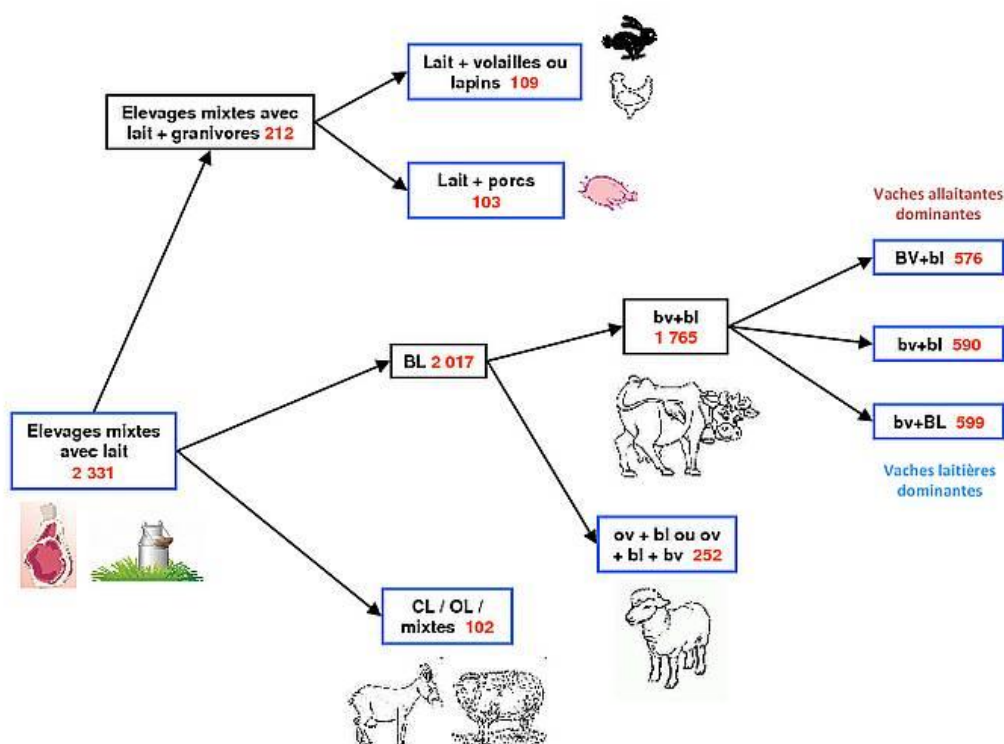


Figure 1. Arbre typologique des exploitations avec des élevages mixtes lait-viande (Source : (RA, 2010))

1.4 Autonomie fourragère et alimentaire en élevages bovins herbagers

La meilleure utilisation des ressources herbagères par les systèmes bovins mixtes peut être une voie pour améliorer l'autonomie alimentaire des exploitations, réduire les coûts de production voire favoriser de meilleurs et plus stables résultats économiques (Aubron *et al.*, 2010). Par ailleurs une autonomie fourragère croissante permettrait une baisse considérable de la variabilité des résultats économiques de l'exploitation voire de sa sensibilité aux perturbations climatiques (Aubron *et al.*, 2010). L'autonomie fourragère serait synonyme de réduction des charges alimentaires mais aussi favoriserait l'autonomie alimentaire (Aubron *et al.*, 2010). L'idéal des systèmes d'élevage bovin herbagers est en effet d'avoir une alimentation axée sur la forte valorisation de leur parcellaire en vue de se procurer une meilleure autonomie fourragère. Parallèlement l'utilisation non contrôlée des prairies au profit de l'élevage serait source de dégradation de la biodiversité prairiale. Une surexploitation des ressources sur le long terme pourrait aboutir à la dégradation de services

écosystémiques liés aux végétations de prairies. Cependant parmi les principaux leviers de l'autonomie fourragère on cite : l'adaptation de la taille des troupeaux à la surface fourragère et aux cultures de l'exploitation pour réduire l'importation des fourrages (Mosnier *et al.*, 2012), la diminution de l'utilisation des intrants tels que les aliments concentrés (qui par leur teneur importante en nutriments et énergie sont particulièrement sollicités pour équilibrer les rations des bétails) au profit de l'utilisation de fourrages produits au sein de l'exploitations, et l'augmentation de la part de pâturage (Bernués *et al.*, 2011). On cite également les stratégies de vêlage qui consistent à faire coïncider les vêlages des troupeaux avec les périodes de pousse d'herbe et qui seraient particulièrement intéressantes. Cela permet de procurer aux animaux des ressources en herbe importantes aux périodes de forte lactation (Le Gall *et al.*, 2001). Le regroupement des vêlages en vue de maximiser le pâturage est également un facteur d'amélioration des résultats économiques et environnementaux (Le Rohellec *et al.*, 2009). La génétique des troupeaux peut aussi être déterminante pour espérer un meilleur rapport entre production animale et valorisation des ressources fourragères. Dans le cas des élevages bovins laitiers ; une comparaison entre la race normande et prim'Holstein penche en faveur de la race normande. En effet la race normande à une alimentation moins exigeante et valorise mieux les ressources herbagères, même si elle a un moindre potentiel laitier (Delaby and Peyraud, 2009). La diversité animale dans un contexte d'élevage de montagne intervient comme un levier d'autonomie fourragère à travers la conduite simultanée des troupeaux laitier et allaitant avec la complémentarité des deux troupeaux qui permet de mieux valoriser les ressources herbagères vu les besoins et performances différents des troupeaux (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig *et al.*, 2006; Andrieu *et al.*, 2007). Les études sur l'amélioration de l'utilisation de ressources prairiales portent sur le bon ajustement des chargements (Jouven and Baumont, 2008), la bonne adéquation entre les dynamiques de production fourragère et des besoins des animaux qui permettrait d'atteindre un meilleur degré d'autonomie fourragère voire alimentaire (Steinwilder *et al.*; Dillon *et al.*, 1995; Jacquot *et al.*, 2012). En effet l'équilibre entre l'offre herbagère et les besoins des animaux est la clé d'un meilleur degré d'autonomie alimentaire (Jacquot *et al.*, 2012), et constitue un élément déterminant pour la compétitivité des élevages bovins herbagers et leur capacité à mieux résister aux aléas naturels (Nettier *et al.*, 2010). L'autonomie fourragère a pour

conséquences la préservation et l'augmentation de l'importance des prairies permanentes au sein des systèmes d'élevage, assurant ainsi la conservation, voir une amélioration, de la biodiversité prairiale (Poetsch, 2008). L'autonomie fourragère favorise la séquestration du carbone (Soussana *et al.*, 2010) et une plus faible sensibilité des exploitations aux variations des prix des intrants (Bernués *et al.*, 2011). Il faut en plus de cela noter que l'herbe pâturée est plus intéressante sur le plan économique comparativement aux fourrages conservés et aux aliments concentrés (Poetsch, 2008). Un haut niveau d'autonomie fourragère à l'échelle de l'exploitation favorise l'amélioration des performances productives et économiques et constitue un facteur de préservation des prairies permanentes. L'autonomie fourragère se présente ainsi comme un facteur de durabilité des systèmes d'élevage herbagers. D'où l'intérêt de déterminer les modes de gestion et les configurations des troupeaux qui favorisent une meilleure valorisation des ressources herbagères dans les zones montagneuses.

1.5 Gestion des systèmes d'élevages dans les zones contraignantes

Les systèmes bovins nécessitent en général des efforts particuliers dans leur gestion, mais les systèmes d'élevages mixtes bovins laitier-allaitant nécessitent encore plus d'efforts. La gestion d'un système d'élevage étant relative à la conduite des troupeaux ainsi qu'à la planification des activités culturales et d'élevages, nous nous intéressons ici à la relation entre les modes de conduites des systèmes d'élevages et leurs performances (autonomie fourragère, performances économiques environnementales et de production). Les modes de gestion des systèmes de production agricole sont les moyens privilégiés pour accroître leurs performances et les affranchir des aléas qu'ils soient internes (sol, infections et carences nutritionnelles pour les produits animaux...) ou externes (climat et économie "politiques agricoles et prix"). Dans le cas des systèmes d'élevages mixtes bovins laitier-allaitant, la définition d'un mode de conduite adéquat s'avère incontournable pour faire face aux aléas externes et espérer un bon fonctionnement de l'exploitation avec de meilleures performances. En effet les aléas externes (variation de prix, politiques économiques et agricoles) ont la particularité de ne pas être directement maîtrisables au niveau de l'exploitation. De nombreux travaux sont réalisés dans l'objectif de procurer aux systèmes d'élevages des fonctionnements durables dans des contextes de contraintes naturelles, d'aléas naturels et économiques (variation de prix, évolution de politiques économiques). Les aléas sont pris en compte dans les décisions des éleveurs pour aborder la question d'adaptation

des systèmes d'élevage (Milestad and Darnhofer, 2003). La prise en compte des aléas dans la gestion des systèmes agricole est abordée dans des travaux réalisés aussi bien en France (Landais and Balent, 1993; Tichit *et al.*, 2004) qu'à l'internationale (Hardaker *et al.*, 1997). Les modes de conduites sont adoptés en fonction d'un ou de plusieurs objectifs selon des stratégies spécifiques. L'une des stratégies les plus prisées est la recherche d'autonomie alimentaire : dans ce cas la gestion efficace du système de production s'appuie fortement sur la recherche d'autonomie fourragère. Outre la gestion centrée sur le système de production, les agriculteurs améliorent les performances économiques de leur système avec la territorialisation des productions qui consiste à l'instauration de réglementation communes à travers leur organisation en AOP (Appellation d'Origine Protégé). En effet les populations sont en recherche de produit issus de tradition dans un territoire valorisant un savoir-faire local et possèdent une histoire et une identité forte (Bérard and Marchenay, 1995; Brunschwig, 2000). Ce besoin des populations assuré par la territorialisation des exploitations est source d'amélioration de performances économiques des exploitations tout en leur imposant des modes de fonctionnement responsables. Par ailleurs la production laitière dans la production labellisée à indication géographique telle que AOP (Appellation d'Origine Protégée) ou IGP (Indication Géographique Protégée) est importante pour des produits de meilleure qualité et le développement des territoires. Dans de tels contextes, l'alimentation des systèmes d'élevage fait également l'objet d'adaptations pour saisir des opportunités de contrats agroenvironnementaux (Hubert *et al.*, 1993). Ces organisations en plus de sécuriser les profits des exploitations favorisent la durabilité des systèmes, la création d'emploi locaux et la flexibilité des systèmes d'élevage.

2. Flexibilité des systèmes d'élevage

Afin de définir le concept de flexibilité des systèmes d'élevages et des situations dans lesquelles les systèmes d'élevage herbager pourraient être considérés comme flexibles. Nous allons définir successivement les termes de "système de production", "système fourrager" et "système d'élevage" avant de nous focaliser sur le concept de "flexibilité des systèmes d'élevages" qui fait l'objet d'un chapitre de résultat de la thèse.

Un système est une représentation simplifiée de la réalité selon un point de vue (Lerbet, 1984). Le Moigne (1977) caractérise un système par sa structure, son activité

et son évolution d'où sa définition d'un système comme « *un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique* » (Le Moigne, 1994). La définition des frontières d'un système, s'effectue en fonction du problème à traiter (Ten Napel et al., 2011). Dans les cas des exploitations agricoles, les frontières correspondent à celles de l'exploitation elle-même. Une exploitation agricole ne peut ainsi être considérée comme un système fermé car elle échange matière première, produits, informations, énergie avec son environnement ou milieu extérieur (Ten Napel et al., 2011). Un système de production se définit comme un assemblage d'ateliers identifiés sur la base des tâches et des activités nécessaires à l'atteinte un objectif (Coleno and Duru, 1998).

Un système fourrager se définit par Attonaty (1980) comme l'« *ensemble de moyens de production, des techniques et des processus qui, sur un territoire, ont pour fonction d'assurer la correspondance entre le (ou les) système(s) de culture et le (ou les) système(s) d'élevage* » (Attonaty, 1980).

La définition de système d'élevage la plus fréquente dans la littérature et la plus complète est évoquée par Landais. Il définit une système d'élevage ainsi : « *un système d'élevage est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés par l'homme en vue de valoriser des ressources par l'intermédiaire d'animaux domestiques* (Landais, 1987). Le système d'élevage est composé de trois sous-unités : l'éleveur(s) et ses pratiques, le troupeau composé de tous les animaux, et les ressources (aliments, énergie, matériels, bâtiments...) (Landais, 1987).

Les systèmes d'élevage à travers leur mode de conduite s'adaptent aux perturbations, on parle de capacité d'adaptation ou de flexibilité du système. La flexibilité d'un système se définit comme sa capacité à s'adapter aux perturbations, de s'accommoder aux circonstances et à maintenir une cohérence par rapport à l'environnement à affronter (Reix, 1997). La flexibilité d'un système se mesure en sa capacité de perdurer dans l'état désiré (Thompson and Nardone, 1999; Mignon, 2001). La flexibilité traduit dans certain cas la capacité à apprendre des situations antérieures pour mieux s'accommoder à de nouvelles situations (Cohendet and Llerena, 1999). Fouque définit la flexibilité d'un système comme sa capacité à multiplier les configurations possibles (Fouque, 1999). La flexibilité dans le contexte de notre étude

est globalement « *l'aptitude à s'accommoder aux circonstances, à absorber les changements, une habilité à préserver et créer des options, à apprendre* » (Chia and Marchesnay, 2008). Plusieurs expressions sont utilisées pour désigner les capacités d'adaptation d'un système. On utilise les jeux de mots suivants : Capacité à absorber les changements, Adaptation aux changements, Habilité et aptitudes spécifiques à préserver ou à créer des options, Capacité à apprendre, Capacités d'anticipation.

Dans le domaine de l'étude des systèmes agricoles, la notion de résilience et de flexibilité sont très proches dans certaines situations. En effet la flexibilité peut être statique ou dynamique (Alcaras and Lacroux, 1999). Dans un cadre dynamique la flexibilité est l'adaptation continue des systèmes aux perturbations, ce qui peut correspondre à la résilience du système considéré. A l'échelle d'un système, la flexibilité englobe l'organisation dans toutes ses dimensions (décisions, coordinations, apprentissage, organisation des processus). Cependant une bonne adaptation des systèmes de production nécessite une conduite adéquate. La question d'adaptation des systèmes d'élevage est abordée dans de nombreux travaux (Moulin, 1993; Milestad and Darnhofer, 2003; Chia and Marchesnay, 2008; Dedieu and Ingrand, 2010).

Afin de procurer aux élevages efficacité, flexibilité, certains auteurs ont émis l'idée de s'intéresser simultanément à la sécurité des systèmes fourragers, aux systèmes d'élevage intensifs et à leur productivité (Landais and Gilibert, 1991). La bonne capacité d'adaptation des systèmes bovins mixtes a ainsi été démontrée par (Cournut *et al.*, 2012) qui montrent que la conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants permet de bonne capacité d'adaptation aux systèmes d'élevage à travers une bonne concordance entre les besoins des animaux et la disponibilité des ressources. Il montre également que l'association de troupeaux est source de flexibilité des systèmes d'élevage à travers la possibilité d'ajustement des interactions entre les animaux et les ressources disponibles (Cournut *et al.*, 2012). Des leviers de la flexibilité des systèmes de production ont ainsi été définis par (Delaby *et al.*, 2001). Dans le cas des systèmes de production bovin, il s'agit de la fertilisation du type de fauche de la période de fauche, déprimage, intensité de pâturage, nombre de passages d'animaux sur les parcelles, temps de repousse (Delaby *et al.*, 2001). On a par ailleurs les ajustements organisationnels qui portent sur les apports de fourrages conservés et sur la chronologie d'utilisation des parcelles (Andrieu, 2004). Au sujet des systèmes de

pâturage et de l'autonomie fourragère des systèmes d'élevage, Martin et al. (2009) ont étudié les conditions de flexibilité dans l'utilisation des prairies et ont publié un arbre de discrimination des opportunités d'utilisation des prairies. La conduite est dite flexible si les performances agronomiques et/ou économiques se conservent selon une diversité de conditions de pâturage. Dans la cadre de nos travaux les systèmes à définir se doivent d'être fondé sur les leviers de flexibilité afin de mieux faire face aux aléas. On opte ainsi pour l'accroissement du caractère adaptatif de la conduite du système dans le temps et dans l'espace. Comme le stipule Gunderson (2000), on cherche à diversifier les processus, les activités tout en amplifiant l'autonomie des différentes composantes de systèmes de production.

2.1 Les différentes catégories d'aléas

Un aléa est une variable aléatoire caractérisée par des événements qui peuvent être favorables ou défavorables (Mosnier, 2009). Mosnier (2009) recense quatre catégories d'aléas auxquels sont soumis les systèmes de production, à savoir : les risques climatiques et sanitaires qui affectent les quantités produites et leur qualité, les risques humains et professionnel, les risques de prix ou de marché qui jouent sur le prix des intrants et des produits finis, les risques institutionnels générés par le changement de politiques ou de régulation. Les différents aléas auxquels sont confrontés les systèmes peuvent être matérialisés par des actions (avec des avantages ou inconvénients) intervenant dans un contexte spatio-temporel (Mosnier, 2009). Les systèmes d'élevages sont de plus en plus confrontés à des aléas qui peuvent être internes ou externes aux systèmes.

Les aléas internes liés à la biologie et à la reproduction des animaux sont les perturbations endogènes à certaines composantes du système d'élevage. Il s'agit de perturbations prévisibles et maitrisables à la source en agissant sur les composantes concernées, ou en protégeant ces dernières. Ces aléas influencent directement les productions. Il s'agit principalement des problèmes sanitaires, problèmes de croissance des animaux, pathologies contagieuses. Des moyens de prévention existent pour éviter les aléas sanitaires, limitation des risques d'infestation par les parasites (Boyard *et al.*, 2007) à travers les soins vétérinaires, l'anticipation de la vente ou l'abattage systématique. Par ailleurs pour gérer les risques, il est possible de réduire l'exposition au risque pour éviter l'exposition de la production entière aux aléas.

Les aléas anticipés ou habituels n'ont pas ou ont peu d'effets sur les profits des éleveurs dans la mesure où ces derniers les anticipent. Nombre de solutions existent pour gérer les aléas internes contrairement aux aléas externes.

Les aléas externes sont soit d'ordre naturel, économique ou institutionnel. Les aléas externes d'ordre naturel regroupent les risques climatiques matérialisés par des conditions climatiques extrêmes. Ce sont des variations qui affectent généralement l'ensemble des agriculteurs des zones soumises aux mêmes caractéristiques pédoclimatiques dans les mêmes périodes. Ils provoquent la baisse de productivité des cultures donc des ressources destinées à l'élevage. Sur le plan économique les aléas externes concernent la variabilité des prix des intrants et des produits en raison de politiques commerciales plus libérales (fin des quotas laitiers, diminution des aides couplées à la production et des interventions de la PAC dans les échanges internationaux). En effet la succession des réformes de PAC et les décisions de l'OMC rendent très imprévisibles l'évolution des prix dans le contexte économique à l'avenir. On peut notamment mentionner le découplage total de la PAC, la suppression du système des quotas laitiers dans l'Union Européenne, dont la conséquence d'augmenter la production de lait dans les exploitations laitières et d'entraîner la baisse du prix du lait a été prédite par nombre d'auteurs dans les années 2000 (Bouamra-Mechemache *et al.*, 2008; Réquillart *et al.*, 2008; Sckokai *et al.*, 2011; Lelyon *et al.*, 2012). Les productions peuvent générer des aléas de prix, c'est le cas de baisse de prix des produits en cas de production surabondante. La combinaison de ces phénomènes rend de plus en plus imprévisibles l'évolution des prix dans le contexte économique à l'avenir. Plusieurs facteurs peuvent engendrer les aléas de prix. Par exemple le prix des intrants et des moyens de production utilisés dans les systèmes de production bovin, en plus d'être indexé sur les coûts des énergies, a augmenté de 35 % en moyenne entre 2005 et fin 2012 en France (Chatellier *et al.*, 2013). Face à ces aléas non maîtrisables via le système, il s'avère essentiel d'ajuster continuellement le mode de production. Les objectifs de réduction des aléas pour maximiser les performances des systèmes de production peuvent être contradictoires. Les décisions à un moment ont généralement des conséquences sur les décisions futures (Mosnier, 2009). D'où la gestion aléas externes s'avère délicate mais indispensable à la viabilité des systèmes d'élevage.

La thèse se focalise sur les aléas externes d'ordre économique, notamment les aléas de prix. Ces aléas constituent une source de variabilité des profits des exploitations qui peut menacer leur pérennité. Les aléas d'ordre économiques intègrent généralement les effets des aléas naturels. Par exemple une saison climatique non favorable à la production d'un produit entraîne généralement l'augmentation des prix du produit concerné. D'où la prise en compte indirecte des aléas liés aux variations climatiques dans les prix des produits. Contrairement au fonctionnement traditionnel des exploitations, orientées vers l'intensification de l'agriculture favorisée par les politiques anciennes de la PAC garantissant des prix agriculteurs, il est aujourd'hui essentiel de songer à l'adaptation des systèmes aux changements liés à l'environnement naturel, économique et social. La tendance aujourd'hui est de s'adapter aux aléas à travers des modes de gestions qui garantissent la durabilité des systèmes.

2.2 Gestion des aléas économiques et aléas de prix

Les aléas climatiques ont la particularité de rendre difficile la gestion des productions fourragères et du pâturage (Baumont *et al.*, 2008; Mosnier, 2009). Les aléas économiques qui interviennent à travers la variation des prix des produits et l'évolution des conjonctures économiques peuvent menacer la capacité des exploitations à dégager des revenus stables. Pour gérer les risques on peut soit réduire l'exposition au risque pour atténuer la sensibilité de la production aux aléas ou jouer sur la flexibilité de son système pour l'adapter. La réduction de l'exposition aux risques n'étant pas évidentes dans le cas des aléas externes, il est essentiel de jouer sur la flexibilité des systèmes pour faire face aux perturbations. Cependant la complexité des systèmes d'élevages exige de dissocier les risques naturels des risques économiques. Toute fois les risques naturels sont parfois endogènes aux risques économiques. Pour rester dans le contexte de notre étude nous nous intéressons particulièrement aux risques économiques notamment les variations de prix. En effet les aléas naturels et l'évolution des politiques économiques influencent les prix des produits et des intrants destinés à l'élevage. Un aléa est ainsi dans le cadre de nos travaux une variable aléatoire comme le prix, qui est caractérisé par des événements tels que « prix élevés » ou « prix bas » ; il peut être favorable ou défavorable aux producteurs du marché (Mosnier, 2009). Dans le cas des systèmes d'élevages les intrants et les produits sont des éléments indispensables au fonctionnement économiques des exploitations. Leur prix constitue

ainsi un facteur déterminant pour les résultats économiques des exploitations. L'accroissement des incertitudes économiques contraint les agriculteurs à s'organiser pour faire face aux perturbations. Ils sont ainsi tenus d'ajuster continuellement leur mode de production. La capacité des systèmes d'élevage à résister et à s'adapter aux aléas, que ces derniers soient naturels ou économiques, s'avère essentielle pour leur durabilité économique (Reix, 1997; Sauvant and Perez, 2010). Nous nous focalisons sur l'adaptation des systèmes qui présente un enjeu scientifique s'agissant de redéfinir les systèmes de manière à leur permettre de résister aux perturbations ou encore de s'adapter aux aléas de prix pour accroître leur durabilité.

3. La question de la durabilité des systèmes d'élevage bovin

3.1 Agroécologie et systèmes bovins mixtes herbagers

Au-delà de l'application des concepts et principes de l'agroécologie à la conception et à la gestion d'agroécosystèmes durables (Thomas *et al.*, 1993), l'agroécologie est l'ensemble des pratiques dont l'objectif est d'amplifier les processus naturels pour concevoir les systèmes productifs peu artificialisés, respectueux de l'environnement et moins dépendant des intrants (Altieri, 1987; Gliessman, 1997; Wezel and Soldat, 2009). Il s'agit de : « *l'étude intégrative de l'écologie de l'ensemble des systèmes alimentaire, intégrant les dimensions écologiques, économiques et sociales* » (Francis *et al.*, 2003). L'agroécologie consiste à prendre en compte la diversité biologique à tous les niveaux d'organisation des systèmes de production agricole pour comprendre les dynamismes et les piloter durablement par rapport aux attendus de production. Au niveau des systèmes d'élevage l'application des principes de l'agroécologie consiste d'une part à la réduction de l'utilisation des intrants en augmentant l'efficacité alimentaire des animaux et la part des ressources non directement valorisable par l'homme dans l'alimentation animale et d'autre à réduire la pollution à travers le principe précité pour encourager le recyclage des déchets en s'appuyant sur la complémentarité entre les différents ateliers de production. Cinq principes fondamentaux de l'agroécologie en lien avec la production agricole sont définis par Altieri (2002) à savoir : (1) La gestion intégrer de la santé animale : choisir les animaux adaptés à l'environnement d'élevage, utiliser les pratiques réduisant la sensibilité aux pathogènes), (2) La réduction des intrants nécessaires à la production : utilisation des ressources non directement valorisées par l'homme , (3) L'optimisation du

fonctionnement métabolique des systèmes, (4) Le renforcement de la résilience des systèmes à travers leurs capacités d'adaptation (leur flexibilité) : Valorisation complémentaire des animaux et diversification des ressources, utilisation des ressources non directement valorisables par l'homme, (5) La préservation de la biodiversité à travers l'adaptation des pratiques agricoles et des modes d'utilisation des ressources naturelles.

Le choix des modes de gestion des systèmes bovins herbagers à travers la détermination des compromis entre les différentes performances des systèmes de production (performances de valorisation des ressources, performances économiques et environnementales) en respectant les principes précités, permet de tendre vers des performances meilleures. Les systèmes bovins mixtes herbagers font ainsi preuve du maintien d'une diversité d'espèces, mais aussi d'une structure d'écosystème complexe (un environnement montagneux). La diversité qu'elle soit animale, géographique, ou végétale est considérée dans le cadre de l'agroécologie comme un levier de production (Veen *et al.*, 2009; Dumont and Bernuès, 2014). Le respect des principes de l'agroécologie a ainsi pour avantages de sécuriser les revenus de l'exploitation et de minimiser les impacts négatifs de l'élevage sur l'environnement (Le Rohellec *et al.*, 2009; Fortun-Lamothe *et al.*, 2013). Produire en respectant les principes de l'agroécologie permet de procurer un minimum de durabilité aux systèmes de production bovins herbagers.

3.2 La biodiversité des végétations de prairie

Edward O. Wilson à l'origine du terme « biodiversité » le définit comme la « *Variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes* » (Hermitte, 1992). Cette définition est parue la première fois dans l'article 2 de la Convention sur la diversité biologique de 1992 (Hermitte, 1992). La plupart des travaux sur la biodiversité des couverts végétaux ont eu pour résultat l'élaboration de typologies construites en croisant les facteurs du milieu et/ou de pratiques (Fleury *et al.*, 1988; Jeangros *et al.*, 1991; Jeannin *et al.*, 1991). Plusieurs composantes de biodiversité ont été définies (Noss, 1990) à savoir la diversité taxonomique (nombre d'espèces), la diversité écologique (diversité d'exigences écologiques des espèces), et la diversité fonctionnelle (variété des modes

de fonctionnement des espèces). Ces composantes de la biodiversité sont liées entre elles (Orth *et al.*, 2004). De nombreux travaux s'appuient sur la biodiversité taxonomique qui consiste à différencier les espèces, les dénombrer afin de définir des types de couvert végétaux. C'est le principe même de la construction des typologies de prairies. Il a été démontré que l'évolution de la diversité floristique est régie par la vitesse de colonisation et la vitesse d'extinction des espèces présentes (Olff and Ritchie, 1998). Une colonisation rapide et ou une extinction lente des espèces favoriserait le maintien, voire l'augmentation du nombre d'espèce de la diversité taxonomique. Afin de mesurer la biodiversité des couverts végétaux, des méthodes d'évaluation du niveau de biodiversité végétale à partir d'indicateurs visuels simples ont été mis en place (SRVA, 2002; Orth *et al.*, 2004). Des indicateurs indirects à savoir les indicateurs de pratiques permettent également de mesurer la biodiversité. Ces indicateurs ne sont toutefois pas transposables spatialement ; on dit qu'ils sont site spécifiques (Büchs, 2003). Au niveau des systèmes de production agricole, les méthodes d'évaluation de la biodiversité visent à caractériser l'état environnemental de l'exploitation et son évolution à l'aide d'indicateurs basés sur des pratiques (Girardin *et al.*, 1999). L'Hypothèse de Grime qui stipule que la diversité est faible aux valeurs extrêmes des facteurs agronomiques (Grime, 1973) s'inscrit dans ce cadre. Connu sous le nom d'Hypothèse de stress intermédiaire, elle situe le niveau maximum de biodiversité aux valeurs médianes des facteurs agronomiques (facteurs liés aux milieux [fertilité, humidité, acidité, climat] et facteurs liés aux pratiques [taux d'utilisation, fréquence d'utilisation]) (Grime, 1973).

La préservation de la biodiversité des couverts végétaux est possible à travers les modes gestion productifs et le respect des principes de l'agroécologie. La préservation de la biodiversité des écosystèmes prairiaux est également favorisée à travers l'organisation territoriale des exploitations en IGP/AOP (Gueringer *et al.*, 2009; Gueringer *et al.*, 2013). Ces organisations territoriales des exploitations sont régies par des cahiers des charges qui s'appuient sur les réglementations visant à protéger l'intégrité de l'environnement. La préservation de la biodiversité des couverts végétaux présente de nombreux avantages pour l'élevage. Par exemple la biodiversité des écosystèmes prairiaux permet en plus de la production fourragère aux systèmes agricoles d'être plus résilients face aux aléas climatiques. Les prairies permanentes permettent le stockage du carbone dans les sols pour limiter le lessivage du sol et les

émissions de Gaz à effet de serre (Pflimlin, 2008; Soussana *et al.*, 2010). Schläpfer *et al.* (2002) , montre par exemple à travers une étude économique que les coûts de compensation de la variabilité interannuelle et saisonnière de production des systèmes homogènes basés sur des prairies temporaires les rendent moins intéressants que les systèmes basés sur des prairies permanentes contrastées. Les prairies permanentes s'avèrent ainsi une source incontestable de durabilité systèmes d'élevage herbagers.

3.3 Durabilité des systèmes d'élevage

Le rapport Brundtland en 1987 définit le développement durable comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ». La définition de développement durable adoptée à la conférence (de Rio sur l'environnement, 1992) stipule que le développement durable est « *un mode de développement censé satisfaire les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* ». A travers le concept de développement durable les acteurs s'accordent pour aborder la durabilité des systèmes en plusieurs volets indissociables (Vilain, 2008). Le développement durable est fondé sur trois composantes interdépendantes, à savoir une composante environnementale, une composante sociale, une composante économique. Cependant (Landais, 1998) défini quatre piliers de durabilité des exploitations agricoles à savoir la viabilité, la reproductibilité, la vivabilité et la transmissibilité. Une exploitation agricole durable est ainsi « *une exploitation viable, vivable, transmissible et reproductible* ». La durabilité sous entendant la capacité du système à perdurer dans le temps. De nos jours les préoccupations environnementales sont de plus en plus croissantes avec l'affluence des réglementations environnementales qui interviennent avec le problème de changement climatique et de la préservation des ressources naturelles qui préoccupent de plus en plus les scientifiques et les professionnels. Ajouté aux cahiers de charge pour la durabilité de l'environnement, la réduction de l'utilisation des énergies fossiles, la Directive sur les Nitrates (Directorate-General, 2002), le Water Framework Directive (Estrela and Vargas, 2012). Les exploitations se trouvent de plus en plus engagées dans des démarches de signes de qualités, et sont de plus en contraintes par des cahiers de charges. On parle d'émergence de la préoccupation autour de la durabilité de l'agriculture (Landais, 1998). L'idée de définir des modes de conduite durables pour les systèmes d'élevages bovins mixtes lait-viande dans des

zones à contraintes naturelles présente ainsi un enjeu scientifique majeur non encore exploré. On se préoccupe ainsi dans le cadre de notre thèse de la recherche de compromis entre valorisation des prairies, flexibilité des systèmes d'élevages, préservation de l'environnement et de la diversité du couvert végétal. Cela revient à étudier entre autres la durabilité des systèmes d'élevage bovin herbagers à travers la recherche de compromis entre les principales composantes de durabilité relatives à ces systèmes. Vu la complexité des systèmes d'élevages et la multiplicité de critères à prendre en compte, il apparaît nécessaire de procéder par des expérimentations virtuelles.

4. La simulation comme méthode d'exploration des systèmes d'élevage

4.1 Les outils d'évaluation des systèmes de production agricole

La modélisation informatique est un moyen efficace d'observation du fonctionnement global des systèmes complexes dont on ne peut pas cerner tous les aspects. Permettant de mettre en évidence, de comprendre et de prédire le comportement des systèmes, la modélisation informatique sert aussi à la description des interactions entre les différentes composantes des systèmes (Mosnier, 2009). Les composantes des systèmes d'élevage sont en interaction (Liénard and Lherm, 1986) d'où la nécessité de les mettre en cohérence ce qui conduit généralement à des méthodes telles que la modélisation. Les modèles sont reconnus pour permettre la quantification des interactions entre les composantes d'une exploitation et pour tester des systèmes alternatifs (Halberg *et al.*, 2005). La définition de base du modèle est donnée par Spedding (1988) qui définit un modèle comme *«une abstraction du système étudié, capable de manipulation expérimentale pour projeter les conséquences des changements des déterminants du comportement du système»*. La construction d'un modèle permet d'intégrer des connaissances existantes sur les composantes isolées. Les modèles sont de plus en plus utilisés pour étudier les systèmes complexes tels que les systèmes de production agricole. *« Un système est dit complexe lorsqu'il est composé d'un grand nombre d'éléments en interaction et que la dynamique de ces interactions dirige le comportement du système en lui donnant une apparence d'unité aux yeux d'un observateur extérieur »* (Berry and Beslon, 2013). La modélisation d'un système permet de réduire sa complexité pour l'étudier selon un aspect donné. Les systèmes de production agricole sont appréhendés comme des systèmes complexes

(Le Gal *et al.*, 2010). Les modèles sont utilisés pour représenter des systèmes de production complexes généralement constitués de plusieurs ateliers de production qui communiquent entre eux. Les modèles permettent de tester des hypothèses scientifiques et d'étudier le comportement des systèmes de production agricole en explorant virtuellement les situations inaccessibles sur le terrain. De nombreux modèles de simulation évaluent les pratiques agricoles et l'impact des aléas (climat, économie) sur la performance agricole, environnementale et économique des exploitations. La simulation intègre des modèles basés sur les processus élaborés et validés par des données expérimentales. Elle consiste à faire évoluer le modèle au cours du temps afin de mieux comprendre le fonctionnement de la dynamique du système. Un grand nombre de modèles permettent d'évaluer la rentabilité des systèmes d'élevage en maintenant ou en réduisant les impacts négatifs à long terme sur l'environnement. De nombreux modèles décrivent de façon empirique ou mécanistique la composante biologique des systèmes et prédisent les impacts de la gestion des prairies sur la gestion animale et la production fourragère (Coleno and Duru, 1998; Delaby *et al.*, 2001; Cros *et al.*, 2004) pour les vaches laitières et (Teague and Foy, 2002; Romera *et al.*, 2004; Baumont *et al.*, 2008) pour les vaches allaitantes), d'autres modèles explorent les interactions entre les modes de gestion et les conditions climatiques (Andrieu, 2004; Fitzgerald *et al.*, 2005). L'avancée de la modélisation du fonctionnement des troupeaux et des systèmes d'élevage depuis les années quatre-vingt-dix a permis d'explorer la sensibilité des composantes des systèmes d'élevage herbivores aux aléas dans différents contextes (disponibilité fourragère, conduite de la production à l'herbe, production animale). D'après la taxonomie pour les modèles de simulation développée par Paul A. Fishwick (1996) il existe 5 catégories de base de modèle de simulation. Ce sont : les modèles conceptuels, les modèles déclaratifs, les modèles fonctionnels, les modèles à contraintes et les modèles spatiaux. Les modèles utilisés dans le domaine de l'agriculture se situent pour la plupart dans les catégories de modèles fonctionnels et à contraintes. Dans cette catégorie les modèles plus rencontrés sont les modèles dynamiques, les modèles bioéconomiques mais aussi les modèles d'optimisation. Dans le souci d'être efficace, précis et d'éviter de mobiliser un lourd personnel, il s'avère important d'utiliser la modélisation pour analyser les systèmes d'élevage afin de définir des systèmes plus efficaces et plus résilients. Ajouter à cela, la recherche de compromis entre différentes performances des

systèmes d'élevage nécessite de prendre en compte toutes les composantes du système en interaction en plus de leur fonctionnement propre. La modélisation est l'approche idéale pour cela, en plus de permettre de faire des comparaisons dans des conditions suffisamment proches de la réalité.

4.2 Les modèles de simulation

4.2.1 Modèles dynamiques et modèles statiques

On distingue deux grandes catégories de modèles selon la prise en compte de la temporalité lors des simulations. On distingue les modèles dynamiques qui intègrent des composantes temporelles et climatiques en général. De nombreux modèles de simulations dynamiques permettent d'évaluer les pratiques agricoles et la variabilité du climat sur les performances agricoles, environnementales et/ou économiques des exploitations. Ce sont des modèles tels que WFM (Whole Farm Model), développé en Nouvelle-Zélande (Wastney *et al.*, 2002; Beukes *et al.*, 2008), et MELODIE, développé en France par l'INRA (Faverdin *et al.*, 2011). L'amélioration de la gestion du pâturage est abordée à travers des modèles dynamiques tels que SEPATOU (Cros *et al.*, 2001), Patur'in (Delaby *et al.*, 2001) qui mettent en avant la modulation de la gestion du pâturage pour l'ajustement de l'offre fourragère aux besoins des animaux ou encore le modèle e-Dairy, qui est un modèle à la fois dynamique et stochastique utilisé pour prédire des performances biophysiques et économiques des systèmes laitiers en pâturage (Baudracco *et al.*, 2013). Parmi les modèles développés à l'UMRH, le simulateur DYNAMILK est utilisé pour comprendre les compromis possibles entre production, autonomie fourragère et utilisation de prairies (Jacquot *et al.*, 2012). Le simulateur SEBIEN (Jouven and Baumont, 2008) met en œuvre une approche biotechnique centrée sur le fonctionnement fourrager pour simuler l'impact des règles de conduite favorables à la biodiversité sur la production et l'utilisation des prairies pour des exploitations-types de bovins allaitants. Ces modèles dynamiques ont pour caractéristique commune de représenter finement les phénomènes biophysiques en prenant en compte les séries climatiques. On a également le modèle de simulation dynamique IFSM conçu pour déterminer les alternatives pour une gestion optimale et durable des exploitations (Rotz *et al.*, 2012) et le modèle déterministe CropSyst avec un module stochastique au niveau du module climat qui a pour fonction première de simuler la production de cultures et qui sert à analyser les effets pédoclimatiques et

les effets du mode de gestion des exploitations agricoles sur la productivité des systèmes de cultures et sur l'environnement (Stöckle *et al.*, 2003). Ces modèles utilisés pour l'exploration et l'évaluation des systèmes agricoles ont la particularité de prendre en comptes la composante temporelle afin de permettre des analyses en relation avec l'évolution des systèmes considérés dans le temps. Dans le cas des modèles dynamiques, les simulations consistent à faire évoluer le modèle au cours du temps afin de mieux comprendre le fonctionnement de la dynamique du système. D'autre part, les modèles statiques permettent de réaliser des simulations pour évaluer une situation afin de déterminer des équilibres et des niveaux de décision sur des bases propres aux objectifs du modèle. On distingue des modèles statiques d'évaluation des pratiques agricoles tels que EDEN, un outil d'aide à la décision permettant d'effectuer des analyses multicritères et des bilans économiques (van der Werf *et al.*, 2009) et INDIGO, une méthode qui calcule des indicateurs agro-environnementaux (Bockstaller and Girardin, 2003). Il s'agit de systèmes supposés à l'équilibre ; on les qualifie de modèles Momo périodique.

4.2.2 Spécificités des modèles

Selon leurs spécificités, on distingue une diversité de modèles, chacun étant utilisé dans un cadre spécifique. On a par exemple les modèles de programmation stochastique (Hardaker *et al.*, 2004) dont le fonctionnement est basé sur des hypothèses fondées sur des valeurs aléatoires. Les modèles récursifs (Day, 1963; Day *et al.*, 1973) qui ont la particularité d'être réinitialisés avec les résultats d'optimisation précédente et si nécessaire avec une nouvelle information sur le contexte environnemental (Blanco and Flichman, 2002). Les Modèles multi périodique, caractérisés par la notion de temps pour laquelle est définie une situation initiale et une situation finale, prennent en compte les dynamiques biologiques, les investissements et les installations (Louhichi *et al.*, 2004). On distingue entre autres les modèles déterministes dont le fonctionnement est basé sur des hypothèses fondées sur des valeurs déterminées. Il existe cependant des modèles d'optimisation dynamique stochastique. La particularité de ces derniers, comparés aux modèles mathématiques multi périodique réside dans leur méthode de résolution : elle repose sur l'hypothèse de Bellman (Bellman, 1954) qui stipule que la décision optimale peut être déterminée à n'importe quelle étape décisionnelle si les décisions issues de l'état

induit par cette décision sont également optimales. Notre objectif étant d'évaluer les exploitations dans des conditions de fonctionnement économique optimales nous nous intéressons aux modèles s'appuyant sur des bases économiques et sur les choix de production.

4.2.3 Modèles économiques

Il existe deux types de modèles qui se fondent sur des bases économiques et sur les choix de production. D'une part, les modèles économétriques qui s'appuient sur une approche empirique et qui cherchent à estimer les paramètres d'une ou plusieurs fonctions à partir d'une base de données historiques grâce à l'inférence statistique. D'autre part les modèles de programmation mathématique qui ont une démarche mécaniste (Rehman and Romero, 1993). La programmation mathématique est l'ensemble des techniques mathématiques permettant la représentation du fonctionnement des exploitations en réaction avec un ensemble de contraintes. La programmation mathématique est couramment utilisée pour analyser les exploitations agricoles. La technique est basée sur la représentation du fonctionnement des exploitations par des fonctions mathématiques sous contraintes. Les programmes linéaires recherchent la valeur extrême de combinaisons linéaires d'activités possibles soumises à des contraintes qui limitent leur dimension et la nature de leur combinaisons (Veysset *et al.*, 2005).

4.2.4 Les modèles d'optimisation bioéconomiques

Parmi les modèles de programmation mathématique on distingue les modèles d'optimisation bioéconomiques qui lient des composantes, économique et biotechnique. Les modèles d'optimisation bioéconomiques sont de la famille des modèles mathématiques. Ils permettent de prendre en compte les interactions entre les composantes biologiques, financières, structurelles et décisionnelles. Ils optimisent le choix de l'éleveur par rapport à une fonction objective sous un ensemble de contraintes qui peuvent être multiples (Mosnier, 2009). Dans la constitution des modèles bioéconomiques des systèmes d'élevage, les composantes propres aux systèmes modélisés sont érigées en module et mises en relation. On distingue des composantes économiques (module économique) des composantes biotechniques

(les modules troupeaux-culture-structure) en fonction de la problématique à étudier. Ces modèles sont les plus appropriés pour déterminer les équilibres, en plus d'être utilisés comme outils d'aide à la décision. Les modèles d'optimisation bioéconomiques sont généralement utilisés pour traiter des questions étroitement liées aux composantes économiques des systèmes. Ces modèles détaillent les spécifications biotechniques des systèmes de production et permettent de déterminer l'ensemble des actions qui permettent d'aboutir aux systèmes optimaux par rapport à un objectif économique (Janssen and Van Ittersum, 2007). Dotés de la particularité d'optimiser le fonctionnement des systèmes sur des bases économiques et initialement utilisés dans le domaine de la pêche, de nombreux modèles d'optimisation bioéconomique sont de nos jours élaborés pour l'exploration des systèmes agricoles. La technique de programmation linéaire est le mode privilégié pour cette approche. Les modèles bioéconomiques sont des outils permettant l'évaluation ex-post et ex-ante des impacts et des politiques ou des changements technologiques dans le domaine agricole. Ils sont généralement développés pour une localisation ou une étude spécifique. Ces modèles lient la gestion des systèmes aux conditions générales ou alternatives de production en décrivant les relations entre les entrées et les sorties, tout en les associant aux externalités. Les modèles d'optimisation bioéconomiques prédisent la structure et le mode de conduite de fermes qui optimisent les bénéfices économiques à l'équilibre (Topp and Mitchell, 2003; Veysset *et al.*, 2005). De nombreux travaux de recherche s'appuient sur des modèles d'optimisation bioéconomique pour l'exploration des systèmes d'élevage (Veysset *et al.*, 2000; Falconer and Hodge, 2001; Topp and Mitchell, 2003; Janssen *et al.*, 2010; Louhichi *et al.*, 2010; Mosnier *et al.*, 2017) . A l'instar des modèles d'optimisation bioéconomique conçus pour les aléas de prix (Lambert, 1989; Ridier and Jacquet, 2002) et les aléas climatiques (Olson and Mikesell, 1988; Jacquet and Pluvineau, 1997; Kobayashi *et al.*, 2007) sur les systèmes d'élevage, Mosnier *et al.* (2009) propose un modèle d'optimisation bioéconomique dynamique pour simuler les ajustements optimaux de la gestion des systèmes d'élevage bovin laitiers aux chocs de production et de marché en France. D'autres modèles d'optimisation bioéconomiques sont utilisés pour déterminer les effets de l'agriculture sur la biodiversité (Oglethorpe and Sanderson, 1999; Schuler *et al.*, 2003). Avec la fonction première d'évaluer les performances économiques des exploitations ce sont des modèles continuellement adaptables et améliorables ce qui offre la

possibilité de les utiliser dans le cadre de plusieurs problématiques. Ces derniers semblent être les plus appropriés pour déterminer les équilibres au sein des systèmes, en plus d'être utilisés comme outil d'aide à la décision. Dans le cadre de nos travaux focalisés sur la détermination de compromis sur la base de nombreux critères, pour des analyses dans des conditions de fonctionnement économique optimales nous choisissons d'utiliser un modèle informatique notamment un modèle d'optimisation bioéconomique. Ces derniers sont les modèles informatiques les mieux adaptés à notre problème vu leur particularité à déterminer des équilibres dans des conditions de fonctionnement optimisées sur des bases économiques.

5. Conclusion

Cette synthèse bibliographique constitue une étude préalable des systèmes d'élevages bovins herbagers et de l'environnement d'élevage en relation avec la question de la durabilité. Elle permet d'appréhender les atouts et des contraintes des zones de montagnes vis-à-vis des élevages bovins. Cependant afin d'aborder efficacement les aspects essentiels de la thèse à savoir l'autonomie fourragère, la flexibilité des systèmes et la préservation de l'environnement en particulier la biodiversité des prairies, la synthèse bibliographique s'est articulée autour des concepts nécessaires à nos travaux. Il s'agit des concepts de flexibilité, de biodiversité, d'agroécologie et de durabilité qui régissent les différents axes de la thèse. Ces éléments permettent de nous orienter vers les outils utilisés dans des travaux similaires. Permettant ainsi de faire un parallèle entre les objectifs de la thèse et les méthodes les plus sollicitées pour des problèmes similaires, la synthèse bibliographique intervient ainsi pour clarifier les objectifs de la thèse et définir une méthodologie adéquate à notre étude.

CHAPITRE III.

Objectifs scientifiques et méthodologie générale

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODOLOGIE GENERALE

1. Objectifs scientifiques

1.1 Développement de la question de recherche

La thèse a pour objectif principal de contribuer à définir des systèmes d'élevage agroécologiques présentant une plus grande durabilité dans les zones défavorisées notamment les zones de montagnes. Le sujet de thèse en lui-même constitue la question de recherche :

Quelles sont les capacités des doubles troupeaux herbagers bovins laitiers – bovins allaitants à concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une flexibilité accrue de fonctionnement ?

La définition de système durable ne peut se faire sans quantifier les composantes de la durabilité qu'intègre le système de base et explorer les déterminants et l'évolution de ces derniers (Jouven, 2006). L'objectif de la thèse conduit ainsi à aborder cette question à travers les trois composantes économique, sociale et environnementale de la durabilité. Cependant la composante sociale est prise en compte dans nos travaux essentiellement à travers le coût du travail dans les systèmes étudiés. De ce fait, nous étudions ainsi seulement la composante environnementale et la composante socio-économique de la durabilité. L'exploration de l'évolution des déterminants de ces composantes s'effectue à travers l'analyse des performances biotechniques, économiques et environnementales des systèmes bovins mixtes laitier-allaitant. On s'attache ainsi à identifier les modes de conduite des exploitations bovin herbagers qui favorisent de meilleurs compromis entre : la valorisation de la diversité agronomique et géographique du parcellaire pour une plus grande autonomie alimentaire, l'adaptativité des systèmes aux aléas économiques pour garantir des profits stables dans le temps et l'utilisation maîtrisée de la biomasse pour le maintien des services écosystémiques parallèlement à des impacts environnementaux moindres. Les meilleurs compromis intra et inters composants sont ainsi recherchés afin d'identifier les systèmes qui favorisent les meilleures performances biotechniques (autonomie alimentaire), économiques (meilleures capacités d'adaptions avec un profit meilleur et plus stable), environnementales (moindres impacts environnementaux et bonne conservation des services écosystémiques).

Dans notre travail, nous cherchons à identifier les systèmes qui permettent le meilleur compromis entre les trois aspects précités dans des conditions de fonctionnement optimisé au moyen d'un modèle d'optimisation bioéconomiques. Cette exploration s'appuie sur la simulation en parallèle d'un système d'élevage bovin en double troupeaux laitiers et allaitant, décliné selon des propositions variables de leurs troupeaux laitiers et allaitants. Cette exploration est alors décomposée en vue de répondre aux trois questions suivantes :

Quelles "configurations" des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une meilleure valorisation des ressources herbagères en zones contraignantes ?

A travers le terme "configuration" nous faisons allusion à la structure et au mode de conduite du système d'élevage. Le mode privilégié de valorisation des ressources est ici le pâturage. A la suite des simulations, nous évaluons pour chaque configuration de systèmes ses performances biotechniques (intégrant les taux de pâturages) de production et économiques pour d'identifier les configurations de système qui permettent une meilleure utilisation du pâturage avec des meilleures performances économique et environnementale. Les comparaisons intra systèmes des performances permettent d'identifier les configurations qui favorisent une meilleure valorisation des ressources herbagères par pâturage avec un bon bilan économique et de bonnes performances de production.

Comment les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent aux aléas économiques pour stabiliser leur profit dans le temps ?

Nous identifions et nous évaluons notamment les impacts des changements au niveau de la structure des systèmes de production (les répartitions de troupeaux et les productions animales) et de la conduite sur le maintien du profit. Nous identifions parallèlement les aléas auxquels les systèmes s'avèrent les plus sensibles en fonction de leur structure et mode de conduites.

Quelles "configurations" des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant favorisent une utilisation maîtrisée de la biomasse pour préserver les services écosystémiques avec de meilleurs bilans environnementaux ?

L'expression "utilisation maîtrisée de la biomasse" désigne ici les niveaux de chargement et les quantités des ressources en herbe exploitées au moyen de mécanisation. A la suite des simulations, nous évaluons pour chaque configuration de système, les bilans environnementaux, l'évolution des services écosystémiques, les niveaux d'utilisation de biomasse. Cette démarche trouve son sens dans des comparaisons intra systèmes des différents bilans qui permettent d'identifier les configurations de systèmes qui favorisent les meilleurs compromis entre durabilité socio-économique et durabilité environnementale.

Ces questions impliquent chacune une hypothèse d'où les trois hypothèses ci-après.

1.2 Trois hypothèses de thèse

Le contexte de la thèse fait intervenir trois hypothèses à savoir :

Hypothèse 1 : La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les troupeaux bovins spécialisés dans les zones de montagnes tout en maintenant de bonnes performances économiques.

Hypothèse 2 : Dans des conditions optimisées de fonctionnement économiques, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés.

Hypothèse 3 : Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations par comparaison avec les systèmes bovins spécialisés.

Pour vérifier ces hypothèses il s'avère nécessaire de :

- Explorer la conduite des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant à l'aide d'un outil adapté à la zone d'étude et aux systèmes d'élevage bovins mixtes.
- Evaluer systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant des conditions de fonctionnement optimisées sous une base commune.
- Evaluer la capacité des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant à accroître leur autonomie alimentaire.

- Evaluer la capacité des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant à s'adapter aux aléas économiques (aléas de prix et évolution des politiques économiques).
- Evaluer les impacts environnementaux et l'efficacité énergétique des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant.
- Analyser l'évolution des services écosystémiques associés aux végétations de prairie dans le cas de la conduite des systèmes bovins mixtes.

Ces points sont abordés à travers trois axes d'études qui permettent de vérifier les hypothèses et de donner des éléments de réponse à la question de recherche.

1.3 Trois axes de la thèse

Trois 3 axes d'étude sont ainsi développés à savoir :

Axe 1 : Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne

Il s'agit ici d'évaluer l'efficacité alimentaire des exploitations et la capacité des systèmes à accroître leur autonomie alimentaire (acquisition de l'autonomie fourragère et réduction de l'utilisation des concentrés) à travers le mode de conduite de l'exploitation conduisant à la sécurisation des productions (production fourragère, production laitière et production animales) dans les zones défavorisées ou zones de montagne.

Axe 2 : Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix

De nos jours l'incertitude croissante dans le contexte économique dans lequel évolue l'élevage contraint à étudier les capacités d'adaptation des systèmes à moyen et long terme. Cette étude propose d'évaluer la sensibilité des choix de production et des résultats économiques d'exploitations bovines avec une part variable de bovins allaitants et de bovins laitiers variable aux aléas économiques. Il s'agit de vérifier si et dans quelle mesure la conduite simultanée d'un troupeau de bovin laitier et d'un troupeau de bovins allaitants constitue une bonne stratégie de gestion des risques économiques.

Axe 3 : Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers : "analyse environnementale des systèmes bovins mixtes"

Nous analysons ici les niveaux des services écosystémiques des systèmes bovins mixtes laitiers-allaitants parallèlement à leurs impacts environnementaux et leurs performances économiques dans des situations de fonctionnement optimisées. Des analyses multicritères des données issues des simulations combinées aux informations issues de la superposition de typologies de prairies permettent d'identifier les systèmes qui minimisent la dégradation de l'environnement tout en obtenant de meilleures performances économiques et de bons niveaux de services écosystémiques.

Tableau 1. Correspondance entre les questions traitées, les hypothèses et axes d'études.

	Hypothèses	Questions	Axes d'étude
I	Hypothèse 1 : La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les troupeaux bovins spécialisés dans les zones de montagnes tout en maintenant de bonnes performances économiques.	Quelles "configurations" des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une meilleure valorisation des ressources herbagères en zones contraignantes ?	Axe 1 : Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne
II	Hypothèse 2 : Dans des conditions optimisées de fonctionnement économiques, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés.	Comment les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent aux aléas économiques pour stabiliser leur profit dans le temps ?	Axe 2 : Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix

III	Hypothèse 3 : Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations par comparaison avec les systèmes bovins spécialisés.	Quelles "configurations" des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant favorisent une utilisation maîtrisée de la biomasse pour préserver les services écosystémiques avec de meilleurs bilans environnementaux ?	Axe 3 : Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers : "analyse environnementale des systèmes bovins mixtes"
-----	---	--	--

1.4 Dispositifs de mise en œuvre

Ce travail a mobilisé trois ensembles de dispositifs :

- 1) Un travail préalable d'enquêtes exploratoires a servi d'une part, à une représentation du système d'élevage centrée sur les interrelations entre fonctionnement des troupeaux et fonctionnement dynamique du système fourrager à l'échelle de l'ensemble du cycle de production et de prospecter, et d'autre part, à identifier le fonctionnement et les caractéristiques de parcellaires en systèmes d'élevage bovins doubles troupeaux herbagers.
- 2) Choix de l'outil de simulation Orfee adapté aux doubles troupeaux, fondé sur l'appréhension et l'adaptation du modèle Orfee (Mosnier *et al.*, 2017) à l'environnement d'étude à travers l'intégration des contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcellaires basées sur la typologie française des prairies permanentes s'est avéré bien adapté à notre approche, contrairement aux modèles de simulation DYNAMILK (Jacquot *et al.*, 2012; Jacquot *et al.*, 2015) et SEBIEN (Jouven, 2006; Jouven *et al.*, 2007; Jouven and Baumont, 2008) proposés au niveau de l'UMRH. Ces adaptations portent sur l'intégration de codes au modèle initial pour lui permettre de prendre en compte davantage les caractéristiques géographiques du parcellaire. L'adaptation du modèle a été réalisée à travers la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System) (McCarl, 2004).
- 3) Des expérimentations virtuelles (simulations de scenarii) basées sur un plan d'expérience et des cas-types (modèles représentatifs viables d'exploitations réelles) ont permis d'explorer la réponse d'un même système d'élevage variant selon sa proportion de bovins laitiers et de bovins allaitants afin de quantifier les impacts de types de parcellaires sur l'équilibre du système fourrager, sur la productivité du troupeau, et l'aptitude du système à maintenir ou développer un certain niveau d'autonomie fourragère, mais aussi à obtenir de bonnes performances économiques et environnementales. Des méthodes informatiques d'exploration de modèle notamment d'analyse de sensibilité locales et globale seront également sollicitées pour évaluer la

sensibilité du profit aux variations des certain paramètres (paramètres économiques) d'entrée du modèle afin de faire des mesures sensibilité en situation d'aléas économiques.

2. Méthodologie générale : stratégie adoptée

2.1 Enquête exploratoire

En vue de cerner le contexte géographique et de mieux appréhender les systèmes d'élevage bovin double troupeaux laitier et allaitant en zones de montage des enquêtes ont été réalisées sur un territoire représentatif du Massif central où se trouvent des systèmes d'élevage de ce type. Ce travail exploratoire a été réalisé près de Laguiole sur le plateau de l'Aubrac en Aveyron. Ce territoire du Massif central est représentatif de zones soumises à de fortes contraintes naturelles (contraintes climatiques, géographiques et topographiques) qui abritent des systèmes de production simultanément impliqués dans la production de viandes et de lait. Quatre enquêtes ont été réalisées. La première enquête a été faite dans une exploitation double troupeaux bovin lait-viande de petite taille (GAEC DE FONT-FRIDE avec 45 ha de prairies permanentes, 40 VL (Vaches Laitières) "Montbéliard", 35 VA (Vaches Allaitantes) "Aubrac"), deux autres ont eu lieu dans des exploitations de taille moyenne (GAEC DE LA VOLTE avec 128 ha de prairies permanentes, 105 VL "Simmental" , 60 VA "Aubrac » et FERME DE GREZETTES avec 160 ha de prairies permanentes, 37 VL "Simmental", 37 VA "Aubrac"), et la dernière enquête s'est déroulée dans une exploitation de grande taille (GAEC DE CLAUZELS avec 410 ha de prairies permanentes, 60VL "Simmental" , 120 VA "Aubrac"). Ces enquêtes sont réalisées dans le but de cerner les fonctionnements des exploitations et les particularités des systèmes avec doubles troupeaux bovins laitier et allaitant. Lors des enquêtes des données biotechniques, pédoclimatiques, géographiques, économiques, zootechniques, des commentaires sur le fonctionnement de l'exploitation, des indications sur les moyens de production et les troupeaux ont été relevées. Une description détaillée des parcelles permettant de déterminer la structure du parcellaire et les types de végétation de prairies a été réalisée, et les cultures ont été aussi prises en compte dans les enquêtes. Après avoir récolté des données relatives aux exploitations, une phase de questions a été abordée sur les aléas climatiques et sanitaires et sur l'organisation générale. Les entretiens avec les agriculteurs ont nécessité pour chaque exploitation en moyenne 2h30 d'échange. Ces enquêtes ont par ailleurs permis d'identifier les paramètres pertinents pour les adaptations du modèle. On trouvera dans les annexes le questionnaire d'enquête utilisé. Il était initialement prévu de faire les retours des résultats de nos analyses aux agriculteurs

enquêtés en vue de les aider à accroître la durabilité de leurs systèmes de production, mais des limites dans l'adaptation d'Orfee à des cas particuliers nous a contraint à renoncer à cette ambition.

2.2 Démarche de la thèse

La stratégie adoptée consiste à faire des expérimentations virtuelles à l'aide du modèle d'optimisation bioéconomique Orfee adapté à la zone d'étude pour intégrer l'hétérogénéité du parcellaire, les pentes et les altitudes. Les enquêtes exploratoires nous ont aidés à bien appréhender les systèmes étudiés et à identifier les opérations et paramètres à prendre en compte pour l'adaptation du simulateur. Nous nous sommes appuyés pour nos expérimentations sur les données de deux Cas-types (modèles représentatifs d'exploitations viables construits à partir de données de fermes réelles) contrastés. Ces cas-types correspondent à des exploitations en régime de croisière et permettent des simulations basées sur un plan d'expérience structuré sur la variation des répartitions des deux troupeaux (laitier et allaitant). Nous visions ainsi à vérifier nos hypothèses à travers nos trois axes d'étude qui traite chacun d'une hypothèse pour contribuer à répondre à la problématique générale de la thèse.

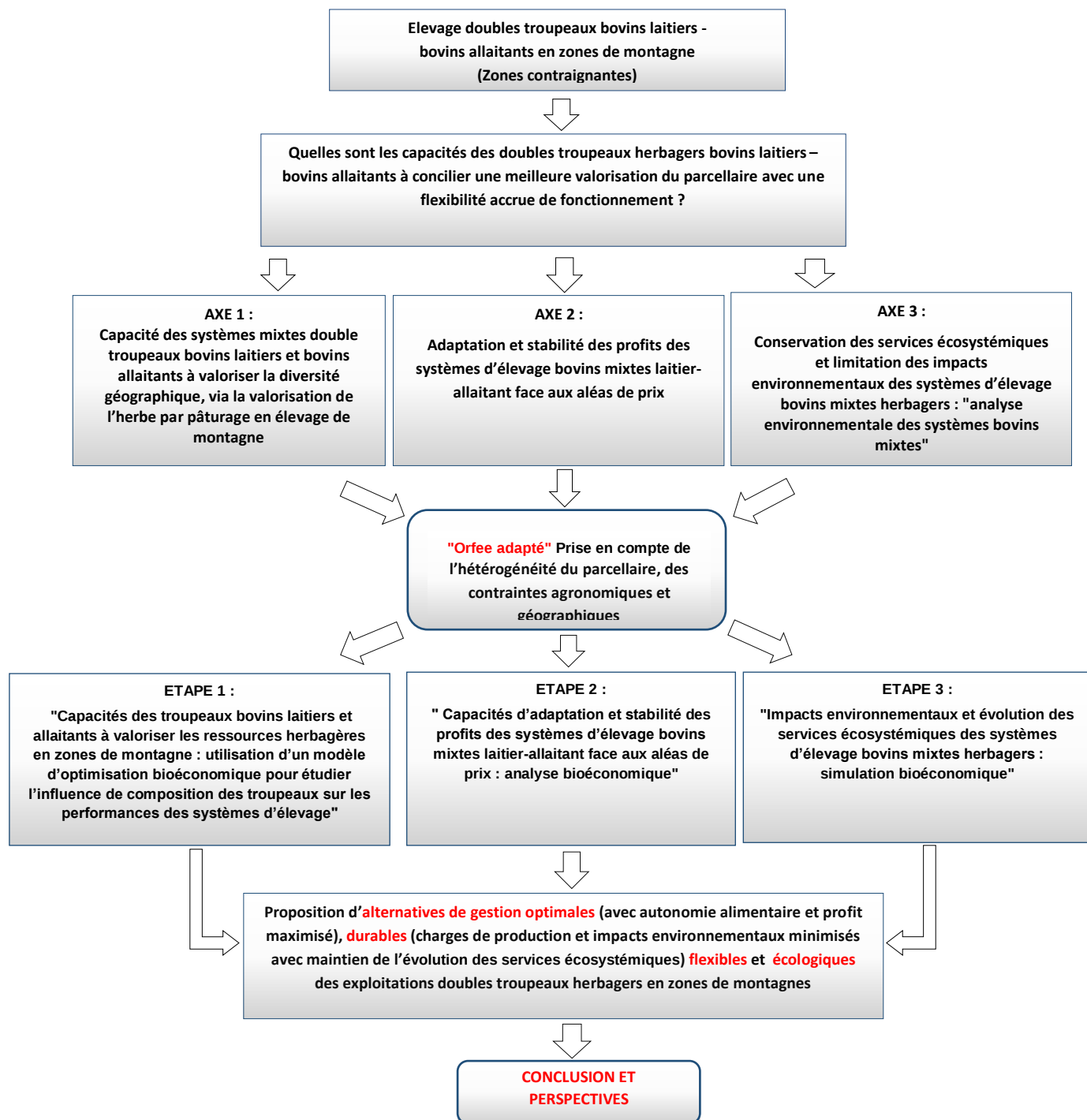


Figure 1. Diagramme illustratif de la démarche de la thèse.

2.3 Choix du modèle support : Orfee

La gestion des doubles troupeaux bovins laitier et allaitant s'avère difficile à maîtriser du fait de la dualité des conduites et plus encore dans les zones de montagne dites à contraintes. Parmi ces contraintes, on peut citer les aléas naturels, les contraintes géographiques et climatiques. Cependant nos hypothèses stipulent que ces types d'élevage ont une forte capacité d'adaptation et auraient une meilleure durabilité si le système est orienté sur la forte valorisation des prairies. Parallèlement il est important en zone de montagne de conserver les services écosystémiques liés aux végétations prairies. L'étude des exploitations bovines en zones de montagne a par ailleurs soulevé de nombreuses questions ces dernières années, notamment liées à la recherche d'autonomie fourragères : Ces questions ont mené au développement de modèles dynamiques tel que SEBIEN qui est un modèle de référence pour analyser les relations entre la composition botanique et les pratiques (Jouven and Baumont, 2008), mais qui représente exclusivement des troupeaux bovins allaitants. On a également le modèle DYNAMILK servant à l'analyse des compromis possibles entre production laitière, autonomie fourragère et utilisation de prairies (Jacquot *et al.*, 2012), mais ce dernier représente exclusivement des troupeaux bovins laitiers. De plus ces modèles ne prennent pas en compte de façon fine les aspects économiques et la combinaison des deux troupeaux, qui s'avère fréquente dans les zones de montagne, et se trouve au cœur de notre problématique mais aussi nécessaire à la vérification de nos hypothèses.

L'objectif d'assurer une autonomie fourragère ne peut être atteint qu'en prenant en compte toutes les composantes du système de production en interaction. En effet pour observer les meilleurs équilibres, la prise en compte de toutes les composantes du système de production en interaction est essentielle pour explorer des systèmes complexes tels que les systèmes bovins dans des zones montagneuses. C'est ainsi que la modélisation est privilégiée car elle permet d'avoir une vue large sur le système. Afin de déterminer les compromis entre les composantes de la durabilité des systèmes d'élevage et l'optimisation de leurs résultats économiques, nous avons opté pour le modèle d'optimisation bioéconomiques Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017) qui a comme premier avantage d'intégrer à la fois des troupeaux laitiers et des troupeaux allaitants. Par ailleurs, les modèles d'optimisation bioéconomique permettent de prendre en compte

les interactions entre les composantes biologiques, financières, structurelles et décisionnelles. Ces derniers sont les plus appropriés pour déterminer les équilibres présentant les meilleurs compromis en plus d'être utilisés comme outil d'aide à la décision. L'optimisation économique est ainsi utilisée pour déterminer les compromis recherchés dans les conditions fonctionnement économiques les plus rentables. Toutefois les résultats économiques des systèmes de production sont liés à leurs performances techniques, ce qui conforte l'exploration des systèmes sur une même base économique ici l'optimisation du résultat courant. On parle de modèle d'optimisation bioéconomique qui sont des modèles qui prédisent la structure et le mode de conduite des fermes permettant l'optimisation du bénéfice économique à l'équilibre. La modélisation bioéconomique s'avère efficace pour la quantification des interactions entre les composantes d'une exploitation et pour tester des systèmes alternatifs (Halberg *et al.*, 2005). La modélisation bioéconomique à travers le modèle Orfee s'est ainsi avéré être l'approche la plus appropriée à notre problème. Cependant afin de bien représenter le cadre d'étude, des adaptations ont été nécessaires pour prendre en compte les systèmes d'élevages bovins herbagers en montagne. La représentation de la production des prairies a été enrichie à partir de la typologie nationale des prairies permanentes (Launay *et al.*, 2011). De plus nous avons souhaité pouvoir prendre en compte les contraintes géographiques (pentes, obstacles et distances) en plus d'intégrer dans ce modèle l'hétérogénéité des parcellaires. Ces nécessités nous ont conduits à adapter le modèle Orfee pour lui adjoindre la prise en compte de ces facteurs complémentaires.

2.4 Les systèmes de production étudiés : les cas-types

Les enquêtes ont été réalisées au printemps 2016 sur le bilan de l'année 2015 qui fut marquée par de faibles rendements de prairie et des invasions de ravageurs. Il est par ailleurs impossible de transcrire certaines données récoltées lors des enquêtes vu leur complexité vis à vis du dispositif de simulation. Enfin, il est également apparu certaines lacunes ou incohérences dans les informations fournies par certains exploitants. Afin de travailler sur des données fiables et objectives, et suite à la constatation de la difficulté de travailler sur des exploitations particulières, nous nous sommes appuyés sur des modèles d'exploitation et plus particulièrement sur des cas types pour nos expériences. Nous avons pour cela recherché les cas-types existant qui représentaient des doubles troupeaux bovins laitiers et allaitants et nous avons

sélectionné pour nos évaluations les cas-types BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2) sur lesquels on trouvera plus de détail dans la section ***Paramétrage du modèle Orfee du Chapitre IV***.

Ces deux exploitations types (BL18 "Ferme_1" et BL22 "Ferme_2") (Cf. Cas types en annexes) avec leurs troupeaux bovins mixtes herbagers sont issus de la base de données DIAPASON (Charroin *et al.*, 2005).

2.5 Plan d'expérience général

Pour nos analyses nous avons choisi de faire varier la proportion de bovins de chaque troupeau au sein de chaque cas-type. Ce dispositif présentait l'avantage de permettre la comparaison de systèmes mixtes, présentant une variété d'équilibres selon les proportions d'animaux laitiers et allaitants, avec des systèmes spécialisés lait ou viande. Nous avons alors défini des scénarios de répartition de troupeaux entre UGB bovin laitier et UGB bovin allaitant basés sur un plan d'expérience à deux dimensions. Nous avons ainsi considéré cinq distributions de troupeaux, soit cinq scenarios pour chaque cas-type avec des troupeaux mixtes. Ces scénarios ont été déclinés selon un pourcentage décroissant de bovins laitiers dans l'UGB totale : 100 % (troupeau laitier, 100D), 75 % (troupeau à dominante laitier, 75D), 50 % (troupeau équilibré lait-viande, 50D), 25 % (troupeau à dominante allaitant, 25D) et 0 % (troupeau allaitant, 0D).

Tableau 2. Plan d'expérience avec cinq distributions de troupeaux, soit cinq scenarios de chaque cas-type avec des troupeaux mixtes ayant un pourcentage décroissant de bovins laitiers dans l'UGB totale : « D pour le nombre d'UGB laitier et la différence en pourcentage (%) pour le nombre d'UGB allaitant » 100 % (troupeau laitier, 100D), 75 % (troupeau à dominante laitier, 75D), 50 % (troupeau équilibré lait-viande, 50D), 25 % (troupeau à dominante allaitant, 25D) et 0 % (troupeau allaitant, 0D).

CAS-TYPE	Cultures	Estives	100D	75D	50D	25D	0D
Cas-type BL18 : Ferme_1	NON	OUI	Troupeau 100% laitier	Troupeau à dominante laitier (75% laitier et 25% allaitant)	Troupeau équilibré (50% laitier / 50% Allaitant)	Troupeau à dominante allaitant (75% allaitant et 25% laitier)	Troupeau 100% allaitant
Cas-type BL22 : Ferme_1	OUI	NON	Troupeau 100% laitier	Troupeau à dominante laitier (75% laitier et 25% allaitant)	Troupeau équilibré (50% laitier / 50% allaitant)	Troupeau à dominante allaitant (75% allaitant et 25% laitier)	Troupeau 100% allaitant

Le plan d'expérience présente des simulations pour deux fois cinq compositions (répartitions) de troupeaux pour afin d'étudier le rôle de la composition des troupeaux sur les performances biotechniques, économiques et environnementales des systèmes d'élevage considérés. Les répartitions de troupeaux des cas-types de bases BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2) sont équivalente à la répartition 50D. Le plan d'expérience sert de support pour les simulations et tous les paramètres sont optimisés à l'exception des répartitions de troupeaux et des chargements. Dans le cadre de cette étude, lors des simulations, les proportions d'unités de gros bétail (UGB) (laitier/allaitant) des troupeaux sont fixes, tandis que le nombre total d'UGB dans l'exploitation, l'assolement et les rations des animaux sont optimisés.

Lors des simulations, le modèle fournit des valeurs pour l'assolement, la fertilisation, les productions et consommations végétales, les rations alimentaires, les productions animales (lait/viande), la démographie des troupeaux, les achats d'intrants et les

ventes de produits, les résultats économiques de l'exploitation, la quantité de travail et les impacts environnementaux, en particulier les émissions de gaz à effet de serre.

2.6 Résultats attendus

Les résultats attendus permettront de valider ou non nos hypothèses. Sur un plan plus théorique, les résultats contribuent à une meilleure compréhension du fonctionnement de systèmes bovins mixtes herbagers et des compromis entre les différentes composantes de durabilité et de production, tout en mettant en évidence les principes agroécologiques mobilisés par ces systèmes. De plus, ce travail permet de disposer d'un simulateur adapté aux systèmes herbagers à même d'évaluer les performances de production, économiques et environnementales des systèmes d'élevage bovin mixte laitier-allaitant, et d'en percevoir les variations en fonction des modifications de leur organisation interne ou de variations du contexte extérieur. Ces résultats sont en cours de valorisation par des publications scientifiques qui constituent les différents axes d'étude de la thèse complétés par des communications à des colloques.

CHAPITRE IV.

Le modèle Orfee et son adaptation à la question de recherche

LE MODELE ORFEE ET SON ADAPTATION A LA QUESTION DE RECHERCHE

1. Modèle Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment)

1.1 Description globale

Le modèle bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017) est un modèle de simulation élaboré pour explorer les systèmes d'élevages associant la production de cultures de rente en France. S'inscrivant dans la lignée d'autres modèles d'élevage tels que Opt'INRA (modèle utilisé en élevage avec pour fonction première la maximisation des bénéfices des exploitations simulées et renfermant 275 activités liées et limitées par 217 contraintes) (Veysset *et al.*, 2005) et FSSIM (Louhichi *et al.*, 2010). Il est utilisé pour optimiser les décisions relatives à la production agricole et herbagère, la production animale, les bâtiments et les matériaux, la composition des rations, l'utilisation des prairies et l'achat d'aliments. Le modèle maximise une fonction objective du type espérance-variance. La fonction objective (espérance du résultat courant net) est constituée par le total des revenus, y compris les ventes d'animaux (lait, carcasses, animaux maigres) et les paiements compensatoires (paiements découplés, paiements à la vache allaitante...) moins les coûts liés aux troupeaux, à la mécanisation (coûts de carburant, d'amortissement et de maintenance ou les coûts d'entreprise) et les bâtiments (amortissement et maintenance) (Mosnier *et al.*, 2017). Le résultat courant net choisit comme objectif est un indicateur pertinent pour mesurer la rentabilité et l'efficience d'une exploitation. L'optimisation est réalisée sous une série de contraintes concernant l'alimentation des animaux, la démographie du troupeau, les opérations agricoles, la mécanisation, l'utilisation de l'espace, les ressources agricoles, les politiques et les processus biotechniques et biologiques liés aux animaux (Mosnier *et al.*, 2017). Le modèle intègre diverses productions animales (bovins laitiers, bovins allaitants et ovins) repartis en différentes catégories. Les alternatives de production concernent les races car elles ont un impact sur les caractéristiques des animaux (poids vif et poids des carcasses, capacité d'ingestion, performances de reproduction, production de lait...). Différentes périodes de vêlage sont possibles afin de contrôler la mortalité des veaux ou de mieux adapter les besoins en aliments ou en main-d'œuvre aux disponibilités en pâturages ou en main-d'œuvre. Les besoins en aliments

pour animaux sont exprimés chaque mois en termes d'énergie, de protéines et de capacité d'ingestion, afin de pouvoir adapter les rations aux contextes de production et de réglementation. Les opérations (distribution des aliments, traite, surveillance de la reproduction...) et les besoins en logement sont également spécifiés et ont un impact direct sur les besoins en main-d'œuvre. Les contraintes démographiques entre les catégories animales annuelles permettent de modéliser les processus de reproduction et de vieillissement. Pour couvrir les principales productions agricoles des systèmes étudiés ainsi que les cultures susceptibles d'améliorer l'autosuffisance alimentaire animale, des cultures dont graminées temporaires et permanentes) sont introduites avec diverses utilisations finales (ensilage, grain, nombre de coupes d'herbe...). L'accent a été mis sur la fourniture d'alternatives de production pour réduire la fertilisation, la protection des plantes et la consommation de carburant. La superficie cultivée est limitée par la superficie agricole utilisable de la ferme et par la superficie pouvant être labourée. Les opérations de culture peuvent être mises en œuvre grâce à différents types de machines. Le type de matériel de traite et de distribution d'aliments est paramétré par l'opérateur. Ils affectent le travail requis pour les différentes opérations du troupeau, contraignent l'alimentation et modifient les coûts de la machine et la consommation de carburant. Les exigences en matière de logement et de construction dépendent du nombre d'animaux et de la production de déjections. Les coûts sont proportionnels à leur capacité et à leurs caractéristiques (stabulation libre, cabine et type de fosse à fumier). Toutefois il s'agit d'un modèle d'optimisation pseudo dynamique, il est globalement statique avec des calculs intermédiaires prenant en compte des pas de temps mensuel pour l'élaboration des bilans. Le modèle est implémenté sous la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System). Il s'agit d'une plateforme de modélisation mathématique permettant la description synthétique de modèles complexes (McCarl *et al.*, 2004).

1.1.1 Activités animales et principaux produits

Les types d'animaux sont caractérisés par la race (les races laitières (prim'Holstein, montbéliarde, normande) ou les races allaitantes (charolaise, limousine, salers, aubrac, blonde d'Aquitaine), l'objectif de production (âge au premier vêlage) ou type de produit animal ciblé, le niveau de la production laitière et la période de vêlage des femelles reproductrices.

Croissance animale : Deux courbes de croissance animale sont construites pour les deux races principales (charolais et prim'Hostein). Il existe également une alternance entre les taux de croissance moyens hivernaux et printaniers, surtout pour les génisses âgées de 3 ans au vêlage qui ont un taux de croissance moyen plus faible en hiver et mobilisent une croissance compensatoire au printemps. Le poids vif des vaches matures par défaut est défini selon les statistiques nationales de 2014 utilisées par (Agabriel *et al.*, 2015) : charolais 700 kg, salers 613 kg, prim'Hostein de 645 kg, le montbéliarde 635 kg.

Production de lait : La production de lait est définie par mois en fonction de la production laitière moyenne par jour et de l'équation de Wood (Wood, 1967) qui permet de spécifier la distribution du lait par mois. L'équation de Wood estime la quantité de lait produite en fonction de la semaine de lactation. On a un potentiel laitier de 8 L / jour pour les charolaises, 9 L / j pour les salers, 7 L / jour pour les limousines. Pour les vaches laitières selon (Agabriel *et al.*, 2015), le potentiel laitier est basé sur la lactation standard (305j).

Tableau 1. Lactation standard selon la composition de la race et du lait.

	Lactation Standard	Teneur en matières grasses (%)	Teneur en protéines (%)
Prim'Hostein	8000	38.7	31.3
montbéliarde	6500	38.6	32.4

Source: milk recording, 2012¹

La production laitière augmente avec le nombre de lactations jusqu'à la cinquième lactation. Cependant, l'effet n'est pris en compte que pour les vaches primipares. Les primipares qui vêlent pour la première fois à 3 ans produisent 83% de leur potentiel de maturité, celles vêlant à 30 mois 75% et celles âgées de 2 ans 71%.

¹<http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/genetique-race/article/des-performances-en-hausse-pour-des-effectifs-en-baisse-1175-89367.html>

1.1.2 Démographie des troupeaux

La mortalité n'est appliquée qu'aux veaux. Les valeurs par défaut sont fournies par race et sont modulées en fonction de la période de vêlage (Perrin *et al.*, 2011). La prolifération est estimée en fonction de la fréquence des jumeaux enregistrés (Ledos and Moureaux, 2013) : prim'Holstein 1,034 ; normande 1,035 ; montbéliarde 1,041 ; charolaise 1,048 ; limousine 1,016 ; saler 1,024. Le taux de réforme minimum par défaut est proposé en fonction des pratiques actuelles observées dans les fermes : prim'Holstein 0,35 ; normande 0,25 ; montbéliarde 0,25 ; charolaise 0,23 ; limousine 0,23 ; saler 0,14.

1.1.3 Alimentation

Les exigences alimentaires : les besoins en aliments, la consommation d'aliments et la valeur des aliments sont calculés selon la méthodologie Inra (Brocard, 2010). Les exigences et le contenu des aliments ont deux valeurs pour caractériser la teneur en protéines : PDIE (protéines digestibles par l'intestin grêle grâce au contenu énergétique des aliments) et PDIN (Protéines Digestibles par l'Intestin grêle grâce à la teneur en azote des aliments pour animaux).

Les besoins totaux des animaux en protéines et en énergie sont calculés comme la somme des besoins en entretien et en croissance pendant la gestation et la production de lait.

La capacité d'ingestion est calculée pour chaque activité animale, sur une base mensuelle. Elle augmente avec le poids vif des animaux, la production de lait et l'activité physique, et diminue au cours du dernier stade de la gestion. Quatre blocs d'équations différents sont introduits pour la vache laitière, la vache allaitante, les veaux qui s'allaitent et pour les autres animaux.

1.1.4 La fonction objective : Le résultat courant

La fonction objective dans Orfee (le résultat courant net) renvoie à une méthode de calcul d'un ratio comptable. Il se calcule à partir du résultat d'exploitation et du résultat financier. Il est constitué par la somme des produits d'exploitations et des produits financiers auxquels on soustrait la somme des charges d'exploitation et des charges financières. Il s'agit d'un indicateur pertinent permettant de mesurer la rentabilité de l'exploitation. Dans notre modèle la fonction objective est représentée comme suit :

Résultat courant = marge brute – (salaires + taxes)

Marge brute = (produit total) – (charges opérationnelles + charges structurelles)

Produit total = revenus issus des produits (lait, viande, cultures) + aides et subventions

1.1.5 Quelques contraintes d'optimisation

Il existe des centaines de contraintes dans le modèle, quelques-unes sont traduites ci-après :

- Les différentes vaches reproductrices peuvent produire différents types de veaux mâles, mais la somme des vêlages de mâles = somme des veaux mâles,
- Le taux minimum de vaches de réforme est défini en fonction du nombre de femelles qui vêlent au cours de l'année,
- La consommation alimentaire ne peut pas dépasser la capacité d'ingestion de l'animal,
- La quantité d'herbe fraîche disponible ne peut pas être retardée d'un mois sur l'autre,
- Les vaches laitières ne peuvent pas pâturer les pâturages situés trop loin de la salle de traite,
- La quantité d'herbe que les vaches laitières peuvent pâturer ne peut pas dépasser le nombre d'hectares qui leur sont accessibles, multiplié par la production de pâturage.

1.2 Implémentation

Le modèle Orfee est implémenté sous la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System) (McCarl *et al.*, 2004). Il s'agit d'une plateforme de modélisation mathématique conçue pour fournir un langage structuré pour la description synthétique de modèles complexes et de grandes tailles (McCarl *et al.*, 2004). Cet outil permet la modification de modèle préexistant par l'introduction d'un nouvel algorithme de façon sécurisée. Le principe consiste à utiliser la définition univoque de relations algébriques indépendantes des algorithmes de résolution utilisés. La plateforme de modélisation a la particularité d'avoir son environnement de modélisation et sa bibliothèque d'optimisation conçus indépendamment. GAMS est un outil puissant pour résoudre des problèmes d'optimisation. Le codage dans GAMS est

relativement simple et peut gérer des problèmes d'optimisation avec différentes structures. Le système de modélisation algébrique générale (GAMS) est un système de modélisation de haut niveau pour l'optimisation mathématique. GAMS est conçu pour modéliser et résoudre des problèmes d'optimisation linéaires, non linéaires et en nombres entiers mixtes. Le système est adapté aux applications de modélisation complexes à grande échelle et permet à l'utilisateur de créer des modèles pouvant être adaptés à de nouvelles situations. Le système est disponible pour être utilisé sur diverses plates-formes informatiques. Les modèles sont portables d'une plateforme à l'autre. Il s'agit du premier langage de modélisation algébrique (AML). Avec un environnement de développement intégré (IDE), GAMS est connecté à un groupe de solveurs d'optimisation indépendant. On trouve les solveurs BARON, COIN-OR, CONOPT, CPLEX, DICOPT, Gurobi, MOSEK, SNOPT, SULUM et XPRESS (McCarl *et al.*, 2004). Il est doté de nombreux avantages et ses propriétés confortent le choix dans notre thèse de partir d'un modèle préexistant à savoir Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017).

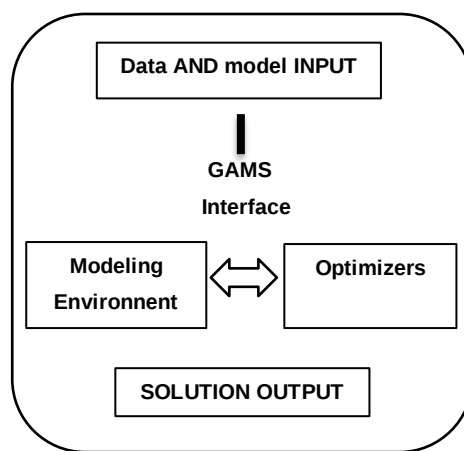


Figure- 1. Schéma de fonctionnement de GAMS (Source : (McCarl *et al.*, 2004)).

GAMS permet également la modification de modèle préexistant, nous avons exploité la possibilité d'adapter finement le modèle de base à notre cadre d'étude. Orfee a ainsi été adapté pour prendre en compte les particularités des zones de montagnes.

2. Adaptation du modèle support pour traiter les questions abordées

On prend en compte la géographie et la constitution du couvert végétale. On sera ainsi en mesure de déterminer l'utilisation des prairies et les utilisations des parcelles (Fleury *et al.*, 1996; Andrieu *et al.*, 2007).

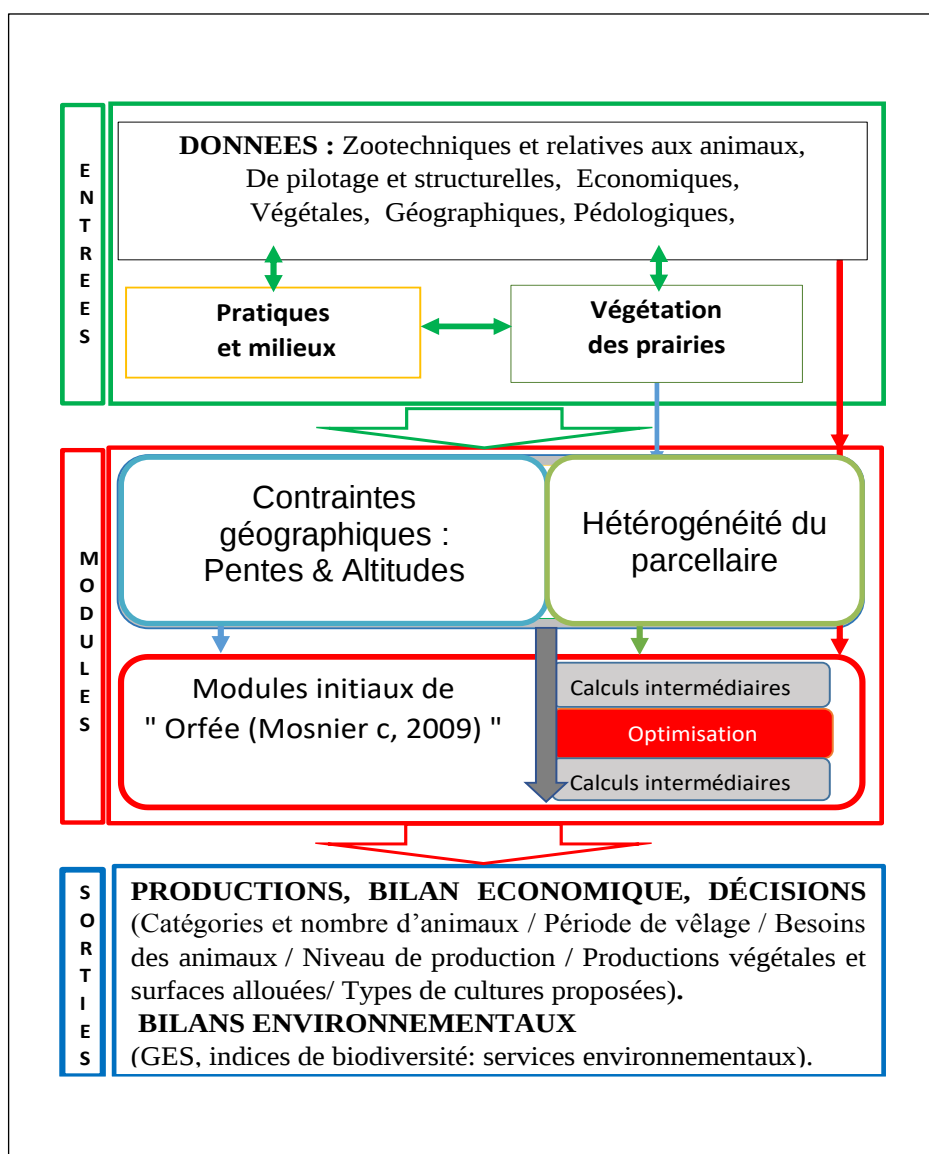


Figure- 2. Concept d'adaptation du modèle support.

2.1 Intégration de l'hétérogénéité du parcellaire

La représentation de la production des prairies a été enrichie à partir de la typologie nationale des prairies permanentes afin d'offrir au modèle une hétérogénéité du parcellaire. Nous nous sommes appuyé sur la méthode de calcul développée dans le

manuel intitulé prairies permanentes, et des références pour valoriser leur diversité (Launay *et al.*, 2011).

2.1.1 Les types de prairie pour représenter les zones de montagne

Les types de prairie considérés pour représenter les zones de montagne sont les végétations de prairies caractéristiques la zone d'étude et référencés dans la typologie nationale des prairies permanentes (Launay *et al.*, 2011) :

PA1 : Pâtures d'altitude sèches et acides à fétuque rouge et agrostide (Prairie de diversité et phénologie tardive : Productivité et valeur alimentaire faible à moyenne, mais relativement stable dans la saison).

PA2 : Prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (Prairie de composition équilibrée : productivité moyenne et valeur alimentaire élevée surtout pour les repousses).

PA3 : Pâtures mixtes d'altitude bien fertilisées à ray-grass anglais et dactyle (Pairie de phénologie précoce, équilibrée en famille botaniques : Forte productivité et valeur alimentaire élevée surtout pour les repousses).

PA4 : Prairies mixtes d'altitude à pâturin commun et ray-grass anglais (Prairies de phénologie précoce, pauvre en légumineuses : Productivité très élevée. Valeur alimentaire élevée, mais diminue très vite au printemps).

PA5 : Pâtures d'altitude fauchées ou peu pâturées à flouve odorante et pâturin commun (Prairie de phénologie moyennement précoce, pauvre en légumineuses. Productivité moyenne : Valeur alimentaire élevée au printemps et moyenne pour la repousse).

Source : prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité (Launay *et al.*, 2011)

2.1.2 Les valeurs alimentaires

Les quantités de biomasse produite et les différentes valeurs alimentaires des prairies sont notamment les suivantes : UFL (Unité Fourragère Lait), UFV (Unité Fourragère Viande), PDIA (Protéines vraies réellement Digestibles dans l'Intestin, d'origine Alimentaire), UEB (Unité d'Encombrement Bovin), UEL (Unité d'Encombrement Lait), PDIN, PDIE mensuelles déterminées en fonction des sommes de températures, des

pratiques et des types de prairies sont intégrés dans le modèle. Nous avons déterminé pour les 5 types de prairies d'altitude les différentes valeurs alimentaires pour les quatre itinéraires techniques considérés dans nos travaux.

2.1.3 Les itinéraires techniques (ITK*)

Il s'agit de quatre itinéraires techniques couramment utilisés en polyculture élevage dans la zone d'étude (Massif Central, France) :

ITK² 1 : Pâturage toute l'année (avril - octobre)

ITK 2 : Fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne

ITK 3 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + pâturage été et automne

ITK 4 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + fauche été (regain)
+ pâturage automne

2.1.4 Intégration d'éléments relatifs aux différents types de prairie

Les quantités de biomasse en Kilogramme de Matière Sèche à l'Hectare (kg MS (Herbe) /ha) et les valeurs alimentaires UFL, UFV, PDIA, PDIN, PDIE, UEM, UEB, UEL (kg de MS) sont déterminées en fonction des sommes de températures journalières exprimées en degré Celsius jour (°Cj) à une altitude de 900m (altitude moyenne des exploitations considérées pour l'étude à travers les cas-types), des différentes pratiques (ITK*), des types de prairies d'altitude (PA*). On considère les 5 types de prairies d'altitude de la typologie nationale (PA1, PA2, PA3, PA4 et PA5) et les quatre itinéraires techniques considérés (ITK1, ITK2, ITK3 et ITK4). Les calculs de bases sont faits sur 4 périodes de l'année à savoir **Fin avril** pour les valeurs ajoutées pour une somme de température de 580°CJ, **Fin juin** pour les valeurs ajustées pour une somme de température de 1180°C, **Début août** pour les repousses de 6 semaines et **Mi-septembre** pour les repousses de 7 semaines en s'appuyant à la lettre sur la méthodologie de calcul de la typologie nationale des prairies permanentes (Tableau 2). On utilise les coefficients de croissance printanière des types de prairie pour calculer les quantités de MS/ha/100°Cj à l'altitude de 900m (Tableau 4). Les valeurs alimentaires sont déterminées en fonction de la biomasse disponible et de la

² Itinéraire Technique

période à dire d'expert (René BAUMONT "UMRH INRA"). Les quantités de biomasse en TMS et les valeurs alimentaires sont données pour les 5 types de prairies d'altitudes dans la typologie nationales à partir du repère saisonnier correspondant à 4 mesures et prélèvements réalisés chaque année.

- Récapitulatif des périodes considérées pour les calculs de productions en herbe et valeurs alimentaires correspondantes

Fin avril : valeurs ajustées pour une somme de température de 580°Cj

Fin juin : valeurs ajustées pour une somme de température de 1180°C

Début août : repousse 6 semaines

Mi-septembre : repousse 7 semaines

Tableau 2. Quantités de biomasse et des valeurs alimentaires par période.

	Deb Printemps Mi-mai 500 à 600°Cj	Fin printemps Fin juin 1050 -1150°Cj	Eté Début août 6 semaines	Automne Fin Sept. 7 semaines
Fourrage (kg MS/ha)	1882	4927	1099	831
UFL (/kg MS)	0,97 ± 0,05	0,76 ± 0,05	0,92 ± 0,07	0,94 ± 0,06
UFV (/kg MS)	0,92 ± 0,06	0,68 ± 0,06	0,86 ± 0,08	0,89 ± 0,07
PDIA (/kg MS)	43	28	49	51
PDIN (/kg MS)	116 ± 13	62 ± 16	116 ± 16	124 ± 19
PDIE (/kg MS)	102 ± 5	78 ± 6	105 ± 8	108 ± 7
UEB (/kg MS)	0,96 ± 0,04	1,14 ± 0,05	0,97 ± 0,05	0,94 ± 0,05
UEL (/kg MS)	0,97 ± 0,02	1,08 ± 0,03	0,98 ± 0,03	0,96 ± 0,03

Source : Prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité "page 22 au 23" (Launay *et al.*, 2011)

2.1.4.1 Croissance printanière des 5 types de prairies d'altitude

Tableau 3. Sommes de température mensuelle à 900m d'altitude.

Périodes	Mars	Avril	Mai	Juin
Sommes des températures en °Cj	151	224	366	479

Tableau 4. Croissance printanière des 5 types de prairies d'altitude.

Type de prairie	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5
Croissance (Kg de MS /ha/100°Cj)	373	508	534	608	449

Source : Prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité "page 102" (Launay *et al.*, 2011)

2.1.4.2 Biomasses et des valeurs alimentaires pour Itinéraire technique à pâturage exclusif (ITK1) sur des prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (PA2).

Nous avons bénéficié pour nos calculs de l'appui d'un auteur de l'ouvrage en question. Ce dernier s'avère l'un des directeurs de la thèse (René BAUMONT "UMRH INRA").

Tableau 5. Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1).

	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
Herbe (kg MS/ha)	1217	2324	1825	733	733	475	356	7663
UFL (/kg MS)	1,0185	0,97	0,873	0,92	0,92	0,94	0,94	
UFV (/kg MS)	0,966	0,92	0,828	0,86	0,86	0,89	0,89	
PDIA (/kg MS)	45,15	43	38,7	49	49	51	51	
PDIN (/kg MS)	121,8	116	104,4	116	116	124	124	
PDIE (/kg MS)	107,1	102	91,8	105	105	108	108	
UEM (/kg MS)	0,893	0,94	1,034	0,97	0,97	0,92	0,92	
UEB (/kg MS)	0,912	0,96	1,056	0,97	0,97	0,94	0,94	
UEL (/kg MS)	0,9215	0,97	1,067	0,98	0,98	0,96	0,96	

Productions d'herbe de Juillet, Août, Septembre et Octobre

Les productions des mois de juillet, août, septembre et octobre sont déterminées au prorata des nombres de semaine. Les valeurs alimentaires de l'herbe en avril sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai augmentée de 5% car les productions sont légèrement meilleures à cette période. Les valeurs alimentaires de l'herbe en mai sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai. Les valeurs alimentaires de l'herbe en juin sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai diminuées de 10% car les productions sont moins bonnes en cette période.

Les valeurs alimentaires de l'herbe en juillet sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe en été. Les valeurs alimentaires de l'herbe en septembre sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe d'automne (Tableau 5).

Estimations des quantités de Biomasse pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1)

- 580°Cj correspondent à 1882kg MS/ha et une somme de température. On considère les sommes de température de mars et d'avril soit 375°Cj au total
Production d'herbe en avril est $(375^{\circ}\text{Cj} * 1882 \text{ kg MS/ha}) / 580^{\circ}\text{Cj} = \mathbf{1217\text{kg MS/ha}}$
- Au mois de mai on a une somme de température de 366°Cj, étant donné que les rendements sont importants durant ce mois. On estime ainsi la croissance à 635 kg MS/ ha/100°Cj au lieu de 508 MS/ ha/100°Cj D'où une augmentation d'herbe en mai de : $(366^{\circ}\text{Cj} * 635 \text{ kg MS/ ha/100}^{\circ}\text{Cj}) / 100^{\circ}\text{Cj} = \mathbf{2324 \text{ kg MS/ha.}}$
- On détermine la production du mois de juin en considérant que les rendements sont bas comparés à ceux du mois du mois d'août. On estime ainsi la croissance en kg de MS/ ha/100°Cj à 381 kg MS/ ha/100°Cj au lieu de 508 MS/ ha/100°Cj : D'où une augmentation d'herbe de $(479^{\circ}\text{Cj} * 381 \text{ kg MS/ ha/100}^{\circ}\text{Cj}) / 100^{\circ}\text{Cj} = \mathbf{1825 \text{ kg MS/ha}}$
- Pour les mois de l'été et du printemps on détermine des quantités au prorata des nombres de semaine que durent le mois. La production d'herbe en juillet (1099 kg MS/ ha) est $(4 * \text{production d'herbe en été}) / 6 = \mathbf{733 \text{ kg MS/ha.}}$

Valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1)

- Valeur d'herbe avril = Valeur de l'herbe de mi-mai + 5%
- Valeur d'herbe mai = Valeur de l'herbe de mi-mai
- Valeur d'herbe juin = Valeur de l'herbe de mi-mai - 10%
- Valeur d'herbe juillet = valeur de l'herbe été
- Valeur d'herbe aout = valeur de l'herbe été
- Valeur d'herbe septembre = valeur herbe automne
- Valeur d'herbe octobre = valeur herbe automne

2.1.4.3 Biomasses et des valeurs alimentaires pour Itinéraire fauche fin de printemps + pâturage été et automne (ITK2) sur des prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (PA2).

On considère la quantité d'herbe récolté en juin égale à 80% de la production d'herbe en été avec des productions d'herbe en été et au printemps qui ne changent pas pour les mois d'août, septembre, octobre. Les calculs sont les mêmes pour les différentes prairies d'altitude. La valeur alimentaire du foin est déterminée en multipliant les valeurs alimentaires de la biomasse par le coefficient correspondant au foin fané sol à savoir 0.83. Ce coefficient correspond à celui d'un foin séché d'un sol qui a été arrosé par la pluie il y a moins de 10 jours ((Cf. page 105 Typologie des prairies permanentes française), (Launay *et al.*, 2011)). Cela Peut changer en fonction des caractéristiques du sol, cf. page 105 de la typologie ((Typologie des prairies permanentes française), (Launay *et al.*, 2011)).

Tableau 6. Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne (ITK2).

	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
Herbe (kg MS/ha)	0	0,00	3941,96	0	732,67	474,88	356,16	5506
UFL (/kg MS)			0,66		0,92	0,94	0,94	
UFV (/kg MS)			0,56		0,86	0,89	0,89	
PDIA (/kg MS)			25,76		49,00	51,00	51,00	
PDIN (/kg MS)			57,04		116,00	124,00	124,00	
PDIE (/kg MS)			75,66		105,00	108,00	108,00	
UEM (/kg MS)			1,52		0,97	0,92	0,92	
UEB (/kg MS)			1,20		0,97	0,94	0,94	
UEL (/kg MS)			1,17		0,98	0,96	0,96	

2.1.4.4 Tableau de valeurs de productions de biomasse et alimentaires

Après détermination de la quantité d'herbe et des valeurs alimentaires pour chaque combinaison d'itinéraire technique et type de prairie soit (20 combinaisons) on obtient le tableau (Tableau 7) ci-après qui est intégré dans le modèle Orfee pour permettre la prise en compte des types de prairies au niveau des ensembles définis dans le modèle.

On intègre les valeurs fourragères en fonction des ITK* et des types des prairies permanentes du Massif central dans un pré-modèle (fichier Excel intégrant les entrées du modèle) et dans le modèle implémenté sur GAMS. Les valeurs du tableau 7 sont utilisées pour les calculs relatifs à l'alimentation des animaux par l'herbe pour renseigner les différentes entités (types de culture et valorisation, valeurs alimentaire, Itinéraires techniques...) dans les ensembles et équations.

Tableau 7. Valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/Kg MS).

	UFL	UFV	PDIN	PDIE	UEB	UEL	UEM	MS	MO
Ensilage_PA2	0.83	0.76	93.96	84.80	1.05	1.03	1.27	0.202	906
Foin_PA2	0.66	0.56	57.04	75.66	1.20	1.17	1.52	0.850	920
Foin_PA1	0.68	0.65	59.80	77.60	1.18	1.16	1.47	0.850	920
Ensilage_PA1	0.80	0.72	87.32	82.79	1.05	1.04	1.28	0.202	906
Ensilage_PA3	0.82	0.74	85.93	82.47	1.06	1.04	1.30	0.202	906
Foin_PA3	0.66	0.56	57.79	74.93	1.20	1.16	1.52	0.850	920
Ensilage_PA4	0.82	0.75	89.86	82.84	1.08	1.05	1.33	0.202	906
Foin_PA4	0.63	0.53	47.84	69.84	1.26	1.20	1.64	0.850	920
Ensilage_PA5	0.82	0.75	89.39	84.08	1.05	1.04	1.29	0.202	906
Foin_PA5	0.66	0.56	55.20	74.69	1.22	1.18	1.55	0.850	920
Regain_PA1	0.77	0.69	93.12	85.54	1.06	1.04	1.29	0.850	920
Regain_PA2	0.86	0.78	112.52	95.55	0.99	1.00	1.19	0.850	920
Regain_PA3	0.86	0.80	115.52	97.05	0.98	1.00	1.18	0.850	920
Regain_PA4	0.86	0.79	110.58	95.55	1.00	1.01	1.21	0.850	920
Regain_PA5	0.81	0.74	93.12	87.36	1.05	1.04	1.28	0.850	920

Tableau 8. Présentation des valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/kg MS) dans le pré modèle de l'outil d'évaluation Orfee. Les lignes P1 à P12 correspondent aux différents mois de l'année partant de janvier (P1) à décembre (P12).

				P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Producti
Montagne	PA1	paturage	Herbe_PA1				8,16	17,06	13,40	3,71	3,71	2,23	1,67			49,94
Montagne	PA1	1C foin	Foin_PA1						27,99							27,99
Montagne	PA1	1C foin	Herbe_PA1								3,71	2,23	1,67			
Montagne	PA1	1C ens	Herbe_PA1							3,71	3,71	2,23	1,67			
Montagne	PA1	1C ens	Ensilage_PA1					19,25								19,25
Montagne	PA1	2C ens	Ensilage_PA1					19,25								19,25
Montagne	PA1	2C ens	regain_PA1							6,31						6,31
Montagne	PA1	2C ens	herbe_PA1									2,23	1,67			
Montagne	PA2	paturage	Herbe_PA2				12,17	23,24	18,25	7,33	7,33	4,75	3,56			76,62
Montagne	PA2	1C foin	Foin_PA2						39,42							39,42
Montagne	PA2	1C foin	Herbe_PA2								7,33	4,75	3,56			
Montagne	PA2	1C ens	Ensilage_PA2					27,60								27,60
Montagne	PA2	1C ens	Herbe_PA2							7,33	7,33	4,75	3,56			
Montagne	PA2	2C ens	Ensilage_PA2					27,60								27,60
Montagne	PA2	2C ens	regain_PA2							12,46						12,46
Montagne	PA2	2C ens	herbe_PA2									4,75	3,56			
Montagne	PA3	paturage	Herbe_PA3				16,81	24,43	19,18	9,81	9,81	5,15	3,86			89,06
Montagne	PA3	1C foin	Foin_PA3						46,44							46,44
Montagne	PA3	1C foin	Herbe_PA3								9,81	5,15	3,86			
Montagne	PA3	1C ens	Ensilage_PA3					34,30								34,30
Montagne	PA3	1C ens	Herbe_PA3							9,81	9,81	5,15	3,86			
Montagne	PA3	2C ens	Ensilage_PA3					34,30								34,30
Montagne	PA3	2C ens	regain_PA3							16,68						16,68
Montagne	PA3	2C ens	herbe_PA3									5,15	3,86			
Montagne	PA4	paturage	Herbe_PA4				9,94	27,82	21,84	11,13	11,13	3,19	2,40			87,46
Montagne	PA4	1C foin	Foin_PA4						33,87							33,87
Montagne	PA4	1C foin	Herbe_PA4								11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA4	1C ens	Ensilage_PA4					26,96								26,96
Montagne	PA4	1C ens	Herbe_PA4							11,13	11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA4	2C ens	Ensilage_PA4					26,96								26,96
Montagne	PA4	2C ens	regain_PA4							18,93						18,93
Montagne	PA4	2C ens	herbe_PA4									3,19	2,40			
Montagne	PA5	paturage	Herbe_PA5				9,94	20,54	16,13	11,13	11,13	3,19	2,40			74,47
Montagne	PA5	1C foin	Foin_PA5						33,87							33,87
Montagne	PA5	1C foin	Herbe_PA5								11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA5	1C ens	Ensilage_PA5					23,33								23,33
Montagne	PA5	1C ens	Herbe_PA5							11,13	11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA5	2C ens	Ensilage_PA5					23,33								23,33
Montagne	PA5	2C ens	regain_PA5							18,93						18,93
Montagne	PA5	2C ens	herbe_PA5									3,19	2,40			

Tableau 9. Quantité de fourrage pour les 5 prairies d'altitude (PA1 à PA5) pour l'itinéraire technique ITK1 « pâturage en toutes saisons de la production d'herbe », mois par mois, avec valeurs moyennes et écart type.

Production / mois	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
PA1 Fourrage (kg MS / ha)	816	1,706	1,340	371	371	223	167	4,827
PA2 Fourrage (kg MS / ha)	1,217	2,324	1,825	733	733	475	356	7,306
PA3 Fourrage (kg MS / ha)	1,681	2,443	1,918	981	981	515	386	8,520
PA4 Fourrage (kg MS / ha)	994	2,782	2,184	1,113	1,113	319	240	8,506
PA5 Fourrage (kg MS / ha)	994	2,054	1,613	1,113	1,113	319	240	7,208
Moyenne de PA1 à PA5	1,140 ± 247	2,262 ± 305	1,776 ± 240	862 ± 248	862 ± 248	370 ± 100	278 ± 75	7,273 ± 1005

2.2 Intégration des contraintes géographiques

A l'aide de la programmation mathématique sous la plateforme de modélisation GAMS, on intègre les contraintes géographiques à savoir la prise en compte de pentes et des distances entre parcelles et siège d'exploitation. Le modèle Orfee n'intégrant pas de fonction de spatialisation on raisonne en termes de quantité pour matérialiser les contraintes liées aux pentes et aux distances des parcelles au siège de l'exploitation.

- ***La quantification de la biomasse issue des surfaces mécanisables et non mécanisables permet de prendre en compte les pentes sur les parcelles :***
Les contraintes spécifient que la surface minimale pâturée pour chaque type de prairie doit être supérieure ou égale à la surface totale non mécanisable.
- ***La quantification la biomasse issue des surfaces accessibles aux vaches laitières permet de prendre en compte l'éloignement des parcelles au siège de l'exploitation :*** Les contraintes spécifient que les quantités d'herbe pâturée par les vaches laitières doivent être inférieures ou égale à la quantité d'herbe pâturable sur les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation.

2.2.1 Paramètres utilisés pour la prise en compte des pentes et distances

On considère les surfaces à pentes accentuées comme les surfaces à valoriser uniquement par pâturage. Les proportions de ces surfaces à fortes pentes sont déterminées pour chaque type de prairies. Toutefois les estives sont considérées comme les surfaces à fortes pentes donc uniquement valorisées par pâturage. Pour décider de la possibilité de fauche ou non, on impose au modèle de faire absolument pâturer les surfaces non mécanisables.

On définit ainsi dans le modèle les surfaces non fauchables par **min_pat_PA***, on a :

min_pat_PA1 "surface minimum pâturable sur PA1"
min_pat_PA2 "surface minimum pâturable sur PA2"
min_pat_PA3 "surface minimum pâturable sur PA3"
min_pat_PA4 "surface minimum pâturable sur PA4"
min_pat_PA5 "surface minimum pâturable sur PA5"

On définit les surfaces maximales pâturables par les vaches laitières par **max_pat_VL_PA*** et on a :

max_pat_VL_PA1 "surface maximale de PA1 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA2 "surface maximale de PA2 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA3 "surface maximale de PA3 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA4 "surface maximale de PA4 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA5 "surface maximale de PA5 pâturable par les vaches laitière"

2.2.2 Intégration des contraintes de pentes déterminant la possibilité de fauche ou de pâturage des prairies

Les surfaces sont affectées d'un pourcentage qui détermine leur part non mécanisable

min_pat_PA1 = sum(castype_sim,car_castype('PA1',castype_sim))*a
min_pat_PA2 = sum(castype_sim,car_castype('PA2',castype_sim))*w
min_pat_PA3 = sum(castype_sim,car_castype('PA3',castype_sim))*x
min_pat_PA4 = sum(castype_sim,car_castype('PA4',castype_sim))*y
min_pat_PA5 = sum(castype_sim,car_castype('PA5',castype_sim))*z

On a w% de PA2 qui est non mécanisable, cette surface sera donc absolument valorisée par pâturage de même que x% de PA3, y% de PA4 et z% PA5. PA1 étant considérée comme estive, 100% de PA1 sont non mécanisables (a= 100%).

Les contraintes spécifient que la surface minimale pâturée pour chaque type de prairie doit être supérieure ou égale à la surface totale non mécanisable. Pour les prairies de type PA2, la contrainte de pente est représentée dans le modèle comme suite :

E_HA_MIN_paturage_PA2(t)..

sum (rot,V_HA_CULTURE('PA2',rot,'paturage',t)) =g= min_pat_PA2;

2.2.3 Intégration des contraintes pour matérialiser les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation

On définit la quantité d'herbe de PA* pâturée par les vaches laitières en

lactation par : $\text{sum}((\text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}) \$ (\text{bovLait}(\text{race_z}) \text{ and } \text{prod_Lait}(\text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}, \text{p})), \text{V_Q_Alim}(\text{'herbe_PA2'}, \text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}, \text{t}, \text{p}))$

On définit le rendement de prairie de type PA* pâturée par : $\text{rdt_patur}(\text{'PA*'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{'herbe_PA*'}, \text{p}))$

On définit la surface de PA* valorisée par pâturage par :

$(\text{rot}, \text{V_HA_CULTURE}(\text{'PA'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{t}))$

On définit le pourcentage de surface de PA* pâturée accessible aux vaches laitières en lactation par : max_pat_VL_PA* Ce dernier représente une part de la surface de PA* valorisée par pâturage lors de la simulation.

Les contraintes spécifient que les quantités d'herbe pâturée par les vaches laitières en lactation doivent être inférieures ou égale aux quantités d'herbe pâturable sur les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation. On élabore les mêmes contraintes pour les 4 autres types de prairie. Toutefois la prairie de type PA1 considéré comme estive n'est pas accessible aux vaches laitières en lactation d'où $\text{max_pat_VL_PA1}=0$ dans la contrainte relative aux prairies de types PA1. Dans le cas des prairies de type PA2, les contraintes de pentes sont représentées dans le modèle Orfee comme suit :

$\text{E_Q_Alim_Patur_Poss_VL_PA2}(\text{t}, \text{p})..$

$\text{sum}((\text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}) \$ (\text{bovLait}(\text{race_z}) \text{ and } \text{prod_Lait}(\text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}, \text{p})), \text{V_Q_Alim}(\text{'herbe_PA2'}, \text{race_z}, \text{a_z}, \text{vel_z}, \text{t}, \text{p})) \leq \text{max_pat_VL_PA2} * \text{sum}(\text{rot}, \text{V_HA_CULTURE}(\text{'PA2'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{t}) * \text{rdt_patur}(\text{'PA2'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{'herbe_PA2'}, \text{p}));$

3. Paramétrage du modèle Orfee

3.1 Les cas-types

Nous utilisons les données de la base DIAPASON généralement sollicitée pour des études thématiques telles que l'autonomie alimentaire, les coûts de production, les bilans des minéraux (Charroin *et al.*, 2005). Deux cas-types double troupeaux bovin laitiers et allaitants sont sélectionnés dans cette base de données de référence Inosys-Réseaux d'élevage. Conçu à partir des résultats des exploitations suivies par les Réseaux d'Elevage, ce sont des modèles représentatifs d'exploitations viables localisées dans une région et construit à partir de données de fermes réelles à travers un vaste réseau de fermes commerciales et de connaissances spécialisées.

Ils décrivent le fonctionnement cohérent d'une exploitation en régime de croisière pour un système et un contexte donné (Charroin *et al.*, 2005). Les cas types utilisés sont précisément les cas type BL18 (Ferme_1) et le cas type BL22 (Ferme_2). Les exploitations correspondantes à ces cas-types sont situées dans les montagnes du Sud de l'Auvergne : dans le Cézalier (Monts Cantal) pour BL18 (Ferme_1) et sur la Planèze de St-Flour (Velay volcanique) pour BL22 (Ferme_2). En plus de représenter des exploitations doubles troupeaux, ces deux cas-types représentent deux exploitations avec des différences prononcées selon le troupeau, la taille de l'exploitation et la configuration du parcellaire et sont représentatifs d'exploitations de montagne. La Ferme_1 représente une exploitation de taille moyenne avec une proportion de bovin lait-viande (prim'Holstein et salers) équilibrée. Une partie des surfaces correspond à des estives. La ferme 2 est une exploitation de grande dimension avec système modernisé lait-viande (montbéliarde et aubrac). Son parcellaire est éclaté et comprend une petite partie de cultures (Voir cas types en annexes) (Tableau 10). Les caractéristiques de ces cas-types permettent de conforter la validation des adaptations du modèle mais aussi de généraliser nos résultats aux exploitations de la zone d'étude (Le Massif Central).

3.2 Données

Le modèle utilise pour les simulations les données relatives à la main-d'œuvre (nombre d'UTH, nombre de titulaires et non titulaires), aux caractéristiques pédologiques (type de sol, fertilité du sol), aux surfaces des parcelles et au mode de gestion caractérisés par la répartition des périodes de vêlage, de traite, de pâturage

et la composition des rations alimentaires. On utilise des données zootechniques (effectifs, les différentes catégories de bovins, leurs espèces et races, les caractéristiques biologiques et de production) des données économiques (les aides, les Droits de Prémption Urbain, les indemnités compensatoires de handicap naturel, les primes par vache allaitante, les primes herbagères agro-environnementales, les charges de la main-d'œuvre, les prix des intrants...). On utilise également des données structurelles, à savoir le type de bâtiment et d'équipement, en précisant leurs capacités, caractéristiques et consommations d'énergie. A cela s'ajoute les rendements et valeurs alimentaires des prairies. Les prix des intrants et des produits agricoles sont déterminés à partir des indices de prix et les prix de l'INSEE de 2000 à 2015 l'année de référence étant l'année 2010.

Tableau 10. Caractéristiques des cas-types de BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2).

Caractéristiques	Ferme_1 : Système lait-viande équilibré de taille moyenne avec estive	Ferme_2 : Système lait-viande modernisé de grande dimension avec parcellaire éclaté et des cultures
Races laitières	prim'Holstein	montbéliard
Races allaitantes	salers	aubrac
Chargement (UGB/ha SFP)	1,26	1,20
Nombre d'UGB lait	44	72
Nombre d'UGB viande	44	55
Nombre de vaches laitières	32	49
Nombre de vaches allaitantes	35	40
Litres de lait vendu par an (L/an)	180 000	300 000
Potentiel laitier (L/vache laitière/an)	5 860	6 433
UMO Totales	2,0	2,1
UMO exploitants	2,0	2,0
UMO salariée	0,0	0,1
Surface agricole utile (ha)	70	112
Estives (ha)	30	0
SFP (ha)	70	108
Surface en herbe (ha)	70	107
Surface de céréales (ha)	0	5
Surface de cultures fourragères (ha)	0	0

UGB : Unités de Gros Bétail

SFP : Surface Fourragère Principale

Source : *Référentiel cantal cas-types lait 2016 (conjoncture 2015) (Chambre d'Agriculture du Cantal, 2015)*

Tableau 11. Tableau récapitulatif des principaux paramètres de simulation.

Principaux paramètres de simulation	Ferme_1	Ferme_2
Nombre d'UGB total	88	127
Troupeau laitier : %UGB	50%	57%
Troupeau allaitant : %UGB	50%	43%
Nombre de vache laitières	33	49
Nombre de vaches allaitantes	35	40
SAU (ha)	70	112
SFP (ha)	70	107
Prairies temporaires (ha)	0	33
Prairies permanentes (ha)	70	0
Répartition en PA1 "estive" (ha)	30	0
Répartition en PA2 (ha)	5,5	20
Répartition en PA3 (ha)	15	25
Répartition en PA4 (ha)	12	15
Répartition en PA5 (ha)	8	14
Cultures (ha)	0	5
% max pâturable de prairie temporaire par les vaches laitières	0%	100%
% max pâturable PA1 (estive) par les vaches laitières	0%	0%
% max de PA2 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA3 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA4 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA5 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
Quota laitier (L/ans)	180000	300000
UMO	2	2,1

3.3 Spécification des modalités de simulation : état des paramètres

Lors des simulations les types d'animaux et les proportions d'UGB viande/lait restent fixes tandis que le nombre total d'UGB, l'assolement et les rations alimentaires des animaux sont optimisés.

Tableau 12. Spécification des paramètres fixes et optimisés.

	Type d'animaux	Proportion d'UGB viande/lait	Nombre d'UGB total	Assolement	Ration des animaux
Scénarios	Fixe	Fixe	Optimisé	Optimisé	Optimisé
Référence	Fixe	Fixe	Optimisé	Optimisé	Optimisé

4. Evaluation du modèle Orfee avec les adaptations apportées

Il s'agit ici de paramétrer le modèle de sorte à faire coïncider les résultats des simulations avec leur correspondant respectif des cas-types suites à des simulations basées sur les spécifications des paramètres fixes et optimisés (Tableau 12). Etant donné que les rendements des prairies oscillent de 4,4 à 7,9 tonnes de matière sèche (MS) à l'hectare selon le type de prairies (Ruget *et al.*, 2009) le niveau de fertilité des sols est modulé pour faire coïncider les productions végétales fournies par les simulations à ceux des cas-types tout en respectant ces limites de rendement. Il existe pour cela une corrélation entre les rendements et la fertilité des sols qui est directement modulable à partir des entrées du modèle. Le taux d'utilisation de biomasse lors du pâturage en tenant compte des diverses pertes et accessibilité de l'herbe est fixé à 65% à la sortie des animaux au printemps (d'avril à Juin) et de 75% pour le reste de l'année. Le taux de prolificité est maintenu à 1,02 pour la race aubrac (Ledos and Moureaux, 2013). Les taux de réforme minimum (txRef_min) ont été ajustés : txRef_min salers =0.14 ; txRef_min prim'Holstein=0.28, txRef_min montbeliard =0.2, txRef_min aubrac=0.19. Les valeurs observées pour valider le modèle adapté sont : La production végétale, l'alimentation par type de fourrage et de prairie, la quantité de fourrage aux UGB, la production animale (lait et viande), les résultats économiques.

4.1 Les valeurs observées pour le calibrage du modèle

La calibration du modèle porte sur 6 grandes catégories de résultats :

1. La production végétale et l'alimentation
2. La quantité de fourrage aux UGB
3. Le temps de travail
4. La production animale (lait et viande)
5. Les résultats économiques

Tableau 13. Tableau récapitulatif des paramètres observés pour l'évaluation (le calibrage) du modèle adapté.

Catégories de données	Valeurs observées pour évaluer le modèle adapté
La production végétale et l'alimentation	- Total de TMS de couvert pâturé (herbe : consommation) - TMS de végétaux récoltés (ensilage, enrubannage, foin, fourrage vert ...) - Total de biomasse utilisé
Les fourrages / UGB	- Total de TMS d'herbe pâturé par UGB - Total de TMS de fourrage récolté par UGB
La production animale (lait/ viande)	- Nombre total d'UGB totaux - Le nombre d'UGB du troupeau laitier - Le nombre d'UGB du troupeau allaitant - Le chargement UGB /ha SFP) - Le nombre de vêlage du troupeau Laitier à l'année - Le nombre de vêlage du troupeau allaitant à l'année - La quantité de lait produit L/an - Le rendement moyen de lait par vêlage L/vêlage - Le nombre de litre de lait vendu L/an - Le taux de réforme du troupeau laitier - Le taux de réforme du troupeau allaitant - La quantité de viande vive vendue au niveau du troupeau allaitant - La quantité de viande vive vendue au niveau du troupeau laitier
Les résultats économiques	- Produit total de l'exploitation - La somme totale des aides PAC reçues par l'exploitation - Les frais vétérinaires des troupeaux par UGB - Les charges opérationnelles de l'exploitation Le revenu courant

4.2 Résultats de simulations basée sur les spécifications des paramètres fixes et optimisés

On simule les cas-types BL18 et BL22 avec le modèle Orfee en intégrant l'hétérogénéité du parcellaire, les contraintes de pentes et de distances selon les spécifications des paramètres mentionné dans le tableau (Tableau 12) à savoir des types d'animaux selon la proportion d'UGB fixés mais avec des nombres totaux d'UGB, un assolement et des rations d'animaux optimisés. On détermine ensuite les variations relatives des valeurs simulées par rapport aux valeurs tirées des cas types afin de juger de la représentativité du modèle adapté.

- Valeur **Simulée** : valeur simulée (prédite)
- Valeur **Réelle** : valeur du cas-type
- **Variation (%)** : variation relative de la valeur simulée par rapport à la valeur du cas-type, déterminée comme suite :

$$\text{Variation (\%)} = (\text{Simulée} - \text{réelle}) * 100 / \text{réelle}$$

4.2.1 Production végétale et alimentation

4.2.1.1 Production végétale et alimentation : Ferme_1

Tableau 14. Comparaison des productions végétales et alimentations de la Ferme 1.

La production végétale et l'alimentation	Simulée	Réelle	Variation (%)
Quantité d'herbe pâturée (TMS)	176	167	5,00
Quantité de végétaux récoltés (TMS)	154	154	0,00
Total de biomasse utilisée (TMS)	321	321	0,00

Les quantités simulées de biomasse pâturée, de végétaux utilisés hors pâturage et de biomasse totale utilisée ne varient presque pas par rapport à leur correspondant du cas-type.

4.2.1.2 Production végétale et alimentation : Ferme_2

Tableau 15. Comparaison des productions végétales et alimentations de la Ferme 2.

La production végétale et l'alimentation	Simulée	Réelle	Variation (%)
Quantité d'herbe pâturée (TMS)	324	285	13,00
Quantité de végétaux récoltés (TMS)	338	334	1,00
Total de biomasse utilisée (TMS)	598	620	-3,00

La quantité de pâturage totale simulée et celle du cas-type s'élève respectivement à 324 TMS et 285 TMS, on a une variation relative de 13% de la valeur simulée par rapport au cas type. Pour les végétaux utilisés (hors pâturage) cette variation est de 1% soit 338 TMS simulée et 334 TMS au niveau du cas-type. La variation relative de la biomasse totale utilisée au niveau des simulations est de -3% par rapport au cas-type. Nous avons une variation maximale de 13% près au niveau de la production végétale et de l'alimentation.

4.2.2 Les récoltes de fourrage par UGB

4.2.2.1 Les récoltes de fourrage par UGB : Ferme_1

Tableau 16. Comparaison des récoltes de fourrage par UGB de la Ferme 1.

Quantité de fourrage / UGB	Simulée	Réelle	Variation (%)
Quantité d'herbe pâturée par UGB	2,00	1,90	5,00
Quantité de fourrage récoltée par UGB	1,77	2,11	-16,00

La simulation donne une quantité totale d'herbe pâturée à l'UGB de 2TMS. Avec 1,9TMS/UGB au niveau du cas-types on a une variation relative de 5% de la valeur simulée par rapport à la donnée du cas-type. Parallèlement la simulation donne une quantité de récolte de fourrage à l'UGB de 1,77 TMS et une valeur de 2,11 TMS /UGB au niveau du cas-types on a une variation relative de -16% de la valeur simulée par rapport au cas-type. Cette différence est due au fait que le modèle a tendance à récolter le juste nécessaire de fourrage et à équilibrer l'alimentation des troupeaux avec le pâturage et l'achat d'aliments concentrés pour procurer les volumes et l'énergie nécessaires aux animaux. Cependant l'agriculteur pour avoir une assurance

au niveau de ses stocks peut avoir tendance à récolter le plus possible. Les différences observées sont raisonnables.

4.2.2.2 Les récoltes de fourrage par UGB : Ferme_2

Tableau 17. Comparaisons des récoltes de fourrage par UGB de la Ferme 2.

Quantité de fourrage / UGB	Simulée	Réelle	Variation (%)
Quantité d'herbe pâturée par UGB	2,56	2,25	14,00
Quantité de fourrage récoltée par UGB	2,40	2,58	-7,00

La simulation donne une quantité totale d'herbe pâturée à l'UGB de 2,56TMS. Avec 2,25TMS/UGB au niveau du cas-type soit une variation relative de 14% de la valeur simulée par rapport à la donnée du cas-type. Cela est aussi dû à l'optimisation de la valorisation du pâturage au niveau du modèle. La quantité de récolte de fourrage à l'UGB est de 2,40TMS au niveau de la simulation et 2,58TMS/UGB au niveau du cas type d'où une variation relative de -7% de la valeur de simulation par rapport au cas-type. Toute fois les valeurs simulées et celles des cas types sont assez très proches.

4.2.3 La production animale

4.2.3.1 La production animale : Ferme_1

Tableau 18. Comparaisons des productions animales de la Ferme 1.

Paramètre de production animale	Simulée	Réelle	Variation (%)
UGB totaux	86,24	88	-2,00
UGB bovin lait	42,55	44	-3,00
UGB bovin viande	43,69	44	-1,00
Chargement (UGB /ha SFP)	1,23	1,26	-2,00
Nombre de vêlages laitiers	29,7	36	-18,00
Nombre de vêlages allaitants	35,89	35	3,00
Quantité de lait produit L/an	185772	191455	-3,00
Rendement laitier moyen L/vêlage	6255	5861	7,00
Lait vendu en litres par année	180000	180000	0,00
Taux de réforme Bovin Lait	0,28	0,28	0,00
Taux de réforme Bovin Viande	0,14	0,14	0,00
Viande vive vendue pour les laitiers (kg)	5633	3730	51,00
Viande vive vendue pour les allaitants (kg)	12245	13858	-12,00

Les valeurs simulées d'UGB totaux, UGB bovin lait et UGB bovin viande et le chargement (UGB/ha SFP) varient faiblement par rapport à leur correspondant respectif du cas-type. On a ainsi des variations relatives respectives des valeurs simulées de -2%, -3% et -1% et -2% par rapport à celles du cas-type, soit des valeurs simulées légèrement inférieures à celles des cas types. Le nombre de vêlages simulés des vaches laitières présente une variation relative de -18% par rapport à la valeur du cas-type. Soit 29,7 vêlages simulés par rapport à 36 vêlages déclarés au niveau du cas-type. Cependant le nombre de vêlages allaitants simulés est relativement identique à celui du cas-type avec 35,89 vêlages simulés et 35 vêlages déclarés sur le cas-type. Les valeurs simulées de la production de lait par année présentent une légère différence soit 185772 L/an simulé contre 191455 L/an, ce qui correspond à une variation relative de simulation de -3% par rapport à la valeur du cas-type. Quant à la

production de lait par lactation, on observe une valeur simulée plus élevée soit 6255 L/lactation par rapport à 5861 L/lactation au niveau du cas type. Cela s'explique par le faible nombre de vêlage chez les vaches laitières d'où une production par vêlage plus importante pour atteindre la production totale de 185772 L/an. Les ventes de lait par an et les taux de réformes ont des valeurs de simulation et de cas-type identiques soit 180000 litres vendu par an, 28% de réforme au niveau de bovin lait et 14% de réforme au niveau de bovin viande. La production de viande au niveau des vaches laitières présente une forte variation soit un surplus de 51% de variation relative de la valeur simulée par rapport à la valeur du cas-type. Cela provient d'une faible vente de viande vive dans le cas type soit 3730 kg contre 5633kg simulé. Ce manque à gagner au niveau du cas type s'explique par l'achat des génisses de renouvellement dont le poids est déduit de la quantité de viande vive réellement produite. En absence de cet achat qui est propre au cas-type B18 on aurait des quantités de viande vive produites par le troupeau laitier qui se rapprochent dans les deux cas. La simulation donne une quantité de viande vive vendue par les vaches allaitantes de 13116 kg de viande vive contre 13858 kg de viande vive sur les cas types, soit une variation relative de -5,3% de la quantité simulée par rapport à la valeur des cas types. Pour conclure, on constate de manière générale que pour la ferme 1 les valeurs de production animale simulées et celles du cas type se rapprochent fortement.

4.2.3.2 La production animale Ferme_2

Tableau 19. Comparaisons des productions animales de la Ferme 2.

Paramètre de production animale	Simulée	Réelle	Variation (%)
UGB totaux	124,46	127	-2,00
UGB bovin lait	65,15	72	-10,00
UGB bovin viande	59,31	55	8,00
Chargement (UGB /ha SFP)	1,16	1,2	-3,00
Nombre de vêlages laitiers	46,07	49	-6,00
Nombre de vêlages allaitants	41,93	43	-2,00
Quantité de lait produit L/an	307426	316830	-3,00
Rendement laitier moyen L/vêlage	6673	6433	4,00
Lait vendu en litre par année	329000	300000	10,00
Taux de réforme Bovin Lait	0,27	0,28	-4,00
Taux de réforme Bovin Viande	0,19	0,19	0,00
Viande vive vendue pour les laitiers (kg)	9173	9620	-5,00
Viande vive vendue pour les allaitants (kg)	17547	18704	-6,00

Les valeurs simulées d'UGB totaux, UGB bovin lait et UGB bovin viande et le chargement (UGB/ha SFP) varient faiblement par rapport à leur correspondant respectif du cas-type. On a des variations relatives respectives des valeurs simulées de -2%, -10% et 8% et -3% par rapport à celles du cas type. Ces quatre paramètres ont des valeurs simulées et des valeurs de cas types très proches. Le nombre de vêlages simulés des vaches laitières a une variation relative de -6% par rapport à la valeur du cas-type. Soit 46,07 vêlages simulés et 49 vêlages déclarés au niveau du cas-type. Cependant le nombre de vêlages allaitants simulés est relativement identique à celui du cas types avec 41,93 vêlages simulés et 43 vêlages déclarés sur le cas-type. Les valeurs simulées de la production de lait par an présentent une différence infime soit 307426 L/an simulé contre 316830 L/an ce qui correspond à une variation relative de simulation de -3% par rapport à la valeur du cas-type. Quant à la production par vêlage on a une hausse au niveau de la valeur simulée soit 6673 L/velage comparée à 6433 L/velage au niveau du cas type. Cela s'explique par

le faible nombre de vêlages chez les vaches laitières d'où une production par vêlage plus importante pour atteindre les 307426 L/an. Les valeurs simulées des ventes de lait par année présentent une différence infime soit 329000 litres simulé contre une valeur de cas-type de 300000 litres, cela correspond à une variation relative de simulation de 10% par rapport à la valeur du cas-type. Les taux de réforme au niveau des bovins allaitant ont des valeurs de simulation et de cas type identiques. Au niveau des bovins laitiers la différence est moindre soit une variation relative de simulation de -4% par rapport à la valeur du cas-type. On a des valeurs très proches pour les taux de réforme de bovin laitier, avec 27% au niveau de la simulation et 28% au niveau du cas-type. On enregistre de légers écarts au niveau de la production de viande des vaches laitières et vaches allaitantes avec 9173kg et 17547kg pour des valeurs simulées respectives par rapport à 9620kg et 18704kg au niveau du cas-types. Pour les vaches laitières et allaitantes ces valeurs correspondent à des variations relatives respectives de -5% et -6% des valeurs de simulation par rapport au cas-types. Pour conclure, les valeurs de production animale simulées et celles du cas-type se rapprochent globalement pour la ferme 2, la variation relative la plus importante de la simulation par rapport au cas-type étant de 10%.

4.2.4 Les résultats économiques

- Ferme_1

Tableau 20. Comparaisons des résultats économiques de la Ferme 1.

Les résultats économiques	Simulée	Réelle	Variation (%)
Produit Total d'exploitation	115526,38	135876,97	-15
Total des aides PAC	43485,85	52173,74	-17
Frais vétérinaires par UGB	55,99	61	-8
Charges Opérationnelles totale	44493,8	46993	-5

- **Ferme_2**

Tableau 21. Comparaisons des résultats économiques de la Ferme 2.

Les résultats économiques	Simulée	Réelle	Variation (%)
Produit Total d'exploitation	150663,79	191996,86	-22
Total des aides PAC	61342,3	56213,42	9
Frais vétérinaires par UGB	55,18	63	-12
Charges Opérationnelles totale	44565,3	55435,0	-20

Orfee est un modèle d'optimisation bioéconomique, qui fonctionne de façon séquentielle selon les principes de Bellman. C'est-à-dire que le résultat optimal final est la résultante d'une optimisation à toutes les étapes précédentes. La fonction objective portant sur l'optimisation du résultat courant, les options choisies à chaque étape par le modèle sont celles qui favorisent l'optimisation du résultat courant, qui minimisent les différents coûts. Il est donc logique d'avoir des différences entre les résultats économiques de simulations et ceux du cas type. Toutefois ces résultats économiques ne présentent pas d'importantes différences.

4.2.5 Achats et ventes

Les achats d'aliments, de concentrés ou de fourrages interviennent pour équilibrer l'alimentation des animaux en termes de volume et de teneur en énergie. En fonction des capacités d'ingestion des animaux le modèle alloue un volume d'aliment contenant l'énergie minimale requise. Les volumes ne doivent pas excéder la capacité d'ingestion des animaux et doivent représenter les valeurs alimentaires et énergétiques nécessaires. Les achats d'aliments interviennent alors pour effectuer des suppléments afin de respecter ces conditions. L'achat de concentrés intervient ainsi lorsqu'on se trouve avec des aliments pauvres en énergie et en éléments nutritifs. Toutefois un seuil d'utilisation maximum de concentrée est fixé. Les valeurs des achats ont un rôle d'ajustement dans le modèle, il en est de même pour les ventes qui interviennent en cas de surplus de produits commercialisables au cours de l'année d'exercice ou lorsque ces produits sont plus rentables économiquement pour la vente plutôt qu'au niveau de l'élevage. On a par exemple l'achat de concentrés qui intervient

lorsqu'on se trouve avec des fourrages pauvres en énergie et en éléments nutritifs. Les achats et les ventes constituent ainsi des variables d'ajustement qui prennent des valeurs favorisant l'optimisation des résultats courants en respectant une série de contraintes. Le modèle privilégie la production par rapport aux achats vu les prix des matières premières qui sont estimés à 20% de plus que les coûts de production en exploitation (Mosnier, 2017).

4.3 Résultats globaux de l'évaluation du modèle Orfee après adaptation

Les résultats techniques simulés à savoir la production végétale et l'alimentation, les quantités de fourrage consommées par UGB et les quantités de produits animaux présentent au maximum 10% de différence relative avec les valeurs correspondantes tirées des cas-type. Globalement les sorties de simulations coïncident avec leur correspondant des cas-types à l'exception des achats et des ventes qui ne peuvent être considérés pour la validation du modèle vu leur caractère de variables d'ajustement. Ainsi, nous avons introduit une contrainte qui interdit les achats et les ventes de fourrages afin de s'inscrire dans un contexte d'autonomie fourragère.

5. Conclusion

L'effort de modélisation s'est avéré capital pour matérialiser la complexité des zones de montagne afin d'appréhender l'évolution et la durabilité des systèmes bovin mixtes herbagers parallèlement aux équilibres recherchés. Cette étape purement technique de la thèse s'est avérée un passage obligé pour disposer d'un simulateur à même de prendre en compte l'hétérogénéité du parcellaire et les caractéristiques topologiques des zones de montagnes dans l'évaluation les performances des systèmes étudiés.

CHAPITRE V.

**Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins
allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l’herbe
par pâturage en élevage de montagne**

ARTICLE.1

Cet axe d'étude a pour objectif d'évaluer l'efficacité alimentaire des exploitations et la capacité des systèmes d'élevage à accroître leur autonomie fourragère, voire alimentaire à travers leur mode de conduite. L'enjeu était de déterminer les modes de conduite qui favorisent la sécurisation des productions fourragères et animales des élevages bovins dans les zones de contraintes. Cet axe d'étude a fait l'objet d'un article scientifique soumis dans la revue scientifique *Livestock Science* le 17 Mai 2018 sous la référence LIVSCI-D-18-495 et le titre : "Biotechnical and economic performance of mixed herd breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: exploration of the impact of herd proportions using the Orfee model". Cette approche a consisté à déterminer les répartitions de troupeaux entre bovin laitier et bovin allaitant herbagers qui permettent une meilleure valorisation des ressources herbagères en zones contraignantes. Nous avons fait l'hypothèse que les troupeaux bovins mixtes laitier-allaitant permettent un meilleur taux d'utilisation des pâturages que les troupeaux spécialisés pour des parcelles soumises à des contraintes. Pour déterminer l'influence de la composition du troupeau sur la valorisation des prairies, de la production animale et des performances économiques, nous avons étudié le fonctionnement de 2 fermes (Ferme_1 (BL18) et Ferme_2 (BL22)) issues de 2 cas-types représentatifs des élevages bovins double troupeaux mixtes de montagne. Ferme_1 est de taille moyenne avec des estives, Ferme_2 de grande taille avec un parcellaire fragmenté et une petite production de céréale. Nous avons utilisé le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment) adapté aux conditions montagneuses et un plan d'expérience avec cinq répartitions de troupeaux entre bovins laitiers et bovins allaitants. Les résultats ont montré un meilleur taux d'utilisation des pâturages avec de bonnes performances de production et économiques des systèmes d'élevage bovin mixtes laitier-allaitant comparé aux systèmes spécialisés. L'article présenté ci-après est le développement de ce travail.

Biotechnical and economic performance of mixed herd breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: exploration of the impact of herd proportions using the Orfee model

Z.R. Diakité^{1a}, C. Mosnier¹, R. Baumont¹, G. Brunschwig¹

¹Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^aCorresponding author: Zakary Diakité. Email: zakary.diakite@vetagro-sup.fr

Short title: Performance of cattle mixed herd breeding systems

Abstract

Ruminant production is predominant in mountainous areas. In these areas, some grassland plots are difficult to reach or non-machinable. Many mountain breeding systems combine in the same farm a herd of dairy cows and a herd of suckling cattle. We hypothesize that mixed herds allow a better grazed grass utilization rate than specialized herds for plots with constraints. To determine the influence of herd composition on the valorization of grassland, animal production, and economic performance, we study the functioning of 2 farms derived from 2 representative mountain bovine mixed system farm types³ (Representative farms). Farm_1 is medium size with a summer mountain pasture, Farm_2 is large with fragmented plots of grassland and cereal crops. These 2 farms are representative of the mountain mixed herd cattle farms. The proportion of Livestock Units (LUs) in each herd, varies between the dairy herd LU and the suckling herd LU. We use the bioeconomic optimization mode named Orfee⁴ (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental

³ Representative farms - representative models of actual farms located in the south of the Auvergne (France) constructed from real farm data

⁴ Bioeconomic Model (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment)

Assessment) modified for mountain conditions by the integration of geographical constraints and the heterogeneity of grassland plots based on the French permanent grassland typology. After describing the model and the farm type, we use the following experimental plan with 5 simulations (defined by the percentage of livestock units (LU) found in the dairy (D) herd): 100D, 75D, 50D, 25D, and 0D. The result shows a better grazed grass utilization rate for mixed herds than for specialized herds. Farm_1 has the maximum grazed grass utilization rate at 85%, Farm_2 has a total valorization by grazing (rate of 100%). Financially, for both farm types, the 100D system has higher output, but higher costs as compared to the 0D system which has lower output but lower costs. In contrast to the specialized dairy systems, 50D and 25D need moderate inputs and moderate use of concentrate. This study shows that understanding the structure of the farm is decisive for the mix of herds to improve the grazed grass utilization rate with a good economic performance. At the same time mixed herds, particularly systems with 25% to 50% of dairy cattle allow a better grazed grass utilization rate with good, stable economic performance.

Keywords:

Bioeconomic model, optimization, cattle, mixed herd, plot, grazed grass.

Highlights:

- Improved grazed grass utilization rate for mixed herds, particularly systems with 25% to 50% dairy cattle LUs
- Fodder and feeding autonomy favored by better grazed grass utilization rate and moderate use of concentrate for mixed herds
- Moderate costs with low input and good operating profit per Man Work Unit for mixed herds with 25% to 50% dairy cattle LU

1. Introduction

European mountain regions are commonly used for animal production based on grass utilization by ruminants. The geographical diversity of mountain areas is not favorable to the use of plots (Fleury et al, 1996), higher altitude involves longer wintering periods, slopes limit the fodder harvest, and the remoteness of plots from farm headquarters

reduces the area available for dairy cow grazing (Andrieu et al, 2007, Brunschwig et al, 2005, Morlon and Benoit, 1990). The Massif Central is representative of these mountainous areas given that more than 2/3 of its agricultural area consists of permanent grasslands which represent an important forage capacity (AGRESTE, 2011 and 2015) although with big natural constraints. Some mountain farms combine the simultaneous management of a dairy herd and a suckling herd (Brunschwig et al, 2005, Brunschwig et al, 2010). To achieve good and stable economic performance by increasing fodder autonomy and diversifying milk/meat production the simultaneous management of dairy and suckling herds can be a solution for an agroecology strategy for producing goods and services (Dumont and Bernuès, 2014). It has been shown that this form of management offers more capacity of adaptation to livestock systems through the possibility of adjusting the interactions between animals and available resources (Cournut et al., 2012). These results need to be confirmed in a variety of situations. Previous studies have focused on improving the use of grassland resources to adjust the stocking rate (LU/ha) (Jouven and Baumont, 2008); on the connection between forage dynamics and animal needs to achieve better forage autonomy; and on food autonomy (Dillon et al, 1995, Jacquot et al, 2012, Steinwigger et al, 2010). The balance between the grass supply and the needs of animals has proved to be the key to a better degree of food autonomy (Jacquot et al, 2012), and constitutes a determining factor for the competitiveness of grass-feed cattle farms and their ability to withstand natural hazards (Nettier et al, 2010). Moreover, increasing forage autonomy permits a big reduction in the variation in the economic performance (a 20% increase in forage autonomy would lead to a 85% decrease in the variation of the economic results of the exploitation) of the exploitation and its sensitivity to climate disturbances (Aubron et al, 2010).

However, the influence of herd structure on the use of grassland resources, particularly grazed grass utilization rate, has not been studied. The aim of this study is to characterize which herd distributions allow the best combination between grazed grass utilization, animal production, and economical performance.

As part of a systemic approach, modeling can explore more complex interactions at the system level and compare performance against several criteria. The simulators SEPATOU (Cros et al, 2001), and Patur'in (Delaby et al, 2001) highlight the modulation of pasture management in order to adjust forage supply to animal needs. The

DYNAMILK simulator provides an understanding of the trade-offs between milk production and grassland use (Jacquot et al, 2012). The dynamic simulation model IFSM is designed to determine the alternatives for optimal and sustainable management of farms (Rotz et al, 2012). The e-Dairy model, a dynamic, stochastic model, is used for prediction of the biophysical and economic performances of grazing dairy systems (Baudracco et al, 2013).

Several studies have used bioeconomic optimization models to explore optimal operating conditions for agricultural systems, or find their optimal performances, to permit decisionmaking. This is the case for the MIDAS simulator which determines the value of pasture improvement (Bathgate et al, 2009), and Lengers and Britz's 2012 study on reducing greenhouse gas emissions on farms. The bioeconomic modelling approach also allows the exploration of compromises between biotechnical and economic criteria (Ewing and Pannell, 1986; Pannell and Panetta, 1986). Orfee (Mosnier et al, 2017a) is a bioeconomic optimization model well adapted for mixed herd farm investigation. We choose to use Orfee for our research into which mixed cattle herd proportions give the best grazed grass utilization rate while optimizing the economic performance.

We hypothesize that a mixed herd allows a better valorization of the grass resources by grazing, especially on plots with geographical constraints (slope, distance from other plots), and better economic performance at farm scale.

2. Materials and methods

To carry out analyzes under the optimal operating conditions of the farms, we chose to use a bioeconomic optimization model. In parallel, to base our study on stable conditions and a diversity of situations, we chose data for 2 different farms in optimal condition. We wished to observe the best equilibria corresponding to the optimal conditions of operation of these farms. To work in a representative study framework, adaptations of the model were made to take into account the specifics of the study area. Through the modified Orfee model, systems using only the grass resources available on the farm are investigated to determine the best grazing level and economic performance of the farms.

2.1. Model overview

This study uses the bioeconomic optimization model Orfee which is a simulation model designed to explore livestock systems associated with grassland and cash crop production in France (Mosnier et al, 2017a). It represents the annual production of a farm at equilibrium on a monthly scale. Livestock, crop production, buildings, and machinery can be optimized for economic risk to maximize average net profits. Net profit is defined as animal and crop receipts plus public support minus operational, fixed, depreciation, financial, and labor costs, and taxes. Optimization is carried out under a series of constraints, which include feeding animals, herd demographics, farming operations, mechanization, use of space, farm resources, biotechnology, and biological processes relating to animals. The model is implemented using the mathematical modeling platform GAMS (General Algebraic Modeling System) (McCarl et al, 2004).

2.2. Adaptation of the model to mountain areas

2.1.1 Integration of elements related to different types of grassland.

Using data from the French typology of permanent grasslands (Launay et al, 2011, Michaud et al, 2015), we estimate the growth and the food value of the grass month by month. The 5 mountain grasslands listed in the typology were considered, and 4 Technical Itineraries (TI) commonly used in cattle breeding in the Massif Central: TI1 - grazing all year (April-October), TI2 - late spring grass cutting (hay produced at the end of June) with summer and autumn grazing, TI3 - mid spring grass cutting (silage or wrapping at the end of May) with summer and autumn grazing, IT4 - mid spring grass cutting (silage or wrapping end of May) with summer grass cutting (regrowth) and autumn grazing. Grass production and feed values are calculated for April to October.

For the different grass productions and feed values provided by the national typology of permanent grassland for the 4 main periods (early spring, late spring, summer, autumn) (Launay et al, 2011), the grass production and the nutritional values for July, August, September, and October are pro-rated by number of weeks. For the good productivity in April, the nutritional values of April grass are equal to the early spring grass food values increased by 5%. The nutritional values of the grass in May are

equal to the early spring values. The nutritional values of the grass in June are equal to the mid-May grass nutritional values reduced by 10% because of grass maturation during this period. The grass nutritional value in July and August is the summer value, September and October is the autumn value. (Table 1 and Table 2).

For the other TI, we estimate the grass production and its food value for the different mowing dates and the nutritional value changes due to conservation as hay or silage from the data of Launay et al (Launay et al, 2011), and the INRA tables 2007 (Baumont et al, 2007). Grass production and nutritional value are put directly into the model for calculation. The grazed grass utilization rate given by the model corresponds to 65% of the total biomass available during the period between April and June, and to 75% for the rest of the year because of the waste that occurs on farms. The periodic grazed grass utilization rate (65% and 75%) correspond to the value given by Aubron (2010), increased of +5% because of the optimization of farm operations.

Table 1. *Quantity of fodder for the 5 altitude pastures (PA1 to PA5) for the technical itinerary “grazing all seasons of grass production”, month by month, with Mean values and standard deviation.*

Production / Months	April	May	June	July	August	September	October	Total
PA1 Fodder (kg DM / ha)	816	1,706	1,340	371	371	223	167	4,827
PA2 Fodder (kg DM / ha)	1,217	2,324	1,825	733	733	475	356	7,306
PA3 Fodder (kg DM / ha)	1,681	2,443	1,918	981	981	515	386	8,520
PA4 Fodder (kg DM / ha)	994	2,782	2,184	1,113	1,113	319	240	8,506
PA5 Fodder (kg DM / ha)	994	2,054	1,613	1,113	1,113	319	240	7,208
Average for (PA1 to PA5)	1,140 ± 247	2,262 ± 305	1,776 ± 240	862 ± 248	862 ± 248	370 ± 100	278 ± 75	7,273 ± 1005

PA1: Acid dry and acidic fescue with red fescue and bent grass highland grassland (Diversified grassland with late phenology: Productivity and low to medium food value, but relatively stable in the season).

PA2: Low fertilized mixed grasslands with odorous species and red fescue (grassland of balanced composition: Mean productivity and high food value especially for regrowth).

PA3: Highly fertilized mixed breeds of English Rye-Grass and cocksfoot (early phenology peer, balanced in botanical family: High productivity and high food value especially for regrowth).

PA4: Mixed grassland with common bluegrass and English grass (Grasslands of early phenology, poor in legumes: very high productivity, high food value, but decreasing very rapidly in Spring).

PA5: Mixed grassland prairie with common bluegrass and English Rye-Grass (Medium early meadow pheasant, low in pulses. Average productivity: High Spring food value and average for regrowth).

Table 2. Mean values and standard deviation for the 5 altitude feed values for the technical itinerary “grazing all seasons”, month by month.

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Total
UFL (/kg DM)	1 ± 0.02	0.95 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.89 ± 0.04	0.89 ± 0.04	0.91 ± 0.03	0.91 ± 0.03	6 ± 0.17
UFV (/kg DM)	0.95 ± 0.02	0.90 ± 0.02	0.81 ± 0.02	0.84 ± 0.04	0.84 ± 0.04	0.85 ± 0.03	0.85 ± 0.03	6 ± 0.20
PDIA (g/kg DM)	44 ± 1.21	42 ± 1.15	37 ± 1.04	47 ± 3.06	47 ± 3.06	49 ± 2.04	49 ± 2.04	313 ± 11.90
PDIN (g/kg DM)	116 ± 4.16	111 ± 3.97	99 ± 3.57	108 ± 9.77	108 ± 9.77	115 ± 6.90	115 ± 6.90	772 ± 38.51
PDIE (g/kg DM)	105 ± 1.74	100 ± 1.65	90 ± 1.49	101 ± 5.06	101 ± 5.06	104 ± 3.02	104 ± 3.02	706 ± 19.21
UEB (/kg DM)	0.92 ± 0.01	0.97 ± 0.01	1.07 ± 0.01	1 ± 0.03	1 ± 0.03	0.97 ± 0.02	0.97 ± 0.02	7 ± 0.10
UEL (/kg DM)	0.93 ± 0.01	0.98 ± 0.01	1.08 ± 0.01	1 ± 0.02	1 ± 0.02	0.98 ± 0.02	0.98 ± 0.02	7 ± 0.07

This table resumes the data relating to the Forage Unit for Meat UFV (/kg DM), Forage Unit for Milk UFL (/kg DM), Protein truly digestible in the small Intestine PDIA (/kg DM), Protein truly digestible in the small Intestine allowed by the nitrogen provided by the food PDIN (g/kg DM), Protein truly digestible in the small Intestine allowed by energy provided by the food PDIE (g/kg DM), Bovine bulk units UEB (/kg DM), Bovine bulk units UEL (/kg DM), 1 UFL=1,760 kcal , 1 UFV =1,820 kcal

2.1.2 Geographic constraints

In order to take into account, the slopes of the plots, and the distances between the plots and the farm's headquarters, we specify that the maximum area that can be harvested for each type of grassland must be lower or equal to the total harvestable area. The slopes are characterized by the possibility of mowing (Aubron et al, 2010). The amount of grass grazed by dairy cows must be lower than or equal to the amount of grazing grass on plots accessible to dairy cows.

2.3. Farm types

We take data from the DIAPASON database which is generally used for thematic studies such as food self-sufficiency, production costs, and mineral balance sheets (Charroin et al, 2005). 2 farm types (*Farm-type BL18* and *Farm-type BL22*) with dairy and suckling herds are selected from the INOSYS Breeding Network references. They are representative models of viable farms located in the same region and constructed with actual farm data from an extensive network of commercial farms plus specialized knowledge. They mirror the coherent running of a well-run, profitable farm for a given system and context (Charroin et al, 2005).

Farm types BL18 and BL22. We use the farm types Farm_1 (Farm-type BL18) and Farm_2 (Farm-type BL22) (c.f. Cas-type année 2015 Chambres d'Agriculture 15-43-48-63 Institut de l'Elevage). The farms correspond to those which are located in the mountain area of southern Auvergne (France): Cézalier (Monts Cantal) for Farm_1 and Planèze of St-Flour (Velay volcanique) for Farm_2. In addition to representing milk and beef cattle farms, these 2 cases represent 2 different farming systems: herd, plot structure, and farm operation (Table 3). The characteristics of these farm types make it possible to use them for simulations to validate model changes but also to generalize our results to the farms of the study area.

For each farm, Table 3 presents a short description of the breeding system. Farm_1 is a balanced milk/beef cattle system of medium size with mountain pasture. Farm_2 is a modernized milk/beef cattle system of large size with fragmented plots and crops.

Farm_1 has exclusively grassland resources with less fragmented plots. Farm_2 has fragmented plots and produces cereals to supplement its concentrate imports. The main geographical constraint for Farm_1 is the slope, whereas for Farm_2 it is the distance from the farm headquarters.

Table 3. *Summary of main features and breeding system of Farm_1 and Farm_2.*

Farms	Farm_1	Farm_2
Description of the breeding system	Medium-sized balanced milk/meat system with mountain pasture	Large- sized modernized milk/meat system with fragmented plots and crops
Total Man Works Unit (MWU)	2.0	2.1
Animals breeds (dairy cows, suckling cows)	Prim'Holstein, Salers	Montbéliard, Aubrac
Annual milk production by dairy cow (L/cow/year)	5700	5500
Kg of meat production by suckling herd per LU (kg/LU)	237	349
Kg of meat production by dairy herd per LU (kg/LU)	138	160
Number of dairy cows	32	49
Number of suckling cows	35	40
Usable agricultural area (ha)	70	112
Principal forage area (ha)	70	108
Cereal area (ha)	0	5
Mountain pasture area (ha)	30	0
Stocking rate (LU/ha of Principal forage area)	1.26	1.20

Source : *Référentiel cantal, cas-type année 2015 Chambres d'Agriculture 15-43-48-63*

Institut de l'Elevage

2.4. Experimental design

The experimental design (Table 4) tests 5 scenarios (defined by the percentage of livestock units (LU) found in the dairy (D) herd): 100D for a dairy-only herd, 75D for a dominant dairy herd, 50D for a balanced dairy and suckling herd, 25D for a dominant suckling herd and 0D for a suckling-only herd. The experimental plan presents these 5 herds compositions in simulations for Farm_1 and Farm_2.

Table 4. *Presentation of the experimental plan.*

Scenarios	100D	75D	50D	25D	0D
Dairy herd (% of total LU)	100%	75%	50%	25%	0%
Suckling herd (% of total LU)	0%	25%	50%	75%	100%

2.5. Parameters and scenarios

Usable Agricultural Area (UAA), Principal Forage Area, Cereal area, Mountain pasture area, Animal type, and Animal production potential are kept the same for both farm types for the different scenarios evaluated. All the parameters are fixed for the simulations, except Feed composition which is optimized. The herd cattle type mix scenarios and the scenarios for the model evaluation parameters are the same for each farm. The other parameters are based on experimental design, optimized or determined according to herd and farm characteristics (c.f. farm types). Herd cattle type mixes are based on the experimental plan, but final date utilization of grassland, calving schedules, feed composition, costs, and total number of LUs are optimized. Public support, type of buildings, equipment, and labor are determined according to optimized herd and farm characteristics. For any scenario, prices are based on INSEE price indexes from 2000 to 2015, with 2010 as reference year. The average reference selling prices are 0.32 €/liter for milk, and 2.43 €/kg for meat for all breeds and meat types. For barley the average reference production cost is 12.92 €/quintal and the purchase price is 15.5 €/quintal. However, the results of the simulations by economic indicator are determined according to the average price over 16 years under investigation.

Table 5. *Categories and states of the main parameters used for the different simulations.*

CATEGORIES OF PARAMETERS	DIFFERENT PARAMETERS	STATES OF MAIN PARAMETERS	
		SCENARIOS OF EVALUATION	
		Farm _1	Farm _2
Plot	Temporary grassland "TG" (ha)	0	33
	PA1 "Mountain pasture " (ha)	29.5	0
	PA2 (ha)	5.5	20
	PA3 (ha)	15	25
	PA4 (ha)	12	15
	PA5 (ha)	8	14
	Crops (ha)	0	5
	Max pasture that could be grazed by dairy cow for Temporary grassland (%)	0	100
	Max pasture that could be grazed by dairy cow for PA1 (%)	0	0
	Max pasture that could be grazed by dairy cow for PA2 to PA5 (%)	70	65
	Max harvestable area for PA1 (%)	0	0
	Max harvestable area for TG and for PA2 to PA5 (%)	100	100
Herds	Number of total LU	Fixed (88)	Fixed (127)
	Distribution of Dairy and Suckling herds (%D, %Suckling LU)	Fixed (50%, 50%)	Fixed (53%, 47%)
Farm management	Grassland end use, Calving schedule	Fixed (Cf. Farm types)	Fixed (Cf. Farm types)
		Dairy - Fall calving Beef - winter calving	Fall calving - Dairy and Beef
-	Feed composition	Optimized	
Economy	Public support	Fixed (Cf. Farm types)	
	Product prices	Fixed (Cf. INSEE, 2010)	
	Economic loads	Fixed (Cf. Farm types)	
Structural data	Type of buildings, equipment, labor	Fixed (Cf. Farm types)	

2.6. Model settings and evaluation

During the evaluation of the model simulations, some parameters are not subject to any optimization. The model is used as a balance sheet model to reproduce from parameter levels the results of simulations that coincide with their respective corresponding farm types. This is done for the 2 farm types, and the model is also subjected to additional settings to match the simulation outputs that differ from their corresponding standard cases.

For example, taking into account that grassland yields range from 4.4 to 7.9 tons of dry matter (DM) per hectare depending on the type of grassland (Ruget et al, 2009), the level of soil fertility is modulated to match the crop yields provided by the simulations with those of the farm types. Thus there is a correlation between yields and soil fertility that is changed from the original model. The values observed for evaluating the modified model are: crop production, feed by type of fodder and grassland, amount of fodder per animal livestock unit, animal production (milk and meat), economic results (the total income of the farm). The simulation results are compared with the corresponding values by farm type, and the relative differences are evaluated.

2.7. Criteria analyzed for herds compositions analysis

For the different scenarios, the criteria considered are:

- **Animal products** are the quantities of meat and milk sold per year. It is evaluated by the analysis of: Total number of livestock unit (LU), Number of dairy Livestock Unit (LU), Milk sold per year (KgL/year), Meat sold per year (1000 kg live weight / year).
- **Consumption** is the detailed consumption of feeds and concentrate. It is evaluated by the analysis of: Stocking rate (LU/ha), Total amount of concentrate consumed in tons of Grass Matter (tGM), Concentrate consumed per LU (tGM/LU), Total amount of fodder (tDM), Total amount of fodder per LU (tDM/LU).
- **Grazed grass utilization rate** is the ratio of the amount of grass grazed (tDM) to the amount of total pasture grass available (tDM). It is evaluated by analyzing: Total pasture grass available (tDM), Grazed grass utilization rate (%), Total grazed grass (tDM), Total amount of grass grazed per LU (tDM/LU), Total amount of grass harvested (tDM), Total amount of grass harvested per LU (tDM/LU), and the different technical itineraries on the farm.
- **Farm economics** is evaluated by analysis of: Man Work Unit (MWU), Total product (€), Subsidies (€), Gross margin (€), Total costs (€), Farm Operating profit (€), Operating profit per MWU, Standard deviation of the Operating profit per MWU.

For each scenario, the analysis of these different biotech and economic indicators permits simultaneous evaluation of the valorization of grass by pasture, animal

production, fodder consumption, and the economic benefits associated with the combination of dairy and suckling herds in mountain areas.

3. Results

3.1 Evaluation of the ability of the model to represent mixed milk/meat bovine herd systems

In the farm type simulation, we observed some small differences between the farm type data and simulation results (Table 6). Purchases (excluding forage) and sales (excluding animal products) are not taken into account for the evaluation of the model because they are adjustment variables. Purchases are made to balance animal feed in terms of volume and energy content. Sales occur either when there are surplus (marketable) products or when these products are more profitable for sale than for use with livestock.

To evaluate the model's ability to deal with bovine mixed milk/meat herd breeding systems, we compare the simulation results with the 2 reference farm types whose herd compositions are close to the 50D scenario. The maximum relative difference (in absolute value) between simulation result and their corresponding value in the farm-types is 22%, but the average difference is 10%. We can conclude that the modified model represents properly the farm types.

Table 6. Differences between simulation results and reference farm data.

Farms	Farm_1			Farm_2		
Parameters	Farm type	Simul	Diff (%)	Farm type	Simul	Diff (%)
Total product (k€)	136	115	-15	192	150	-22
Total grazed grass (tDM)	167	176	5	285	324	13
Grazed grass per LU(tDM/LU)	1.90	2.00	5	2.25	2.56	14
Fodder per LU (tDM/LU)	2.11	1.77	-16	2.58	2.4	-7
Milk production (kL/year)	180	180	0	300	329	10

Simul: Simulation results

Diff: Relative difference between simulation result and his corresponding value of the farm type

3.2 Effect of herd cattle type mixes on production, feeding and grazed grass utilization rate

Table 7 resumes the parameters related to milk and meat production, grass and concentrate consumption, grazing rates, and the corresponding use of the agricultural area by area (ha) - exclusive pasture (pasture), 1 cut of hay followed by pasture (1C_hay + pasture), 1 late cut of silage followed by pasture (1C_late silage + pasture), early cut of silage followed by 1 cut of hay followed by pasture (silage + hay + pasture).

3.3 Animal products: meat and milk production

For Farm_1 the LUs reach their maximum for the 25D scenario with 82 LUs while for Farm_2 the maximum LU is reached at 50D with 137 LUs. For each farm type, with scenario 75D we have at least half of the maximum production of meat (meat production in 0D) (Table 7). The difference in meat yields compared to maximum meat production are 37%, 21% and 10% respectively for the 75D, 50D, and 25D scenarios for Farm_1. For Farm_2, these differences are respectively 42%, 24% and 11% for the 75D, 50D, and 25D scenarios. Because dairy herds produce meat in addition to milk, meat production from 75D progressively approaches maximum meat production (production of specialized herds 0D). 0D systems have limited milk production. In the 100D scenario, little meat production is observed due to the exclusive presence of dairy herds in the farm. For the 2 farm types, milk production shows an almost linear decrease from 100D to 0D, from maximum production of milk to zero in the 2 cases.

Table 7. *Table of indicators of production, feeding, pasture and grazed grass utilization.*

Farms	Farm_1					Farm_2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Milk and meat production										
Total number of livestock unit (LU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Milk sold per year (kL/year)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Meat sold per year (1000 kg/ year)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Grass and concentrates consumption										
Stocking rate (LU/ha)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Total concentrate consumed (tDM)	62	63	61	44	20	93	106	118	69	42
Concentrate consumed per LU (tDM/LU)	0.95	0.87	0.76	0.54	0.25	0.83	0.85	0.86	0.52	0.33
Total fodder consumed (tDM)	287	322	350	341	343	541	580	587	630	580
Fodder consumed per LU (tDM/LU)	4.42	4.41	4.38	4.16	4.29	4.79	4.64	4.28	4.77	4.53
Levels of grass valorization by grazing and correspondent use of the agricultural area										
Total pasture grass available (tDM)	247	239	230	219	202	276	310	344	340	348
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Total grazed grass (tDM)	144	173	195	179	171	199	260	305	340	312
Grazed grass per LU (tDM/LU)	2.21	2.39	2.45	2.18	2.13	1.76	2.08	2.23	2.57	2.43
Total grass harvested (tDM)	143	148	155	162	173	342	320	282	290	269
Grass harvested per LU (tDM/LU)	2.20	2.05	1.94	1.97	2.15	3.04	2.56	2.07	2.19	2.10
Pasture (TI1)	40.9	39.5	37.6	35.2	31.8	28.7	38.5	45.2	45.4	44.6
1C_ hay + pasture (TI2)	28.0	29.6	29.8	29.0	28.9	35.9	54.7	51.7	43.7	43.5
1C_ late silage + pasture (TI3)	1.1	0.9	2.6	5.8	9.3	26.9	4.5	5	7.5	10.6
Silage +hay +pasture (TI4)	0	0	0	0	0	15.6	9.3	5.1	10.4	8.3

3.4 Grass and concentrate consumption

For the 2 farm types, the total fodder consumption (total of silage, wrapping, hay, and grass) per LU is around 4tDM/LU for all the scenarios. For both farm types there is a variation in concentrate consumption per LU shown by a decrease of concentrate consumption with the reduction of dairy LU in herds. The combination of a dairy and a suckling herd maximizes the total number of LUs on the farm in a context of forage autonomy while reducing consumption of concentrate. Suckling herds are less demanding from the nutritional standpoint, hence the advantage of being able to reduce the intake of concentrate. A specialised dairy herd consumes more concentrate than a mixed herd breeding system composed of dairy and suckling cattle, with an equal total number of LUs as shown by the results of Farm_1. Thus, the reduction in concentrate consumption per LU depends more on the proportion of dairy LU than on the total LU. Overall the use of concentrate tends to decrease with the decrease in the percentage of dairy cattle LU in the farm. However, this decline in concentrate consumption is not observed in the 50D and 75D scenarios of Farm_2: in these scenarios stocking rates are significantly higher than the stocking rate of the 100D

scenarios of Farm_2 and these scenarios have big stocking rate increases of +22% and +11% respectively for the 50D and 75D compared to the 100D stocking rate. Also, their total fodder consumption is slightly lower at 4.64 tDM/LU for 75D and 4.28 tDM/LU for 50D, compared to 4.79 tDM/LU for 100D (Table 7). Generally, the use of concentrate is positively related to the number of dairy cow LUs in the system.

3.5 Grazed grass utilization rate

The hay and silage harvests are conditioned by the mechanization decisions through the technical itinerary (TI). For Farm_1 the maximum grazed grass utilization rate is 85% for the 50D system. For Farm_2 the maximum grazed grass utilization rate is 100% for the 25D system (Table 7). Compared to the 50D (Farm_1) and the 75D (Farm_2) systems, the grazing rates are lower for the specialized systems with the minimum values for specialised milk systems, being 58% for Farm_1 and 72% for Farm_2. The maximum grazed grass per LU is with the 50D for Farm_1 and 75D for Farm_2, and the maximum amount of grass harvested per LU (tDM/LU) corresponds to the specialised dairy systems for both farm types (Table 7). The differences in grazing rates are due to the fact that suckling herds are able to consume low quality fodder, and graze grassland areas away from the farm headquarters. In contrast, dairy herds are more demanding of food and have limited access to grassland areas away from the farm headquarters due to the twice a day milking at the headquarters' milking parlour. The diet of dairy herds is based more on harvested grass than the diet suckling herds which is based more on grazing.

3.6 Economic performance

We can see in Table 8 that in both cases the economic performance and the gross margin of the farm decrease with the decreases of dairy LUs (increase of suckling LUs) on the farm. The difference corresponds to the total costs which decrease with the decreases of dairy LUs on the farm. Unlike OD systems, 100D systems have a higher output with heavy costs. Hence the costs decline with the increase of suckling LUs in herds (Table 8).

Table 8. *Table of economic results.*

Farms	Farm_1					Farm_2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Man work unit (MWU)	1.25	1.23	1.17	1.2	0.82	2.1	2.1	2.1	1.81	1.5
Total product (k€)	118.3	115	108	93	74	222	220	214	183	155
Subsidy (k€)	17	21	26	31	35	25	31	38	44	49
Gross margin (k€)	68	67	66	61	55	135	132	132	123	111
Costs (€)	2,915.11	2,844.62	2,723.70	2,465.60	2,239.75	4,253.86	3,607.89	3,547.21	3,504.47	3,256.04
Total loads (€)	50,639	47,679	42,133	31,700	18,840	87,446	87,803	82,356	59,597	43,984
Operating profit (€)	8,147.62	8,897.45	8,966.17	7,825.46	4,725.31	39,530.87	43,266.22	45,916.10	40,342.13	33,127.01
Operating profit / MWU	6,511	7,215	7,647	7,671	5,786	18,824	20,603	21,865	22,342	22,023
SD operating profit / MWU	1,127.76	1,135.34	1,232.37	1,333.99	1,662.86	1,314.61	1,337.01	1,437.03	1,463.26	1,751.47

The total product = meat, milk, and crops receipt + subsidies

The Gross margin = (total product + Subsidies) – (Operating cost + Structural cost)

Total loads = Structural cost + Operating cost + depreciation + taxes + salary

Operating profit = Gross margin – (depreciation + taxes+ salary)

The operating profit per Man Work Unit Human Work Unit (MWU) for Farm_1 and Farm_2 are at the maximum for the 25D distributions. From the 25D distributions, the operating profit per MWU decreases with the decreases of dairy LU in the farm. However, in both cases the operating profit per MWU is close between 50D and 25D systems with respective differences of -0.3% for Farm_1 and -2% for Farm_2. There are moderate costs with good economic performances and operating profit for these mixed herd systems. For these systems, less MWUs are used as the dairy LUs decrease, which contributes to a reduction of costs when the number of dairy LU decreases. At the same time, subsidies increase with the increase of suckling herd LUs, because premiums per suckling cow increase with the number of suckling cows. For systems with suckling cows this reduction in labor contributes to a reduction of costs when the number of dairy cows decreases on the farm.

4. Discussion

4.1 Modelling approach

In addition to taking into account all the components of the systems in an interactive way, modeling allows a simplified representation of the systems in order to focus on the aspects of interest, and the aspects which define the problematic of the model (Coquillard et al, 1997). The modeling approach has been used for several studies on

herbivore farming systems (Aubron et al, 2010, Ingrand et al, 2002, Jacquot et al, 2012, Jouven et al, 2007, Mosnier et al, 2009, Mosnier et al, 2017a). However, production system economic results are related to their technical performances, leading to the necessity to analyze the scenarios on a common basis. We work in optimized operating situations on an economic basis. We use a bioeconomic optimization model which offers the advantage of having a strict coherence between the characteristics of the animals, the animal production, the use of resources, the environment of breeding, and the use of capital subject to a strategy of maximization of operating profit under a given set of constraints. Our model has been used for many studies in the field of agriculture (Mosnier et al, 2009, Mosnier et al, 2015, Mosnier et al, 2017a, Mosnier et al, 2017b). Animal characteristics, structural features, rearing environment, activity functioning and economic outcomes are all considered with their interactions. In addition to these aspects related to our work, the bioeconomic optimization models offer the capacity to consider biological, financial, structural, and decision-making components of the farm. Many studies on pasture have used bioeconomic models (Ewing and Pannell, 1986; Pannell and Panetta, 1986). The modified model gives optimized values which reflect small differences with farm type data, so this highlights the capacity of the model to represent farm types. The use of a bioeconomic optimization model is an original and appropriate approach generally done with an experimental design. In our case the model is used with a two-dimensional experimental design for a simultaneous analysis of pasture grazing, animal production, feed consumption, and economic outcomes. However, the study of the technical management of livestock systems using a bioeconomic optimization model with the particularity of optimizing on economic bases can be problematic. Similar work with relevant results has been done with the same approach, like for example, the study of alternative techniques of integration of farming crops on Malagasy dairy farms (Randrianasolo et al, 2009), Lengers and Britz Bernd (2012) study on reducing greenhouse gas emissions on farms, and the whole-farm model MIDAS used to explore the impact of annual legume species on land use (Bathgate et al, 2009). Bioeconomic modeling also permits here the exploration of simultaneous compromises on biotechnical and economic criteria.

4.2 Grazed grass utilization

The simultaneous valorization of areas nearer to farm headquarters by dairy cows and areas away from headquarters by suckling herds makes it possible to optimize the

grazed grass utilization rate of the whole farm pasture area. Dairy herds require twice-daily milking at the farm headquarters, unlike suckling herds. Simultaneous management of dairy and suckling herds makes it possible to exploit areas of different potential more efficiently, and to optimize the use of grassland resources in mountain areas. The highest capacity of adaptation is on mixed farms, not specialized dairy farms, according to findings from several scientific studies (Andrieu et al, 2007; Brunschwig et al, 2005; Morlon and Benoit, 1990). Despite their good pasture valorization capacity, the lower profitability of suckling herds makes it necessary to establish a compromise between profitability and forage use through their association with economically more profitable dairy herds. Nevertheless, a good mix of LUs between dairy and suckling herds enables optimization of the development of grassland resources by guaranteeing good economic performance by the farm. The dairy cattle and suckling cattle herd mixes with the best grazing rates are 50D and 25D. Standard reference optimized farm-types and balanced systems support this result. In addition, 60% of mixed milk and meat cattle herds present in the Massif Central are balanced herds, and herds with a dominance of suckling cattle (Recensement agricole 2010). However, the structure of the plot is an essential element for an optimal mix of the herd in terms of LU in order to achieve improved grazing and good economic performance at the farm level. Overall mixed herd breeding systems of medium size with dairy and suckling herd mixes with LUs around 50D allow a better grazing rate. However, the large milk/meat systems with fragmented plots, have a better grazed grass utilization rate at around 25D due to their ability to better valorise the distant plots.

4.3 Production, economy and work

The mixed cattle herd breeding systems generate a diversity of animal products (milk and meat) allowing them to benefit from flexibility in the face of product price fluctuations. The animal products from the intermediary scenarios (75D, 50D, 25D) are relatively similar in quantity compared to the maximum quantity of each product on the farm. The simultaneous conduct of dairy and suckling herds is therefore a factor which increases cattle farm flexibility (ability to adapt to circumstances to maintain economic performance). It turns out to be the opposite for specialized systems which are more vulnerable to price fluctuations in general (Manyong et al, 2006). Also feeding by grazing is a benefit to the quality of animal products, particularly dairy products

(Farruggia et al, 2008; Martin, 2016). This is an advantage for farmers both in terms of production and in terms of economic performance. Mixed cattle herds with LU mixes between 50D and 25D have simultaneously the best grazed grass utilization rate and economic performance. This is consistent with the fact that the increase in forage autonomy contributes significantly to the stability of the economic results (Aubron et al, 2010). However mixed cattle herd systems also have consequences on farm organization through the workloads created by the combination of herds with different requirements (Brunschwig et al, 2005).

5. Conclusion

This study shows that mixed cattle herd systems, especially systems with 25% to 50% dairy cattle LU, maximize the grazed grass utilization rate in a context of mountain grasslands with constraints of mechanization and access for dairy cows, with an at least 85% grazing rate. Given their capacity to maximize the grazed grass utilization rate, despite geographical constraints and having moderate consumption of concentrate, mixed systems are mainly suitable for mountain grasslands which have geographical constraints. Because economic performance is essential for the orientation of the animal feed, we focused on these results which reveal that these systems correspond to moderate costs and better results per MWU. With a diversity of products (milk and meat) and a moderate use of concentrate mixed systems can provide greater economic flexibility through the ability to cope with input product price fluctuations. Mixed cattle herd farms can have economic stability and be competitive despite the natural constraints related to their geographic situation.

Acknowledgements

This research was supported by Auvergne Region and the French Ministry of Agriculture, Agrifood and Forestry through UMR-Herbivores (National Institute for Agricultural Research and VetAgro-Sup).

Funding: This research was supported by grants from the Auvergne Region and the French Ministry of Agriculture, Agrifood and Forestry through UMR-Herbivores (National Institute for Agricultural Research and VetAgro-Sup).

References

<http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/> (AGRESTE, 2011 and 2015)

Andrieu, N., Josien, E. and Duru, M. (2007) 'Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level', *Agriculture, ecosystems & environment*, 120(2), pp. 359-369.

Aubron, C., Lurette, A. and Moulin, C.-H. (2010b) 'Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier', *Rencontre Recherche Ruminants*, 17, pp. 249-252.

Bathgate, A., Revell, C. and Kingwell, R. (2009) 'Identifying the value of pasture improvement using wholefarm modelling', *Agricultural Systems*, 102(1), pp. 48-57.

Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Holmes, C., Comeron, E., Macdonald, K. and Barry, T. (2013) 'e-Dairy: a dynamic and stochastic whole-farm model that predicts biophysical and economic performance of grazing dairy systems', *animal*, 7(5), pp. 870-878.

Baumont, R., Dulphy, J. P., Sauvant, D., Tran, G., Meschy, F., Aufrere, J., Peyraud, J.-L. and Champciaux, P. 2007. Les tables de la valeur des aliments. Editions Quae.

Brunschwig, G., Josien, E. and Bernhard, C. (2005) 'Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin allaitant et laitier'.

Brunschwig, G., Sibra, C., Agabriel, C., Molenat, H. and GARCIA-LAUNAY, F. (2010) 'Déterminants géographiques de l'utilisation des prairies en système traditionnel Salers: enseignements sur le fonctionnement du système fourrager', *Renc Rech Ruminants*, 17, pp. 37-40.

Charroin, T., Palazon, R., Madeline, Y., Guillaumin, A. and Tchakerian, E. (2005) 'Le système d'information des Réseaux d'Elevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité', *Renc. Rech. Rum*, 12, pp. 335-338.

Coquillard, P., Hill, D. R. and Sime-Ngando, T. (1997) *Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson Paris.

Cournut, S., Bertrand, J., Conrard, A. and Ingrand, S. 'Intérêt de la mixité d'espèces pour accroître la flexibilité des élevages: l'exemple des élevages bovin lait+ ovin viande en Auvergne'. 19. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, 4 p.

Cros, M.-J., Duru, M. and Peyre, D. (2001) 'SEPATOU, un simulateur de conduites du pâturage à l'épreuve des menus bretons', *Fourrages* 167, 365-383.(2001).

Delaby, L., Peyraud, J. and Faverdin, P. (2001) 'Pâtur'IN: le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur', *Fourrages*, 167(2), pp. 385-398.

Dillon, P., Crosse, S., Stakelum, G. and Flynn, F. (1995) 'The effect of calving date and stocking rate on the performance of spring - calving dairy cows', *Grass and Forage Science*, 50(3), pp. 286-299.

Dumont, B. and Bernuès, A. (2014) 'Agroecology for producing goods and services in sustainable animal farming systems', *Animal: an international journal of animal bioscience*, 8(8), pp. 1201.

Ewing, M. and Pannell, D. (1986) 'Developing regional pasture research priorities', *WA Department of Agriculture Technote*, (6/86).

Farruggia, A., Martin, B., Baumont, R., Prache, S., Doreau, M., Hoste, H. and Durand, D. (2008) 'Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux', *Productions animales*, 21, pp. 181-200.

Fleury, P., Dubeuf, B. and Jeannin, B. (1996) 'Forage management in dairy farms: a methodological approach', *Agricultural Systems*, 52(2), pp. 199-212.

Ingrand, S., Dedieu, B., Agabriel, J. and Pérochon, L. (2002) 'Modélisation du fonctionnement d'un troupeau bovin allaitant selon la combinaison des règles de conduite. Premiers résultats de la construction du simulateur SIMBALL', *Renc. Rech. Rum*, 9, pp. 61-64.

Jacquot, A.-L., Baumont, R., Delaby, L., Pomies, D., Lamadon, A. and Brunschwig, G. 'Dynamilk: un modèle à l'échelle de l'exploitation bovine laitière herbagère pour

explorer l'adéquation entre les dynamiques des productions d'herbe et de lait'. 19. *Rencontres Recherches Ruminants (3R)*. 2012-12-052012-12-06, Paris, FRA: Institut de l'Elevage-INRA.

Jouven, M. and Baumont, R. (2008) 'Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity', *Agricultural Systems*, 96(1), pp. 260-272.

Jouven, M., Loiseau, P., Farruggia, A., Orth, D. and Baumont, R. (2007) 'Estimer la diversité floristique des prairies des exploitations herbagères avec un modèle de simulation couplé à un indicateur'Note de biodiversité", *Fourrages*, (191), pp. 359-376.

Launay, F., Baumont, R., Plantureux, S., Farrie, J., Michaud, A. and Pottier, E. (2011) 'Prairies permanentes-des références pour valoriser leur diversité, éd', Paris: *Institut de l'Elevage*.

Lengers, B. and Britz, W. (2012) 'The choice of emission indicators in environmental policy design: an analysis of GHG abatement in different dairy farms based on a bio-economic model approach', *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement-Review of agricultural and environmental studies*, 93(2), pp. 117-144.

Manyong, V., Okike, I. and Williams, T. O. (2006) 'Effective dimensionality and factors affecting crop - livestock integration in West African savannas: a combination of principal component analysis and Tobit approaches', *Agricultural economics*, 35(2), pp. 145-155.

Martin, B. 2016. ., ., Verdier-Metz, I., Montel, M., Joy, M., Casasús, I., and Blanco, M. 2016, The contribution of mountain pastures to the link to terroir in dairy and meat products. Pag Options Méditerranéennes, no.. 19th Meeting of the

FAO-CIHEAM Mountain Pastures Sub-network. 14-16 June, Zaragoza, Spain. In: Coppa, M. (ed.).

McCarl, B. A., Meeraus, A., van der Eijk, P., Bussieck, M., Dirkse, S., Steacy, P. and Nelissen, F. 2004. McCarl GAMS user guide. Citeseer.

Michaud, A., Plantureux, S., Pottier, E. and Baumont, R. (2015) 'Links between functional composition, biomass production and forage quality in permanent

grasslands over a broad gradient of conditions', *The Journal of Agricultural Science*, 153(5), pp. 891-906.

Morlon, P. and Benoit, M. (1990) 'Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système', *Agronomie*, 10(6), pp. 499-508.

Mosnier, C., Agabriel, J., Lherm, M. and Reynaud, A. (2009) 'A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France', *Agricultural Systems*, 102(1), pp. 77-88.

Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J. and Gac, A. (2017a) 'Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions', *Agricultural Systems*, 157, pp. 202-215.

Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J. and Gac, A. (2017b) 'What prospective scenarios for 2035 will be compatible with reduced impact of French beef and dairy farm on climate change?', *Agricultural Systems*, 157, pp. 193-201.

Mosnier, C., Duclos, A., Lherm, M., Lelyon, B., Agabriel, J. and Gac, A. (2015) 'Orfee: un modèle bioéconomique pour simuler la production, les résultats économiques et les émissions de gaz à effet de serre des exploitations bovines', 2015; 22. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, Paris, FRA, 2015-12-02-2015-12-03, 89-89.

Nettier, B., Dobremez, L., Coussy, J.-L. and Romagny, T. (2010) 'Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises', *Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine*, (98-4).

Pannell, D. and Panetta, D. (1986) 'Estimating the on-farm cost of skeleton weed (*Chondrilla juncea*) in Western Australia using a wholefarm programming model', *Agriculture, ecosystems & environment*, 17(3-4), pp. 213-227.

Randrianasolo, J., Lecomte, P., Salgado, P. and Vayssières, J. (2009) 'Modélisation bioéconomique des alternatives techniques d'intégration cultures élevages dans les fermes laitière malgaches'.

Rotz, C. A., Corson, M. S. and Chianese, D. S. (2012) 'THE INTEGRATED FARM SYSTEM MODEL'.

Ruget, F., Satger, S., Volaire, F. and Lelièvre, F. (2009) 'Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS', *Crop science*, 49(6), pp. 2379-2385.

Steinwigger, A., Starz, W., Podstatzky, L., Kirner, L., Pötsch, E., Pfister, R. and Gallnböck, M. (2010) 'Low-Input Vollweidehaltung von Milchkühen im Berggebiet Österreichs—Ergebnisse von Pilotbetrieben bei der Betriebsumstellung', *Züchtungskunde*, 82, pp. 241-252.

www.myinosys.fr/resultats-par-grand-systeme/elevages-mixtes-lait-viande.html,
Recensement agricole 2010. Consulted in jun 2016

CHAPITRE VI.

Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier – allaitant face aux aléas de prix

ARTICLE.2

Après avoir identifié les systèmes d'élevage bovin mixte laitier-allaitant comme les plus aptes à permettre une meilleure valorisation des ressources herbagères par pâturage en zones contraignantes avec de bonnes performances de production et économiques. Il était essentiel d'évaluer la sensibilité des choix de production et des résultats économiques de ces systèmes d'élevage aux aléas économiques. Il s'est agi de vérifier si et dans quelle mesure la conduite simultanée d'un troupeau de bovins laitiers et d'un troupeau de bovins allaitants constituait une bonne stratégie de gestion des risques économiques. Cet axe d'étude a fait l'objet d'un article scientifique approuvé par la revue scientifique ***Agricultural Systems*** sous la référence AGSY_2575 (Cf. *Agricultural Systems* 171 (2019) 126–134). Ce travail qui s'intitule "Profit stability of mixed dairy and beef production systems of the mountain area of southern Auvergne (France) in the face of price variations: Bioeconomic simulation" a consisté à vérifier la capacité des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant à faire face aux aléas économiques, notamment aux variations des prix en vue de stabiliser leur profit dans le temps. Nous avons fait l'hypothèse que dans des conditions de fonctionnement économiques optimisées, les systèmes bovins mixtes s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer de meilleurs et plus stables profits comparés aux systèmes bovins spécialisés. Afin d'explorer la capacité d'adaptation et la stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix, nous avons utilisé le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee. Une analyse de sensibilité locale, combinée avec une analyse de sensibilité globale a permis d'appréhender les adaptations des exploitations à des changements indépendants de prix et d'évaluer la sensibilité du résultat courant aux variations de prix. Il ressort de ces analyses combinées que la conduite simultanée de troupeaux bovins mixtes avec une bonne modulation de la taille des troupeaux, tenant compte des disponibilités des ressources, de la structure des exploitations et des prix des produits sur le marché, favorise des résultats économiques durables. Les systèmes bovins mixtes s'avèrent plus flexibles face aux aléas de prix avec une variabilité du résultat courant relativement faible comparée aux systèmes spécialisés. L'article ci-après est le développement de ce travail.

Profit stability of mixed dairy and beef production systems of the mountain area of southern Auvergne (France) in the face of price variations: bioeconomic simulation

Z.R. Diakité^{1a}, M.S. Corson², G. Brunschwig¹, R. Baumont¹, C. Mosnier¹

¹Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

²UMR SAS, INRA, AGROCAMPUS OUEST, F-35000 Rennes, France

^aCorresponding author: Zakary Rodrigue Diakité. E-mail: zakary.diakite@icloud.com

Short title:

Ability of mixed cattle systems to stabilize profit

Abstract

Mountain farmers face additional structural constraints (e.g., steep slopes, high elevations, fragmented fields) along with the regular risks inherent to agriculture, such as economic fluctuations. We thus hypothesized that simultaneously producing dairy and beef herds (i.e., “mixed cattle systems”) on mountain farms is a good compromise between a farm’s expected profits and the variation in these profits. To explore the profit stability of mixed cattle systems in the face of price variations, we used the bioeconomic optimization model Orfee to simulate one farm strategy: adjusting the number of cattle. The model simulated three mixed cattle systems (dairy and beef herds) and two specialized cattle systems (dairy or beef herd) on two farms in southern Auvergne (France) that differed in agronomic potential, field configurations and animal productivity. A local sensitivity analysis of beef, milk and feed price was combined with a global sensitivity analysis based on metamodels. Results indicated that the number of cattle was adjusted as a function of resource availability, farm structure, and product prices on the market. Compared to specialized systems, mixed cattle systems usually seemed an effective strategy to manage economic risk, with good compromise between expected profits and variation in profits.

Keywords: mixed cattle system, sensitivity analysis, whole farm model, bioeconomic optimization, risk management

Highlights

- Mixed cattle systems have higher profit than specialized ones by using more of the pasture
- Mixed cattle systems have more stable profit than specialized ones when prices vary
- On-farm feed production influences profit of grazing cattle systems significantly
- Mixed cattle systems appear to be an effective strategy for managing price risks

1. Introduction

In the Massif Central, a mountainous region in central France, 80% of the agricultural area is covered by permanent grasslands (AGRESTE 2011), which are favorable for grazing cattle. The region contains many livestock farms, but its agronomic and geographic characteristics render livestock production more difficult than that at lower elevations. For example, high elevations of fields make crop production impractical and shorten grazing periods, steep slopes prevent mechanization, long distances between fields and the farm headquarters consume time and fuel and impede animal movement, and remoteness from main transport routes increases transportation costs (Brunschwig et al. 2006; Andrieu et al. 2007). These structural constraints not only decrease the competitiveness of mountain farms but can also reduce their ability to manage the risks inherent to all agriculture: climate risks and economic fluctuations (Baumont et al. 2008; Mosnier et al. 2009). Variability in prices of agricultural inputs and products has increased in part due to more liberal business policies (e.g., end of milk quotas, decrease in production-based subsidies, intervention of the European Union Common Agricultural Policy in international trade). Diversification can be an effective way of reducing farmers' risk exposure, since different agricultural products are not necessarily subject to the same economic fluctuations (Chavas 2008). Farms in mountainous regions, however, have limited ability to diversify agricultural production. Those that produce dairy cattle and beef cattle at the same time can render their income streams from milk and beef more equal than they would be if they specialized in dairy or beef production. Risk management generally comes at a cost (Abson 2013), though, since diversification requires producing products besides the most profitable one and can come at the expense of economies of scale (Chavas 2008). Nonetheless, complementarity and synergy between products can decrease the cost of diversification. Several studies have investigated economic gains obtained

from complementary effects of farm products. For example, Chavas and Aliber (1993) estimated that mixed crop-livestock farming resulted in substantial economies of scope, and Kim et al. (2012) found significant productivity gains in diversified rice farms in Korea. In addition, simultaneous production of several livestock species has been shown to decrease climatic, health, and economic risks (Bonaudo et al. 2014; Tichit et al. 2011).

Production systems that combine dairy and beef cattle (i.e., “mixed cattle systems”) are common in mountainous regions such as Auvergne, in the Massif Central, where they represent 75% of mixed livestock farms producing milk (AGRESTE 2011). To our knowledge, however, no studies have analyzed the cost-effectiveness of mixing types of animal production to reduce risk exposure by explicitly assessing the complementarity among herds. Complementarity between dairy cattle herds and beef cattle herds can result in more efficient grass use on the farm, especially by the beef herd, which does not require such high-quality grass and can be grazed on pastures further from the barn (Morlon and Benoit 1990; Brunschwig et al. 2006; Andrieu et al. 2007; Diakite, in review). In addition, managing dairy and beef herds simultaneously can increase a farm’s adaptation ability by modifying the production of the herds. The question thus becomes whether simultaneous production of dairy and beef herds is a cost-effective strategy for managing risk, particularly in mountainous areas, considering the ability of farms to adapt their production system. We hypothesized that mixed cattle systems on mountain farms are a good compromise between a farm’s expected profits and the variation in these profits.

Simulation modeling provides an overall view of the functioning of systems by considering many of their elements and interactions among them. Many simulation models simulate agricultural practices and predict impacts of external fluctuations (e.g., climate, economy) on agricultural, environmental, and economic performances of farms. Bioeconomic models represent farm functioning and are generally used to simulate optimal production decisions for a given economic objective (Janssen and Van Ittersum 2007). Studies have simulated impacts of price fluctuations (Lambert 1989; Ridier and Jacquet 2002), climate fluctuations (Olson and Mikesell 1988; Kingwell et al. 1993; Jacquet and Pluvinage 1997; Kobayashi et al. 2007), or both (Mosnier et al. 2009) on specialized production systems. Model use is usually preceded by sensitivity analysis, which assesses the relative influence of input

parameters on one or more model outputs (Cariboni et al. 2007). Sensitivity analysis serves in particular to understand and evaluate complex models (Hamby 1994), as well as in decision support, developing recommendations, and understanding and assessing systems (Pannell 1997). To our knowledge, bioeconomic modeling and sensitivity analysis have not been used together to address the ability of mixed cattle systems to decrease the sensitivity of profits of cattle farms to price fluctuations. This study assessed the sensitivity of production decisions and profit of simulated cattle farms with variable percentages of dairy and beef cows in the total number of Animal Units (AU) by considering their ability to adapt the production system by varying the stocking rate. To this end, we used the bioeconomic optimization model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier et al. 2017) to simulate farms with a beef and/or dairy herd, forage production, and crop production.

2. Materials and methods

2.1 Model description

Orfee (**Fig. 1**) represents annual production of a livestock farm at equilibrium (i.e., crop allocations and the number of animals by type are the same from year to year under average climate conditions) (Mosnier et al. 2017). Equilibrium is ensured by constraints on crop rotations and the regulation of herd size/composition (through the number of cows, calving periods, replacement of heifers). Economic results obtained from this equilibrium production are calculated under different economic contexts. Orfee has been used to optimize monthly decisions about herd size, ration composition, pasture use, and feed purchases to maximize the expected net profit (Mosnier et al. 2017). Net profit equals farm income (sales plus subsidies) minus farm operating costs and building and equipment depreciation. The optimal type and quantity of feed in animal diets (e.g., hay, silage, grass of different qualities, silage maize, concentrated feeds) maximize the objective function while covering animal needs in energy and protein for maintenance, gestation, milk production, and growth, and while not exceeding animals' intake capacity. These requirements are calculated based on the INRA feeding system (INRA 2007). The total quantity of forage consumed cannot exceed the amount produced. In contrast, cereals and straw can be either purchased or sold if feed requirements do not equal feed production.

Most of the agricultural land simulated in this study was composed of permanent grasslands (**Table 1**). Orfee was adapted to represent the geographic constraints and heterogeneity of permanent grasslands in more detail. Five mountain grassland types characterized by elevation and botanical composition (Launay et al. 2011) were considered. We also considered four pasture management strategies commonly used in cattle production in the Massif Central (Diakit   et al., in review): i) grazing all year (April-October), ii) late spring grass cutting (hay produced at the end of June) with summer and autumn grazing, iii) mid-spring grass cutting (silage or wrapped bales at the end of May) with summer and autumn grazing, and iv) mid-spring grass cutting (silage or wrapped bales at the end of May) with summer grass cutting and autumn grazing. Feed values of grass, hay, silage, and wrapped bales were differentiated by grassland type.

For each area of grassland type present on the farm, the model optimizes management strategies under constraints of mechanizable area (some areas with steep slopes or stones can only be grazed). In addition, dairy cows can graze only as much grass as is produced on fields that they can access (Table S7). Structural and depreciation costs related to housing and milking are proportional to herd size. The number of hours of machine use depends on the management strategy chosen. Costs related to machines are not exactly proportional to the number of hours of use since minimum annual maintenance and depreciation costs are included if a machine is used for at least one hour per year. Orfee runs on the General Algebraic Modeling System (GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA) and uses the Mixed Integer Programming solver CPLEX. It is a static linear optimization model, but integer variables are used to model indivisibilities of investments and conditional subsidies. It is interfaced with Microsoft   Excel input and output data files.

During simulations, the model uses input data about soil characteristics (e.g., soil type and fertility), pasture yields, forage values, field areas, and the type of herd management, described by the distribution of weaning periods, milking, and grazing. It uses animal-production data about biological and production characteristics (e.g., growth rates, reproduction performance, feed requirements, housing requirements) and economic data (e.g., subsidies, labor opportunity cost, input prices). Orfee also uses farm structural data, such as the types of buildings and equipment (but their capacities are optimized by the model). As output, Orfee predicts land use, fertilization,

plant production and consumption, animal rations, animal production (milk/beef), herd demographics, input purchases, product sales, economic results, the amount of work performed, and environmental impacts, in particular greenhouse gas emissions.

2.2 Production systems studied

We considered five herd distributions (i.e., scenarios) for each farm as a decreasing percentage of dairy cattle in the total number of AU: 100% (dairy herd, 100D), 75% (dairy herd larger than beef herd, 75D), 50% (dairy and beef herds equal, 50D), 25% (dairy herd smaller than beef herd, 25D) and 0% (beef herd, 0D). In this study, the percentage of the farm's AU that were dairy cattle remained fixed, while the total number of AU, land use, and animal rations were optimized. The five distributions were applied to two case-study farms ("Farm_1" and "Farm_2") that have both dairy and beef herds (**Table 1**). Selected from INOSYS Breeding Network References (farm BL18 and BL22, respectively) (Charroin et al. 2005), they are representative models of viable farms in southern Auvergne and are constructed with actual farm data from an extensive network of commercial farms plus specialized knowledge. They mirror the coherent running of well-run, profitable farms for a given system and context (Charroin et al, 2005). Although both mountain farms, they differed greatly in their herd sizes, cattle breeds, farm sizes, and field configurations. Farm_1 was of moderate size with equal percentages of dairy (Holstein) and beef (Salers) cattle. Some of its forage area was composed of summer mountain pastures. Farm_2 was a large farm with modern dairy (Montbéliarde) (57% of total AU) and beef (Aubrac) production. Its fields were scattered, and some of them were used to produce cash crops. The farms correspond to those in specific areas of southern Auvergne: Cézalier (Mounts of Cantal) for Farm_1 and Planèze de Saint-Flour (area of Velay volcanique) for Farm_2. These baseline farms produced all of their own forage for their cattle. To ensure that, when simulated, they continued to contain only as many cattle as their grasslands could support, Orfee was set to prohibit forage purchases, allowing only concentrated feed purchases. The differences in herds, field configurations, farm operation and the characteristics of these farm types made it possible to use them for simulations to validate model changes but also to generalize our results to the farms of the study area.

2.3 Experimental design for price variations

Orfee considered the annual variability in economic context observed over the period 2000-2015 to choose the optimal production system that maximized farm profit over the entire period. Thus, it did not simulate any adaptation of the production system to each annual context (i.e. the system remains the same for all 16 years). To test how the farm would adapt to changes in prices, a statistical experimental design (Kleijnen 1995a, b) was implemented. We considered only the most important sources of economic risk for the farms considered: prices of milk and beef (the main products contributing to farm income), and those of feed inputs. Since they were based on pasture, the farms considered required few mechanized activities, pesticides, or fertilizers. Input prices were determined from French prices and price indices from 2000-2015 (INSEE 2018). Adjusted for inflation, the price variations observed over this period (**Appendix 1**) were higher for cereal-based products (coefficient of variation (CV) = 20%) than for milk (CV = 9%) or beef (CV = 8%). Since correlations between prices of these three products were weak (from -0.17 to 0.05), we explicitly assumed no covariance among them. Variations of $\pm 25\%$ of each individual price were first simulated in increments of 5% to observe potential nonlinearities. In a second step, price variations were tested in combination to represent unfavorable or favorable price contexts. We varied the three prices simultaneously among three levels (-25%, baseline, +25%) (i.e., factors of 0.75, 1.00, and 1.25, respectively), yielding 27 ($= 3^3$) combinations.

2.4 Sensitivity Indexes

Two types of sensitivity analysis were used to understand the adaptation potential of the systems and analyze the sensitivity of net profit to price fluctuations: “local”, to focus on a change in a specific price (using the full Orfee model), and “global”, to consider interactions between prices and calculate profit-price elasticities (using Orfee metamodels). System adjustments caused by price fluctuations were captured by examining changes in the total number of AU. Sensitivity indices calculated from these adjustments provided information about the flexibility with which each farm could adjust the number of AU and the stability of each farm’s net profit.

2.4.1 Local sensitivity analysis to observe changes in the number of AU and sensitivity of net profit to individual prices

We started with a local “one-at-a-time” sensitivity analysis, which varies parameters independently over a fixed interval (Hamby 1994; O'Neill et al. 1980). Local sensitivity analysis reveals the influence of a change in each price on model output. Local sensitivity analysis was performed for each year (2000-2015) of the five scenarios for each farm. Each year represented a specific economic context, with its own prices for agricultural inputs and products. For each year and each scenario, we individually varied the price of milk, beef, or “concentrated feed” (a weighted mean of several feeds) by $\pm 25\%$. After varying each price, we noted the relative change in the number of AU and calculated a local sensitivity index (LSI) (Hoffman and Gardner 1983) for the influence of each price on net profit. According to Hamby (1994), LSI is more robust than 14 other, more complex, sensitivity indices. LSI equals $(P_{\max} - P_{\min}) / P_{\max}$, where $P_{\max}$ and $P_{\min}$ equal net profit when the price of the product is set at its maximum (+25%) and minimum (-25%) value, respectively. For each scenario for each farm, the relative change in the number of AU and the LSI for each price were averaged over the 16 simulated years into a mean percentage change and a mean sensitivity index (MSI), respectively.

2.4.2 Metamodel construction

To assess sensitivity of net profit to interactions among the prices, we constructed metamodels from results of the full Orfee model and calculated price-profit elasticities. From the input parameters (prices) and output (net profits) of this experimental design (Tables S1 and S2, Supplementary Material), a metamodel of each scenario for each farm simulated in Orfee was constructed using multivariate regression in R software (R Core Team 2018).

▪ General metamodel

$$\begin{aligned} \text{Op} = & \gamma_0 + \gamma_1 \times \text{MilkPrice} + \gamma_2 \times \text{BeefPrice} + \gamma_3 \times \text{FeedPrice} + \\ & \gamma_{12} \times (\text{MilkPrice} \times \text{BeefPrice}) + \gamma_{13} \times (\text{MilkPrice} \times \text{FeedPrice}) + \\ & \gamma_{23} \times (\text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) + \gamma_{123} \times (\text{MilkPrice} \times \text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1})$$

where Op equals net profit; MilkPrice, BeefPrice and FeedPrice equal the price of milk, beef, and “concentrated feed”, respectively; γ_0 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_{12} , γ_{13} , γ_{23} , and γ_{123} are

coefficients determined from the regression for each scenario of each farm, and ϵ_i represents the errors.

This metamodel considers interactions among prices but makes the strong assumption of a linear response to them. The change in net profit (Op) is estimated as a function of each change in price via partial derivatives, thus yielding an analytical form of elasticity between each price (milk, beef, and “concentrated feed”) and net profit. The price-profit elasticities for each scenario of each farm represent the level of increase or decrease in profit due to the increase in the price of milk, beef, or “concentrated feed” by 1 unit.

- **Example of estimating the elasticity of net profit to milk price**

$$\partial(\text{Op})/\partial (\text{MilkPrice}) = \gamma_1 + \gamma_{12} \times (\text{BeefPrice}) + \gamma_{13} \times (\text{FeedPrice}) + \gamma_{123} \times (\text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Elasticity between each of the prices and net profit is a function of the other two prices and thus includes interactions between the prices. To estimate each metamodel, beef price, milk price and feed prices were aggregated into three proxies (used only to construct the metamodel). The feeds included in “concentrated feed” were wheat, triticale, barley, weaner feed and soybean meal, and the prices of these feeds used to calculate the weighted mean price of “concentrated feed” in the metamodels were those from the reference year (2010) (**Appendix 2**). For the reference year, the mean price of milk, beef and “concentrated feed” was 0.32 €/L, 2.39 €/kg and 223.03 €/t, respectively.

3. Results

3.1 Reference values of technical data

Orfee calculated baseline values of technical data for each scenario for each farm (**Table 2**) based on the 2000-2015 baseline prices. The number of AU predicted was smallest when composed of only dairy cattle, due to their greater nutritional requirements and their under-use of some remote pastures that were too far from the milking parlor. The number of AU predicted was largest in certain mixed systems because pasture was used more (beef cows could access remote pastures) and the greater profitability of dairy production encouraged an increase in milk production per

ha by buying more concentrated feed. Logically, income from milk sales increased as the percentage of dairy cattle in total AU increased, as did that from beef sales as the percentage of beef cattle increased. For Farm_1, which had less productive grasslands and no cash crops, the amount of concentrated feed consumed per AU increased as the percentage of dairy cattle increased. Net profit was lowest for specialized beef systems and highest for mixed cattle systems, which could use more of the farm's grass (**Table 2**).

3.2 Farm potential to adapt stocking rate in the face of price variations

Optimizing net profit resulted in a positive correlation between milk or beef price and number of AU, and a negative correlation between “concentrated feed” price and number of AU (**Fig. 2**). In particular, when the price of “concentrated feed” decreased, farms increased the number of AU and purchased more feed to increase production. These changes were not linear, however: for example, a 25% decrease in “concentrated feed” price increased the number of AU in all scenarios of both farms except 0D of Farm_1. Also, a 25% increase in “concentrated feed” price decreased the number of AU in all scenarios of both farms except 25D and 0D of Farm_2. Since Farm_2 had more grassland area and beef production is less profitable than dairy production, its number of AU in scenario 0D increased more than in the other scenarios when the price of beef increased or that of “concentrated feed” decreased. Generally, asymmetries in the number of AU as prices increased or decreased reflected differences in the amount of grass available on the farm and in profitability. Since beef cattle can graze more of a farm's grass, farms in scenario 0D maximized income from beef by maximizing the number of AU.

3.3 Sensitivity of net profit to price variations

3.3.1 Profit response to individual and interacting price variations

The magnitudes of variations in net profit were nearly proportional to those in individual prices (**Fig. 3**). Creating the metamodels as linear functions of variations in beef, milk, and feed prices was thus justified, although the linearity of interactions between prices was not tested. Regressions confirmed that interactions between the three prices (milk, beef, and “concentrated feed”) had significant effects on net profit (i.e., the F-statistic always exceeded the critical value) (Tables S3 and S4, Supplementary Material). For the three prices considered, the mean values of interactions (the elasticity related to

coefficient γ_{123} (when $\gamma_1 = \gamma_{12} = \gamma_{13} = 0$) for the two farms were 0.542, 0.537, 0.664, 0.628, and 0.001 in scenarios 100D, 75D, 50D, 25D, and 0D, respectively, indicating that mixed systems had the largest interactions between prices.

3.3.2 Sensitivity of net profit to price variations

Based on slopes of the change in net profit as a function of each price in the local sensitivity analysis (**Fig. 2**), as expected, i) farms with a greater percentage of beef cows were more sensitive to beef price, ii) farms with a greater percentage of dairy cows were more sensitive to milk price, and iii) farms using less concentrate feed, such as 0D, were less sensitive to “concentrate feed” price.

According to the elasticities, Farm_2, which had higher profit, was generally less sensitive to price variations than Farm_1 (**Table 3**). In agreement with the local sensitivity analysis, elasticities were positive for beef and milk prices and negative for “concentrated feed” prices. Thus, net profit increased when milk and beef price increased and decreased when “concentrated feed” price increased, all else being equal.

Sensitivity indices of Farm_1 were larger in absolute value than those of Farm_2, mainly due to much lower net profits of Farm_1 (**Table 2**). In absolute value, the largest sensitivity indices for net profit occurred in scenario 100D when milk or “concentrated feed” price varied and in scenario 0D when beef price varied. Overall, indices had intermediate values for mixed systems, hence the lower sensitivity of mixed systems to price variations than specialized systems. Milk prices influenced net profit more than the other prices as long as milk income contributed more to net profit than beef income or feed expenses.

In response to variation in the three prices, net profit of mixed systems (especially 25D) varied less than that of specialized systems (**Fig. 4**). One could expect a specialized dairy system to have more stable profit than a specialized beef system since the former sells both beef and milk. Orfee predicted the opposite, however, because net profit was more sensitive to milk price than beef price. Consequently, Scenario 25D had the lowest variability in net profit because it had relatively less dairy production. This pattern corresponds to the mixed systems, which had intermediate elasticities for the three prices (**Table 3**).

Median net profits of the five scenarios for each farm described a concave-down curve that peaked in scenario 50D (**Fig. 4**). Although scenario 100D was more profitable than 0D, adding a beef herd to the dairy herd used more grass on the farm, which increased mean net profit.

4. Discussion

4.1 Local and global sensitivity indices

The local sensitivity analysis served as an initial analysis of the sensitivity of farm structure and net profit to independent variations in price using the full Orfee model. The local sensitivity analysis thus assessed the potential of systems to adapt the number of AU by examining precise points in the solution space. In contrast, the global sensitivity analysis used metamodels, which made strong assumptions about the functional form of responses, but which assessed interactions between prices. The MSI's inability to consider these interactions, as well as differences in how the two indices were calculated (MSI being a normalized difference, elasticity being a partial derivative), explain their differences in value. The strong correlation between the MSIs and elasticities confirm the reliability of the overall analysis. While ignoring correlations between prices in the local sensitivity analysis may appear overly simplistic, it did broaden the analysis beyond restricted or preconceived conceptual limits.

4.2 Influence of case-study farm characteristics on results

As models of viable farms, the case-study farms had certain baseline characteristics (e.g., 50-57% of AU as dairy cattle) that may have rendered their metamodels less representative in certain scenarios (e.g., 0% dairy cattle, Tables S5 and S6). For example, Farm_2's large increase in the number of AU in scenario 0D when beef price decreased or "concentrated feed" price increased may have influenced the corresponding metamodel to operate at the edge of its range of validity. Thus, while the set of metamodels used provided a general overview of a wide range of mixed cattle systems, their predictions for specialized systems should be taken with greater caution.

4.3 Potential of farms to adapt to price fluctuations

The simulations reveal that modifying the number of AU allows farms to adapt to price variations to increase income or decrease costs. This agrees with results of previous

studies that show a decrease in production when economic conditions become unfavorable (Veysset et al. 2002; Mosnier et al. 2010). Mixed systems, however, do not necessarily modify their systems more than specialized systems in response to economic conditions. Compared to real mixed systems, those simulated in the study had less flexibility because the experimental design required them to keep the percentages of dairy and beef cattle fixed, while the interest of mixed systems lies in increasing milk or beef production according to the economic conditions. Thus, model results represent conservative predictions. Decreasing concentrated feed prices increased net profit in all scenarios but did so the most for systems with a dairy herd equal to or larger than a beef herd, since the dairy herd required more concentrated feed. Farmers can make adaptations that are more substantial than simply adjusting the number of AU: modifying production cycles, especially of beef cattle (Mosnier et al. 2010), by diversifying varieties of marketable animals in the beef herd, lengthening production cycles, and adding fattening of beef steers (Lambert 1989). These additional adaptations represent potential sources of flexibility in the face of price fluctuations. Sustainable adaptations of livestock systems over time may become difficult, however, due to the continual changes in prices of agricultural products and inputs. In addition, large decreases in production cannot decrease fixed costs of farm structure (Veysset et al. 2002), and infrastructure cannot always be increased to increase the number of AU. It is thus necessary to design and manage systems by choosing the most stable practices and strategies over the long term (Lev and Campbell 1987).

4.4 Cost effectiveness of mixed cattle systems to reduce variability in net profit

Net profit of cattle systems with a larger dairy or beef herd was more sensitive to milk or beef price, respectively. In contrast, the sensitivity of net profit to “concentrated feed” price depended on whether the system was limited by the amount of grass available. Variations in “concentrated feed” price influenced most the farms with the lowest feed autonomy (i.e. percentage of the feed and fodder consumed that is produced on the farm). Increased feed autonomy, via grass availability, is thus a factor that can decrease variability in net profit by decreasing the dependence of farms on purchased feeds, as examined in previous studies (e.g. Aubron et al. (2010)). We show that mixed systems had less variable net profit than specialized systems, especially than the specialized dairy system; however, net profit of the 50D scenario was not the least

variable. Diversifying a farm with a riskier type of production may increase variability in net profit. Since mixed systems also provided the highest mean net profit, they appeared to be a cost-effective strategy to increase profit. This increase in mean profit, however, depends greatly on the potential complementarity considered and the profitability of each herd. Orfee did reflect that dairy cows cannot graze some of the grasslands. Managing the two herds maximized use of the grass available on the farm. Modifying the grassland area would have changed the economic optimum. It is not surprising that scenario 50D had the highest mean profit since it corresponded to the initial situation of the representative model farms simulated. Modifying the type of equipment, such as adding a mobile milking parlor, could also decrease incentives to manage a beef herd. Note that beef cows can complement dairy cows in the use of grasslands, but the opposite is not really true. More generally, the greater the difference in profitability between the two types of cows, the greater is the cost of diversification.

Combining both dairy and beef herds appears to be a cost-effective risk management strategy. According to their level of risk aversion, farmers would value more the strategies that maximize average profit or that minimize variability in profit. Both strategies were associated with mixed systems but with different percentages of dairy cows in the systems. Some limits of these findings must be highlighted. It is unlikely that having only a small number of dairy cattle on a farm could be profitable, since dairy production requires relatively large investments and specific management practices. Managing two herds with different needs requires more work and technical ability than managing a single herd of the same size, due to the larger number of tasks to perform and the need to master a wider technical field. Nonetheless, managing dairy and beef herds simultaneously requires fewer additional skills than other diversification options such as product processing, other types of livestock, or tourism.

5. Conclusion

This study assessed whether and to what degree simultaneous management of dairy and beef herds was a good strategy for managing economic risks. To estimate the degree by which the number of AU was adjusted and its subsequent influence on the stability of profit in the farms analyzed, parallel local and global sensitivity analyses helped understand potential structural adaptations of farms to changes in individual

prices and the sensitivity of net profit to interacting variations in prices, respectively. Results indicated that mixed cattle systems, by modifying the number of AU as a function of resource availability, farm structure, and product and input prices, favor economic viability. Mixed cattle systems have high capacity to adjust the number of AU as a function of the potential profit of agricultural products and the availability of feed and forage resources on the farm. Thus, despite price fluctuations, mixed systems can generate higher and more stable net profits mainly by diversifying their animal production, but also by decreasing input purchases. Compared to specialized systems, mixed cattle systems usually seemed an effective strategy to manage economic risk, with good compromise between expected profits and variation in profits. However, it is essential to plan adjustment of herd sizes over time and, in particular, compare the amount of work required by simultaneous management of two herds to the amount and variability of net profit that it generates.

Acknowledgements

This research was supported by Auvergne Region and the French Ministry of Agriculture, Agrifood and Forestry through the Herbivores Mixed Research Unit (National Institute for Agricultural Research and VetAgro-Sup).

References

Abson DJ, Fraser ED, Benton TG (2013). Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agriculture & Food Security*, 2(1), 2.

AGRESTE (2011). <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/> (accessed 22 January 2019).

Andrieu N, Josin E, Duru M (2007) Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120 (2-4):359-369

Aubron C, Lurette A, Moulin CH (2010). Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier. *Rencontre Recherche Ruminants*, 17, 249-252.

- Baumont R, Jouven M, Deux N, Farruggia A (2008) A How can farms with beef cattle systems based on permanent pasture cope with extreme climatic years? Results of a study using the whole-farm simulator SEBIEN. In: Proceedings of the 8th European International Farming Systems Association symposium, pp 8-10
- Bonaudo T, Bendahan AB, Sabatier R, Ryschawy J, Bellon S, Leger F, ... Tichit M (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57, 43-51.
- Brunschwig G, Josien E, Bernhard C (2006) Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin laitier et allaitant. *Fourrages* 185:83-95
- Cariboni J, Gatelli D, Liska R, Saltelli A (2007) The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling* 203 (1-2):167-182
- Chambre d'Agriculture du Cantal (2015) Référentiel Cantal cas-types lait 2016 (conjoncture 2015)
- Charroin T, Palazon R, Madeline Y, Guillaumin A, Tchakerian E (2005) Le système d'information des Réseaux d'Elevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 12:335-338
- Chatellier V, Lelyon B, Perrot C, You G (2013) Le secteur laitier français à la croisée des chemins. *INRA Productions Animales* 26 (2):77-99
- Chavas JP (2008). On the economics of agricultural production. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 52(4), 365-380.
- Chavas JP, Aliber M (1993). An analysis of economic efficiency in agriculture: a nonparametric approach. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 1-16.
- Cournut S, Bertrand J, Conrard A, Ingrand S (2012) Intérêt de la mixité d'espèces pour accroître la flexibilité des élevages: 'exemple des élevages bovin lait+ ovin viande en Auvergne. In: *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, 19. 4 p.
- Hamby D (1994) A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment* 32 (2):135-154

Hoffman FO, Gardner RH (1983) Evaluation of uncertainties in environmental radiological assessment models. In Till JE and Meyer HR (Ed.), Radiological Assessment: a Textbook on Environmental Dose Assessment, pp. 11-1 to 11-51, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Versailles, France, 310p

INSEE (2018). Indices des prix dans l'agriculture : IPPAP, prix de gros alimentaires (indexation de contrats), IPAMPA, ancienne base (2010). URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/102413565/>

Jacquet F, Pluvillage J (1997) Climatic uncertainty and farm policy: a discrete stochastic programming model for cereal-livestock farms in Algeria. Agricultural Systems 53 (4):387-407

Janssen S, Van Ittersum MK (2007) Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models. Agricultural Systems 94 (3):622-636

Kim K, Chavas JP, Barham B, Foltz J (2012). Specialization, diversification, and productivity: a panel data analysis of rice farms in Korea. Agricultural Economics, 43(6), 687-700.

Kingwell RS, Pannell DJ, Robinson SD (1993) Tactical responses to seasonal conditions in whole-farm planning in Western Australia. Agricultural Economics 8 (3):211-226

Kleijnen JP (1995) Sensitivity analysis and optimization in simulation: design of experiments and case studies. In: Simulation Conference Proceedings. Winter. IEEE, pp 133-140

Kleijnen JP (1995b) Sensitivity analysis and optimization of system dynamics models: regression analysis and statistical design of experiments. System Dynamics Review 11 (4):275-288

Kobayashi M, Howitt RE, Jarvis LS, Laca EA (2007) Stochastic rangeland use under capital constraints. American journal of agricultural economics 89 (3):805-817

Lambert DK (1989) Calf retention and production decisions over time. Western Journal of Agricultural Economics:9-19

Launay F, Baumont R, Plantureux S, Farrie J, Michaud A, Pottier E (2011) Prairies permanentes - des références pour valoriser leur diversité. Ed. Institut de l'Elevage, Paris

Lev L, Campbell DJ (1987) The temporal dimension in farming systems research: the importance of maintaining flexibility under conditions of uncertainty. *Journal of Rural Studies* 3 (2):123-132

Morlon P, Benoit M (1990) Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie* 10 (6):499-508

Mosnier C, Agabriel J, Lherm M, Reynaud A (2009) A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. *Agricultural Systems* 102 (1-3):77-88

Mosnier C, Agabriel J, Veysset P, Bebin D, Lherm M (2010) Évolution et sensibilité aux aléas des résultats technico-économiques des exploitations de bovins allaitants selon les profils de production. *INRA Prod Anim* 23 (1):91-102

Mosnier C, Duclos A, Agabriel J, Gac A (2017) Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems* 157:202-215

O'Neill R, Gardner R, Mankin J (1980) Analysis of parameter error in a nonlinear model. *Ecological Modelling* 8:297-311

Olson K, Mikesell CL (1988) The range stocking decision and stochastic forage production. Staff Papers 13502, University of Minnesota, Department of Applied Economics.

Pannell DJ (1997) Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples. *Agric Econ* 16:139-152

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>

Reix R (1997) Flexibilité. In Simon Y and Joffre P (Ed.), *Encyclopédie de gestion, Economica*

Ridier A, Jacquet F (2002) Decoupling direct payments and the dynamics of decisions under price risk in cattle farms. *Journal of Agricultural Economics* 53 (3):549-565

Sauvant D, Perez J-M (2010) Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage. *Avant propos. INRA Productions Animales* 23 (1):3

Tichit, M, Puillet, L, Sabatier, R, Teillard, F (2011). Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: functional diversity matters. *Livestock Science*, 139(1-2), 161-171.

Veysset P, Lherm M, Bébin D (2002) Conséquences de la crise bovine en 2001 sur les résultats économiques des exploitations d'élevage bovin allaitant charolais. *Renc Rech Rum* 9:177-180

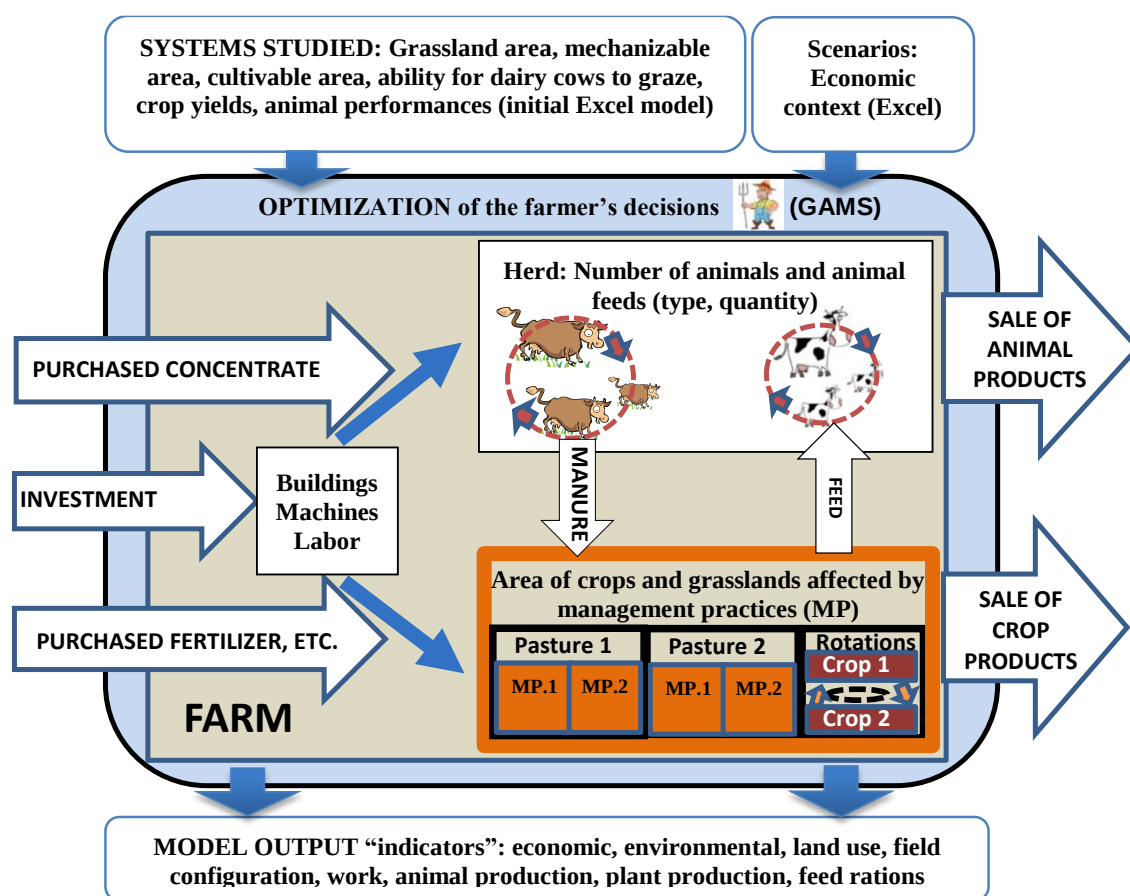


Figure. 1. Diagram of the model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment). GAMS = General Algebraic Modeling System

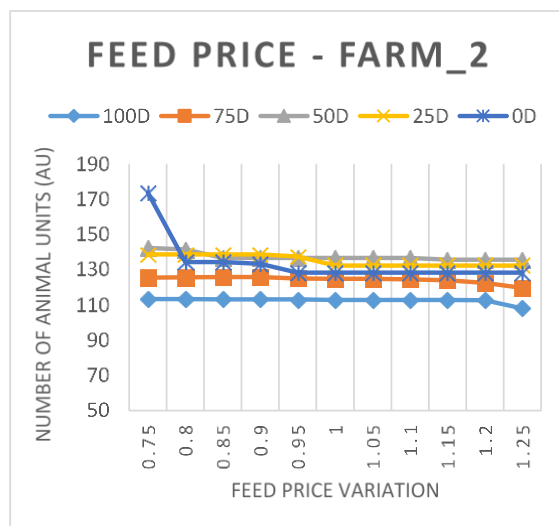
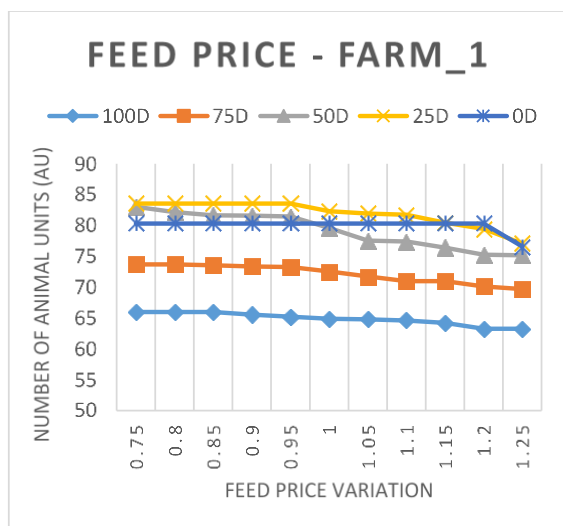
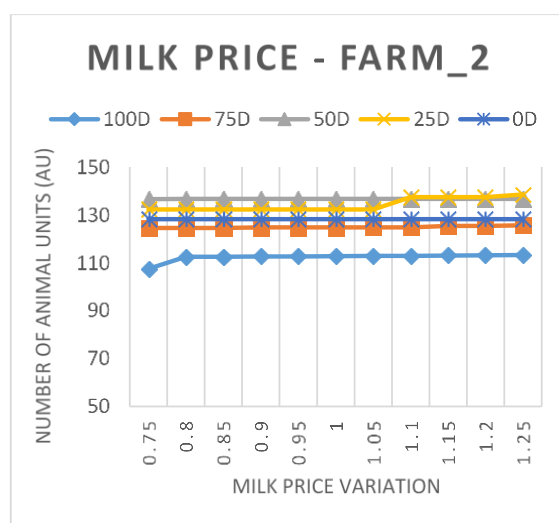
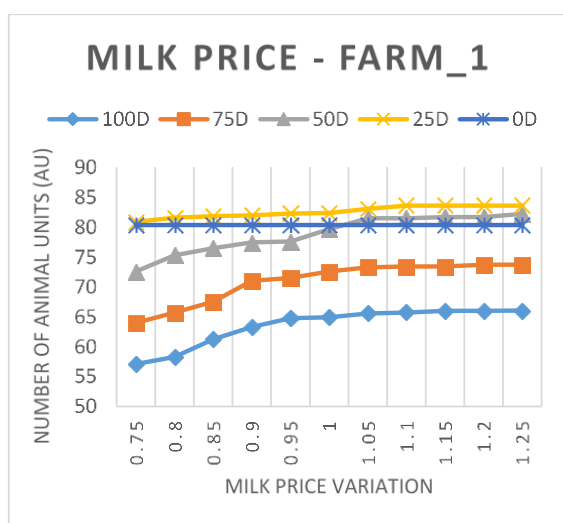
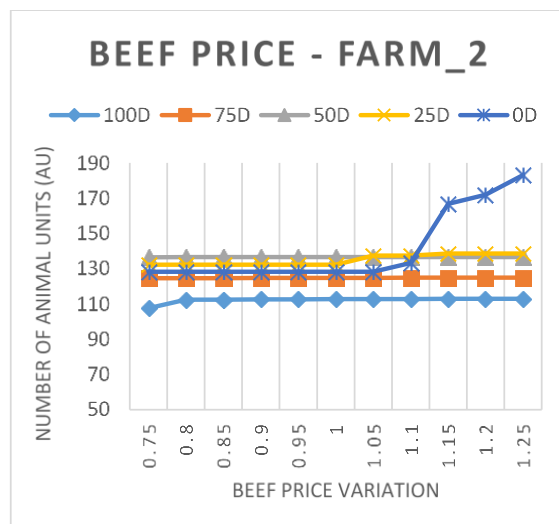
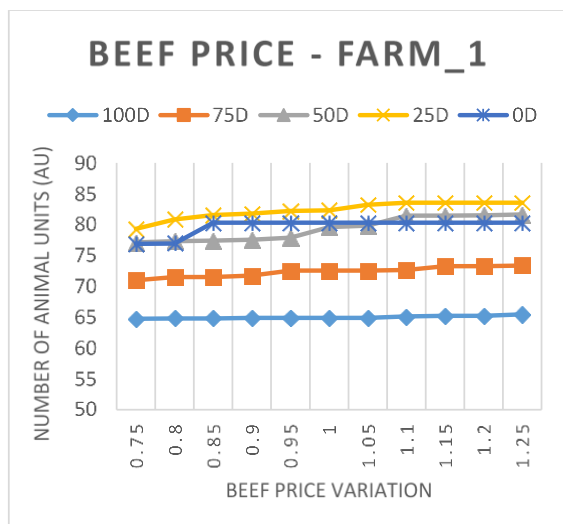


Figure. 2. Number of animal units (AU) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25). Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd

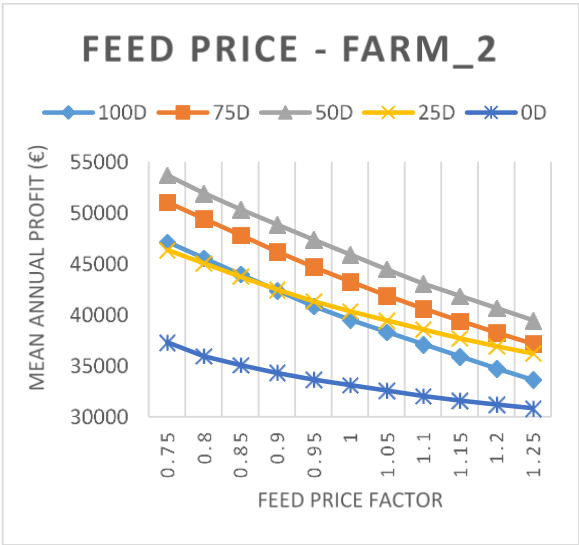
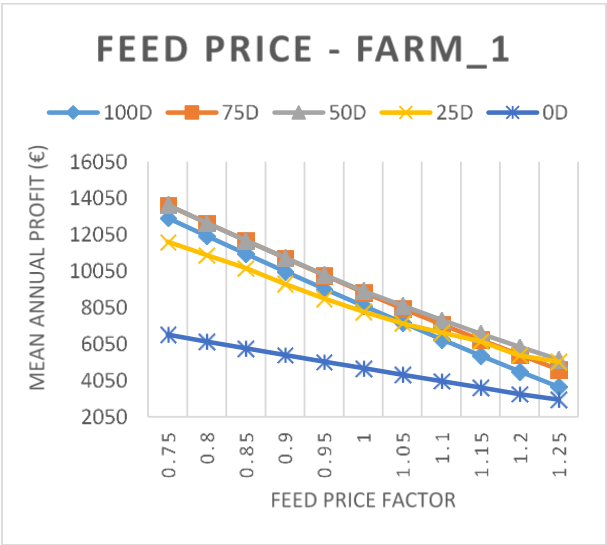
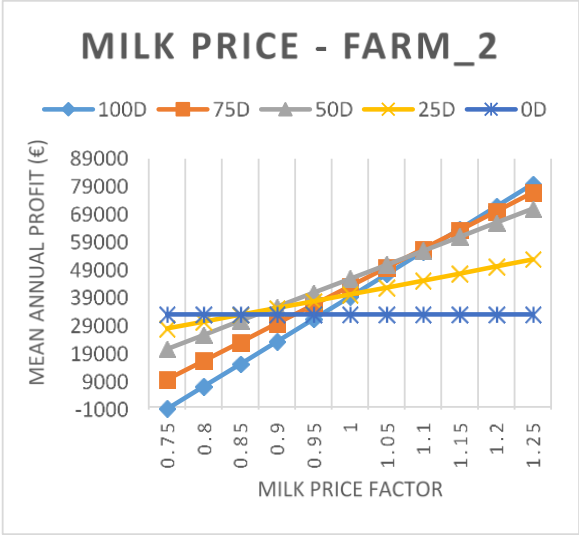
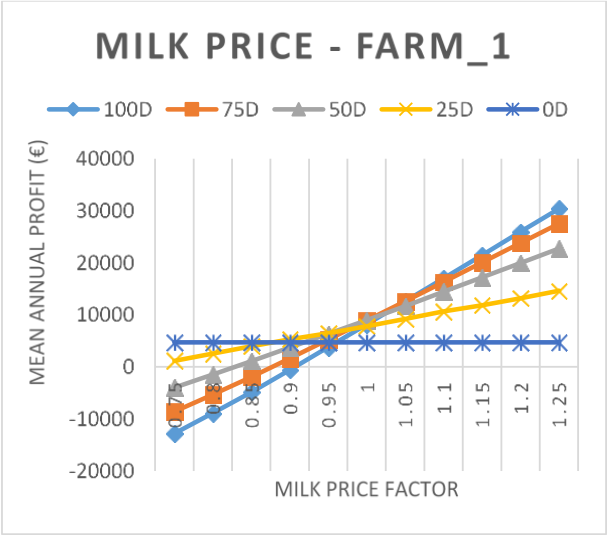
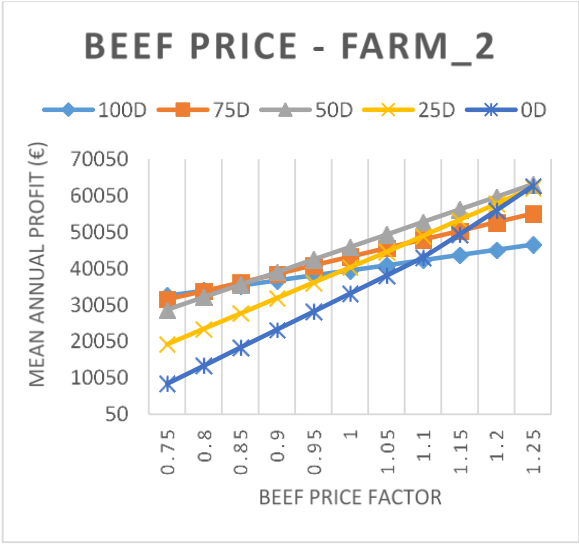
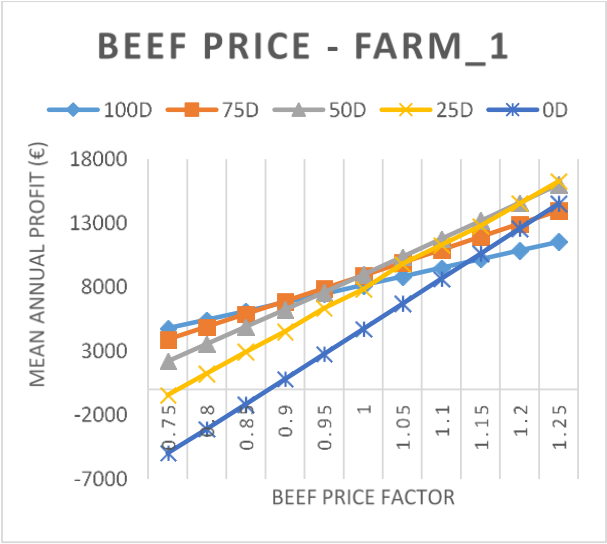


Figure. 3. Mean net profit (€) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25). Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd

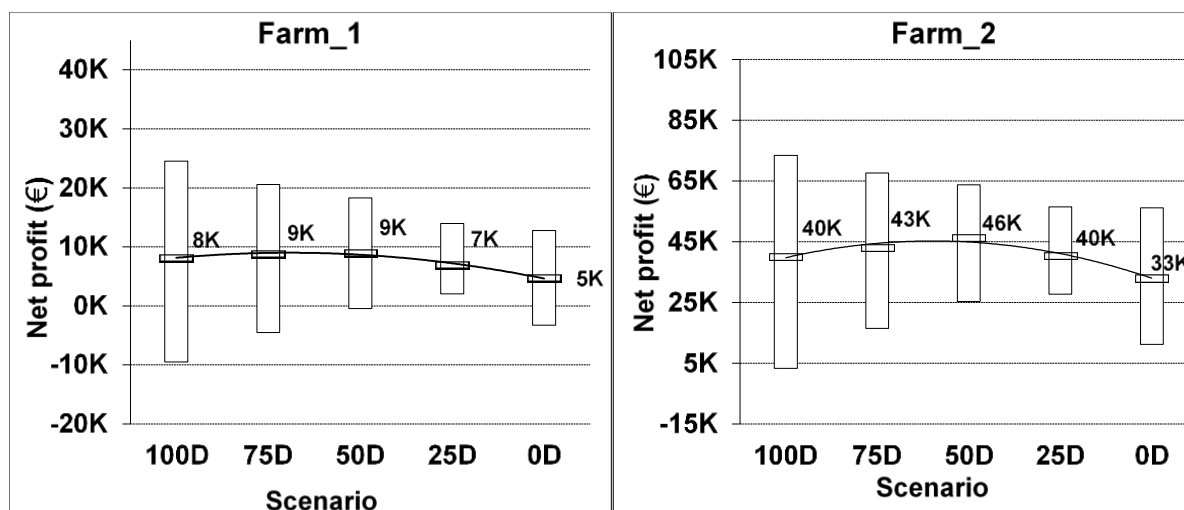


Figure. 4. Boxplots of net profit from 27 simulations in scenarios of Farm_1 and Farm 2 in which prices of milk, beef, and “concentrated feed” varied simultaneously among three levels. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd and K = kilo (10^3).

Table- 1. Main characteristics of mixed cattle systems Farm_1 (moderate size with summer grazing) and Farm_2 (large size with scattered fields and some crops) (Farms BL18 and BL22, respectively, in Chambre d'Agriculture du Cantal (2015))

Characteristic	Farm_1	Farm_2
Beef cattle breed	Salers	Aubrac
Dairy cattle breed	Prim'Holstein	Montbéliard
No. of dairy animal units (AU)	44	72
No. of beef AU	44	55
No. of dairy cows	32	49
No. of beef cows	35	40
Milk sold (kL/yr)	180	300
Milk production (L/dairy cow/yr)	5860	6433
Stocking rate (AU/ha on-farm forage area)	1.26	1.18
Utilized agricultural area (ha)	70	112
Summer pastures (ha)	30	0
On-farm forage area (ha)	70	108
Pasture area (ha)	70	107
Cereal area (ha)	0	5
Forage crop area (ha)	0	0

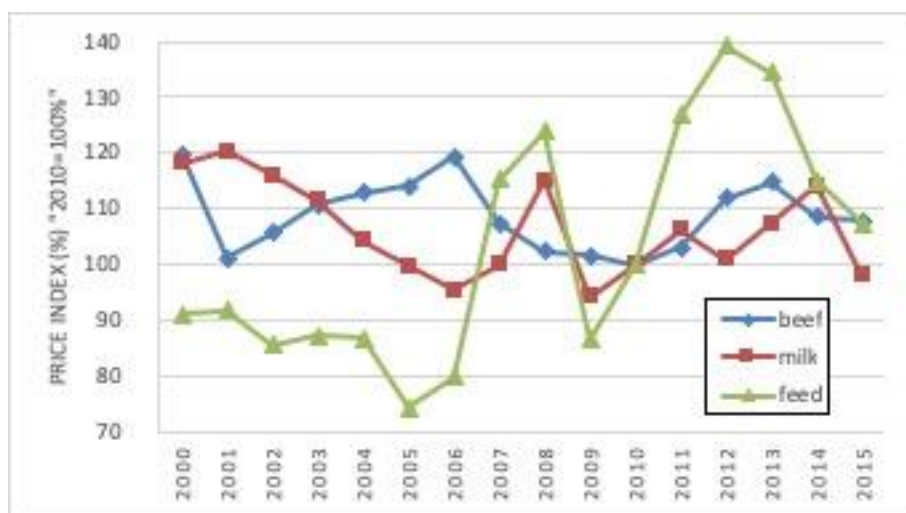
Table- 2. Baseline values of technical, biological, and economic outputs for the five scenarios of the two farms. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

Technical output	Farm_1					Farm_2				
	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Mean net profit (k€/yr)	8.2	8.9	9.0	7.8	4.7	39.5	43.2	45.9	40.3	33.1
Animal units (AU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Stocking density (AU/ha forage area)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Milk produced (kL/yr)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Beef produced (t/yr)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Milk sold (k€/yr)	88	74	54	28	0	166	138	103	50	0
Beef sold (k€/yr)	13	20	28	34	39	28	47	69	84	99
Concentrated feed purchased (t/yr)	62	63	61	44	20	82	97	110	55	26
Concentrated feed produced (t/yr)	0	0	0	0	0	21	21	21	21	21
Concentrated feed consumed (t/AU/yr)	0.95	0.86	0.76	0.54	0.25	0.73	0.94	0.96	0.58	0.37
Mean concentrated feed purchased (k€/yr)	18	18	17	13	7	25	28	29	18	11
Total pasture grass available (t DM)	247	239	230	219	202	276	310	344	340	348
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Total grazed grass (t DM)	144	173	195	179	171	199	260	305	340	312
Grazed grass per AU (t DM/AU)	2.21	2.39	2.45	2.18	2.13	1.76	2.08	2.23	2.57	2.43
Total grass harvested (t DM)	143	148	155	162	173	342	320	282	290	269
Grass harvested per AU (t DM/AU)	2.20	2.05	1.94	1.97	2.15	3.04	2.56	2.07	2.19	2.10
Total fodder consumed (t DM)	287	322	350	341	343	541	580	587	630	580
Fodder consumed per AU (t DM/AU)	4.42	4.41	4.38	4.16	4.29	4.79	4.64	4.28	4.77	4.53

Table- 3. Mean local sensitivity indices and global sensitivity indices (elasticities) calculated for the five scenarios of the two farms over 16 simulated years. Bold values are maximum absolute values among scenarios for a given change in price. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

Farm	Sensitivity index	Price varied	100D	75D	50D	25D	0D
Farm_1	Local	Beef	0.77	0.85	0.99	1.16	1.58
		Milk	1.47	1.36	1.25	1.08	0.00
		Feed	-2.69	-1.61	-1.12	-1.31	-0.94
	Global	Beef	1.54	2.11	2.89	4.12	8.20
		Milk	9.92	7.59	5.47	3.21	0.00
		Feed	-2.29	-2.05	-1.91	-1.68	-1.56
	Local	Beef	0.31	0.44	0.56	0.71	0.90
		Milk	1.03	0.89	0.73	0.48	0.00
		Feed	-0.44	-0.40	-0.40	-0.30	-0.21
Farm_2	Global	Beef	0.89	1.19	1.53	2.04	2.89
		Milk	4.09	3.09	2.16	1.21	0.00
		Feed	-0.67	-0.63	-0.61	-0.51	-0.52

Appendix 1. Price indices of agricultural products from 2000-2015 corrected for inflation for milk, beef, and “concentrated feed” (a weighted mean of several feeds) (“IPPAP” prices from INSEE (2018))



Appendix 2. Prices of feeds (per t) for the reference year (2010) (INSEE 2018) used to calculate the weighted mean of “concentrated feed” in the study’s metamodels

Feed	Price (€/t)
Wheat	160.50
Triticale	135.00
Barley	129.20
Weaner feed	206.00
Soybean meal	217.70
Weighted mean	223.03

Supplementary material

Table S 1. Virtual experimental design for Farm_1, varying prices of milk, beef, and “concentrated feed” among three levels simultaneously to analyze sensitivity in predicted net profit for five scenarios of dairy and beef cattle herd distribution: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd. “Base” refers to the baseline distribution of the farm’s dairy and beef herds.

No.	Price coefficient for			Price			Net profit					
	milk	beef	feed	milk (€/L)	beef (€/kg)	feed (€/t)	100D	75D	50D	25D	0D	base
1	0.75	1	1	0.238	2.386	223.03	-12818	-8607	-3978	1163	4725	-3978
2	1.25	1	1	0.397	2.386	223.03	30390	27510	22717	14609	4725	22717
3	1	1.25	1	0.318	2.983	223.03	11533	13969	16008	16273	14524	16008
4	1	0.75	1	0.318	1.790	223.03	4775	3907	2203	-441	-4970	2203
5	1	1	1	0.318	2.386	223.03	8148	8897	8966	7825	4725	8966
6	1	1	0.75	0.318	2.386	167.28	12959	13672	13686	11661	6562	13686
7	1	1	1.25	0.318	2.386	278.79	3704	4646	5193	5087	3001	5193
8	0.75	0.75	0.75	0.238	1.790	167.28	-12272	-9682	-6983	-4136	-3237	-6983
9	0.75	0.75	1.25	0.238	1.790	278.79	-18616	-15801	-12467	-8743	-6284	-12467
10	0.75	0.75	1	0.238	1.790	223.03	-15780	-12998	-10053	-6916	-4970	-10053
11	0.75	1.25	1.25	0.238	2.983	278.79	-13108	-7329	-777	6405	12762	-777
12	0.75	1.25	0.75	0.238	2.983	167.28	-5795	136	6923	13325	16361	6923
13	0.75	1.25	1	0.238	2.983	223.03	-9830	-4079	2576	9596	14524	2576
14	0.75	1	0.75	0.238	2.386	167.28	-9133	-4892	-143	4342	6562	-143
15	0.75	1	1.25	0.238	2.386	278.79	-15913	-11693	-6711	-1196	3001	-6711
16	1.25	1.25	1.25	0.397	2.983	278.79	28954	27822	25124	20442	12762	25124
17	1.25	1.25	0.75	0.397	2.983	167.28	39078	37839	35169	27459	16361	35169
18	1.25	1.25	1	0.397	2.983	223.03	33827	32633	29922	23860	14524	29922
19	1.25	0.75	0.75	0.397	1.790	167.28	32063	27379	20533	9997	-3237	20533
20	1.25	0.75	1.25	0.397	1.790	278.79	22131	17706	11414	3558	-6284	11414
21	1.25	0.75	1	0.397	1.790	223.03	26958	22389	15613	6199	-4970	15613
22	1.25	1	0.75	0.397	2.386	167.28	35567	32599	27850	18728	6562	27850
23	1.25	1	1.25	0.397	2.386	278.79	16586	14495	11263	6918	459	11263
24	1	1.25	1.25	0.318	2.983	278.79	6995	9522	11786	13345	12762	11786
25	1	1.25	0.75	0.318	2.983	167.28	16390	18797	20940	20392	16361	20940
26	1	0.75	0.75	0.318	1.790	167.28	9528	8549	6527	2930	-3237	6527
27	1	0.75	1.25	0.318	1.790	278.79	433	21	-1111	-2655	-6284	-1111

Table S 2. Virtual experimental design for Farm_2, varying prices of milk, beef, and “concentrated feed” among three levels simultaneously to analyze sensitivity in predicted net profit for five scenarios of dairy and beef cattle herd distribution: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd. “Base” refers to the baseline distribution of the farm’s dairy and beef herds.

Price coefficient for							Price				Net profit	
				milk	beef	feed						
No.	milk	beef	milk	(€/L)	(€/kg)	(€/t)	100D	75D	50D	25D	0D	Base
1	0.75	1	1	0.238	2.386	223.03	-654	9850	20796	28164	33127	17936
2	1.25	1	1	0.397	2.386	223.03	79918	76817	71040	52888	33127	73290
3	1	1.25	1	0.318	2.983	223.03	46550	55102	63126	62198	62699	61679
4	1	0.75	1	0.318	1.790	223.03	-654	9850	20796	28164	33127	17936
5	1	1	1	0.318	2.386	223.03	39531	43266	45916	40342	33127	45608
6	1	1	0.75	0.318	2.386	167.28	47165	51043	53691	46357	37315	53507
7	1	1	1.25	0.318	2.386	278.79	33635	37180	39488	36233	30854	39040
8	0.75	0.75	0.75	0.238	1.790	167.28	-200	5560	11054	11900	11292	9756
9	0.75	0.75	1.25	0.238	1.790	278.79	-11755	-6190	-559	3744	6153	-2085
10	0.75	0.75	1	0.238	1.790	223.03	-7011	-1425	3620	7092	8426	2331
11	0.75	1.25	1.25	0.238	2.983	278.79	384	15572	31718	45128	56144	27270
12	0.75	1.25	0.75	0.238	2.983	167.28	13787	29315	46381	55667	72864	41885
13	0.75	1.25	1	0.238	2.983	223.03	6287	21660	38007	49462	62699	34001
14	0.75	1	0.75	0.238	2.386	167.28	6761	17436	28288	33610	37315	25798
15	0.75	1	1.25	0.238	2.386	278.79	-5909	4230	14566	24056	30854	11790
16	1.25	1.25	1.25	0.397	2.983	278.79	80888	82166	81610	69568	56144	82276
17	1.25	1.25	0.75	0.397	2.983	167.28	94704	96729	97303	83984	72864	97603
18	1.25	1.25	1	0.397	2.983	223.03	86971	88736	88440	75549	62699	89375
19	1.25	0.75	0.75	0.397	1.790	167.28	80598	72819	61315	37047	11292	65134
20	1.25	0.75	1.25	0.397	1.790	278.79	66941	59162	47373	27339	6153	51242
21	1.25	0.75	1	0.397	1.790	223.03	72876	64930	53854	31448	8426	57440
22	1.25	1	0.75	0.397	2.386	167.28	87650	84766	79160	59103	37315	81298
23	1.25	1	1.25	0.397	2.386	278.79	73871	70373	64437	48411	30854	66484
24	1	1.25	1.25	0.318	2.983	278.79	40580	48856	56659	57306	56144	54768
25	1	1.25	0.75	0.318	2.983	167.28	54209	62952	71835	69911	72864	69620
26	1	0.75	0.75	0.318	1.790	167.28	40122	39147	36176	24307	11292	37439
27	1	0.75	1.25	0.318	1.790	278.79	27267	26129	22432	15161	6153	23803

Table S 3. Regression results for the metamodels of Farm_1, by scenario: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd. “Base” (excluded from the mean) refers to the baseline distribution of the farm’s dairy and beef herds.

	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	γ_{123}		F- statistic: on 7, with 19 df	p-value
Scenario	Intercept	MilkPrice	BeefPrice	FeedPrice	MilkPrice× BeefPrice	MilkPrice× FeedPrice	BeefPrice× FeedPrice	MilkPrice× BeefPrice× FeedPrice	R ²		
Base	-83092.5	242603	15823.8	892.3	-5857.7	-4467.2	-311.1	612.2	0.9915	317.0	< 2.2e-16
100D	-98661.8	350761.8	7369.6	609.7	-3388.5	-4380.8	-154.4	371.0	0.9933	400.2	< 2.2e-16
75D	-91110.4	303469.4	10892.3	698.4	-4259.9	-4407.6	-212.1	476.1	0.9923	347.9	< 2.2e-16
50D	-83092.5	242603	15823.8	892.3	-5857.7	-4467.2	-311.1	612.2	0.9915	317.0	< 2.2e-16
25D	-64750.3	148411	20735.7	759.2	-13260.3	-3501.4	-370.1	821.8	0.9916	318.5	< 2.2e-16
0D	-31691.5	8891.6	17172.4	-79.6	-12.5	-478.4	-41.7	0.7	0.9967	823.2	< 2.2e-16
Mean	-73861.3	210827.4	14398.8	576.0	-5355.8	-3447.1	-217.9	456.4	0.9931	317.0	< 2.2e-16

Table S 4. Regression results for the metamodels of Farm_2, by scenario: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd. “Base” (excluded from the mean) refers to the baseline distribution of the farm’s dairy and beef herds.

	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	γ_{123}		F- statistic: on 7, with 19 df	p-value
Scenario	Intercept	MilkPrice	BeefPrice	FeedPrice	MilkPrice× BeefPrice	MilkPrice× FeedPrice	BeefPrice× FeedPrice	MilkPrice× BeefPrice× FeedPrice	R ²		
Base	-147874.00	550679.30	20163.10	-195.70	-12791.00	-2589.40	-323.60	799.30	0.9922	346.9	< 2.2e-16
100D	-130560.10	454109.80	26160.50	-356.60	-7598.50	-1964.60	-263.20	514.70	0.9665	78.4	1.1e-12
75D	-117104.00	354017.00	35967.50	-169.60	-8725.00	-2291.20	-352.00	616.30	0.9805	136.3	7.0e-15
50D	-69197.78	103352.30	30545.07	-756.73	34573.98	1390.29	85.09	-1100.14	0.9959	654.9	< 2.2e-16
25D	-96360.00	506.70	63510.00	1231.00	-182.00	-0.01	-870.70	0.00	0.9937	426.6	< 2.2e-16
0D	-112219.18	292533.02	35269.23	-49.53	1055.50	-1090.98	-344.88	166.03	0.9521	54.0	3.3e-11
Mean	-121153.30	385180.60	33747.70	-250.80	-10063.60	-2187.30	-337.70	635.20	0.9777	270.0	< 2.2e-16

Table S 5. Values of Pr (> | t |) of coefficients for each scenario of Farm_1

	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	γ_{123}
								MilkPrice×
					MilkPrice×	MilkPrice×	BeefPrice×	BeefPrice×
Pr(> t)	Intercept	MilkPrice	BeefPrice	FeedPrice	BeefPrice	FeedPrice	FeedPrice	FeedPrice
100D	0.0303 *	0.0143 *	0.6751	0.7456	0.9501	0.4525	0.8413	0.8760
75D	0.0302 *	0.0205 *	0.5036	0.6874	0.9320	0.4135	0.7657	0.8282
50D	0.0210 *	0.0278 *	0.2574	0.5457	0.8900	0.3304	0.6074	0.7425
25D	0.0150 *	0.0615	0.0508	0.4841	0.6703	0.2993	0.4074	0.5491
0D	0.0273 *	0.8301	0.0052 **	0.8927	0.9994	0.7928	0.8635	0.9993

p-value: * = 0.05, ** = 0.01

Table S 6. Values of Pr (> | t |) of coefficients for each scenario of Farm_2

	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	γ_{123}
								MilkPrice×
					MilkPrice×	MilkPrice×	BeefPrice×	BeefPrice×
Pr(> t)	Intercept	MilkPrice	BeefPrice	FeedPrice	BeefPrice	FeedPrice	FeedPrice	FeedPrice
100D	0.424	0.336	0.789	0.981	0.956	0.917	0.922	0.938
75D	0.291	0.235	0.602	0.947	0.961	0.905	0.905	0.939
50D	0.023 *	0.026 *	0.080	0.936	0.886	0.725	0.685	0.818
25D	0.159	0.486	0.131	0.719	0.569	0.830	0.921	0.680
0D	0.501	0.999	0.285	0.844	0.999	1.000	0.735	1.000

p-value: * = 0.05

Table S 7. Characteristics of the main parameters of fields used for simulations

FIELD PARAMETERS	Farm_1	Farm_2
Temporary grassland "TG" (ha)	0	33
PA1 "Mountain pasture" (ha)	29.5	0
PA2 (ha)	5.5	20
PA3 (ha)	15	25
PA4 (ha)	12	15
PA5 (ha)	8	14
Crops (ha)	0	5
Max. TG that can be grazed by dairy cattle (%)	0	100
Max. PA1 that can be grazed by dairy cattle (%)	0	0
Max. PA2 to PA5 that can be grazed by dairy cattle (%)	70	65
Max. harvestable area for PA1 (%)	0	0
Max. harvestable area for TG and PA2 to PA5 (%)	100	100

CHAPITRE VII.

**Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts
environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers :
Analyse environnementale des systèmes bovins mixtes**

ARTICLE.3

A la suite de l'évaluation de la flexibilité des systèmes bovins mixtes aux aléas économiques, il s'avérait importants d'évaluer les performances environnementales de ces systèmes pour juger de leurs durabilités effectives. Cette étude avait comme objectif d'analyser les niveaux des services écosystémiques des systèmes d'élevage bovin mixtes laitier-allaitant parallèlement à leurs impacts environnementaux et performances économiques dans des situations de fonctionnement optimisées. L'enjeu était d'identifier les systèmes qui minimisent la dégradation de l'environnement avec les meilleures performances économiques et niveaux de services écosystémiques. Nous avons fait l'hypothèse que les systèmes bovins mixtes herbagers permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances économiques et environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations de prairies. Le principe était d'analyser plusieurs critères à l'aide des sorties de simulations du modèle Orfee parallèlement à des paramètres issus des typologies régionale (Typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif central) et nationale (Typologie des prairies permanentes française (Launay et al. 2011)) de prairies pour caractériser les systèmes les plus responsables sur le plan environnemental. A la suite de simulations réalisées selon un plan d'expérience avec cinq répartitions de troupeaux avec le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee, l'analyse simultanée des bilans de gaz à effet de serre GES (CO₂, CH₄, N₂O), de la consommation d'énergie, des niveaux des services écosystémiques et de l'utilisation de la biomasse a permis d'identifier les systèmes bovins mixtes comme les systèmes permettant d'anticiper des problèmes économiques dans les conditions de changement climatique. Les systèmes bovins mixtes présentent des émissions de GES à l'échelle de l'exploitation et des éq CO₂ par unité de protéine produite, équilibrés comparés aux systèmes spécialisés. Ces systèmes favorisent une utilisation durable de la biomasse et un meilleur compromis entre les principaux services écosystémiques, ainsi que de bonnes performances économiques. L'article ci-après est le développement de ce travail.

Impacts environnementaux et évolution des services écosystémiques des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers : simulation bioéconomique

Z. Diakité^{1a}, C. Mosnier¹, G. Brunschwig¹, R. Baumont¹

¹Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^aCorresponding author: Zakary Rodrigue Diakité. E-mail : zakary.diakite@vetagro-sup.fr

Titre court : Evaluation environnementale des systèmes d'élevage bovins mixtes

Abstract

Management practices of cattle production systems are continually being improved, especially in the search for feed and forage autonomy of farms. Mixed dairy-beef cattle systems are preferred in mountain zones because they adapt to natural constraints to improve use of forage resources and resist economic variations. We aimed to assess levels of ecosystem services of mixed dairy-beef cattle systems, along with their environmental impacts and energy use, when their functioning was optimized from an economic viewpoint. We hypothesized that mixed dairy-beef cattle systems use biomass well, with better economic and environmental performances, while conserving ecosystem services of pasture vegetation. Based on a two dimensions experimental design, five scenarios of herd distribution (100D, 75D, 50D, 25D and 0D, where D represents the percentage of dairy cattle in the herd) were simulated with the bioeconomic optimization model Orfee. Simultaneous assessment of greenhouse gas (GHG) emissions, energy use, levels of ecosystem services and biomass use identified mixed dairy-beef cattle systems as being those that were best prepared for economic variations and the problem of climate change. Mixed dairy-beef cattle systems had more balanced GHG emissions and energy use per unit area and per unit of usable protein mass, than those of specialized cattle systems. Mixed dairy-beef cattle systems favor sustainable use of biomass and a better compromise between the main ecosystem services and have good economic performances.

Keywords: simulation model, bioeconomic optimization, case study, fields arrangement, typology, mixed cattle herds, ecosystem services, greenhouse gas, biomass

Résumé

Les modes de gestion des systèmes d'élevage bovin sont continuellement soumis à des améliorations notamment pour la recherche de l'autonomie alimentaire dans les exploitations. On privilégie dans les zones de montagnes les systèmes bovins mixtes qui s'accommodent aux contraintes naturelles pour mieux valoriser les ressources herbagères et faire face aux aléas économiques. Notre objectif était d'analyser les niveaux des services écosystémiques des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant parallèlement à leurs impacts environnementaux et leurs consommations d'énergie lorsque leur fonctionnement est optimisé sur une base économique. On fait l'hypothèse que les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances économiques et environnementales en maintenant les services écosystémiques liés aux végétations de prairies. Sur la base d'un plan d'expérience à deux dimensions, cinq scénarios de répartition de troupeau (100D, 75D, 50D, 25D et 0D : D% étant le pourcentage d'UGB bovin laitier avec la différence en UGB bovin allaitant) ont été simulés avec le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee. L'analyse simultanée des bilans de gaz à effet de serre (GES), des consommations d'énergie, des niveaux des services écosystémiques et de l'utilisation de la biomasse permet par la suite d'identifier les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant comme des systèmes d'élevage bovin permettant d'anticiper des problèmes économiques parallèlement au problème de changement climatique. Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant présentent des émissions de GES par unité de surface, par unité de protéine valorisable et des consommations d'énergie équilibrées comparé aux systèmes bovins spécialisés. Ces systèmes favorisent une utilisation durable de la biomasse et un meilleur compromis entre les principaux services écosystémiques en plus d'avoir de bonnes performances économiques.

Mots-clés : Modèle de simulation, optimisation bioéconomique, cas-type, parcellaires, typologie, troupeaux bovins mixtes, services écosystémiques, gaz à effet de serre, biomasse

Implications :

- Les systèmes bovins mixtes favorisent une utilisation durable de la biomasse avec des performances environnementales et énergétiques équilibrées comparé aux systèmes spécialisés
- Les systèmes bovins mixtes permettent un meilleur compromis entre les différents services écosystémiques en plus d'avoir de bonnes performances économiques.
- Les systèmes mixtes permettant d'anticiper le problème de changement climatique parallèlement aux problèmes économiques.

1. Introduction

Avec le phénomène d'extensification, les élevages herbivores notamment les élevages bovins herbagers ont de plus en plus tendance à se développer. Cela est fortement perçu dans les zones de montagnes qui disposent d'énormes potentiels en herbe. Parallèlement les systèmes bovins mixtes laitier-allaitant dans ces zones sont reconnus pour permettre une meilleure valorisation des ressources herbagères, faire face aux aléas économiques, naturels mais aussi s'accommoder aux contraintes naturelles pour la production (Diakit^é et al in review). Cependant les prairies permanentes constituent une énorme source de biodiversité et un important moyen de stockage de carbone et de protection contre l'érosion (Duru *et al.*, 1998; Thiébaud *et al.*, 2001; Jouven, 2006). Par ailleurs la problématique environnementale devient de plus en plus préoccupante et les agriculteurs se trouvent de plus en plus contraints par des cahiers de charges pour tendre à minimiser les impacts environnementaux des systèmes de production. Dans un tel contexte, la définition de modes de conduite durables pour les systèmes d'élevages bovins dans des zones à contraintes naturelles présente un enjeu scientifique majeur non encore exploré. L'objectif de cette étude était d'analyser les niveaux des services écosystémiques des exploitations bovins herbagers parallèlement à leurs impacts environnementaux et performances économiques dans des situations de fonctionnement optimisées afin d'identifier les systèmes bovins les plus durables. Nous avons fait l'hypothèse que les systèmes

bovins mixtes herbagers permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances économiques et environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations de prairies. Des simulations ont été réalisées avec le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Mosnier *et al.*, 2017) qui a la particularité d'optimiser les modes de fonctionnement des exploitations sur la base de l'optimisation du profit. Nous avons réalisé des analyses multicritères à l'aide des sorties de simulations (réalisées à partir d'un plan d'expérience avec cinq répartitions de troupeaux entre bovins laitiers et bovins allaitants) combinées aux informations issues de la superposition de la typologie nationale des prairies permanentes française (Launay *et al.*, 2011) et de la Typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif Central (Typologie régionale) pour identifier les systèmes qui minimisent la dégradation de l'environnement avec des meilleurs performances économiques et niveaux de services écosystémiques .

2. Matériel et méthodes

2.1 Modèle et systèmes de production utilisés

2.1.1 Description du modèle

Le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee représente la production annuelle d'une ferme à l'équilibre (exploitation viable) avec un pas de temps mensuel (Mosnier *et al.*, 2017). Il a été utilisé ici pour optimiser les décisions relatives à la taille du troupeau, à la composition des rations, à l'utilisation des prairies et à l'achat d'aliment pour maximiser une fonction objective du type espérance-variance qui maximise l'espérance du résultat courant net. La fonction objective (le résultat courant) est constituée par la somme des produits d'exploitations (ventes plus subventions) à laquelle on soustrait les charges liées au fonctionnement de l'exploitation, à l'amortissement des bâtiments et du matériel et à la rémunération du travail (hors gestion). L'optimisation est réalisée sous une série de contraintes concernant l'alimentation des animaux, la démographie du troupeau, les opérations agricoles, la mécanisation, l'utilisation de l'espace, les ressources agricoles, et les processus biotechniques et biologiques liés aux animaux (Mosnier *et al.*, 2017). Orfee est implémenté sous la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System) (McCarl, 2004). Il a été adapté pour prendre en compte les contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcellaires basées sur la

typologie française des prairies permanentes (Launay *et al.*, 2011) (Diakité *et al.*, in review). Le modèle utilise pour les simulations les données relatives à la main-d'œuvre (nombre d'UTH, nombre de titulaires et non titulaires), aux caractéristiques pédologiques (type de sol, fertilité du sol), aux surfaces des parcelles, et au mode de gestion, caractérisé par la répartition des périodes de vêlage, de traite et de pâturage, et la composition des rations alimentaires. On utilise des données zootechniques (effectifs, les différentes catégories de bovins, leurs espèces et races, les caractéristiques biologiques et de production) des données économiques (les aides, les Droits de Prémption Urbain, les indemnités compensatoires de handicap naturel, les primes par vache allaitante, les primes herbagères agro-environnementales, les charges de la main-d'œuvre, les prix des intrants...). Les prix des intrants et des produits agricoles sont déterminés à partir des indices de prix et les prix de l'INSEE de 2000 à 2015, l'année de référence étant l'année 2010 (INSEE, 2018). On utilise également des données structurelles, à savoir le type de bâtiment et d'équipement, en précisant leurs capacités, caractéristiques et consommations d'énergie. A cela s'ajoute les rendements et valeurs alimentaires des prairies. Dans le cadre de cette étude, lors des simulations les types d'animaux et les proportions d'unités de gros bétail (UGB) (laitier/allaitant) des troupeaux sont fixes, tandis que le nombre total d'UGB dans l'exploitation, l'assolement et les rations des animaux sont optimisés. A la suite des simulations, le modèle fournit des prédictions de l'assolement, la fertilisation, les productions et consommation végétales (les taux de pâturage par UGB, les quantités de récolte par UGB, les quantités totales de ressources en herbes pâturées et fauchées par UGB), les rations alimentaires, les productions animale (lait/viande), la démographie des troupeaux, les achats d'intrants et vente de produits, les résultats économiques de l'exploitation, la quantité de travail et les impacts environnementaux, en particulier les émissions de gaz à effet de serre et des allocations des émissions de gaz à effet de serre par unité de produits d'exploitation.

2.1.2 Les systèmes de production étudiés

On considère cinq distributions de troupeaux, soit cinq scénarios pour chaque exploitation avec des troupeaux mixtes avec un pourcentage décroissant de bovins laitiers dans l'UGB totale : 100 % (troupeau laitier, 100D), 75 % (troupeau à dominante laitier, 75D), 50 % (troupeau équilibré lait-viande, 50D), 25 % (troupeau à dominante allaitant, 25D) et 0 % (troupeau allaitant, 0D).

Ces cinq distributions sont appliquées aux deux exploitations types (BL18 "Ferme_1" et BL22 "Ferme_2") (Tableau 1) avec des troupeaux bovins mixtes herbagers, qui sont issues de la base de données DIAPASON (Charroin *et al.*, 2005). Les exploitations types utilisées présentent des différences prononcées selon le troupeau, la taille de l'exploitation et la configuration du parcellaire. Ces exploitations sont représentatives des exploitations de montagne. La Ferme 1 représente une exploitation de taille moyenne avec une proportion de bovin lait-viande (prim'Holstein et salers) équilibrée. Une partie des surfaces correspond à des estives. La ferme 2 est une exploitation de grande dimension avec un système modernisé lait-viande (montbéliarde et aubrac). Son parcellaire est éclaté et comprend une petite partie de cultures. Les données et les paramètres utilisés pour les simulations sont détaillés dans les tableaux ci-après :

Tableau- 1. Caractéristiques et récapitulatif des principaux paramètres de simulation des cas-types de BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2).

Principales données et paramètres de simulation	Ferme_1	Ferme_2
Caractéristiques générales du cas type	Système lait-viande équilibré de taille moyenne avec estive	Système lait-viande modernisé de grande dimension avec parcellaire éclaté et des cultures
Races laitières	prim'Holstein	montbéliard
Races allaitantes	salers	aubrac
Chargement (UGB/ha SFP)	1,26	1,20
Nombre d'UGB lait	44	72
Nombre d'UGB viande	44	55
Nombre de vaches laitières	32	49

Nombre de vaches allaitantes	35	40
Litres de lait vendu par an (L/an) Potentiel laitier (L/vache laitière/an)	180 000 5 860	300 000 6 433
UMO Totales	2,0	2,1
UMO exploitants	2,0	2,0
UMO salariée	0,0	0,1
Surface agricole utile (ha)	70	112
Estives (ha)	30	0
SFP (ha)	70	108
Surface en herbe (ha)	70	107
Surface de céréales (ha)	0	5
Surface de cultures fourragères (ha)	0	0
Nombre d'UGB total	88	127
Troupeau laitier : %UGB	50%	57%
Troupeau allaitant : %UGB	50%	43%
Nombre de vache laitières	33	49
Nombre de vaches allaitantes	35	40
SAU (ha)	70	112
SFP (ha)	70	107
Prairies temporaires (ha)	0	33
Prairies permanentes (ha)	70	0
Répartition en PA1 "estive" (ha)	30	0
Répartition en PA2 (ha)	5,5	20
Répartition en PA3 (ha)	15	25
Répartition en PA4 (ha)	12	15
Répartition en PA5 (ha)	8	14
Cultures (ha)	0	5
% max pâturable de prairie temporaire par les vaches laitières	100%	100%
% max pâturable PA1 (estive) par les vaches laitières	0%	0%
% max de PA2 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA3 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA4 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA5 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
Quota laitier (L/ans)	180000	300000
UMO	2	2,1

UGB : Unités de Gros Bétail

SFP : Surface Fourragère Principale

Source : *Référentiel cantal cas-types lait 2016 (conjoncture 2015) (Chambre d'Agriculture du Cantal, 2015)*

2.2 Évaluation environnementale

2.2.1 Impacts environnementaux : consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre

Les bilans des gaz à effet de serre (GES) tiennent compte des émissions de CO₂ issues des achats d'aliments du fonctionnement et de la mécanisation, des émissions de CH₄ issues des déjections des animaux, de la fermentation entérique et des émissions de N₂O issues de la fertilisation, du lisier et du lessivage. Les consommations d'énergie proviennent des consommations d'énergie directe (pétrole et électricité consommés en exploitation) et des consommations d'énergie indirectes (énergie relative aux achats d'aliments et à la fertilisation). Les impacts environnementaux des systèmes étudiés s'observent à partir des bilans des différents GES calculés par le modèle, ainsi que de la consommation totale d'énergie calculée à partir de la somme des consommations d'énergie fournies par le modèle pour le pétrole, l'électricité, les achats d'aliments et la fertilisation. Orfee calcule en effet les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O) et les quantités d'énergie consommées en Méga Joules (MJ). Ces valeurs correspondent à des valeurs annuelles. A l'aide des Pouvoir de Réchauffement Global à 100 ans (PRG) des principaux GES définis par le GIEC (2007) soit 1 pour le CO₂, 25 pour CH₄ et 298 pour N₂O (Pachauri and Reisinger, 2008), on détermine les quantités totales d'émissions des GES de l'exploitation en éq CO₂ en faisant la somme des émissions pour le CO₂, le CH₄ et le N₂O.

On calcule de la même manière dans le cas des énergies consommées en faisant la somme des énergies issues de l'utilisation du pétrole et de l'électricité, des achats d'aliment et de la fertilisation.

De plus, on détermine les émissions de GES par unité de surface (ha), par UGB et par unité de production animale notamment par unité de protéines valorisable produite. Les productions animales (production de viande et de lait) calculés par le modèle sont converties en protéine valorisables afin d'évaluer les émissions (total éq CO₂) et la consommation d'énergie (énergie totale consommée) par unité de protéine animale valorisable produites. Pour cela on considère que la viande bovine contient de 26 à 31% de protéines (BAUCHART *et al.*, 2008) soit une moyenne de 28,5% et le lait de vache 3,2% (Chatellier *et al.*, 2013).

Tout le long de notre analyse on observe des variations de production qui n'entraînent pas les mêmes impacts environnementaux ni les mêmes consommations d'énergie selon les exploitations et les scénarios. Il était donc nécessaire d'exprimer les prédictions du modèle selon des unités fonctionnelles (à l'échelle de l'exploitation, par Unité de surface (ha) par Unité Gros Bovin (UGB) mais aussi par Unité de protéine valorisable) qui permette d'évaluer les performances environnementales des différents systèmes en relation avec les principaux facteurs de productions et les productions elle-même.

2.2.2 Evolution des services écosystémiques

2.2.2.1 Les typologies

- **Typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif central : Typologie régionale**

On utilise la typologie multifonctionnelle de la zone fromagère AOP du Massif central (typologie régionale) qui est un outil d'étude des écosystèmes de prairies à destination des éleveurs dans le cadre de la production fromagère AOP du Massif central. Cette typologie a été élaborée à partir de 15 exploitations de la région de référence à raison de 5 prairies par exploitation et elle couvre six zones d'appellation (saint-nectaire, cantal, laguiole, salers, bleu d'Auvergne et fourme d'Ambert). Il s'agit principalement de prairies permanentes. On considère la version simplifiée qui présente 23 types de prairies qui ont fait l'objet de mesure spécifiques. Les types de prairie sont identifiés en fonction des pratiques et des caractéristiques du milieu. Cette typologie fournit des informations sur la composition en espèces (espèces dominantes, la qualité nutritive et les rendements des prairies), les différents services agricoles, écologiques et environnementaux, mais surtout les évolutions des types de prairie sous l'effet des changements de pratiques. Les correspondances entre les 23 types de prairies répertoriés dans cette typologie et celles de la typologie des prairies permanentes française sur laquelle nous nous appuyons également pour cette étude sont données pour chaque type de prairies (Cf. Typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif central).

▪ **Typologie des prairies permanentes française : Typologie nationale**

Avec la collaboration de 78 éleveurs repartis sur 25 départements dans 12 régions de la France, un échantillon de 190 prairies parmi 1500 prairies présélectionnées a servi à la réalisation de la typologie des prairies permanentes française à l'exception des parcours méditerranéens. 19 types de prairies sont définis dans cette typologie à partir de l'analyse de la composition botanique des prairies, la mesure de la production de l'herbe et de la valeur alimentaire des fourrages des échantillons de prairie. Les principaux critères utilisés pour couvrir la diversité des prairies étant : les pratiques [pâturage exclusif, fauche exclusif, fauche-pâturage], intensité d'utilisation [Chargement animal, durée de pâturage, nombre de coupe], le niveau de fertilisation minérale [forme minérale ou organique], le système d'élevage [bovin /ovin, lait/ viande et viande] et la zone géographique. Les références sur l'évolution saisonnière de la composition fonctionnelle des graminées, de la biomasse produite et de la valeur alimentaire sont proposées et mises en relation avec les valorisations fourragères possibles. La contribution des différents types de prairies aux services écosystémiques en lien avec la richesse et la diversité floristique est évaluée. Cette typologie constitue un outil pouvant être utilisé dans des démarches de diagnostic agro-environnemental à l'échelle de l'exploitation et du territoire (Cf. Typologie des prairies permanentes française), (Launay *et al.*, 2011).

2.2.2.2 Type de prairies et itinéraires techniques

▪ **Prairies d'altitude de la typologie nationale**

Les types de prairie considérés sont ceux rencontrés dans les zones d'implantation des systèmes bovins herbagers notamment les zones de montagnes. Il s'agit précisément des prairies d'altitude décrites dans la typologie des prairies permanentes française (la typologie nationale) à savoir :

Type PA1 : Les pâtures d'altitudes sèches et acides à fétuque rouge agrostides sont des prairies d'altitude présentes sur les terrains généralement pentus entre 600 et 1600 mètres d'altitude avec des sols acides, sec et peu fertiles. Ces prairies destinées exclusivement au pâturage sont majoritairement composées de graminées. Nous les avons associées tout au long de nos travaux aux estives.

Type PA2 : Les prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge sont des prairies d'altitude présentes sur les terrains entre 600 et 1200 m d'altitude sur des sols neutres, sec à sain et peu fertiles. Ces prairies majoritairement composées de grandes graminées peuvent être fauchées et ou pâturées.

Type PA3 : Les pâtures mixtes d'altitude bien fertilisées à ray-grass anglais et dactyle sont des prairies d'altitude que l'on retrouve sur les terrains généralement pentus entre 600 et 1100 mètres d'altitude avec des sols neutres, sec à sain avec un niveau de fertilité moyen voire fort. Elles sont majoritairement composées de grandes graminées. Généralement fauchées puis pâturées, ces végétations peuvent être valorisées exclusivement par pâturage si on limite l'importance des montées à épis et la floraison des graminées (pâturage dès le printemps).

Type PA4 : Les prairies mixte d'altitude à pâturin commun et ray-grass anglais sont des prairies d'altitude que l'on retrouve sur les terrains entre 700 et 1100 mètres d'altitude avec des sols acide à neutres, sain et un niveau de fertilité moyen. Elles sont majoritairement composées de grandes graminées. Généralement fauchées puis pâturées, ces végétations peuvent être valorisées exclusivement par pâturage si on limite l'importance des montées à épis et la floraison des graminées (pâturage dès le printemps).

Type PA5 : Les pâtures d'altitude fauchées ou peu pâturées à flouve odorante et pâtur commun sont des prairies d'altitude que l'on retrouve sur les terrains généralement pentus entre 600 et 900 mètres d'altitude avec des sols sain, acide à neutre, sain avec un niveau de fertilité moyen, voire fort. Elles sont majoritairement composées de grandes graminées. Généralement fauchées puis pâturées, ces végétations peuvent être exclusivement réservées à la fauche.

▪ **Les services écosystémiques considérés**

Trois services écosystémiques de régulation des prairies utilisés dans la typologie nationale sont considérés pour cette étude à savoir :

- **La contribution au maintien d'insectes pollinisateurs (SE1)** correspond à la proportion d'espèces végétales à mode de reproduction entomophile (dispersion du pollen par les insectes). Trois niveaux de contribution au maintien des insectes pollinisateur sont identifiés : la contribution faible (<5%),

contribution moyenne (entre 5 et 25%) et une forte contribution (>25%). Sur une échelle de 1 à 3, des notes sont respectivement attribuées à chaque type de prairies d'altitude pour sa contribution au maintien d'insectes pollinisateurs (Launay *et al.*, 2011).

- **La richesse floristique (SE2)** correspond au nombre d'espèces végétales quantifié lors du relevé botanique. Trois niveaux de richesse floristique sont identifiés dans la typologie à savoir niveau **faible** (nombre d'espèces inférieur à 25), **moyen** (nombre d'espèces entre 26 et 35) et **assez élevé** (nombre d'espèces supérieur à 35). Sur une échelle de 1 à 3 des notes sont respectivement attribuées à chaque type de prairies d'altitude (Launay *et al.*, 2011).
- **La conservation de la diversité floristique patrimoniale (SE3)** correspond au nombre d'espèces oligotrophes (caractéristiques des milieux pauvres). On distingue quatre niveaux de conservation de la diversité floristique patrimoniale dans la typologie à savoir niveau **nul** (nombre d'espèces oligotrophes inférieur à 5), **faible** (nombre d'espèces oligotrophes compris entre 5 et 9), **moyen** (nombre d'espèces oligotrophes compris entre 10 et 19) et **fort** (nombre d'espèces oligotrophes au-delà de 20). Sur une échelle de 0 à 3 des notes sont respectivement attribuées à ces quatre niveaux de conservation de la diversité floristique patrimoniale des types des prairies d'altitude (Launay *et al.*, 2011).

▪ Itinéraires techniques en élevage de montage

L'utilisation de la biomasse est appréhendée sur la base de quatre (4) itinéraires techniques (ITK*) couramment utilisés en polyculture élevage. Ces itinéraires techniques sont celles fréquemment rencontrés dans les systèmes bovins présents dans les zones de montagne telle que Massif Central, France). Ces itinéraires techniques on ensemble la particularité de couvrir la gamme d'itinéraires technique existante dans la zone d'étude :

ITK 1 : Pâturage toute l'année (avril –octobre)

ITK 2 : Fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne

ITK 3 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + pâturage été et automne

ITK 4 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + fauche été (regain)
+ pâturage automne

2.2.2.3 Évolution des services écosystémiques

▪ Superposition de la typologie nationale et de la typologie régionale

Afin d'identifier les correspondances entre les types de prairie des 2 typologies considérées on fait une synthèse des correspondances entre les 5 types de prairie d'altitude de la typologie des prairies permanentes française (Launay *et al.*, 2011) et les 23 types de la version simplifiée de la typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif central (Tableau 2).

- Les végétations de type PA1 de la typologie nationale sont majoritairement composées de graminées et associées aux prairies de type 6, 7, 16, 17 et 18 de la typologie régionale.
- Les végétations de types PA2 de la typologie nationale sont majoritairement composées de grandes graminées et associées aux prairies de type 1, 4 et 12 de la typologie régionale.
- Les végétations de types PA3 de la typologie nationale sont majoritairement composées de grandes graminées et associées aux prairies de type 2, 8, 9 et 19 de la typologie régionale.
- Les végétations de types PA4 de la typologie nationale sont majoritairement composées de grandes graminées et associées aux prairies de type 3, 10, 13 et 14 de la typologie régionale.
- Les végétations de types PA5 de la typologie nationale sont majoritairement composées de grandes graminées et associées aux prairies de type 5, 11 et 15 de la typologie régionale.

Tableau- 2. Correspondances entre les types de prairies de la typologie régionale et de la typologie nationale.

Typologie	Typologie Nationale	Typologie Régionale
Correspondances entre les types de prairie	PA1	Type 6, Type 7, Type 16, Type 17, Type 18
	PA2	Type 1, Type 4, Type 12
	PA3	Type 2, Type 8, Type 9, Type 19
	PA4	Type 3, Type 10, Type 13, Type 14
	PA5	Type 5, Type 11, Type 15

▪ **Services écosystémiques associés aux prairies d'altitude (notes /3)**

Les prairies de type PA1 ont respectivement pour leurs principaux services écosystémiques les notes de 1, 3 et 1 respectivement pour la contribution au maintien d'insectes pollinisateurs, la richesse floristique et la conservation de la diversité floristique patrimoniale (Tableau 3).

Les prairies de type PA2 ont respectivement pour leurs principaux services écosystémiques les notes de 1,5, 2 et 1 respectivement pour la contribution au maintien d'insectes pollinisateur, la richesse floristique et la conservation de la diversité floristique patrimoniale (Tableau 3).

Les prairies de type PA3 ont respectivement pour leurs principaux services écosystémiques les notes de 2,5, 2 et 1 respectivement pour la contribution au maintien d'insectes pollinisateur, la richesse floristique et la conservation de la diversité floristique patrimoniale (Tableau 3).

Les prairies de type PA4 ont respectivement pour leurs principaux services écosystémiques les notes de 2 2 et 1 respectivement pour la contribution au maintien d'insectes pollinisateur, la richesse floristique et la conservation de la diversité floristique patrimoniale (Tableau 3).

Les prairies de type PA5 ont respectivement pour leurs principaux services écosystémiques les notes de 2,5, 2 et 1 respectivement pour la contribution au maintien d'insectes pollinisateur, la richesse floristique et la conservation de la diversité floristique patrimoniale (Tableau 3).

Tableau- 3. Récapitulatif des notes des différents services écosystémiques associées aux types de prairie utilisés pour l'évaluation.

Type de végétation	SE1	SE2	SE3
PA1	1,0	3,0	1,0
PA2	1,5	2,0	1,0
PA3	2,5	2,0	1,0
PA4	2,0	2,0	1,0
PA5	2,5	2,0	1,0

Concernant la conservation de la diversité floristique patrimoniale, tous les types de prairies (PA1, PA2, PA3, PA4, PA5) pris en compte ont les mêmes niveaux de service environnementaux (Tableau 3). A l'exception du type PA1 particulièrement riche sur le plan floristique, les autres types ont quasiment les mêmes niveaux de richesse floristique à savoir la note 2 tandis qu'on a des notes de contribution au maintien des insectes pollinisateurs plus diversifiées à savoir 1, 1,5, 2,5, 2 et 2,5 respectivement pour les types PA1, PA2, PA3, PA4 et PA5.

▪ Évolution des types de prairie avec les pratiques agricoles

Le manque de précision sur le temps d'évolution des types de végétation vis à vis des pratiques agricoles nous a contraint à faire la simplification qui consiste à ne pas prendre en compte le temps dans nos travaux et à nous appuyer sur les typologies de prairies qui croisent les facteurs du milieu et de pratiques (Fleury *et al.*, 1988; Jeangros *et al.*, 1991) en proposant des évolutions en fonction des pratiques agricoles. On détermine ainsi à travers la typologie multifonctionnelle des prairies des zones fromagères AOP du Massif central les évolutions des types de prairie liées aux pratiques agricoles. Les pratiques agricoles considérées dans la typologie régionale pour définir les évolutions des types de prairie sont : le pâturage, la fauche, l'augmentation de la fertilisation, l'augmentation de la pression de coupe ou l'avancée de la date de fauche, voire un régime mixte (fauche-pâturage), l'enfrichement, le piétinement et la sous exploitation. On ne considère toutefois pour cette étude uniquement les pratiques de fauche, de pâturage et le régime mixte (fauche-pâturage), sans prendre en compte les évolutions liées à la fertilisation et au piétinement (chargement). La fertilisation est en effet limitée lors des simulations et le chargement de départ des

scénarios des fermes est équivalent, avec des variations peu significatives lors des simulations.

La transposition des évolutions pour les types de prairie de la typologie des prairies permanentes nationale conduit aux propositions suivantes :

PA1 : Ces types de prairies sont exclusivement dédiés au pâturage, ce qui permet de maintenir à l'équilibre la végétation.

PA2 : L'alternance de la fauche et du pâturage permet de maintenir à l'équilibre la végétation de ce type de prairie, tandis que le pâturage conduit ces prairies à évoluer vers le type PA1

PA3 : Le pâturage permet le maintien à l'équilibre de la végétation de ce type de prairie tandis que la fauche conduit ces prairies à évoluer vers le type PA4.

PA4 : Le pâturage exclusif conduit ces prairies à évoluer vers le type PA3 tandis que la fauche conduit ces prairies à évoluer vers le type PA5.

PA5 : La fauche de ces prairies permet d'avoir des fourrages de bonne valeur alimentaire pour les animaux exigeants et les repousses peuvent être fauchées pour fournir des regains d'excellente qualité. Les fauches maintiennent ainsi à l'équilibre la végétation de ce type tandis que le pâturage exclusif conduit ces prairies à évoluer vers les types PA1 et PA4.

La typologie nationale ne fournit hélas pas d'information sur les évolutions possible des types PA2 et PA5 lorsque ces prairies sont fauchées. Cependant les fauches font ici partie intégrante des pratiques mixtes (fauche-pâturage) qui maintiennent ces types de prairie à l'équilibre, d'où l'hypothèse d'un maintien à l'équilibre des prairies PA2 et PA5 pour les pratiques de fauche.

Tableau- 4. Notes (notes sur 3) correspondantes aux services écosystémiques associés aux prairies considérées en fonction des pratiques agricoles.

États		Notes après évolution :		
Type de végétation Initial	Type de végétation après évolution	Contribution au maintien des insectes pollinisateurs	Richesse floristique	Conservation de la diversité floristique patrimoniale
via les pratiques de Fauche				
PA2	PA2	1,5	2,0	1,0
PA3	PA4	2,0	2,0	1,0
PA4	PA5	2,5	2,0	1,0
PA5	PA5	2,5	2,0	1,0
via les pratiques de Pâturage				
PA1	PA1	1,0	3,0	1,0
PA2	PA1	1,0	3,0	1,0
PA3	PA3	2,5	2,0	1,0
PA4	PA3	2,5	2,0	1,0
PA5	PA1 & PA4	1,5	2,5	1,0

▪ Notes évoluées correspondantes aux scénarios

Pour évaluer la contribution de chaque scénario pour chaque ferme quant aux services écosystémiques qu'il procure, on s'appuie sur le calcul d'une moyenne pondérée par la surface des notes de chaque service. Ces notes peuvent être calculées pour la situation initiale ou pour la situation après évolution de la végétation :

Les notes sont déterminées en faisant des moyennes pondérées des notes associées aux surfaces couvertes par les combinaisons **types de végétation-pratique**.

2.2.3 Utilisation de la biomasse

On évalue l'utilisation de la biomasse à partir des taux de pâturage par UGB, des quantités de récolte par UGB, des quantités totales de ressources en herbes pâturées et fauchées par UGB et des taux de fauches précoces. Le modèle Orfee calcule ces valeurs tandis que les taux de fauches précoces sont déterminés à l'aide des calculs ci-après :

Les quantités de fauche précoces sont déterminées à partir des surfaces soumises aux fauches précoces, rapportées à la surface totale fauchée. La surface totale

fauchée étant la surface totale soumise aux itinéraires techniques ITK2, ITK3 et ITK4. Les surfaces d'ensilage fauchées lors de l'application des itinéraires techniques ITK3 et ITK4 correspondent aux fauches précoces (ensilage ou enrubannage récolté en fin mai), On a ainsi :

$$\text{Taux de fauches précoces} = (\text{surface ITK3} + \text{ITK4}) / (\text{surface ITK2} + \text{ITK3} + \text{ITK4})$$

NB : On prend en compte les prairies temporaires pour déterminer les différents taux de fauche à l'échelle de l'exploitation.

3. Résultats

3.1 Émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie

▪ Consommations d'énergie et émissions de GES dans les exploitations

Les consommations d'énergie issues de l'électricité, du pétrole, des achats d'aliments et de la fertilisation augmentent simultanément avec la part d'UGB bovin lait et le nombre total d'UGB dans l'exploitation. La consommation d'énergie totale dans l'exploitation a une tendance similaire, il en est de même pour les émissions de CO₂ qui sont liées à la consommation d'énergie. Cependant les émissions de CH₄ et de N₂O augmentent exclusivement avec le nombre total d'UGB dans l'exploitation. On a de fortes émissions de CH₄ et N₂O pour les scénarios qui permettent de maximiser le nombre total d'UGB de l'exploitation notamment les systèmes mixtes. A l'échelle de l'exploitation, les plus fortes émissions totales de GES correspondent aux systèmes intermédiaires qui d'une part comportent des troupeaux laitiers à l'origine d'importantes émissions de CO₂, mais qui d'autre part maximisent leur nombre total d'UGB. On a les plus grandes valeurs de cumuls d'émissions de GES pour les systèmes bovins mixtes par unité de surface, et en particulier pour les systèmes équilibrés en UGB bovin allaitant et UGB bovin laitier. Cependant les consommations d'énergie par unité de surface (hectare) augmentent avec la part d'UGB bovin laitier dans les troupeaux ainsi qu'avec l'augmentation du nombre total d'UGB dans l'exploitation (Tableau 5).

▪ Consommations d'énergie et émissions de GES par unité gros Bovins (UGB)

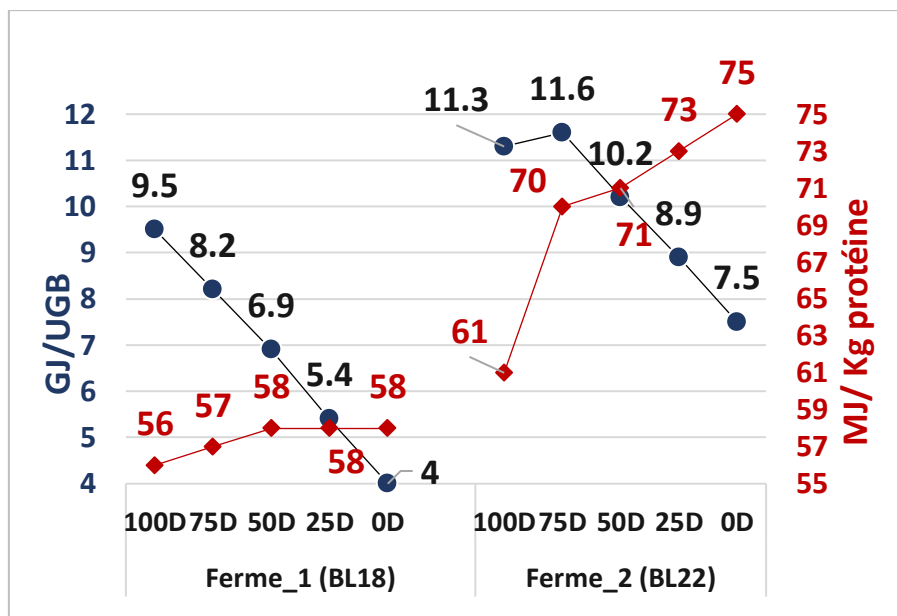
On a globalement des cumuls d'émission de GES et de consommation d'énergie par UGB qui augmentent avec la part d'UGB bovin laitier dans les troupeaux. Les systèmes bovins mixtes ont des émissions de GES et des consommations d'énergie par UGB intermédiaires, entre celles des systèmes spécialisés (100D et 0D), les valeurs associées aux systèmes laitiers étant les plus importantes (Tableau 5).

▪ **Consommations d'énergie et émission de GES par unité de protéine produite**

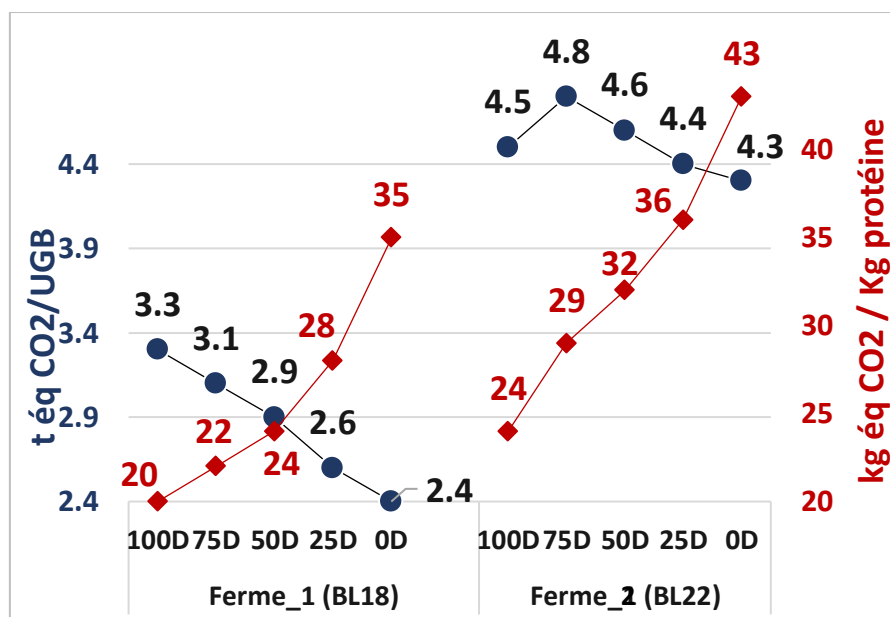
On a globalement des cumuls d'émissions de GES (CO₂, CH₄ et N₂O) et des consommations d'énergie par unité de protéines (kg protéine) qui augmentent avec la part d'UGB bovin allaitant dans les troupeaux (Tableau 5).

Tableau- 5. Récapitulatif des émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie selon différentes unités fonctionnelles.

Cas-types	Ferme 1					Ferme 2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Emissions totales de GES (tonne éq CO₂) et consommation totale d'énergie en Giga Joules (GJ)										
Emissions Totale de GES (tonne éq CO ₂)	217	227	231	216	192	512	606	636	587	550
Energie totale (GJ/UGB)	618	597	549	446	315	1283	1454	1400	1172	956
Émissions totales de GES par hectare (tonne éq CO₂/ha) et consommation totale d'énergie en Giga Joules par hectare (GJ/ha)										
Emissions Totale de GES à l'hectare (tonne éq CO ₂ /ha)	3,1	3,2	3,3	3,1	2,7	4,6	5,4	5,7	5,2	5,0
Energie Totale par hectare (GJ/ha)	8,8	8,5	7,8	6,4	4,5	11,5	13,0	12,5	10,5	8,5
Emissions totale de GES par UGB (tonnes éq CO₂ /UGB) et consommation totale d'énergie en Giga Joules par UGB (GJ/UGB)										
Emissions Totale de GES par UGB (t éq CO ₂ /UGB)	3,3	3,1	2,9	2,6	2,4	4,5	4,8	4,6	4,4	4,3
Energie totale consommée par UGB (GJ/UGB)	9,5	8,2	6,9	5,4	4,0	11,3	11,6	10,2	8,9	7,5
Emissions totales de GES en tonnes éq CO₂ par kg de protéine (tonne éq CO₂ / kg protéine) et consommation totale d'énergie en Giga Joules par kg de protéine (tonne éq CO₂ / kg protéine)										
Emissions Totale de GES par unité de protéine (kg éq CO ₂ / Kg protéine)	20	22	24	28	35	24	29	32	36	43
Energie totale consommée par unité de protéine (MJ/ Kg protéine)	56	57	58	58	58	61	70	71	73	75



Figure~ 1. Consommations totales d'énergie par UGB (GJ/UGB) et par unité de protéine (MJ/ Kg protéine)



Figure~ 2. Émissions totales de GES par UGB (tonnes eq CO2 /UGB) et par unité de protéine (kg eq CO2 / Kg protéine)

3.2 Services écosystémiques

Les itinéraires techniques (ITK*) sont appliqués par le modèle à des surfaces spécifiques pour chaque scénario afin d'optimiser le fonctionnement des exploitations sur la base de l'optimisation du profit. Le tableau ci-après fourni les distributions des parcelles, types de végétation avec les modes de valorisation (ITK*) qui leur sont appliqués lors que l'optimisation du fonctionnement des scénarios de chaque exploitation.

Tableau- 6. Distribution des parcelles, et modes de valorisation (ITK*).

Pasture (TI1)		Farm_1					Farm_2				
Type of grass valorization and correspondent use of the agricultural area in hectare											
Pasture (TI1)		100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
	SAU	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	112,0	112,0	112,0	112,0	112,0
	STH	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	107,0	107,0	107,0	107,0	107,0
	Culture	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	PT : Prairies Temporaires	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,0	33,0	33,0	33,0	33,0
	PP : Prairies permanentes	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
PT	Pâturage "IT1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	23,7	25,5	0,0	0,0
	Pâturage "IT1" (Biologique)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	22,6	24,7
	Foin "Fauche IT12"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage "Fauche IT3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage_foin "Fauche IT4"(Biologique)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,5	9,3	5,1	8,4	0,0
	Déprimage (IT4)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	8,3
PA1	Pâturage "IT1"	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Foin "Fauche IT12"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage "Fauche IT3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage_foin "Fauche IT4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PA2	Pâturage "IT1"	0,2	0,2	0,7	1,6	2,2	0,9	0,9	0,9	1,0	1,6
	Foin "Fauche IT12"	5,3	5,3	4,8	3,9	3,3	19,1	19,1	19,1	19,0	18,4
	Ensilage "Fauche IT3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage_foin "Fauche IT4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PA3	Pâturage "IT1"	0,5	0,6	0,6	0,1	0,0	0,8	0,2	0,2	0,2	0,0
	Foin "Fauche IT12"	14,5	14,4	14,4	14,9	15,0	0,0	22,3	19,8	22,9	25,0
	Ensilage "Fauche IT3"	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	24,2	2,5	5,0	1,8	0,0
	Ensilage_foin "Fauche IT4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PA4	Pâturage "IT1"	10,5	9,2	6,8	3,9	0,0	8,8	13,0	15,0	9,3	4,3
	Foin "Fauche IT12"	0,4	2,0	2,6	2,3	2,7	3,5	0,0	0,0	0,0	0,2
	Ensilage "Fauche IT3"	1,1	0,8	2,7	5,7	9,3	2,6	2,0	0,0	5,7	10,6
	Ensilage_foin "Fauche IT4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PA5	Pâturage "IT1"	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	1,2	12,1	14,0
	Foin "Fauche IT12"	7,8	8,0	8,0	8,0	8,0	13,3	13,3	12,8	1,9	0,0
	Ensilage "Fauche IT3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ensilage_foin "Fauche IT4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Les distributions des surfaces des parcelles en fonction des modes de valorisation permettent de déterminer les niveaux des services écosystémiques associés aux scénarios en fonction des pratiques (Tableau 7).

Tableau- 7. Tableau récapitulatif des niveaux (notes sur 3) des services écosystémiques des scénarios des deux fermes.

Cas-type	Ferme 1					Ferme 2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
SE1	1,89	1,9	1,892	1,872	1,86	2,111	2,108	2,099	1,903	1,865
SE2	1,21	1,209	1,224	1,259	1,28	1,018	1,018	1,023	1,121	1,145
SE3	2,21	2,209	2,224	2,259	2,28	2,018	2,018	2,023	2,121	2,145

On a des niveaux de services écosystémiques sensiblement égaux entre les scénarios de chaque Ferme (Tableau 7). Au niveau de la Ferme 1 la richesse floristique est le service le plus prononcé avec la note maximale de 2,3 sur une échelle de 3 pour le scénario 0D, il est suivi par la contribution au maintien des insectes pollinisateurs avec la note de 1,9 pour le scénario 100D et par la conservation de la diversité floristique patrimoniale avec une note maximale de 1,3 pour le scénario 0D. On observe les mêmes correspondances pour les valeurs maximales de la Ferme 2, la richesse floristique est le service le plus prononcé avec la note maximale 2,2 pour le scénario 0D, il est suivi par la contribution au maintien des insectes pollinisateurs avec la note de 2,1 pour le scénario 100D et par la conservation de la diversité floristique patrimoniale avec une note maximale de 1,1 pour le scénario 0D. Pour les deux Fermes les notes moyennes associées aux services écosystémiques correspondent plutôt à celles des scénarios intermédiaires d'où cette position de compromis pour les systèmes bovins mixtes laitier-allaitant en termes de maintien des services écosystémiques.

3.3 Utilisation de la biomasse

La distribution des parcelles en fonction des modes de valorisation (ITK*) permet de déterminer les différents taux de valorisation des ressources herbagères. Dans les deux fermes, en partant des distributions 50D, on a une augmentation des taux de fauches précoces avec le nombre d'UGB allaitant.

Tableau- 8. Tableau récapitulatif des modes et niveaux de valorisation de la biomasse.

Cas -types	Ferme 1					Ferme 2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Taux de pâturage (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Taux de fauche précoce (%)	3,7	2,9	8,2	16,5	24,4	54,1	20,1	16,4	29,0	30,2
Herbe pâturée par UGB (tMS/UGB)	2,21	2,39	2,45	2,18	2,13	1,76	2,08	2,23	2,57	2,43
Herbe récoltée par UGB (tMS/UGB)	2,2	2,05	1,94	1,97	2,15	3,04	2,56	2,07	2,19	2,1
Herbe pâturées et récoltées par UGB (tMS/UGB)	4,41	4,44	4,39	4,15	4,28	4,8	4,64	4,3	4,76	4,53

On a une utilisation totale de la biomasse (pâturage + fauche) entre 4,1 et 4,8 pour tous les scénarios des deux fermes. Cette utilisation des ressources en herbe a tendance à basculer globalement vers le pâturage lorsqu'il y a plus d'UGB bovins allaitant dans les troupeaux et vers les fauches lorsqu'il y a plus d'UGB bovins laitiers (Tableau 8). Toutefois les consommations varient avec les nombres d'UGB totaux et la structure de la ferme.

4. Discussion

4.1 Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre

Les bilans de GES et des consommations d'énergie sont essentiels à l'évaluation de la durabilité environnementale des exploitations. Les analyses laissent voir que les plus fortes consommations d'énergie correspondent aux scénarios spécialisés bovins lait car une forte quantité d'énergie ingérée est nécessaire à la production du lait soit 32MJ pour 1kg de lait (Upton *et al.*, 2013). Contrairement aux troupeaux allaitants, les troupeaux laitiers ont des consommations d'énergie fossile dues à la fois aux activités de traite, de récolte et au stockage important de fourrages du fait de leur exigence en termes de qualité de fourrage et de la contrainte de ne pas pouvoir faire pâturer par les vaches laitières les parcelles éloignées de l'étable (Andrieu *et al.*, 2007). Comparé à un élevage de bovins allaitant, l'énergie occupe une place importante dans un élevage de bovins laitiers ; elle est évaluée à hauteur de 10% des coûts de production du litre de lait en 2004 (Galan *et al.*, 2007). Les scénarios sont ainsi de moins en moins

énergivores et plus économiques lorsque le pourcentage d'UGB bovin allaitant augmente dans les troupeaux.

Les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des produits pétroliers, notamment pour la mécanisation, et les émissions de N₂O issues de la fertilisation, du lisier, du lessivage minéral restent ici modestes dans la mesure où nos scénarios favorisent l'autonomie fourragère. Les systèmes intégrant des troupeaux allaitants sollicitent moins de fertilisation et d'utilisations d'énergie fossile donc des émissions des GES liées à ces activités. On a ainsi des émissions de CO₂ et de N₂O assez réduites comparés aux émissions des CH₄ issus particulièrement de la fermentation entérique. Mais hélas les rations à base de foin engendrent plus d'émissions de CH₄ par fermentation entérique soit 19 g de CH₄/kg de lait alors que cette valeur pour une ration à base d'ensilage de maïs est de 14g de CH₄/kg de lait (Doreau *et al.*, 2011). Les émissions de CH₄ issues principalement de la fermentation entérique s'avèrent les plus importantes des GES. On enregistre ainsi les niveaux maximums d'émission de CH₄ pour les scénarios mixtes qui maximisent les nombre d'UGB de l'exploitation.

On enregistre les plus fortes émissions de GES au niveau des scénarios qui rassemblent tous les postes d'émission de GES (électricité, pétrole, fertilisation, fermentation entérique...), notamment les systèmes mixtes (les scénarios 50D). Toutefois lorsque ces émissions sont ramenées aux unités de production animale (UGB), les plus fortes émissions de GES s'observent au niveau des scénarios 100D. Vu le nombre d'UGB croissant en partant des scénarios 100D jusqu'aux scénarios 0D, on a globalement des émissions par UGB décroissantes du scénario 100D au scénario 0D. Les systèmes intégrant des troupeaux allaitants privilégient la valorisation de l'herbe par pâturage permettant ainsi de limiter la consommation d'énergie liée aux activités de récolte et de gestion des fourrages. Ces derniers contribuent également à la fertilisation via les déjections tout en évitant les consommations d'énergie pour la fertilisation, les récoltes et les conditionnement (Peyraud *et al.*, 2010). Les élevages bovins mixtes ont ainsi des consommations intermédiaires en énergie qui les rendent intéressants sur les plans environnemental et économique.

Parallèlement à l'évaluation globale des scénarios en qualité de systèmes, Il est important d'évaluer leur production sur une base commune. L'empreinte carbone de protéines valorisables s'avère l'indicateur idéal pour apprécier les spécificités des

systèmes en termes de production. La production des protéines représente un point commun aux deux troupeaux (troupeaux laitier et troupeaux allaitant) qui constituent chaque système. La quantité de protéines dans la viande cumulée à celle issue du lait rapporté aux consommations totales d'énergie et aux émissions totales de GES constituent des indicateurs pertinents pour juger de la durabilité environnementale des productions animales issues des exploitations bovins herbagers mixtes ou spécialisées (laitier ou allaitant) sur une base commune. Les protéines étant un produit commun à tous les systèmes, qu'ils soient mixtes, spécialisés laitier ou allaitant, l'expression des émissions de GES et des consommations d'énergie par unité de protéine permet alors d'évaluer sur une même base les performances environnementales et l'efficacité énergétique des systèmes en relation avec leurs productions animales. Les analyses basées sur cette unité fonctionnelle montrent que les systèmes mixtes présentent les meilleurs compromis en termes de performances environnementales et d'efficacité énergétique lorsque l'on met en relation la production de protéine avec les émissions de GES ou les consommations d'énergie. Les quantités de protéines produites valorisables augmentent avec la part d'UGB bovin laitier dans les troupeaux car les races laitières produisent de la viande riche en protéines en surtout plus de lait. Ainsi, l'empreinte carbone augmente avec l'augmentation des UGB laitiers dans les troupeaux. En effet l'écart entre les productions des protéines et les émissions des GES se réduit avec l'augmentation des UGB allaitants. Les productions de protéines étant supérieures aux émissions globales de GES, inversement aux consommations d'énergies. D'où de faibles émissions de GES et de consommations d'énergies par unité de protéine en partant des systèmes 100D vers les systèmes 0D.

Les systèmes intermédiaires constituent ainsi les meilleurs compromis en termes de consommation d'énergie et d'empreintes carbone par rapport aux productions animales obtenues. Les systèmes spécialisés laitiers s'avèrent être les plus énergivores mais avec une empreinte carbone par kg de protéines animales plus faible.

4.2 Services écosystémiques et Utilisation de la biomasse

Malgré un fonctionnement selon des pas de temps mensuel, le dispositif utilisé est statique et les notes associées aux évolutions des services écosystémiques fournis

par les végétations de prairies s'appuient sur un nombre limité de pratiques (fauche et pâturage). Les résultats sont donc à prendre avec précaution car une bonne appréhension de l'évolution des services écosystémiques fournis par les prairies nécessite un dispositif dynamique et un temps d'évolution long. En effet avec le modèle Orfee, il est impossible de prendre en compte avec suffisamment de précision le temps et la trajectoire d'évolution de la biodiversité en fonction des pratiques. D'où l'usage des typologies de prairies qui croisent les facteurs du milieu et/ou de pratiques en proposant des évolutions en fonction des pratiques les plus courantes (Fleury *et al.*, 1988; Jeangros *et al.*, 1991). Les typologies aident à rendre compte de l'hétérogénéité, voire du contraste de la biodiversité entre parcelles au sein d'une même exploitation. De plus le fait d'arriver aux mêmes cohérences de résultats pour deux cas types contrastés (au niveau de la structure des parcellaires ainsi qu'au niveau des compositions des troupeaux) avec la prise en compte d'un minimum de pratiques à savoir la fauche et le pâturage justifie la pertinence à notre approche.

Les simulations réalisées conduisent toutefois à percevoir le meilleur compromis entre les trois services écosystémiques considérés (Contribution au maintien des insectes pollinisateurs, Conservation de la diversité floristique patrimoniale, Richesse Floristique) pour les scénarios intermédiaires (75D,50D,25D).

Par ailleurs l'utilisation de la biomasse s'accroît avec le niveau d'intensification de l'exploitation. On a ainsi des taux de fauche précoce pour des scénarios de la Ferme 1 inférieurs aux scénarios correspondants de la Ferme 2. L'optimisation du fonctionnement des fermes sur la base de l'optimisation du profit favorise des niveaux similaires d'utilisation totale des ressources en herbe ramenés à l'UGB. Cette utilisation des ressources en herbes se répartit entre fauche et pâturage selon qu'il y ait plus d'UGB laitier ou d'UGB allaitant dans l'exploitation.

Les résultats respectent la logique que la diversité botanique est surtout favorisée par le pâturage et souvent la fauche à un seuil optimal, cependant lorsque les chargements sont trop élevés et la pression des fauches trop importantes la biodiversité décroît (Jouven *et al.*, 2007). Par ailleurs les éleveurs les moins chargés dégagent des revenus plus constants. Un moindre chargement se traduit par une sensibilité aux aléas plus atténuées.

La structure de l'exploitation est une caractéristique importante à prendre en compte car elle joue un rôle prépondérant à l'équilibre entre chargement animal et productivité des prairies (Loiseau, 1991). Par ailleurs le chargement animal à savoir le nombre d'animaux qu'un hectare de prairie peut nourrir pendant une période, s'avère d'une importance capitale. En effet le rapport entre chargement et productivité permet de définir un domaine où il est possible de concilier une production animale autonome et une utilisation durable des prairies (Balent *et al.*, 1999). De nombreux critères sont ainsi à prendre en compte dans la détermination des modes de conduites favorisant la préservation des services écosystémiques.

On a toutefois les meilleurs compromis entre niveaux des services écosystémiques, utilisation de la biomasse et consommation d'énergie au niveau des scénarios intermédiaires (75D,50D,25D). Globalement les systèmes conduisant simultanément des troupeaux bovins laitiers et des troupeaux bovins allaitants avec des proportions équilibrées obtiennent de meilleures performances de pâturage tout en favorisant le maintien des services écosystémiques de régulation liés au couvert végétal.

5. Conclusion

L'appréciation des impacts environnementaux (émission de GES et consommation d'énergie) est largement dépendante de la structure, du potentiel de production et la spécialisation phare (production de viande ou de lait) des systèmes. L'analyse simultanée des bilans de GES, de la consommation d'énergie, de l'évolution des services écosystémiques et de l'utilisation de la biomasse ne permet pas d'identifier de configuration de système (scénario) qui procure à la fois de meilleurs services économiques parallèlement à une moindre contribution au changement climatique. Les performances environnementales des systèmes ne peuvent être appréciées qu'en tenant compte d'une unité fonctionnelle (Exemple : GES et énergie /UGB & GES et énergie /kg protéine) donc de l'objectif de l'agriculteur en termes d'occupation du territoire ou de production alimentaire. Des systèmes présentant les meilleurs compromis entre performances environnementales, efficacies énergétique et maintien des services écosystémiques ne peuvent donc être identifiés indépendamment des objectifs de productions. Toutefois les systèmes bovins mixtes semblent favoriser une utilisation durable de la biomasse et un meilleur compromis entre les principaux services écosystémiques. De plus le niveau d'intensification de

l'exploitation devrait être modéré pour une utilisation durable de la biomasse. Par ailleurs, le dispositif d'exploration utilisé s'avère inadapté pour d'étudier les transitions ou les adaptations à des changements. Il serait ainsi intéressant d'évaluer les systèmes en question dans des conditions de fonctionnement dynamiques pour mieux appréhender l'évolution des services écosystémiques et de l'utilisation des ressources herbagères.

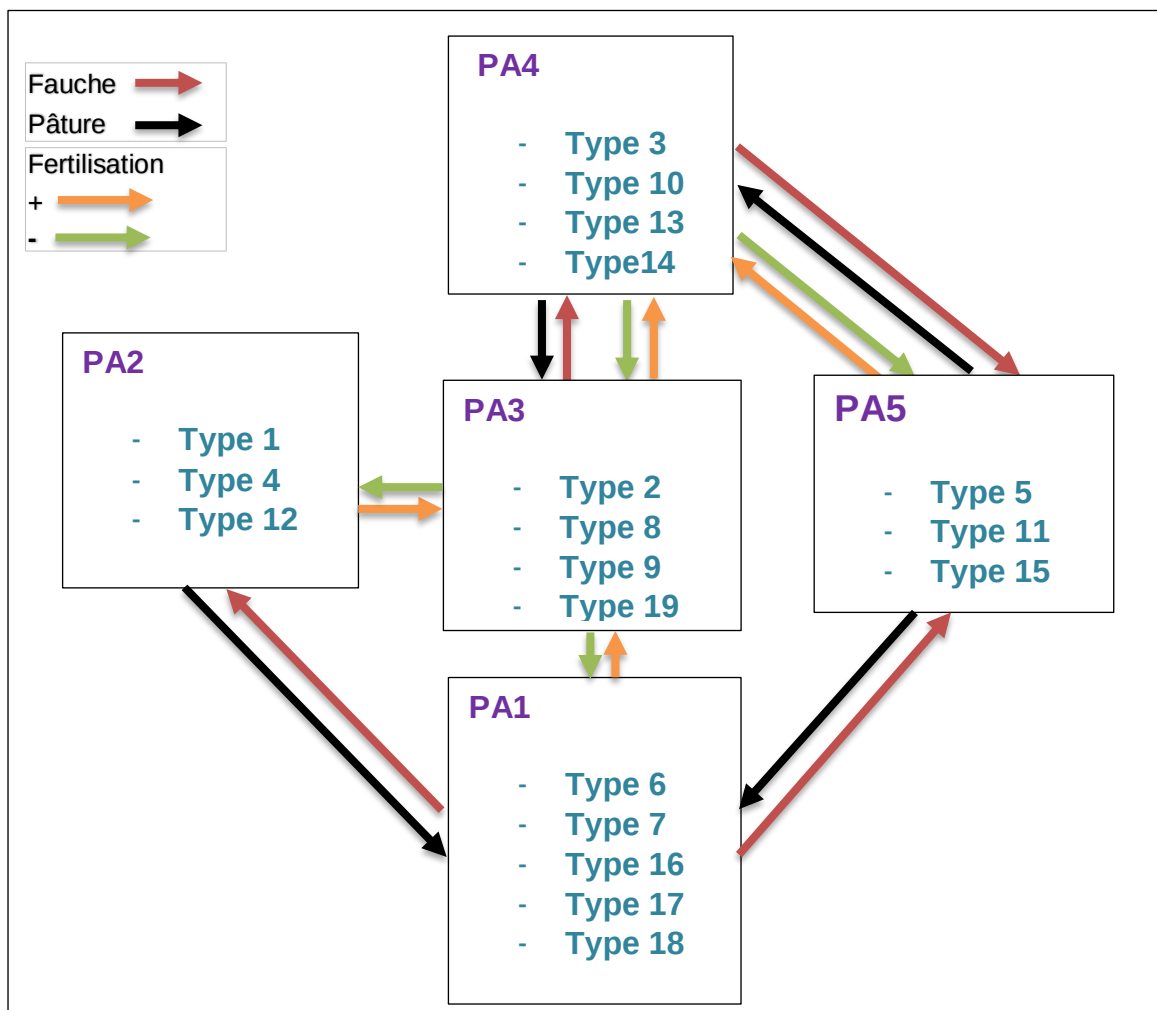
Appendix

Tableau- 9. Tableau des indicateurs de production, d'alimentation, de pâturage et d'utilisation du pâturage.

Farms	Farm_1					Farm_2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Milk and meat production										
Milk sold per year (kL/year)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Meat sold per year (1000 kg/ year)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Levels of grass valorization by grazing and correspondent use of the agricultural area										
Total number of livestock unit (LU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Stocking rate (LU/ha)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Total grazed grass (tDM)	144	173	195	179	171	199	260	305	340	312
Grazed grass per LU (tDM/LU)	2.21	2.39	2.45	2.18	2.13	1.76	2.08	2.23	2.57	2.43
Fodder consumed per LU (tDM/LU)	4.42	4.41	4.38	4.16	4.29	4.79	4.64	4.28	4.77	4.53
Total grass harvested (tDM)	143	148	155	162	173	342	320	282	290	269
Grass harvested per LU (tDM/LU)	2.20	2.05	1.94	1.97	2.15	3.04	2.56	2.07	2.19	2.10
Pasture (TI1)	40.9	39.5	37.6	35.2	31.8	28.7	38.5	45.2	45.4	44.6
1C_ hay + pasture (TI2)	28.0	29.6	29.8	29.0	28.9	35.9	54.7	51.7	43.7	43.5
1C_ late silage + pasture (TI3)	1.1	0.9	2.6	5.8	9.3	26.9	4.5	5	7.5	10.6
Silage +hay +pasture (TI4)	0	0	0	0	0	15.6	9.3	5.1	10.4	8.3

Tableau- 10. Récapitulatif des productions animales (lait, viande), émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie selon différentes unités fonctionnelles.

Indicateurs	Ferme 1					Ferme 2			
Unités	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D
SAU en hectares (ha), Nombre total d'UGB, production animales, production de protéine animale, Emissions des GES en tonnes (tonne éq CO2), émissions totales de GES (tonne éq CO2) et consommation d'énergie en Giga Joules (GJ)									
SAU (ha)	70	70	70	70	70	112	112	112	112
Nombre total d'UGB	65	73	80	82	80	113	125	137	132
Production totale de viande vive produite (kg/an)	8955	11811	14939	17497	19066	18090	25887	34267	39658
Production totale de Lait produit (L/an)	264700	221903	162335	83949	0	500267	415011	310255	150356
Production totale de protéines (kg)	11022	10467	9452	7673	5434	21164	20658	19694	16114
Emissions de GES (tonne CO2)	51	52	50	43	32	99	126	129	111
Emissions de GES (tonne éq CO2)	132	140	145	139	128	319	344	361	330
Emissions de GES (tonne éq CO2)	34	35	36	34	32	94	136	146	146
Emissions de GES de l'électricité (GJ)	190	165	130	82	29	358	308	247	143
Emissions de GES du Pétrole (GJ)	97	101	105	107	109	243	215	198	197
Emissions de GES de l'achat d'aliment (GJ)	200	206	198	147	74	245	295	329	179
Emissions de GES de la fertilisation (GJ)	132	126	116	110	103	437	636	626	652
Emissions Totale de GES (tonne éq CO2)	217	227	231	216	192	512	606	636	587
Emissions Totale (GJ/UGB)	618	597	549	446	315	1283	1454	1400	1172
Emissions de GES en tonne par UGB (tonnes éq CO2 /UGB) & consommation d'énergie en Giga Joules par UGB (GJ/UGB)									
Emissions de GES (tonne éq CO2/UGB)	0,785	0,712	0,625	0,524	0,400	0,876	1,008	0,942	0,841
Emissions de GES (tonne éq CO2/UGB)	2,031	1,918	1,813	1,695	1,600	2,823	2,752	2,635	2,500
Emissions de GES (tonne éq CO2/UGB)	0,523	0,479	0,450	0,415	0,400	0,832	1,088	1,066	1,106
Emissions Totale de GES (tonne éq CO2/UGB)	3,338	3,110	2,888	2,634	2,400	4,531	4,848	4,642	4,447
Emissions Totale par UGB (GJ/UGB)	9,513	8,180	6,864	5,442	3,938	11,355	11,635	10,220	8,876
Emissions de GES en tonne par ha de SAU (tonne CO2/ha), émissions totales de GES à l'hectare (tonne éq CO2/ha) et consommation d'énergie en Giga Joules par hectare (GJ/ha)									
Emissions de GES (tonne CO2/ha)	0,729	0,743	0,714	0,614	0,457	0,884	1,125	1,152	0,991
Emissions de GES (tonne éq CO2/ha)	1,886	2,000	2,071	1,986	1,829	2,848	3,071	3,223	2,946
Emissions de GES (tonne éq CO2/ha)	0,486	0,500	0,514	0,486	0,457	0,839	1,214	1,304	1,304
Emissions Totale de GES à l'hectare (tonne éq CO2/ha)	3,100	3,243	3,300	3,086	2,743	4,571	5,411	5,679	5,241
Emissions Totale par hectare (GJ/ha)	8,834	8,531	7,844	6,375	4,500	11,456	12,986	12,501	10,461
Emissions totales de GES en tonnes éq CO2 par kilogramme de protéine (tonne éq CO2 / Kg protéine) et consommation d'énergie en Giga Joule par kilogramme de protéine (tonne éq CO2 / Kg protéine)									
Emissions Totale par unité de protéine (tonne éq CO2 / Kg protéine)	0,020	0,022	0,024	0,028	0,035	0,024	0,029	0,032	0,036
Emissions Totale consommée par unité de protéine (GJ/ Kg protéine)	0,056	0,057	0,058	0,058	0,058	0,061	0,070	0,071	0,073



Figure~ 3. Évolution des types de prairies avec les pratiques agricoles " les types de prairies de la typologie régionale et de la typologie nationale".

Références

Andrieu, N., Josien, E., Duru, M., 2007. Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level. *Agriculture, ecosystems & environment* 120, 359-369.

Balent, G., Alard, D., Blanfort, V., Poudevigne, I.J.F., 1999. Pratiques de gestion, biodiversité floristique et durabilité des prairies. 160, 385-402.

BAUCHART, D., CHANTELOT, F., GANDEMER, G., 2008. Qualités nutritionnelles de la viande et des abats chez le bovin: données récentes sur les principaux constituants d'intérêt nutritionnel.

Charroin, T., Palazon, R., Madeline, Y., Guillaumin, A., Tchakerian, E., 2005. Le système d'information des Réseaux d'Elevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité. *Renc. Rech. Rum* 12, 335-338.

Chatellier, V., Lelyon, B., Perrot, C., You, G., 2013. Le secteur laitier français à la croisée des chemins. *Productions animales* 26, 77-99.

Doreau, M., Martin, C., Eugène, M., Popova, M., Morgavi, D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *Productions Animales* 24, 461.

Duru, M., Balent, G., Gibon, A., Magda, D., Theau, J., Cruz, P., Jouany, C., 1998. Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées centrales. *Fourrages* 153, 97-113.

Fleury, P., Jeannin, B., Dorioz, J., 1988. Typologie des prairies de fauche de montagne des Alpes du Nord humides (2ème éd.). GIS Alpes du Nord, Chambéry.

Galan, F., Dolle, J., Charroin, T., Ferrand, M., Hiet, C., 2007. Consommation d'énergie en élevage bovin-Des repères pour se situer et progresser. *Renc. Rech. Rum* 14, 29-32.

INSEE, 2018. Indices des prix dans l'agriculture : IPPAP, prix de gros alimentaires (indexation de contrats). p. IPAMPA ancienne base (2010).

Jeangros, B., Troxler, J., Schmid, W.J.R.S.A., 1991. Prairies de Suisse riches en espèces: Description et rendement. 23, 26-35.

Jouven, M., 2006. What is the balance between animal production and sustainable grassland utilization in grassland-based suckler systems? A modelling approach of the management-herd-resources interactions. INAPG (AgroParisTech).

Jouven, M., Loiseau, P., Farruggia, A., Orth, D., Baumont, R., 2007. Estimer la diversité floristique des prairies des exploitations herbagères avec un modèle de simulation couplé à un indicateur'Note de biodiversité'. Fourrages (191), 359-376.(2007).

Launay, F., Baumont, R., Plantureux, S., Farrie, J., Michaud, A., Pottier, E., 2011. Prairies permanentes-des références pour valoriser leur diversité, éd. Paris: Institut de l'Elevage.

Loiseau, P., 1991. Diagnostic appliqué à la gestion des pâturages de montagne. Fourrages 125, 41-59.

McCarl, B.A., 2004. Gams user guide: 2004. Washington: GAMS.

Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J., Gac, A., 2017. Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. Agricultural Systems 157, 202-215.

Pachauri, R.K., Reisinger, A., 2008. Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. GIEC.

Peyraud, J., Dupraz, P., Samson, E., Le Gall, A., Delaby, L., 2010. Produire du lait en maximisant le pâturage pour concilier performances économiques et environnementales. Renc. Rech. Rum 17, 17-24.

Thiébaud, F., Cozic, P., Véron, F., Brau-Nogué, C., Bornard, A., 2001. Intérêts et limites des différents couverts fourragers et pratiques associées vis-à-vis de l'environnement. Analyse bibliographique. Fourrages 168, 449-475.

Upton, J., Humphreys, J., Groot Koerkamp, P.W., French, P., Dillon, P., De Boer, I.J., 2013. Energy demand on dairy farms in Ireland. J Dairy Sci 96, 6489-6498.

CHAPITRE VIII.

Discussion générale

DISCUSSION GENERALE

1. Dispositif expérimental

1.1 Le modèle d'optimisation bioéconomique

1.1.1 Choix de la modélisation au dépend des expérimentations terrain

L'étude consiste à évaluer les effets des proportions relatives de bovins laitiers et de bovins allaitants sur les performances des systèmes bovins mixtes laitier-allaitant en zones de montagnes pour voir les compromis entre leurs performances biotechniques, économiques et environnementales. Cependant la complexité des systèmes d'élevages bovins mixtes pratiqués dans les zones de montagnes rend difficile le choix de méthodologie adéquate à leur exploration (Landais, 2001). Ajouté à cela la complexité des zones de montagne et le caractère multicritère des analyses qu'imposent les objectifs de nos travaux qui visent à déterminer des équilibres, contraint à s'appuyer d'office sur un dispositif virtuel. En effet il est impossible de mettre en place des expérimentations terrain qui prennent en compte toutes les composantes des systèmes complexes en interaction pour étudier un nombre important de compromis. Dans le cas des systèmes bovins herbagers étudiés il n'est pas évident d'avoir des réponses fiables en s'appuyant directement sur les observations de terrain à cause du fonctionnement complexe des systèmes d'élevage bovin mixtes laitier - allaitant dans les zones de montagnes, combiné au décalage annuel dont les données d'enquête en exploitation font l'objet. Par ailleurs les expérimentations terrain mobilisent d'importantes ressources humaines, un temps et des coûts importants. Ajouté à cela l'évaluation de plusieurs répartitions de troupeaux reviendrait à analyser un nombre important d'exploitations différentes. Il faudrait pour cela trouver dans la zone d'étude avec des exploitations qui rentrent dans la gamme de configurations à évaluer. Cela constitue une contrainte supplémentaire pour faire des expérimentations sur le terrain. L'attribution de différentes configurations à une même exploitation dans un temps limité étant irréaliste, la construction d'exploitations à configuration spéciales pour les expérimentations est toutefois possible. Ces éléments confortent l'approche d'exploitations virtuelles à l'aide d'un plan d'expérience afin d'utiliser le nombre réduit de configurations d'exploitation pour répondre à notre problématique. Au-delà des limites liées aux données des enquêtes (impossibilité de transcription, complexité des données vis à vis du dispositif de simulation, les lacunes et incohérences dans les

informations fournies par certains exploitants) pour aborder la problématique, il faut noter qu'aborder notre problématique par des expérimentations terrain présente l'avantage d'utiliser des données réelles et d'être confronté à de véritables aléas. Toutefois rencontrer sur le terrain des systèmes d'élevages bovins équilibrés et une gamme d'exploitation avec des répartitions de troupeaux entre bovins laitiers et bovins allaitants adapté à notre problématique s'avère difficile.

Par ailleurs l'approche la plus adaptée à nos analyses qui impliquent de nombreux critères est la modélisation. On arrive avec les modèles à faire des représentations simplifiées des systèmes complexes pour se concentrer sur les aspects d'intérêt qui définissent une problématique (Coquillard *et al.*, 1997).

1.1.2 Intérêt du modèle bioéconomique Orfee et son adaptation

Les systèmes d'élevage à évaluer sont contrastés malgré des caractéristiques globales communes. Le choix d'ajuster le fonctionnement des exploitations sur une base économique à travers l'optimisation de leur profit permet de comparer des configurations de systèmes contrastés. Il s'agit d'un ajustement pertinent car les performances biotechniques et économiques des systèmes d'élevage sont étroitement liées. Pour de tels problèmes le programme mis en place a la particularité de sélectionner les solutions économiquement optimales selon la stratégie et les contraintes imposées (Van der Ploeg, 2003). L'utilisation du modèle d'optimisation bioéconomique Orfee est une approche originale réalisée avec un plan expérimental permettant d'analyser différentes répartitions de troupeaux. Le modèle Orfee s'est avéré efficace à travers plusieurs études dans le domaine de l'agriculture (Mosnier *et al.*, 2015; Mosnier *et al.*, 2017a, b). Par ailleurs la bonne représentativité de la conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants ajoutée aux contraintes géographiques et l'hétérogénéité du parcellaire intégrés au modèle Orfee donne un important crédit à nos analyses. En effet ces adaptations font de Orfee un outil complet comparé à des modèles conçus précédemment pour évaluer les systèmes bovins allaitants (SEBIEN (Jouven, 2006; Jouven *et al.*, 2007; Jouven and Baumont, 2008) et bovins laitiers (DYNAMILK (Jacquot *et al.*, 2012; Jacquot *et al.*, 2015)) en zones de montagnes. La représentation des systèmes d'élevage bovins mixtes avec une fine prise en compte des caractéristiques géographiques et de l'hétérogénéité du

parcellaires pour l'évaluation des systèmes d'élevage bovin herbagers s'avère une première.

En général les modèles sont utilisés temporairement avec un usage restreint à des nouveaux problèmes et un temps d'utilisation qui expire avec l'évolution du problème. Les modèles sont rarement réutilisables en dehors des environnements pour lesquels ils ont été conçus. La particularité du modèle ici utilisé est qu'il est implémenté sur la plateforme de modélisation GAMS (McCarl, 2004) permettant de l'adapter continuellement à de nouvelles situations.

1.2 Systèmes explorés et scénarios : enquête vs cas-types

Les enquêtes ont été réalisées pour une année particulière notamment l'année 2015 qui fut marquée par de faibles rendements en prairie et des invasions de ravageurs. Il s'est de plus avéré impossible de transcrire certaines données récoltées lors des enquêtes à cause de leur complexité, lacunes ou incohérences vis à vis du dispositif de simulation. Ces constatations, ajoutées à la difficulté d'utiliser des données issues d'années particulières pour représenter des années de croisières, nous ont conduits à renoncer à nous appuyer sur les exploitations enquêtées pour réaliser les analyses propres à notre thèse. Par souci de travailler sur des cas fiables et de proposer des résultats objectifs, nous avons choisi d'explorer des modèles représentatifs d'exploitations réelles à savoir des cas types pour nos expériences. Les cas types étant des modèles d'exploitations réelles, ils présentent des particularités et des caractéristiques intrinsèques qui peuvent être incompatibles avec certains scénarios. On s'inscrit également dans une configuration d'associations de modèles qui peut donner une certaine généricité aux résultats, mais aussi présenter des limites, notamment une abstraction par rapport à la réalité. En effet les cas types doubles troupeaux bovin mixtes considérés pour l'étude ont la particularité d'associer deux troupeaux avec des proportions équilibrées. Le fait de faire basculer ces systèmes mixtes en systèmes spécialisés, notamment les systèmes spécialisés laitiers, révèle dans certains cas des limites au vu des modes de valorisation des prairies privilégiés par le modèle notamment le pâturage. C'est le cas du système 100D construit sur la base du cas types BL18 (Ferme_1) pour lequel quasiment toutes les surfaces de prairies de type PA4 sont pâturées alors qu'il s'agit d'un type de prairie caractérisé par la fauche suivie du pâturage. Elle peuvent être valorisées exclusivement par pâturage

que si on limite l'importance des montées à épis et la floraison des graminées en initiant le pâturage dès le printemps (Launay *et al.*, 2011). D'où l'évaluation avec précaution de certains scénarios conçus à partir de changements extrêmes notamment les scénarios spécialisés troupeaux laitiers. En revanche l'extrapolation à des situations 100% allaitant est mieux adaptée aux zones de montagnes et représentée normalement par le modèle en privilégiant le pâturage. En effet, en plus des consommations élevées de pâturage par des troupeaux allaitants, ces derniers sont moins exigeants en termes de qualité de l'herbe et peuvent être déplacés dans des parcelles éloignées de l'étable contrairement aux exploitations laitières spécialisées (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig *et al.*, 2006; Andrieu *et al.*, 2007).

1.3 Représentativité du modèle et domaine de validité

La validation consiste à établir si le modèle fournit une image suffisamment correcte de la réalité au vu de ses objectifs d'utilisation. Elle permet de définir un domaine de validité du modèle (Miller, 1974). Dans le cas de cette étude, la validation du dispositif ne s'est pas faite en comparant les résultats à ceux d'autres travaux ou modèles car peu de travaux abordent des cas d'études proches avec des dispositifs similaires. L'intégration de l'hétérogénéité du parcellaire et des contraintes géographiques permet de mieux explorer les systèmes bovins herbagers. On a ainsi des résultats qui pourraient être généralisés aux systèmes mixtes herbagers. Toutefois il faudrait prendre en compte les spécificités des systèmes telles que la quasi-absence des cultures dans les systèmes qui ont servi à paramétrer le modèle. En effet seul l'un des cas types exploré abrite une infime surface de cultures céréalières (5ha de culture dans le cas type BL22). On ne saurait donc appliquer sans recul nos résultats à des systèmes qui fonctionnent avec des synergies ou qui abritent des surfaces significatives de culture. La validation des résultats est réalisée à travers la vérification des prédictions du modèle avec les données des cas types qui sont en réalité (robustes) des données de terrain moyennées pour un groupe d'exploitations de même profil. D'où la fiabilité et la généricité de nos résultats même si ces derniers peuvent paraître, au vu de notre dispositif expérimental décrit en amont, une abstraction par rapport à la réalité.

La validation du modèle a tenu compte de la cohérence entre les bilans des résultats dans la mesure où les ventes et achats fonctionnaient comme des variables

d'ajustement. Pour autoriser le minimum possible d'ajustement, le modèle privilégie la production aux achats et force l'autonomie fourragère pour minimiser les ventes. Sur ces bases le modèle s'avère suffisamment apte à représenter le fonctionnement et explorer les systèmes d'élevage bovin mixtes laitier-allaitant en zones de montagne. Malgré les bilans mensuels fournis par le modèle, il a la particularité d'être statique vu sa caractéristique principale à déterminer des équilibres sur une base économique annuelle. Ce caractère s'avère une limite lorsqu'on aborde la question de l'évolution des services écosystémiques. En effet l'étude de l'évolution des services écosystémiques fournis par les prairies nécessite un dispositif dynamique en plus d'un temps d'évolution considérable. En général, les modèles de végétation sont des modèles dynamiques (Ruget *et al.*, 2006; Jouven and Baumont, 2008; Duru *et al.*, 2010). Ces modèles doivent cela à l'intégration de données pédoclimatiques contrairement à notre dispositif de simulation (Orfee). Toutefois on n'a pas suffisamment de précisions sur le temps et la trajectoire d'évolution des services écosystémiques fournis par les prairies pour approfondir l'analyse de leur évolution. Cela est principalement dû à la difficulté de capitaliser les effets des pratiques sur les végétations de prairies.

2. Durabilité des systèmes bovins mixtes herbagers

Les hypothèses de la thèse relèvent simultanément des principes de l'agroécologie et des principales dimensions de la durabilité. Les décisions privilégiées lors de nos analyses vont de pair avec des principes fondamentaux de l'agroécologie à savoir la réduction d'intrants nécessaires à la production, le renforcement de la résilience des systèmes à travers le développement de leur capacité d'adaptation, la valorisation complémentaire des animaux, la diversification des ressources, la préservation de la biodiversité à travers l'adaptions des pratiques agricoles et des modes d'utilisation des ressources naturelles. La valorisation du potentiel herbager en montagne et le lien entre la diversification (diversité animale) et gestion des aléas méritent d'être mis en relation avec ces principes.

2.1 Valorisation du potentiel herbager en montagne

Nos analyses stipulent que, dans les zones de montagne, l'élevage bovin basé sur l'utilisation des ressources herbagères notamment les systèmes bovins mixtes laitier-allaitant présentent un meilleur niveau d'autonomie fourragère et une plus grande

durabilité comparée aux systèmes bovins spécialisés. En effet les prairies permanentes (réservoirs potentiels de ressources alimentaires pour les systèmes bovins herbagers) représentent un avantage pour les agriculteurs, tant pour la qualité des productions (Martin *et al.*; Farruggia *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2016) que des performances économiques et environnementales de l'exploitation. Utilisées au pâturage, les prairies permanentes contribuent à la conservation de la biodiversité et à la réduction des émissions avec le stockage du carbone (Pflimlin, 2008; Soussana *et al.*, 2010; Soussana and Lemaire, 2014) qui peut en partie compenser les émissions de méthane. Les systèmes bovins mixtes avec des pourcentages équilibrés de bovins laitier et de bovins allaitant ont la particularité de maximiser la valorisation des prairies par pâturage, comparés aux systèmes bovins spécialisés. La maximisation du pâturage s'avère la clé de la durabilité des systèmes bovins mixtes. La maximisation du pâturage permet d'avoir des produits animaux en conciliant performances économiques et environnementales (Peyraud *et al.*, 2010). Les systèmes intégrant des troupeaux allaitants privilégient la valorisation de l'herbe par pâturage permettant ainsi de limiter la consommation d'énergie liée aux activités de récolte et de gestion des fourrages. Les troupeaux contribuent à la fertilisation à travers leurs déjections d'où l'absence de consommations d'énergie pour la fertilisation (Peyraud *et al.*, 2010). La maximisation du pâturage et sa gestion ont suscité de nombreux travaux de recherche et de développement pour évaluer les performances et la compétitivité des systèmes herbivores (Jouven, 2006; Jacquot *et al.*, 2012; Rouillé *et al.*, 2014). Les systèmes qui maximisent le pâturage se sont avérés les plus compétitifs (Dillon *et al.*, 2008; Peyraud *et al.*, 2010). Le pâturage s'avère une source essentielle à la durabilité des systèmes bovins herbagers. Cependant on ne peut avoir l'effet escompté que si la conduite des troupeaux permet une meilleure utilisation des ressources en herbe. Déterminant l'autonomie fourragère, une meilleure utilisation du pâturage permet entre autres de limiter les coûts liés à l'importation d'aliments concentrés ou de fourrage en sécurisant les systèmes d'alimentation en présence d'aléas naturels et/ou économiques. Le pâturage est non seulement la ressource alimentaire la moins chère et la fourniture de services écosystémiques procurés par les prairies est de mieux en mieux connue et reconnue (MEA, 2005; Therond, 2017). Les résultats de nos analyses révèlent que le taux de valorisation de l'herbe par pâturage augmente avec le pourcentage de bovins allaitants dans l'exploitation. Le fait que les bovins laitiers ne peuvent pâturer loin de

la salle de traite et de la présence de parcelles de prairies de qualité assez faible dans le parcellaire incite à privilégier les bovins allaitants. La situation serait différente si on intègre une salle de traite mobile dans nos scénarios. Pour maximiser le profit de l'exploitation en cas d'intégration de salle de traite mobile, un compromis s'imposerait entre le maintien d'un pourcentage important de bovins laitiers (plus exigeant en termes de qualité de l'herbe et qui rejoignent la salle de traite deux fois par jour (Andrieu *et al.*, 2007)) au service desquels serait la salle de traite mobile pour augmenter leur pâturage et le fait de maximiser le pourcentage de bovins allaitants (moins exigeants en termes de qualité de l'herbe et qui peuvent être déplacés dans des parcelles éloignées de l'étable (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig *et al.*, 2006; Andrieu *et al.*, 2007)) lorsque les ressources accessibles au troupeaux laitiers deviennent limitées. Toutefois bien que permettant de réduire l'utilisation d'énergie et de moins solliciter la main-d'œuvre en proposant des systèmes plus autonomes et plus écologiques, l'utilisation de salle de traite mobile n'a pas été intégrée à nos analyses notamment par manque de données vérifiées pour renseigner le modèle. Pour des systèmes basés sur l'agroécologie et naturels (moins dépendants des technologies), les performances de pâturages sont élevées pour les exploitations bovines mixtes contrairement aux exploitations laitières spécialisées (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig *et al.*, 2005; Andrieu *et al.*, 2007). Pour des systèmes bovins mixtes basés sur l'agroécologie et naturels on a également un bon compromis entre performances biotechniques et économiques contrairement aux systèmes spécialisés. En effet les troupeaux allaitants ont la capacité de valoriser complètement les surfaces mais leur moindre rentabilité contraint de trouver un compromis entre rentabilité et utilisation de fourrages à travers l'association des deux troupeaux économiquement plus rentables notamment les troupeaux de bovins laitiers. Le tiers des troupeaux bovins mixtes laitier et allaitant présents dans le Massif central sont des troupeaux équilibrés entre bovins laitiers et bovins allaitant ou des troupeaux à dominante laitières (RA, 2010). L'association de troupeaux bovins laitiers et de troupeaux bovins allaitants permet à l'éleveur d'agir sur les interactions entre les animaux et les ressources herbagères pour procurer une flexibilité à l'exploitation en termes d'utilisation des ressources mais aussi sur le plan économique.

Toutefois, il faut tenir compte du rapport entre chargement et productivité dans la définition des systèmes car ces paramètres permettent de définir un domaine où il est

possible de concilier une production animale autonome et une utilisation durable des prairies (Balent *et al.*, 1999). De plus la structure de la parcelle est un élément déterminant pour la répartition des troupeaux. Pour un meilleur pâturage et de bonnes performances économiques et environnementales à l'échelle exploitation une combinaison de troupeaux tenant compte de critères qui rejoignent les principes de l'agroécologie semble optimale.

2.2 Flexibilité et avantages des systèmes bovins mixtes

La flexibilité des systèmes bovins herbagers a été abordée exclusivement vis-à-vis des aléas économiques. Les prix des produits agricoles évoluent avec les productions agricoles, et les consommations alimentaires sont affectées généralement par les variations climatiques, le marché et les politiques économiques (Butault, 2008). La conduite simultanée des troupeaux laitiers et allaitants s'est avérée à travers nos résultats le mode de gestion adéquat pour exploiter durablement les ressources herbagères dans les zones de montagnes. Cela est cohérent avec le fait que l'augmentation de l'autonomie fourragère contribue de manière significative à la stabilité des résultats économiques (Aubron *et al.*, 2010). Les prairies permanentes s'avèrent une source de flexibilité tandis que l'association de troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants dans des proportions équilibrées constitue avec le chargement et la régulation des cycles de production des troupeaux des facteurs de flexibilité essentiels. La flexibilité des systèmes est favorisée par la bonne utilisation des ressources herbagères qui s'avère une source incontestable de flexibilité. Toutefois la flexibilité d'un système d'élevage n'est complète que si le système considéré s'adapte aussi bien aux aléas économiques qu'aux aléas climatiques.

Même si le modèle Orfee n'intègre pas les variations climatiques pour la détermination des productions végétales, ces dernières sont calculées en fonction des sommes de températures journalières d'où l'intégration indirecte des effets climatiques dans la détermination des productions fourragères. Les variations liées aux aléas naturels sont ainsi prises en compte dans les calculs des productions de biomasse. Se focaliser exclusivement sur les aléas économiques pour nos travaux trouve ainsi son sens. Cependant les modes de conduite déterminés seraient plus représentatifs de la réalité si l'on amplifie simultanément les aléas économiques conjointement aux aléas naturels en tenant compte finement des corrélations entre ces deux types d'aléas.

Parlant des aléas économiques, la diversification des produits destinés au marché permet de stabiliser le revenu par rapport aux aléas notamment économiques. Au niveau des systèmes bovins mixtes laitier-allaitant on a une compensation des pertes liées à un produit par les recettes des produits complémentaires. Les coûts liés aux intrants sont par ailleurs réduits grâce au poids important du pâturage dans l'alimentation. L'agriculteur a une assurance vis-à-vis des marchés car il génère une diversité de produits lui permettant de bénéficier d'une flexibilité face aux fluctuations de prix des produits animaux. On rejoint les résultats de précédentes études qui montrent que les adaptations liées à la structures des troupeaux constituent de potentielles sources de flexibilité face aux aléas de prix (Mosnier *et al.*, 2010). Globalement les systèmes bovins mixtes s'avèrent les plus adaptés pour faire faces aux fluctuations de prix contrairement aux systèmes spécialisés (Manyong *et al.*, 2006). Cependant l'adaptation durable des systèmes dans le temps peut s'avérer problématique vu les changements incessants des prix des produits et des intrants. De plus, les charges incompressibles de structure ne peuvent pas compenser de fortes réductions de la production (Veyssset *et al.*, 2002). Il est ainsi nécessaire de raisonner le choix du système en choisissant des pratiques et stratégies les plus stables sur du long terme (Lev and Campbell, 1987). On évite ainsi d'être confronté en permanence à la gestion des aléas à travers les réorganisations des systèmes.

En plus de la diversité de produits animaux et de la maximisation du pâturage, la conduite simultanées de troupeaux bovins laitier et allaitant permet le maintien des végétations (Plantureux, 1996). Cela joue par ailleurs un rôle important sur la qualité des produits animaux en particulier les produits laitiers (Martin *et al.*; Farruggia *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2016).

CHAPITRE IX.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. Conclusion

L'objectif de la thèse était de mettre en évidence des compositions adaptées à une gestion optimale et durable des systèmes d'élevage bovin mixtes dans les zones de montagne. L'enjeu était de proposer des systèmes d'élevages herbagers durables à travers l'identification de configurations permettant à la fois une meilleure autonomie alimentaire, une meilleure viabilité et d'une plus grande durabilité environnementale.

Nos travaux ont consisté à analyser l'effet de la taille et de la proportion des différents troupeaux afin de définir des modes de conduite permettant d'optimiser les performances des systèmes et les objectifs de production. Nous avons procédé pour cela à l'évaluation de leurs performances biotechniques, notamment d'autonomie fourragère (à travers la valorisation des prairies), performances économiques et environnementales, mais aussi à l'analyse des effets de l'organisation des systèmes sur l'évolution des végétations de prairies pour différentes combinaisons de troupeaux.

Nous nous sommes ainsi focalisés sur l'évaluation des performances des systèmes bovins mixtes laitier- allaitant herbagers en se posant la question de savoir :

Quelles sont les capacités des doubles troupeaux herbagers bovins laitiers – bovins allaitants à concilier une meilleure valorisation du parcellaire avec une flexibilité accrue de fonctionnement ?

Cette question a été abordée à travers trois axes et traitée sur la base de trois hypothèses à savoir :

- La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les troupeaux bovins spécialisés dans les zones de contraintes, tout en maintenant de bonnes performances économiques.
- Dans des conditions optimisées de fonctionnement économique, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés.
- Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout

en maintenant les services écosystémiques liés aux végétations, par comparaison avec les systèmes bovins spécialisés.

Afin de vérifier ces hypothèses il était nécessaire d'explorer les systèmes bovins herbagers pour d'identifier les modes de conduite et d'organisation structurelle permettant une meilleure valorisation des parcellaires hétérogènes et de faire face aux aléas, notamment économiques tout en préservant l'environnement.

Nous avons utilisé pour cela le modèle d'optimisation bioéconomiques Orfee adapté aux zones de montagnes et paramétré à partir de deux cas-types contrastés ayant des doubles troupeaux pour l'analyse des scénarios de répartition des troupeaux basés sur un plan expérimental à deux dimensions (proportions de troupeaux laitiers et allaitants vs fermes).

- La conduite simultanée des troupeaux bovins laitiers et allaitants s'est avérée favorable à une meilleure utilisation des ressources herbagères par pâturage dans les zones de montagne et permet aux exploitations de tendre vers une meilleure autonomie fourragère voir alimentaire pour réduire leur coût de production.
- A l'inverse des systèmes bovins spécialisés, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant présentent de meilleures capacités d'adaptions aux fluctuations de prix des intrants et des produits d'élevage pour garantir d'intéressantes et plus stables performances économiques.
- L'appréciation des performances environnementales des systèmes bovins herbagers, notamment les émissions des gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, et la préservation de services écosystémiques liées aux couverts végétaux dépend fortement de l'objectif de l'agriculteur en termes d'occupation du territoire et de production alimentaire.

Globalement les systèmes bovins mixtes et plus particulièrement les systèmes équilibrés entre troupeaux bovins laitiers et troupeaux bovins allaitants favorisent une efficience et une autonomie alimentaire tout en garantissant un bon niveau de flexibilité et d'intéressants bilans environnementaux comparés aux systèmes spécialisés.

Dans le cadre de notre étude, la gestion optimale et durable des systèmes d'élevage bovins herbagers dans les zones de montagnes implique par ailleurs le respect de

trois des principes fondamentaux de l'agroécologie tels que définis par Altieri (2002) notamment (1) La réduction des intrants nécessaires à la production avec l'utilisation des ressources non directement valorisées par l'homme, (2) Le renforcement de la résilience des systèmes à travers leur flexibilité avec la valorisation complémentaire des animaux et la diversification des ressources et finalement (3) La préservation de la biodiversité à travers l'adaptation des pratiques agricoles et des modes d'utilisation des ressources naturelles.

Gérés sur une telle base, les systèmes bovins herbagers satisfont aux besoins des animaux en privilégiant la valorisation des ressources propres aux exploitations, et génèrent une diversité de produits, leur permettant de s'accommoder plus facilement aux perturbations économiques notamment les variations de prix et d'avoir d'intéressantes performances économiques et environnementales.

Nos travaux fournissent par ailleurs un simulateur (Orfee adapté par nos soins) à même de prendre en compte l'hétérogénéité du parcellaire et les caractéristiques topologiques des zones de montagnes dans l'évaluation des performances des systèmes d'élevage herbagers.

2. Perspectives

2.1 Charge de travail et élevage bovin mixte

Bien que les systèmes bovins mixtes laitiers et allaitants présentent de nombreux avantages en termes de performances biotechniques, économiques et environnementales. Il s'avère essentiel de faire un focus sur les limites de ces systèmes qui portent essentiellement sur la grande charge de travail et la complexité technique et organisationnelle qu'implique la conduite simultanée de deux troupeaux avec différents besoins. En effet ces systèmes nécessitent plus d'effort, de travail et d'organisation pour exprimer pleinement leurs avantages. Le travail est le moyen privilégié pour accroître la productivité des facteurs de production cependant l'utilisation simultanée des troupeaux laitiers et allaitants accroît l'utilisation de la main-d'œuvre et exige un gros effort sur le plan organisationnel. Comme l'indique Cournut (2013) les éleveurs sont en général confrontés à l'imprévisibilité de certains événements (dates de mise bas, sécheresse...), à la multiplicité des déplacements (mouvements d'animaux, chantiers de fenaison...), à la maîtrise des équipements en plus de la nécessité de mobiliser différentes compétences (élevage, transformation,

gestion des salariés, vente, administration...). La mixité nécessite une organisation encore plus exigeante et a autant d'impact sur le travail que sur les résultats économiques des exploitations. Toutefois la productivité du travail a beaucoup augmenté de nos jours avec les innovations technologiques qui permettent de jouer sur les équipements (robot, stabulation libre/logettes...), les possibilités de recours au salariat et l'externalisation des tâches auprès d'entreprises (Cournut and Chauvat, 2013). Cependant la réduction des besoins en main-d'œuvre nécessite des investissements en matériels et équipements mais toutes les tâches ne peuvent pas être mécanisées. Un prolongement de la thèse pourrait être l'étude fine et méthodologique des difficultés organisationnelles des systèmes bovins mixtes dans les zones de montagne pour déterminer les organisations et les conduites des deux troupeaux et des surfaces prenant en compte une meilleure répartition et la réduction du travail dans la gestion des systèmes.

2.2 Évolution et préservation des services écosystémiques

Il est essentiel de pousser les études sur l'évolution des services écosystémiques en permettant au modèle de prendre en compte les paramètres de durée. Il s'agit concrètement d'étudier l'évolution des services écosystémiques liés aux végétations des systèmes en question dans des conditions de fonctionnement dynamiques pour mieux appréhender l'évolution de ces services écosystémiques en relation avec les pratiques. Pour cela des modules et adaptations supplémentaires du modèle Orfee s'avèrent nécessaires. On pourrait par exemple rendre le modèle dynamique ou le faire fonctionner selon des pas de temps journaliers pour au moins prendre en compte les sommes de températures journalières nécessaires à la représentation de l'évolution des végétations des prairies en fonction des conditions climatiques.

Par ailleurs pour une garantie de la préservation des services écosystémiques, il faudrait accroître l'importance de la valeur des services écosystémiques aux yeux des éleveurs en instaurant des primes liées à ces services. En effet, la rémunération des services écosystémiques et sociaux de l'élevage s'évalue à 600 euro/ha/an (Bureau and Mahé, 2008). Il serait intéressant d'initier des travaux en lien avec la valorisation des végétations de prairies dans le cadre de l'élevage, sur l'évolution et la valorisation de ces services écosystémiques et de la possibilité d'instauration de diverses primes liées à la préservation des services écosystémiques liés aux végétations de prairies.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abson, David J, Evan DG Fraser, and Tim G Benton. (2013). "Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture." *Agriculture & food security* 2 (1):2.

Agabriel, Jacques , Sylvie Brouard, Didier Bastien, Marion Benoit, Pascal D'Hour, Jean-Pierre Farrié, Marie Catherine Leclerc, and Eric Pottier. (2015). *Guide de l'alimentation du troupeau bovin allaitant*. Edited by les incontournables.

AGRESTE. 2011. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/> (accessed 22 January 2019).

AGRESTE. 2015. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/> (accessed 22 January 2019).

Alcaras, J. R., & Lacroux, F. (1999). Planning as Adapting. *ECONOMIES ET SOCIETES*, 33(6/7), 7-38.

Altieri, M. (1987). *Agroecology: The scientific bases of alternative agriculture*. Boulder, Colorado, US. Westview Press. 184p.

Altieri, M. A. (2002). Agroecological principles for sustainable agriculture. *Uphoff, N., ed. 2002. Agroecological Innovations: Increasing Food Production with Participatory Development*, 40-46. Sterling, Va.: Earthscan Publications.

Andrieu, N. (2004). "L'utilisation de la diversité de la ressource fourragère dans les systèmes d'exploitation d'élevage (dans les régions de montagne) pour tamponner les effets de la variabilité inter-annuelle du climat." Thèse de doctorat à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon.

Andrieu, Nadine, Etienne Josien, and Michel Duru. 2007a. "Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level." *Agriculture, ecosystems & environment* 120 (2-4):359-369.

Andrieu, Nadine, Etienne Josien, and Michel Duru. 2007b. "Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level." *Agriculture, ecosystems & environment* 120 (2):359-369.

Ansquer, P, JP Theau, P Cruz, J Viegas, R Al Haj Khaled, and M Duru. (2004). "Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies naturelles. Une étape vers la construction d'outils pour gérer les milieux à flore complexe." *Fourrages* 179:353-368.

Attonaty, J. M. (1980). Qu'est-ce que le système fourrager. Perspectives agricoles, (Hors-série), 20-27.

Aubron C, Lurette A, Moulin CH (2010). Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier. *Rencontre Recherche Ruminants*, 17, 249-252.

Balent, G., Alard, D., Blanfort, V., & Poudevigne, I. (1999). Pratiques de gestion, biodiversité floristique et durabilité des prairies. *Fourrages*, 160, 385-402.

Bank, World. 2007. The World Bank Annual Report 2007: The World Bank.

Bathgate, A, C Revell, and R Kingwell. 2009. "Identifying the value of pasture improvement using wholefarm modelling." *Agricultural Systems* 102 (1):48-57.

Bauchart, Dominique, Franck Chantelot, and Gilles Gandemer. (2008). "Qualités nutritionnelles de la viande et des abats chez le bovin: données récentes sur les principaux constituants d'intérêt nutritionnel."

Baudracco, J, N Lopez-Villalobos, CW Holmes, EA Comeron, KA Macdonald, and TN Barry. 2013. "e-Dairy: a dynamic and stochastic whole-farm model that predicts biophysical and economic performance of grazing dairy systems." *Animal* 7 (5):870-878.

Baumont, R, M Jouven, N Deux, and A Farruggia. (2008). "How can farms with beef cattle systems based on permanent pasture cope with extreme climatic years? Results of a study using the whole-farm simulator SEBIEN." Proceedings of the 8th European International Farming Systems Association symposium.

Baumont, Rene, J Pierre Dulphy, Daniel Sauvant, Gilles Tran, Francois Meschy, Jocelyne Aufrere, Jean-Louis Peyraud, and Pascal Champciaux. (2007). Les tables de la valeur des aliments. Editions Quae.

Bellman, Richard. 1954. The theory of dynamic programming. RAND Corp Santa Monica CA.

Bernués, A., Ruiz, R., Olaizola, A., Villalba, D., & Casasús, I. (2011). Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science*, 139(1-2), 44-57.

Berry, Hugues, and Guillaume Beslon. (2013). De la modélisation comme poésie. La modélisation de systèmes biologiques complexes vue par deux modélisateurs. *Editions Matériologiques*, Paris.

Beukes, PC, CC Palliser, KA Macdonald, JAS Lancaster, G Levy, BS Thorrold, and ME Wastney. (2008). "Evaluation of a whole-farm model for pasture-based dairy systems." *Journal of dairy science* 91 (6):2353-2360.

Blanco, FM, and G Flichman. (2002). "Recursive Stochastic Programming, an alternative approach to solve stochastic agricultural resource problems." Proceedings of the international conference on risk and uncertainty in environmental economics: risk and uncertainty in environmental economics. Wageningen University.

Bockstaller, C, and Ph Girardin. (2003). "Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO." *Rapprt technique, INRA*.

Bonaudo, Thierry, Amaury Burlamaqui Bendahan, Rodolphe Sabatier, Julie Ryschawy, Stéphane Bellon, Francois Leger, Danièle Magda, and Muriel Tichit.

(2014). "Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems." *European Journal of Agronomy* 57:43-51.

Bouamra-Mechemache, Zohra, Roel Jongeneel, and Vincent Réquillart. (2008). "Impact of a gradual increase in milk quotas on the EU dairy sector." *European Review of Agricultural Economics* 35 (4):461-491.

Boyard, C., Barnouin, J., Gasqui, P., & Vourc'h, G. (2007). Local environmental factors characterizing *Ixodes ricinus* nymph abundance in grazed permanent pastures for cattle. *Parasitology*, 134(7), 987-994.

Brocard, Valérie. 2010. *Guide pratique de l'alimentation du troupeau bovin laitier*: Institut de l'Élevage.

Brunschwig, G, C Sibra, C Agabriel, H Molenat, and F Garcia-Launay. (2010). "Déterminants géographiques de l'utilisation des prairies en système traditionnel Salers: enseignements sur le fonctionnement du système fourrager." *Renc Rech Ruminants* 17:37-40.

Brunschwig, Gilles. (2000). *Terroirs d'élevage laitier du Massif central: identification & caractérisation: éléments de méthode, analyses & résultats*: ENITA.

Brunschwig, Gilles, Etienne Josien, and C Bernhard. (2005). "Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin allaitant et laitier."

Brunschwig, Gilles, Etienne Josien, and C Bernhard. (2006). "Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin laitier et allaitant." *Fourrages* 185:83-95.

Bureau, Jean-Christophe, and Louis-Pascal Mahé. 2008. *CAP reform beyond 2013: An idea for a longer view*.

Butault, Jean-Pierre *Revue française d'économie*. (2008). "La relation entre prix agricoles et prix alimentaires." 23 (2):215-241.

Bérard, Laurence, and Philippe Marchenay. (1995). *Lieux, temps et preuves. La construction sociale des produits de terroir*: Ministère de la culture/Maison des sciences de l'homme.

Büchs, Wolfgang. (2003). "Biotic indicators for biodiversity and sustainable agriculture—introduction and background." *Agriculture Ecosystems Environment* 98 (1-3):1-16.

Cariboni, J, D Gatelli, R Liska, and A Saltelli. 2007. "The role of sensitivity analysis in ecological modelling." *Ecological modelling* 203 (1-2):167-182.

Charroin, T, R Palazon, Y Madeline, A Guillaumin, and E Tchakerian. 2005. "Le système d'information des Réseaux d'Elevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité." *Renc. Rech. Rum* 12:335-338.

Chatellier, Vincent, and Hervé Guyomard. "Le bilan de santé de la PAC, le découplage et l'élevage en zones difficiles." *INRA sciences sociales* (2008).

Chatellier, Vincent, B Lelyon, C Perrot, and G You. 2013. "Le secteur laitier français à la croisée des chemins." *Productions animales* 26 (2):77-99.

Chavas, Jean-Paul, and Michael Aliber. 1993. "An analysis of economic efficiency in agriculture: a nonparametric approach." *Journal of Agricultural and Resource Economics*:1-16.

Chavas, Jean-Paul. 2008. "On the economics of agricultural production." *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 52 (4):365-380.

Chia, Eduardo, and Michel Marchesnay. 2008. "Un regard des sciences de gestion sur la flexibilité."

Cohendet, Patrick, and Patrick Llerena. "Flexibilité et modes d'organisation." (1999). *Revue française de gestion*. (123):72-79.

Coleno, F-C, and Michel Duru.(1998). *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement*. "Gestion de production en systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe: une approche par atelier."45-61.

Coquillard, Patrick, David RC Hill, and T Sime-Ngando. 1997. *Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*: Masson Paris.

Cournut, Sylvie, J Bertrand, Amandine Conrard, and Stéphane Ingrand. 2012. "Intérêt de la mixité d'espèces pour accroître la flexibilité des élevages: l'exemple des élevages bovin lait+ ovin viande en Auvergne." 19. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants.

COURNUT, Sylvie, and Sophie CHAUVAT. 2013. "La productivité du travail." *Le Travail*:12.

Cros, Marie-Josée, Michel Duru, and D Peyre. 2001. "SEPATOU, un simulateur de conduites du pâturage à l'épreuve des menus bretons." *Fourrages* 167, 365-383.(2001).

Cros, MJ, M Duru, F Garcia, and R Martin-Clouaire. 2004. "Simulating management strategies: the rotational grazing example." *Agricultural Systems* 80 (1):23-42.

Day, Richard H. 1963. *Recursive programming and supply prediction*.

Day, R. H. (1973). Recursive programming models: a brief introduction. Studies in economic planning over space and time: A contribution to economic analysis. GC Judge and T. Takayama, Eds, 329-344.

de Rio sur l'environnement, Déclaration. 1992. "le développement." Rapport de la Conférence des Nations Unies sur *l'environnement et le développement*.

Dedieu, Benoit, and Stéphane Ingrand. 2010. "Incertitude et adaptation: cadres théoriques et application à l'analyse de la dynamique des systèmes d'élevage." *INRA Productions animales* 23 (1):81-90.

Delaby, L, and JL Peyraud. 2009. "Valoriser les fourrages de l'exploitation pour produire du lait." *Lait* 29:38.

Delaby, L, JL Peyraud, and P Faverdin. 2001. "Pâtur'IN: le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur." *Fourrages* 167 (2):385-398.

Desjeux, JF. 1993. "Valeur nutritionnelle du lait de chèvre." *Le lait* 73 (5-6):573-580.

Dillon, P, S Crosse, G Stakelum, and F Flynn. 1995. "The effect of calving date and stocking rate on the performance of spring-calving dairy cows." *Grass and Forage Science* 50 (3):286-299.

Dillon, PAT, Thia Hennessy, Laurence Shalloo, Fiona Thorne, and Brendan Horan. 2008. *International Journal of Dairy Technology*. "Future outlook for the Irish dairy industry: a study of international competitiveness, influence of international trade reform and requirement for change." 61 (1):16-29.

Directorate-General, European Commission. Environment. 2002. *Implementation of Council Directive 91/676/EEC Concerning the Protection of Waters Against Pollution Caused by Nitrates from Agricultural Sources: Synthesis from Year 2000 Member States Reports*: Office for Official Publications.

Doreau, M, C Martin, M Eugène, M Popova, and Diego P Morgavi. 2011. "Levers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants." *Productions Animales* 24 (5):461.

Dumont, Bertrand, and Alberto Bernuès. 2014. "Agroecology for producing goods and services in sustainable animal farming systems." *Animal: an international journal of animal bioscience* 8 (8):1201.

Duru, M, G Balent, A Gibon, D Magda, JP Theau, P Cruz, and C Jouany. 1998. "Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées centrales." *Fourrages* 153:97-113.

Duru, Michel, Pablo Cruz, Guillaume Martin, Jean Pierre Theau, MH Charron-Moirez, Mayeul Desange, Claire Jouany, and Arezki Zerourou. 2010. "Herb'sim: un modèle pour raisonner la production et l'utilisation de l'herbe." *Fourrages* 201:37-46.

Estrela, Teodoro, and Elisa Vargas. (2012). *Water resources management*. "Drought management plans in the European Union. The case of Spain." 26 (6):1537-1553.

Ewing, MA, and DJ Pannell. 1986. "Developing regional pasture research priorities." *WA Department of Agriculture Technote* (6/86).

Falconer, Katherine, and Ian Hodge. (2001). "Pesticide taxation and multi-objective policy-making: farm modelling to evaluate profit/environment trade-offs." *Ecological Economics* 36 (2):263-279.

Farruggia, A, B Martin, R Baumont, S Prache, M Doreau, H Hoste, and D Durand. 2008. "Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux." *Productions animales* 21:181-200.

Faverdin, Philippe, Xavier Chardon, Cyrille Rigolot, Christine Baratte, Christelle Raison, Benoît Piquemal, Roger Martin-Clouaire, Jean-Pierre Rellier, André Le Gall, and Jean-Yves Dourmad. 2011. "Mélodie, un simulateur d'une exploitation d'élevage pour étudier les relations entre conduites des systèmes et risques pour l'environnement." *Innovations Agronomiques* 12:109-119.

Fishwick, Paul A. "A taxonomy for simulation modeling based on programming language principles." *IIE transactions*. (1998). 30 (9):811-820.

Fishwick, Paul A. "A Taxonomy for Simulation Modeling Based on a Computational Framework." *IIE Transactions on IE Research*. Revised and re-submitted May (1996).

Fitzgerald, J. B., Brereton, A. J., & Holden, N. M. (2005). Assessment of regional variation in climate on the management of dairy cow systems in Ireland using a simulation model. *Grass and Forage Science*, 60(3), 283-296

Fleury, P, B Jeannin, and JM Dorioz. 1988. Typologie des prairies de fauche de montagne des Alpes du Nord humides (2ème éd.). GIS Alpes du Nord, Chambéry.

Fleury, Ph, Brigitte Dubeuf, and B Jeannin. 1996. "Forage management in dairy farms: a methodological approach." *Agricultural Systems* 52 (2):199-212.

Fortun-Lamothe, L, Marielle Thomas, Muriel Tichit, Magali Jouven, and Eliel González-García. 2013. "Agro-écologie et écologie industrielle: deux voies complémentaires pour les systèmes d'élevage de demain. Applications potentielles aux systèmes cynicoles." 15. Journées de la Recherche Cynicole.

Fouque, Thierry (1999). "A la recherche des produits flexibles." *Revue française de gestion*. (123):80-87.

Francis, Charles, Geir Lieblein, S Gliessman, Tor A Breland, Nancy Creamer, R Harwood, L Salomonsson, J Helenius, D Rickerl, and R Salvador. (2003). "Agroecology: the ecology of food systems." *Journal of sustainable agriculture*, 22 (3):99-118.

Galan, F, JB Dolle, T Charroin, M Ferrand, and C Hiet. 2007. "Consommation d'énergie en élevage bovin-Des repères pour se situer et progresser." *Renc. Rech. Rum* 14:29-32.

Garcia-Launay, F, C Sibra, H Molenat, C Agabriel, and G Brunschwig. (2012). *The Journal of Agricultural Science* "Grassland use in mountain bovine systems according to a hierarchy of geographical determinants." 150 (2):203-217.

Gerber, Pierre J, H Steinfeld, B Henderson, A Mottet, C Opio, J Dijkman, A Falcucci, and G Tempio. 2013. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Girardin, Philippe, Christian Bockstaller, and Hayo Van der Werf. (1999). "Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems." *Journal of sustainable agriculture* 13 (4):5-21.

Gliessman, Stephen R (1997). "Agroecology: researching the basis for sustainable agriculture." New York: Verlang.

Grime, John Philip (1973). "Competitive exclusion in herbaceous vegetation." *Nature* 242 (5396):344.

Gueringer, Alain, Dominique Orth, Claire Balay, Fabrice and Rurality in Europe. (2013). "10. Contribution of different farming and forage systems to biodiversity: an example in a PDO cheese area in French mountains." *Food Landre*, 283.

Gueringer, Alain, Hélène Rapey, Marie Houdart, Geneviève Bigot, Etienne Josien, and Fabrice Landré. (2009). "Adaptability through spatial management: a case study of livestock farms in the Massif Central, France." *Outlook on Agriculture* 38 (2):111-118.

Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—in theory and application. *Annual review of ecology and systematics*, 31(1), 425-439.

Halberg, N., van der Werf, H. M., Basset-Mens, C., Dalgaard, R., & De Boer, I. J. (2005). Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems. *Livestock Production Science*, 96(1), 33-50.

Hamby, DM. 1994. "A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models." *Environmental monitoring and assessment* 32 (2):135-154.

Hardaker, J. B., Richardson, J. W., Lien, G., & Schumann, K. D. (2004). Stochastic efficiency analysis with risk aversion bounds: a simplified approach. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 48(2), 253-270.

Hardaker, JB, Ruud BM Huirne, PJ Barry, and RP King. (1997). "Risk management strategies in Agriculture: the state of the art and future perspectives."

Hermitte, Marie-Angèle (1992). "La Convention sur la diversité biologique." *Annuaire français de droit international*. 38 (38):844-870.

Hoffman, FO, and RH Gardner. 1983. "Evaluation of uncertainties in environmental radiological assessment models." *Radiological assessments: a textbook on environmental dose assessment*:11-1.

Hubert, Bernard, Nathalie Girard, Jacques Lasseur, and Stephane (1993). "Les systèmes d'élevage ovin préalpins." *Etudes et Recherches sur les Systemes Agraires et le Développement Bellon*. 351-385.

Ingrand, S, B Dedieu, J Agabriel, and L Pérochon. 2002. "Modélisation du fonctionnement d'un troupeau bovin allaitant selon la combinaison des règles de conduite. Premiers résultats de la construction du simulateur SIMBALL." *Renc. Rech. Rum* 9:61-64.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Versailles, France, 310p

INSEE (2018). Indices des prix dans l'agriculture : IPPAP, prix de gros alimentaires (indexation de contrats), IPAMPA, ancienne base (2010). URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/102413565/>

Jacquet, Florence, and J Pluvillage. 1997. "Climatic uncertainty and farm policy: a discrete stochastic programming model for cereal-livestock farms in Algeria." *Agricultural systems* 53 (4):387-407.

Jacquot, A-L, Luc Delaby, Dominique Pomies, Gilles Brunschwig, and René Baumont. (2015). "Dynamic model of milk production responses to grass-based diet variations during grazing and indoor housing." *The Journal of Agricultural Science*, 153 (4):689-707.

Jacquot, Anne-Lise, Rene Baumont, Luc Delaby, Dominique Pomies, Anne Lamadon, and Gilles Brunschwig. 2012. "Dynamilk: un modèle à l'échelle de l'exploitation bovine laitière herbagère pour explorer l'adéquation entre les dynamiques des productions

d'herbe et de lait." 19. Rencontres Recherches Ruminants (3R). 2012-12-052012-12-06, Paris, FRA.

Janssen, Sander, Kamel Louhichi, Argyris Kanellopoulos, Peter Zander, Guillermo Flichman, Huib Hengsdijk, Eelco Meuter, Erling Andersen, Hatem Belhouchette, and Maria Blanco. 2010. "A generic bio-economic farm model for environmental and economic assessment of agricultural systems." *Environmental Management* 46 (6):862-877.

Janssen, Sander, and Martin K Van Ittersum. 2007. "Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models." *Agricultural systems* 94 (3):622-636.

Jeangros, B., Troxler, J., & Schmid, W. (1991). Prairies de Suisse riches en espèces: Description et rendement. *Rev. Suisse Agric*, 23(1), 26-35.

Jeannin, B, Ph Fleury, and JM Dorioz. 1991. "Typologie des prairies d'altitude des Alpes du Nord: méthode et réalisation." *Fourrages* 128:379-396.

Jouven, M, and R Baumont. 2008. "Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity." *Agricultural Systems* 96 (1):260-272.

Jouven, Magali. 2006a. "Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers?: une approche par modélisation des interactions conduite-troupeau-ressources." Paris, Institut national d'agronomie de Paris Grignon.

Jouven, Magali. 2006b. "What is the balance between animal production and sustainable grassland utilization in grassland-based suckler systems? A modelling approach of the management-herd-resources interactions." INAPG (AgroParisTech).

Jouven, Magali, Pierre Loiseau, Anne Farruggia, Dominique Orth, and Rene Baumont. 2007a. "Estimer la diversité floristique des prairies des exploitations herbagères avec

un modèle de simulation couplé à un indicateur'Note de biodiversité'." *Fourrages* (191), 359-376.(2007).

Jouven, Magali, Pierre Loiseau, Anne Farruggia, Dominique Orth, and Rene Baumont. 2007b. "Estimer la diversité floristique des prairies des exploitations herbagères avec un modèle de simulation couplé à un indicateur'Note de biodiversité'." *Fourrages* (191):359-376.

Kim, Kwansoo, Jean-Paul Chavas, Bradford Barham, and Jeremy Foltz. 2012. "Specialization, diversification, and productivity: a panel data analysis of rice farms in Korea." *Agricultural Economics* 43 (6):687-700.

Kingwell, Ross S, David J Pannell, and Stephen D Robinson. 1993. "Tactical responses to seasonal conditions in whole-farm planning in Western Australia." *Agricultural economics* 8 (3):211-226.

Kleijnen, Jack PC. 1995a. "Sensitivity analysis and optimization in simulation: design of experiments and case studies." *Simulation Conference Proceedings*, 1995. Winter.

Kleijnen, Jack PC. 1995b. "Sensitivity analysis and optimization of system dynamics models: regression analysis and statistical design of experiments." *System Dynamics Review* 11 (4):275-288.

Kobayashi, Mimako, Richard E Howitt, Lovell S Jarvis, and Emilio A Laca. 2007. "Stochastic rangeland use under capital constraints." *American journal of agricultural economics* 89 (3):805-817.

Lambert, David K. 1989. "Calf retention and production decisions over time." *Western Journal of Agricultural Economics*:9-19.

Landais, E, and G Balent. 1993. *Pratiques d'élevages extensifs-Identifier-Modéliser-Evaluer*, Ouvrage collectif Etude et recherche N 27 Ed. INRA.

Landais, É., & Gilibert, J. (1991). *Recherches sur l'extensification de l'élevage: éléments de réflexion tirés d'une approche systémique*. INRA.

Landais, Etienne. 2001. *Pratiques d'élevage extensif: identifier, modéliser, évaluer*: Editions Quae.

Landais, Étienne. 1987. *Recherches sur les systèmes d'élevage: questions et perspectives*: Institut national de la recherche agronomique, Département de recherches sur les systèmes agraires et le développement.

Landais, Étienne. (1998). "Agriculture durable: les fondements d'un nouveau contrat social?" *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 33 (33):5-22.

Launay, F, R Baumont, S Plantureux, JP Farrie, A Michaud, and E Pottier. 2011. "Prairies permanentes-des références pour valoriser leur diversité, éd." *Paris: Institut de l'Elevage*.

Le Gal, P. Y., Mérot, A., Moulin, C. H., Navarrete, M., & Wery, J. (2010). A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, 25(2), 258-268.

Le Gall, A, P Faverdin, P Thomet, and R Verite. 2001. "Grazing in New Zealand: some ideas for the rainy regions of Europe." *Fourrages (France)*.

Le Gall, A, A Pflimlin, and M Maheas. 2007. "La prairie, un enjeu économique et sociétal." *Le dossier Economie de l'Elevage, Institut de l'Elevage (Ed), Paris, France*:1-40.

Le Moigne, Jean-Louis. (1994). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*: jeanlouis le moigne-ae mcx.

Le Rohellec, C, D Falaise, C Mouchet, M Boutin, and J Thiebot. (2009). "Analyse de l'efficacité environnementale et énergétique de la mesure agri-environnementale «Système fourrager économe en intrants»(SFEI), à partir de l'analyse de pratiques de quarante quatre signataires. Campagne culturelle 2006/2007." *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 109-112.

Ledos, H., & Moureaux, S. (2013). Durée de gestation pour les principales races de l'espèce bovine : Moyenne et variabilité. *Institut de l'Élevage*, 44.

Lelyon, B, V Chatellier, and K Daniel. (2012). "Production strategies after the end of milk quotas: an analysis based on bio-economic modeling." *Productions Animales* 25 (1):67-76.

Lerbet, Georges. (1984). "Approche systémique et sciences de l'éducation." *Revue française de pédagogie*. 29-36.

Lev, Larry, and David J Campbell. 1987. "The temporal dimension in farming systems research: the importance of maintaining flexibility under conditions of uncertainty." *Journal of Rural Studies* 3 (2):123-132.

Liénard, G, and M Lherm. 1986. "Bases économiques du choix d'un type de production de viande bovine. Cas des troupeaux allaitants." *Production de viande bovine, D. Micol, INRA, France*:273-330.

Loiseau, P. 1991. "Diagnostic appliqué à la gestion des pâturages de montagne." *Fourrages* 125:41-59.

Louhichi, Kamel, Véronique Alary, and Patrice Grimaud. 2004. "A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Réunion Island." *Animal research*, 53 (5):363-382.

Louhichi, Kamel, Argyris Kanellopoulos, Sander Janssen, Guillermo Flichman, Maria Blanco, Huib Hengsdijk, Thomas Heckeley, Paul Berentsen, Alfons Oude Lansink, and Martin Van Ittersum. 2010. "FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies." *Agricultural Systems* 103 (8):585-597.

Manyong, V., Okike, I. and Williams, T. O. (2006) 'Effective dimensionality and factors affecting crop - livestock integration in West African savannas: a combination of

principal component analysis and Tobit approaches', *Agricultural economics*, 35(2), pp. 145-155.

Martin, B., Coppa, M., Verdier Metz, I., Montel, M. C., Joy Torrens, M., Casasús Pueyo, I., & Blanco Alibés, M. (2016). "The contribution of mountain pastures to the link to terroir in dairy and meat products." CIHEAM.

Martin, Guillaume, Laure Hossard, Jean Pierre Theau, Olivier Therond, Etienne Josien, Pablo Cruz, Jean-Pierre Rellier, Roger Martin-Clouaire, and Michel Duru. (2009). "Characterizing potential flexibility in grassland use. Application to the French Aubrac area." *Agronomy for sustainable development*, 29 (2):381-389.

McCarl, Bruce A. 2004. "Gams user guide: (2004)." *Washington: GAMS*.

McCarl, Bruce A, Alex Meeraus, Paul van der Eijk, Michael Bussieck, Steven Dirkse, Pete Steacy, and Franz Nelissen. (2004). McCarl GAMS user guide. Citeseer.

MEA. 2005. "Ecosystem and human well-being: biodiversity synthesis." *World Resources Institute, Washington, DC*.

Michaud, A, Sylvain Plantureux, E Pottier, and R Baumont. 2015. "Links between functional composition, biomass production and forage quality in permanent grasslands over a broad gradient of conditions." *The Journal of Agricultural Science* 153 (5):891-906.

Mignon, Sophie. (2001). *Stratégie de pérennité d'entreprise*: Vuibert.

Milestad, Rebecka, and Ika Darnhofer. (2003). "Building farm resilience: The prospects and challenges of organic farming." *Journal of sustainable agriculture*, 22 (3):81-97.

Miller, DR. (1974). "Sensitivity analysis and validation of simulation models." *Journal of Theoretical Biology*. 48 (2):345-360.

Morlon, Pierre, and Marc Benoit. 1990. "Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système." *Agronomie* 10 (6):499-508.

Mosnier, C, J Agabriel, M Lherm, and Arnaud Reynaud. 2009a. "A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France." *Agricultural Systems* 102 (1-3):77-88.

Mosnier, C, J Agabriel, M Lherm, and Arnaud Reynaud. 2009b. "A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France." *Agricultural Systems* 102 (1):77-88.

Mosnier, C, J Agabriel, P Veyssset, D Bebin, and M Lherm. 2010. "Évolution et sensibilité aux aléas des résultats technico-économiques des exploitations de bovins allaitants selon les profils de production." *Inra Prod. Anim* 23 (1):91-102.

Mosnier, Claire. 2009. "Adaptation des élevages de bovins allaitants aux aléas de prix et de climat: approches par modélisation." Paris, AgroParisTech.

Mosnier, Claire, Anne Duclos, Jacques Agabriel, and Armelle Gac. 2017a. "Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions." *Agricultural Systems* 157:202-215.

Mosnier, Claire, Anne Duclos, Jacques Agabriel, and Armelle Gac. 2017b. "What prospective scenarios for 2035 will be compatible with reduced impact of French beef and dairy farm on climate change?" *Agricultural Systems* 157:193-201.

Mosnier, Claire, Anne Duclos, Michel Lherm, Baptiste Lelyon, Jacques Agabriel, and Armelle Gac. 2015. "Orfée: un modèle bioéconomique pour simuler la production, les résultats économiques et les émissions de gaz à effet de serre des exploitations bovines." 2015; 22. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, FRA, 2015-12-02-2015-12-03*, 89-89.

Mosnier, Claire, Michel Lherm, and Jacques Agabriel. 2012. Parmi les systèmes bovins viande, ceux dont le chargement est plus faible sont-ils moins sensibles aux aléas climatiques?

Moulin, C-H (1993). "Le concept de fonctionnement de troupeau." *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*. 73-93.

Nations Unies, DESA. 2012. World Population Prospects: The 2012 Revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division New York, NY, USA.

Nettier, Baptiste, Laurent Dobremez, Jean-Luc Coussy, and Thomas Romagny. 2010. "Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises." *Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine* (98-4).

O'Neill, RV, RH Gardner, and JB Mankin. 1980. "Analysis of parameter error in a nonlinear model." *Ecological Modelling* 8:297-311.

Oglethorpe, David R, and Roy A Sanderson. (1999). "An ecological-economic model for agri-environmental policy analysis." *Ecological Economics*, 28 (2):245-266.

Olf, Han, and Mark E Ritchie. 1998. "Effects of herbivores on grassland plant diversity." *Trends in ecology & evolution* 13 (7):261-265.

Olson, Kent, and Chris L Mikesell. 1988. The range stocking decision and stochastic forage production. University of Minnesota, Department of Applied Economics.

Orth, D, P Loiseau, A Loisnel, O Perrin, and O Balay. (2004). "Un cas d'évaluation physiologique de la biodiversité: options et questions." *Fourrages* 179:335-352.

Pachauri, Rajendra K, and Andy Reisinger. 2008. *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*: GIEC.

Pannell, David J. 1997. "Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples." *Agric Econ* 16:139-152.

Pannell, David, and Dane Panetta. 1986. "Estimating the on-farm cost of skeleton weed (*Chondrilla juncea*) in Western Australia using a wholefarm programming model." *Agriculture, ecosystems & environment* 17 (3-4):213-227.

Perrin, JB, C Ducrot, JL Vinard, P Hendrikx, and D Calavas. 2011. "Analyse de la mortalité bovine en France de 2003 à 2009." *Productions Animales* 24 (3):235.

Peyraud, JL, P Dupraz, E Samson, A Le Gall, and L Delaby. 2010. "Produire du lait en maximisant le pâturage pour concilier performances économiques et environnementales." *Renc. Rech. Rum* 17:17-24.

Pflimlin, A (2008). "Evolution de l'Europe laitière et des systèmes fourragers. Argumentaire pour une autre politique." *Fourrages*, 196: 401-424.

Pflimlin, A., Faverdin, P., & Béranger, C. (2009). Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. *Fourrages* (200), 429-464. (2009)

Plantureux, S. (1996). Biodiversité, type de sol et intensité de l'exploitation de prairies permanentes du Plateau lorrain. *Acta botanica gallica*, 143(4-5), 339-348.

Poetsch, E. M. (2008). LIFS & livestock production—grassland and dairy farming in Austria. *Low Input Farming Systems: an Opportunity to Develop Sustainable Agriculture*, 33.

Pottier, E, A Michaud, JP Farrié, Sylvain Plantureux, and Rene Baumont. 2012. "Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux." *Innovations Agronomiques* 25.

RA. 2010. "Recensement Agricole." <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010>.

Randrianasolo, Jery, Philippe Lecomte, Paulo Salgado, and Jonathan Vayssières. 2009. "Modélisation bioéconomique des alternatives techniques d'intégration cultures élevages dans les fermes laitière malgaches."

Rehman, Tahir, and Carlos Romero. (1993). "The application of the MCDM paradigm to the management of agricultural systems: some basic considerations." *Agricultural systems*, 41 (3):239-255.

Reix, Robert. 1997. "Flexibilité." *Simon Y. et Joffre (éd.), P. Encyclopédie de gestion, Economica*.

Ridier, Aude, and Florence Jacquet. 2002. "Decoupling direct payments and the dynamics of decisions under price risk in cattle farms." *Journal of Agricultural Economics* 53 (3):549-565.

Romera, A. J., Morris, S. T., Hodgson, J., Stirling, W. D., & Woodward, S. J. R. (2004). A model for simulating rule-based management of cow–calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 42(2), 67-86.

Rotz, C Alan, Michael S Corson, and Dawn S Chianese. (2012). "THE INTEGRATED FARM SYSTEM MODEL."

Rouillé, B., Devun, J., & Brunschwig, P. (2014). L'autonomie alimentaire des élevages bovins français. *OCL*, 21(4), D404.

Ruget, Françoise, S Novak, and S Granger. 2006. "Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée." *Fourrages* 186 (241):256.

Ruget, Françoise, Sylvain Satger, Florence Volaire, and François Lelièvre. (2009). "Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS." *Crop science* 49 (6):2379-2385.

Réquillart, Vincent, Z Bouamra-Mechemache, R Jongeneel, and C Penel. (2008). Economic analysis of the effects of the expiry of the EU milk quota system. Institut d'Economie Industrielle.

Sauvant, Daniel, and Jean-Marc Perez. (2010). "Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage. Avant propos." *INRA Productions Animales* 23 (1):3.

Schläpfer, Felix, Michael Tucker, and Irmi Seidl. (2002). "Returns from hay cultivation in fertilized low diversity and non-fertilized high diversity grassland." *Environmental and Resource Economics* 21 (1):89-100.

Schuler, Johannes, and Harald Kächele. "Modelling on-farm costs of soil conservation policies with MODAM." *Environmental Science & Policy* 6.1 (2003) : 51-55.

Sckokai, Paolo, Peter Witzke, Ignacio Pérez Domínguez, T Jansson, and M Kempen. (2011). "Economic and environmental impacts of milk quota reform in Europe." *Journal of Policy Modeling*, 33 (1):29-52.

Soussana, Jean-François, and Gilles Lemaire. 2014. "Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190:9-17.

Soussana, Jean-François, T Tallec, and Vincent Blanfort. (2010) "Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands." *Animal*. 4 (3):334-350.

Spedding, CRW. (1988). "General aspects of modelling and its application in livestock production." *animal science*.

SRVA. (2002). "Service Romand Vulgarisation Agricole." <http://www.srva.ch>.

Steinwigger, A., Starz, W., Podstatzky, L., Kirner, L., Pötsch, E. M., Pfister, R., & Gallnböck, M. (2010). Low-Input Vollweidehaltung von Milchkühen im Berggebiet Österreichs—Ergebnisse von Pilotbetrieben bei der Betriebsumstellung. *Züchtungskunde*, 82, 241-252.

Stöckle, Claudio O, Marcello Donatelli, and Roger Nelson. (2003). "CropSyst, a cropping systems simulation model." *European journal of agronomy* 18 (3):289-307.

Teague, WR, and JK Foy. (2002). "Validation of SPUR2. 4 rangeland simulation model using a cow-calf field experiment." *Agricultural systems*. 74 (2):287-302.

Ten Napel, J, AA Van der Veen, SJ Oosting, and PWG Groot Koerkamp. (2011). "A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability." *Livestock Science*. 139 (1-2):150-160.

Therond, O. (coord.), Tichit M. (coord.), Tibi A. (coord.), Accatino F., Biju-Duval L., Bockstaller C., Bohan D., Bonaudo T., Boval M., Cahuzac E., Casellas E., Chauvel B., Choler P., Constantin J., Cousin I., Daroussin J., David M., Delacote P., Derocles S., De Sousa L., Domingues Santos J.P., Dross C., Duru M., Eugène M., Fontaine C., Garcia B., Geijzendorffer I., Girardin A., Graux A-I., Jouven M., Langlois B., Le Bas C., Le Bissonnais Y., Lelièvre V., Lifran R., Maigné E., Martin G., Martin R., Martin-Laurent F., Martinet V., McLaughlin O., Meillet A., Mignolet C., Mouchet M., Nozières-Petit M-O., Ostermann O.P., Paracchini M.L., Pellerin S., Peyraud J-L., Petit-Michaut S., Picaud C., Plantureux S., Poméon T., Porcher E., Puech T., Puillet L., Rambonilaza T., Raynal H., Resmond R., Ripoché D., Ruget F., Rulleau B., Rush A., Salles J-M., Sauvant D., Schott C., Tardieu L. (2017). Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques. Rapport d'étude, Inra (France), 966 pages.

Thiébaud, F, P Cozic, F Véron, C Brau-Nogué, and A Bornard. (2001). "Intérêts et limites des différents couverts fourragers et pratiques associées vis-à-vis de l'environnement. Analyse bibliographique." *Fourrages* 168:449-475.

Thomas, Marielle, Laurence Fortun-Lamothe, Magali Jouven, Muriel Tichit, E Gonzalez-Garcia, Jean-Yves Dourmad, and Bertrand Dumont. (2014). "Agro-écologie et écologie industrielle: deux alternatives complémentaires pour les systèmes d'élevage de demain." *Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage*:89-100.

Thomas, V. G., and P. G. Kevan. "Basic principles of agroecology and sustainable agriculture." *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 6.1 (1993) : 1-19.

Thompson, PB, and A Nardone. (1999). *Livestock production science*. "Sustainable livestock production: methodological and ethical challenges." 61 (2-3):111-119.

Thornton, Philip.K. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. (2010). "Livestock production: recent trends, future prospects." 365 (1554):2853-2867.

Tichit, Muriel, Bernard Hubert, Luc Doyen, and Didier Genin. "A viability model to assess the sustainability of mixed herds under climatic uncertainty." *Animal Research* (2004) 53 (5):405-417.

Tichit, Muriel, Daniele Magda, Daphné Durant, Anne Lauvie, Elisabeth Lécivain, Gilles Martel, Bénédicte Roche, Christine De Sainte Marie, Rodolphe Sabatier, and F TEILLARD. (2012). "Systèmes d'élevage et biodiversité: des antagonismes aux synergies." *Actes des 19e Journées des Rencontres Recherches Ruminants, 5-6 décembre 2012, Centre des Congrès de la Villette, Paris, France*:1-8.

Tichit, Muriel, Laurence Puillet, Rodolphe Sabatier, and F Teillard. (2011). "Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: functional diversity matters." *Livestock Science* 139 (1-2):161-171.

Topp, CFE, and M Mitchell "Forecasting the environmental and socio-economic consequences of changes in the Common Agricultural Policy." *Agricultural Systems* (2003) 76 (1):227-252.

Upton, J., J. Humphreys, P. W. Groot Koerkamp, P. French, P. Dillon, and I. J. De Boer. 2013. "Energy demand on dairy farms in Ireland." *J Dairy Sci* 96 (10):6489-98. doi: 10.3168/jds.2013-6874.

Van der Ploeg, Jan Douwe. 2003. *The virtual farmer: past, present and future of the Dutch peasantry*: Uitgeverij Van Gorcum.

van der Werf, Hayo MG, Claver Kanyarushoki, and Michael S Corson. (2009). "An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment." *Journal of environmental management* 90 (11):3643-3652.

Veen, Peter, Ricard Jefferson, J de Smidt, and Jvd Straaten. 2009. *Grasslands in Europe of high nature value*: KNNV.

Veysset, P, M Lherm, and D Bébin. 2002. "Conséquences de la crise bovine en 2001 sur les résultats économiques des exploitations d'élevage bovin allaitant charolais." *Renc. Rech. Rum* 9:177-180.

Veysset, P, JCHA UTCOLAS, and D BEBIN. 2000. "Un outil d'aide à la décision dans le choix du système d'exploitation en élevage bovin allaitant."

Veysset, Patrick, Didier Bébin, and Michel Lherm. 2005. "Adaptation to Agenda 2000 (CAP reform) and optimisation of the farming system of French suckler cattle farms in the Charolais area: a model-based study." *Agricultural Systems* 83 (2):179-202.

Vilain, Lionel. 2008. *La méthode IDEA: indicateurs de durabilité des exploitations agricoles*: Educagri éditions.

Wastney, ME, CC Palliser, JA Lile, KA Macdonald, JW Penno, and KP Bright. 2002. "A whole-farm model applied to a dairy system." PROCEEDINGS-NEW ZEALAND SOCIETY OF ANIMAL PRODUCTION.

Wezel, Alexander, and Virginie Soldat. 2009. "A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology." *International Journal of Agricultural Sustainability* 7 (1):3-18.

Wood, PDP. "Algebraic model of the lactation curve in cattle." *Nature*. (1967) 216 (5111):164.

Yu, C, JJ Cheng, and AJ Zielen. 1991. "Sensitivity analysis of the RESRAD, a dose assessment code." *Transactions of the American Nuclear Society;(United States)* 64 (CONF-911107--).

REALISATIONS SCIENTIFIQUES

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES AVEC ACTES

- **Présentation de la thèse à l'occasion de la journée des doctorants à UMR1213 Herbivores - Theix - Inra le 3 Mars 2016.**
- **Présentation à la journée des doctorants à UMR1213 Herbivores - Theix - Inra le 31 Mars 2017 (Résultats préliminaires).**
- **Poster aux JED (Journées de l'Ecole Doctorale SVSAE) 18 et 19 Mai 2017**
- **Présentation aux journées scientifiques organisées par L'ARC Environnement, Envirhônalp et la Fédération des Recherches en Environnement du site Clermont-Ferrand le 15 juin 2017.**
- **Présentation Poster au 12th INTERNATIONAL Meeting on Mountain cheese 20-22 June 2017 at Padova, Italy**
Title: *Capacities of dairy and suckling herds to valorize grassland resources in mountain areas: use of a bio economic optimization model to study the influence of the structure of livestock systems*
June 2017 Padova University Press Università degli Studi di Padova via 8 Febbraio 2, Padova www.padovauniversitypress.it ISBN 978-88-6938-059-4.
- **Poster pour 10th. International Symposium on the Nutrition of Herbivores (ISNH10) ; du 2 au 6 Septembre , 2018. Clermont-Ferrand (France)**
Title: *Grazing performance and the use of concentrate in double herds breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: a bioeconomic simulation analysis*
Published: Advances in Animal Biosciences, 9 (3), Editeur: Cambridge University Press, Cambridge (Royaume Uni), ISSN : 2040-4700 Pages : 214-214.
- **Poster pour la 24e édition 3R - Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants- Congrès international francophone 5 et 6 décembre 2018, Paris.**

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Article scientifique soumis dans la revue scientifique Livestock Science le 17 mai 2018 sous la référence livsci-d-18-495.

Article title: Biotechnical and economic performance of mixed herd breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: exploration of the impact of herd proportions using the Orfee model

Article scientifique approuvée par la revue scientifique Agricultural Systems le 30 janvier 2019 sous la référence AGSY_2575 (Cf. Agricultural Systems 171 (2019) 126–134)

Article title: Profit stability of mixed dairy and beef production systems of the mountain area of southern Auvergne (France) in the face of price variations: Bioeconomic simulation

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Contribution au module agriculture tropicale avec les Ingénieurs 2^{ème} année VetAgro-Sup Campus Agronomique de Clermont- Ferrand :

Cours sur la culture de café et le cacao en Côte d'Ivoire

- Présentation des itinéraires techniques de production du café et du cacao
- Présentation des circuits et politiques de commercialisation

MODULES TECHNIQUES ET BIOLOGIQUES

- Formation de programmation mathématique sous GAMS et présentation du modèle Orfee du 18 au 21 avril 2017 à l'INRA de Theix,
- Ecoles chercheurs « l'Approches interdisciplinaires de la modélisation des agroécosystèmes (Système complexe, Modèle, Code) » Du 7 au 10 mars 2017 à Sainte Foy Lès Lyon,
- Summer school agroécologie et productions animales du 26 au 29 juin 2017.
- Formation Google digital Active organisée par l'Université Clermont-auvergne les 30-31 mai et 1er Juin à la faculté de Médecine de Clermont-Ferrand (formation cloturée par un test de certification validé) *23 Modules couvrant de nombreux thèmes du marketing digital : Recherche, emailing, médias sociaux, display, vidéo, e-commerce, ciblage, analyse d'audience*
- Ecole-Chercheurs MEXICO Méthodes pour l'EXploration Informatique des modèles COMplexes "Analyse de sensibilité, métamodélisation et optimisation de modèles complexes" 26-30 mars 2018 ; Résidence club La Fayette, La Rochelle
- Formation initiale PSC1 (Prévention et Secours Civiques de niveau 1) du 04/10/2018 au 05/10/2018, salle Vassivière (CVRH de Clermont) 45, rue Jules Verne 63051 CLERMONT-FERRAND CEDEX 02

MODULES SOCIO-PROFESSIONNELS

- Module (OSP 6) : La propriété intellectuelle
- Module (OSP 19) Commerce international
- Module (OSP 24) : Maîtriser l'information stratégique
- Module (OSP 23) Management
- Module (SP44) Montage de projets européens
- Module (SP21) La création d'entreprise
- Module (SP31) Devenir consultant après son doctorat

SIGLES ET ABREVIATIONS

AML : Langage de Modélisation Algébrique
AOC : Appellation d'Origine Contrôlée
AOP : Appellation d'Origine Protégée
ARS : Agricultural Research Service
CH₄ : Méthane
CO₂ : Dioxyde de carbone
COMETE : Conception, Modélisation et Evaluation des sysTèmes d'Elevage d'herbivores
CPER : Contrat de Plan Etat Région
EBE : Excédent Brut d'Exploitation
EIA : Environmental Investigation Agency
EQF : EQuivalent litre de Fioul
FAO : Food and Agriculture Organisation
GAMS : General Algebraic Modeling System
GES : Gaz à Effet de Serre
Ha : Hectare
ICHN : Indemnités Compensatoires de Handicaps Naturels
IDE : Environnement de Développement Intégré
IGP : Indication Géographique Protégée
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
ITK : Itinéraire Technique
KWh : kilowattheure
MEA : Millenium Ecosystem Assessment
MJ : Méga Joules
MS : Matière Sèche
N₂O : Protoxyde d'azote
OMC : Organisation Mondiale du Commerce
Orfee: Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment
PAC : Politique Agricole Commune
PB : Produit Brut

PDIA : Protéines vraies réellement Digestibles dans l'Intestin, d'origine Alimentaire

PDIE : Protéines Digestibles par l'Intestin grêle grâce au contenu Energétique des aliments

PDIN : Protéines Digestibles par l'Intestin grêle grâce à la teneur en azote des aliments pour animaux

PDRN : Plan de Développement Rural National

RA : Recensement Agricole

SAU : Surface Agricole Utile

SFP : Surface Fourragère Principale

SRVA : Service Romand de Vulgarisation Agricole

STH : Superficie Toujours en Herbe

MS : Matière Sèche

UAA : Usable Agricultural Area

UEB : Unité d'Encombrement Bovin

UEL : Unité d'Encombrement Lait

UFL : Unité Fourragère Lait

UFV : Unité Fourragère Viande

UGB : Unités de Gros Bétail

UMO : Unité de Main d'Œuvre

UMRH : Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores

UTA : Unité de Travail Agricole

VA : Vache Allaitante

VL : Vache Laitière

LISTE DES ILLUSTRATIONS

CHAPITRE I : Introduction générale

CHAPITRE II : Synthèse bibliographique

Figures

Figure 1. Arbre typologique des exploitations avec des élevages mixtes lait-viande (Source : (RA, 2010)) 15

CHAPITRE III : Objectifs scientifiques et méthodologie générale

Tableaux

Tableau 1. Correspondance entre les questions traitées, les hypothèses et axes d'études. 42

Tableau 2. Plan d'expérience avec cinq distributions de troupeaux. 52

Figures

Figure 1. Diagramme illustratif de la démarche de la thèse. 48

CHAPITRE IV : Le Modèle Orfee et adaptation à la question de recherche

Tableaux

Tableau 1. Lactation standard selon la composition de la race et du lait. 59

Tableau 2. Quantités de biomasse et des valeurs alimentaires par période. 66

Tableau 3. Sommes de température mensuelle à 900m d'altitude. 66

Tableau 4. Croissance printanière des 5 types de prairies d'altitude. 66

Tableau 5. Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1). 67

Tableau 6. Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne (ITK2). 69

Tableau 7. Valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/Kg MS). 71

Tableau 8. Présentation des valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/kg MS) dans le pré modèle de l'outil d'évaluation Orfee. 72

Tableau 9. Quantité de fourrage pour les 5 prairies d'altitude (PA1 à PA5) pour l'itinéraire technique ITK1 « pâturage en toutes saisons de la production d'herbe », mois par mois, avec valeurs moyennes et écart type. 72

Tableau 10. Caractéristiques des cas-types de BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2). 77

Tableau 11. Tableau récapitulatif des principaux paramètres de simulation. 78

Tableau 12. Spécification des paramètres fixes et optimisés. 79

Tableau 13. Tableau récapitulatif des paramètres valeurs observées pour le calibrage du modèle. 81

Tableau 14. Comparaison des productions végétales et alimentations de la Ferme 1. 82

Tableau 15. Comparaison des productions végétales et alimentations de la Ferme 2. 83

Tableau 16. Comparaison des récoltes de fourrage par UGB de la Ferme 1. 83

Tableau 17. Comparaisons des récoltes de fourrage par UGB de la Ferme 2. 84

Tableau 18. Comparaisons des productions animales de la Ferme 1.	85
Tableau 19. Comparaisons des productions animales de la Ferme 2.	87
Tableau 20. Comparaisons des résultats économiques de la Ferme 1.	88
Tableau 21. Comparaisons des résultats économiques de la Ferme 2.	89

Figures

Figure- 1. Schéma de fonctionnement de GAMS (Source : (McCarl et al., 2004)).	62
Figure- 2. Concept d'adaptation du modèle support.	63

CHAPITRE V : Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne

Tableaux

Table 1. Quantity of fodder for the 5 altitude pastures (PA1 to PA5) for the technical itinerary “grazing all seasons of grass production”, month by month, with Mean values and standard deviation.	99
Table 2. Mean values and standard deviation for the 5 altitude feed values for the technical itinerary “grazing all seasons”, month by month.	100
Table 3. Summary of main features and breeding system of Farm_1 and Farm_2.	102
Table 4. Presentation of the experimental plan.	102
Table 5. Categories and states of the main parameters used for the different simulations. ...	104
Table 6. Differences between simulation results and reference farm data.	107
Table 7. Table of indicators of production, feeding, pasture and grazed grass utilization. ...	108
Table 8. Table of economic results.	110

CHAPITRE VI : Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix

Tableaux

Table- 1. Main characteristics of mixed cattle systems Farm_1 (moderate size with summer grazing) and Farm_2 (large size with scattered fields and some crops) (Farms BL18 and BL22, respectively, in Chambre d'Agriculture du Cantal (2015)).	148
Table- 2. Baseline values of technical, biological, and economic outputs for the five scenarios of the two farms.	149
Table- 3. Mean local sensitivity indices and global sensitivity indices (elasticities) calculated for the five scenarios of the two farms over 16 simulated years.	150
Table S 1. Virtual experimental design for Farm_1, varying prices of milk, beef, and “concentrated feed” among three levels simultaneously to analyze sensitivity in predicted net profit for five scenarios of dairy and beef cattle herd distribution.	152
Table S 2. Virtual experimental design for Farm_2, varying prices of milk, beef, and “concentrated feed” among three levels simultaneously to analyze sensitivity in predicted net profit for five scenarios of dairy and beef cattle herd distribution.	153
Table S 3. Regression results for the metamodels of Farm_1.	154

Table S 4. Regression results for the metamodels of Farm_2.....	154
Table S 5. Values of Pr ($> t $) of coefficients for each scenario of Farm_1	155
Table S 6. Values of Pr ($> t $) of coefficients for each scenario of Farm_2	155
Table S 7. Characteristics of the main parameters of fields used for simulations	156

Figures

Figure. 1. Diagram of the model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment). GAMS = General Algebraic Modeling System	143
Figure. 2. Number of animal units (AU) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25).	145
Figure. 3. Mean net profit (€) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25).	147
Figure. 4. Boxplots of net profit from 27 simulations in scenarios of Farm_1 and Farm 2 in which prices of milk, beef, and “concentrated feed” varied simultaneously among three levels..	147

Appendices

Appendix 1. Price indices of agricultural products from 2000-2015 corrected for inflation for milk, beef, and “concentrated feed” (a weighted mean of several feeds) (“IPPAP” prices from INSEE (2018)).....	151
Appendix 2. Prices of feeds (per t) for the reference year (2010) (INSEE 2018) used to calculate the weighted mean of “concentrated feed” in the study’s metamodels.....	151

CHAPITRE VII : Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes herbagers : Analyse environnementale des systèmes bovins mixtes

Tableaux

Tableau- 1. Caractéristiques et récapitulatif des principaux paramètres de simulation des cas-types de BL18 (Ferme_1) et BL22 (Ferme_2).	165
Tableau- 2. Correspondances entre les types de prairies de la typologie régionale et de la typologie nationale.	172
Tableau- 3. Récapitulatif des notes des différents services écosystémiques associées aux types de prairie utilisés pour l'évaluation.	174
Tableau- 4. Notes (notes sur 3) correspondantes aux services écosystémiques associés aux prairies considérées en fonction des pratiques agricoles.	176
Tableau- 5. Récapitulatif des émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie selon différentes unités fonctionnelles.	178
Tableau- 6. Distribution des parcelles, et modes de valorisation (ITK*).	180
Tableau- 7. Tableau récapitulatif des niveaux (notes sur 3) des services écosystémiques des scénarios des deux fermes.	181
Tableau- 8. Tableau récapitulatif des modes et niveaux de valorisation de la biomasse.	182

Tableau- 9. Tableau des indicateurs de production, d'alimentation, de pâturage et d'utilisation du pâturage.	188
Tableau- 10. Récapitulatif des productions animales (lait, viande), émissions de Gaz à Effet de Serre et consommations d'énergie selon différentes unités fonctionnelles.....	189

Figures

Figure~ 1. Consommations totales d'énergie par UGB (GJ/UGB) et par unité de protéine (MJ/Kg protéine).....	179
Figure~ 2. Émissions totales de GES par UGB (tonnes éq CO ₂ /UGB) et par unité de protéine (kg éq CO ₂ / Kg protéine).....	179
Figure~ 3. Évolution des types de prairies avec les pratiques agricoles " les types de prairies de la typologie régionale et de la typologie nationale".	190

CHAPITRE VIII : Discussion générale

CHAPITRE IX : Conclusion et perspectives

ANNEXES

Printemps 2016
Enquêteurs : _____

Date d'enquête : _____
N° d'enquête : _____

Questionnaire d'enquête
Caractérisation des systèmes d'exploitation doubles troupeaux dans le massif central

- Besoin de **photos**, **schéma** ou carte, les trois **fichiers îlots (.dbf , .shp , .shx)**
(À signaler à l'agriculteur avant l'enquête)
- Présenter le plan du questionnaire à l'agriculteur,
- Les informations en italiques sont secondaires ou à renseigner moi-même.

I. Identification

Nom et prénom(s) de l'agriculteur : _____

Adresse du siège : _____

Téléphone : _____

Nom de l'exploitation : _____

☐ (1) EA individuelle ☐ (2) GAEC ☐ (3) EARL ☐ (4) Autre : _____

N° EDE : _____

II. Description du parcellaire (remplir fiche de description du parcellaire)

- Description de SAU, de prairie permanentes et de prairies temporaires.

Description de la SAU

Prairies Permanentes _____ ha

Prairies Temporaires _____ ha

Surface des cultures _____ ha

(.....)

On en tire la SAU totale et la surface en herbe _____

(À demander si nécessaire pour vérification)

Altitude du siège d'exploitation : _____ m

Altitude du buron : _____ m (s'il y en a un)

III. Contexte agro-pédo-climatique (à remplir ultérieurement par l'enquêteur)

☐ (1) Volcanique tout herbe ☐ (2) Volcanique labouré ☐ (3) Granitique d'altitude ☐ (4) Granitique avec maïs possible ☐ (5) Autres : _____

IV. Structure, moyens de production

	Associés	Salariés	Prestations entreprises, CUMA	Personnes bénévoles
Nombre de personnes				
Nombre d'UTH				

UTH (à calculer):.....

V. Productions annuelles (Faire valider par l'agriculteur)

La production globale de lait en litres : _____

Période de vêlage : _____

Intervalle vêlage- vêlage en jour (IVV) : _____

Durée de tarissement : _____

Quel est votre quota fermier (ou vente directe) ? _____

Traite toute l'année (O/N) : _____

Si traite toute l'année, préciser le creux de production : _____

SI NON

- Date de début de la période de traite : _____

- Date de fin de la période de traite : _____

- Date de fermeture de la salle de traite : _____

Variation des stocks / Cheptel « conduite animale »

Précision de l'année ou de la campagne _____

1. Troupeau laitier

Types	Races	Effectifs à la date d'enquête	Achats période d'enquête	Vente en 2015	Poids vif (Kg)	UGB	Obs
Vaches laitières							
G ₂₋₃							
G ₁₋₂							
G ₀₋₁							
Veaux vendus entre 8 et 15 jours							
Mâles reproducteurs							
Autres							

Mode de reproduction : _____

Age de premier vêlage : _____

Nombre de génisses intégrant le troupeau par an : _____

Les pertes durant l'année d'exercice pris en compte : _____

Autres ventes : _____

2. Troupeau Allaitant

Types	Races	Effectifs à la date d'enquête	Achats période d'enquête	Vente en 2015	Poids Moyen (Kg)	UGB	Observations
Vaches allaitantes							
Veaux de boucherie							
Broutards							
Taurillons maigres (âges ?)							
Taurillons finis (âges ?)							
Bœufs							
G ₂₋₃							
G ₁₋₂							
G ₀₋₁							
Taureaux reproducteurs							
Autres							

Mode de reproduction _____

Age de premier vêlage : _____

Les périodes de vêlage : _____

Nombre de génisses intégrant le troupeau : _____

Les pertes durant l'année d'exercice pris en compte : _____

Autres ventes : _____

Autres productions : _____

VI. Typologie des prairies (Déterminer la typologie à partir des informations des feuilles A3)

Remplir le Tableau 1 : Caractéristiques des parcelles Cf. feuille A3 jointe

Remplir le Tableau 2 : Calendrier Cf. feuille A3 jointe

(Indiquer chaque fois les périodes ou les dates en fonction des indications de l'agriculteur)

Récapitulatif des **récoltes** – Campagne (période) _____

<i>préciser matière sèche ou brute (MS/MB)</i>	Surface (ha)	Rendement (t/ha) (MS / MB)	Nombre d'unités*	Poids d'unité *	Quantité récoltée	Achat _____	Vente _____	Surface récoltée (ha) à remplir à posteriori
Foin								
Regain								
Enrubannage								
Ensilage d'herbe								

* unité : balle, silo,

Bilan fourrager :

En règle générale (année normale), êtes-vous ... ?

☐ Déficitaire de combien ? : _____

☐ Autosuffisant

☐ Excédentaire

de combien ? : _____

VII. Alimentation et composition des rations :

Quelles sont les rations hivernales et complémentations au pâturage par lot d'animaux ?

Lot	N° ration	Début et fin de la période	Quantité de fourrage Préciser /jour ou /repas, /animal ou /lot, MS ou MB	Quantité de concentré Préciser /jour ou /repas, /animal ou /lot, MS ou MB

VIII. Caractéristiques des bâtiments

[illegible]

Logements plus probables : *Stabu_paill, Logettes paillées, Logettes_lisier*

Les bâtiments vous imposent-ils un mode de récolte particulier ?

☐ Oui

☐ Non

Si oui quel type de récolte

La capacité de stockage de fourrage permise par vos bâtiments est-elle suffisante ?

☐ Oui

☐ Non

Si non dans quelles situations

Quelles sont les conséquences sur la gestion des surfaces ?

Enrubannage stocké dehors, foin sous bâches, période de pâturage allongée...

Le bâtiment destiné aux animaux a-t-il un nombre de places suffisant ?

☐ Oui

☐ Non

Si non quelles sont les conséquences sur la gestion des surfaces et la conduite des animaux ?

Surfaces sacrifiées pour les animaux pendant l'hiver, modifications de conduite des animaux (Ventes précoces, tarissements avancés, vélages tardifs, mise en pension...)

Informations sur l'état des bâtiments

IX. Cultures

Dénomination	Surface (ha)	Rendement (kg brut/ha)	Achats (kg) *	Ventes (kg)*	Stock début (kg)*	Stock fin (kg)*

** A remplir par l'enquêteur en s'appuyant sur les informations précédentes*

X. Opérations culturales et consommation d'énergie

Opérations	Caractéristiques équipements (poids, puissances...)	Temps d'utilisation (ha/ heure)	Consommation d'énergie à l'hectare (préciser les unités)
Labour			
Travail du sol			
Semis			
Combiné			
Fertilisation			
Traitement			
Fauche			
Pressage RB			
Pressage BB			
Pressage basse densité			
Ensileuse			
Moiss-batt			
Epandage fumier			
Epandage lisier			
Autre tracteur			
Télescopique			

Quelles sont vos cultures habituelles ?

Quelles sont les cultures propres à l'année 2015

Comment qualifiez-vous l'année 2015 par rapport aux années antérieures

XI. Données économiques

Année d'exercice : _____

1. Politique agricole commune (PAC)

Prime au Maintien du Troupeau de Vaches Allaitantes ou PMTVA : _____

Indemnité Compensatoire de Handicap Naturel " ICHN " (O/N) : _____

Droit à Paiement Unique "DPU" (€) _____

Active PHAE (O/N) : _____ (valeur) _____

Charges vétérinaires / VL (€ / VL) : _____

Charges vétérinaires / UGB (€ / UGB) : _____

2. Charges (en €)

Charge de fermage _____

Cotisations sociales _____

Montant total des charges diverses (activités annexes) _____

Charges de la SAU (Travaux du sol/récoltes/épandage/irrigation/chantiers de drainage)

XII. Aléas climatiques et sanitaires

1. Aléas climatiques

Comment qualifiez-vous les récoltes de fourrage de 2015 par rapport aux années précédentes ?

Quelles sont les périodes de perturbations climatiques de l'année 2015 ?

Quelles sont les conséquences de ces perturbations sur la conduite des surfaces et la production ?

Troupeau laitier: _____

Troupeau allaitant : _____

2. Aléas sanitaires

Perturbations sanitaires rencontrées _____

Conséquences sur la production et les conduites des animaux

Troupeau laitier: _____

Troupeau allaitant : _____

3. Gestion des aléas:

Comment avez-vous géré ces manques de production fourragère (pâturage ou récolte) ?

☐ Acheter des aliments concentrés ou/et des fourrages

☐ Retarder la période de fauche (augmenter les quantités récoltées)

☐ Allonger la période de pâturage

☐ Changer l'alimentation des vaches (sous-alimentation passagère, complémentation...)

☐ Vendre des animaux

☐ Diminuer les objectifs de production

☐ Modifier l'équilibre fauche/pâturage

☐ Tarir des vaches pour décharger les pâtures

☐ Autre solution (à préciser)

En termes de régulation du système fourrager, nous nous attendons à obtenir certains de ces éléments : achat d'aliments, quantité privilégiée à la qualité pour la constitution du stock fourrager, période de pâturage allongée, accepter une sous-alimentation passagère des vaches en comptant sur la mobilisation de leurs réserves, vente des vaches, diminuer les objectifs de production, évolution du chargement, réduction de la surface de fauche au profit du pâturage, tarissement des VL pour décharger les pâtures...

Quelles sont les principaux atouts et contraintes de votre parcellaire ?

Atouts	Contraintes

4. Conséquences, atouts et/ou contraintes du parcellaire

- Sur la traite

- Sur les apports de complémentation alimentaire au champ

- Sur le trajet avec les animaux

- Sur la surveillance

- Sur la constitution des lots d'animaux

- Autres :

XIII. Questions d'ordre général

Pourquoi avez-vous choisi un système d'élevage double troupeaux ?

Quels sont les avantages majeurs des systèmes doubles troupeaux ?

Quels sont les inconvénients majeurs des systèmes doubles troupeaux ?

Quelle est pour vous la production la plus importante sur le plan économique ?

Est-ce que le fait d'avoir un double troupeau présente des avantages pour l'environnement ? Pourquoi ?

Est-ce que le fait d'avoir un double troupeau permet de mieux faire face aux aléas ? Pourquoi ?

Quels sont les avantages et inconvénients d'avoir une diversité de production ?

Quelles sont les conséquences des systèmes doubles troupeaux sur le travail ?

Que représente la biodiversité prairiale pour vous ?

Quelles sont vos mesures et méthodes de préservation de la biodiversité prairiale ?

Comment voyez-vous l'évolution des systèmes doubles troupeaux dans le contexte actuel ?

Avez-vous des éléments complémentaires à mentionner ?

XIV. **Schéma d'allotement** (A faire moi-même Utile pour la vérification des résultats et les discussions)
Cf. Notice et feuille A3

Merci !

Capacities of dairy and suckling herds to valorize grassland resources in mountain areas: use of a bio economic optimization model to study the influence of the structure of livestock systems

Z. Diakité^{2, 1*}, C. Mosnier^{1, 2}, R. Baumont^{1, 2}, G. Brunschwig^{2, 1}

¹INRA, UMR1213, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France;

²Université Clermont Auvergne, VetAgro-Sup, UMR1213 BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

*zakary.diakite@vetagro-sup.fr

Abstract

Cattle farming systems with dairy and suckling herds in the Massif Central would improve the valuation of grassland resources and offer better economic performance than specialized herd systems. To verify these hypotheses, we used the bio economic optimization model "Orfée" to represent two Farm-types of the south of Auvergne (ref. BL18 and BL22). The model was enriched with the representation of grassland production from the national typology of permanent grasslands. For each farm, we used the following experimental plan for the simulations: (D for dairy herd LU and S for suckling herd LU) 100% D, 75% D-25% S, 50% D-50% S, 25% D-75% S, 100% S, and a herd distribution equals to the distribution of the considered farm. The result shows a better valuation of grassland resources for intermediate systems with a balanced distribution between dairy and suckling herd, conversely, a lesser one for specialized systems. Balanced LU systems offer the best economic compromise with reasonable loads and provide meat in addition to good quality milk.

Keywords: optimization model, farm-types, grassland resources, valuation, dairy cattle, suckling cattle

Introduction

Research are being done to improve the management of cattle farming systems. In the case of grass-fed cattle farms most of the research concerns forage autonomy and many of them show the essential role of grass valuation by grazing. In the field, the mountainous areas constitute rich territories in grassland resources and are used for cattle farming. But, the geographical characteristics do not play in favor of the valuation of the plots (Fleury et al., 1996). Indeed, mountainous areas present geographical constraints, namely slopes, obstacles in addition to the fragmentation of the plot, which makes it difficult to allocate plots to dairy cows for the pasture (Brunschwig et al., 2006). However, the simultaneous conduct of dairy and suckling herd is likely to optimize the valuation of grassland resources in mountain areas.

In this study, we evaluate the influence of combinations of dairy and suckling herds on the economic performance and grass valuation in the case of mountain cattle farming systems.

Material and methods

We used a bio economic model to realize an in-silico experiment and analyze the influence of the distribution of dairy and suckling cattle herds on the performance of farm system. We chose the model "Orfée" (Mosnier, 2009): **Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment**. Inspired by Opt INRA (Veysset et al., 2005), this is a bio economic optimization model which maximizes the farm net operating income. Designed from mathematical functions representing biotechnical and economic processes, it represents the exploration system of polyculture farming and helps to making decisions.

This model was developed under the **General Algebraic Modeling System (GAMS)**. This mathematical modeling software is useful to describe complex and large models with a structured language. It also offers the possibility to modify preexisting model, and leaves directly the code of the model "Orfée" to adapt our study.

Our simulations were based on two **Farm-types BL18 and BL22** (Chambre d'Agriculture Cantal, 2015): these operating systems have two flocks, one dairy herd and other suckling herd. Both Farm-types represent two very different farms in terms of herd, structure of the plot, and size and operation of the farms.

Table 1: Summary of main characteristics of Farm-types BL18 and BL22

BL18	BL22
Medium-sized milk-meat systems with a summer mountain pasture, 2 <i>agricultural workforce</i> - 44 LU dairy cow 44 LU suckling cow- 70 ha <i>Agricultural Area</i> - 30 ha summer mountain pasture - 1.26 LU / ha main fodder area	Large size milk-meat system with an fragmented plot and crops 2 <i>agricultural workforce</i> - 72 LU dairy cow 55 LU suckling cow - 112 ha <i>Agricultural Area</i> - 5 ha cereals - 1.2 LU / ha main fodder area

Source: Chambre d'Agriculture Cantal, 2015

The farms corresponding to these Farm-types are located in the mountains of southern Auvergne: Cézalier (Monts Cantal) for the BL18 and Planèze of St-Flour (Velay volcanique) for the BL22. Two standard cases describe the cruise operation situations.

We use the bio economic optimization model "Orfée" to find equilibria under optimal operating conditions of the farms. To offer the heterogeneity of plotting to the model, his representation of grassland production has been enriched from the national typology of permanent grasslands (Launay et al., 2011). Geographical constraints are taking into account slopes, obstacles and distances. The result is then parameterized to represent the two Farm-types of the southern Auvergne.

Experimental plan: The experimental plan presents six herds compositions developed to study the influence of herd composition on technical and economic performance of the farming systems using the adapted model.

Table 2: Experimental plan for six situations: (D for dairy herd and S for suckling herd, in LU%) 100% D, 75% D-25% S, 50% D-50% S, 25% D-75% S, 100% S and the last corresponding to the given Farm-type).

Experimental plan	Culture	cutting	Summer Moutain pasture	Repairs dairy LU (D) suckling LU (S)					% ref. Farm-types
				100%D	75%D	50%D	25%D	0%D	
				0%S	25%S	50%S	75%S	100%S	
Farm-type BL18	0	+++	+++	Sc ¹ .1	Sc.2	Sc.3	Sc.4	Sc.5	Sc.6
Farm-type BL22	+++	+++	0	Sc.A	Sc.B	Sc.C	Sc.D	Sc.E	Sc.F

There are five scenarios designed according to these repairs for each Farm-type and each of them are completed with an additional scenario corresponding to the distribution of the considered farm.

Analyzes of the model outputs permit to evaluate grass valuation by grazing but also the economic advantages (products and gross margin) associated with the combination of dairy and suckling herds. We analyze simultaneously the technical and economic results from

¹Scenario

the simulations based on four categories of indicators: farm economy, animal's consumption, livestock and plant production.

Results and discussion

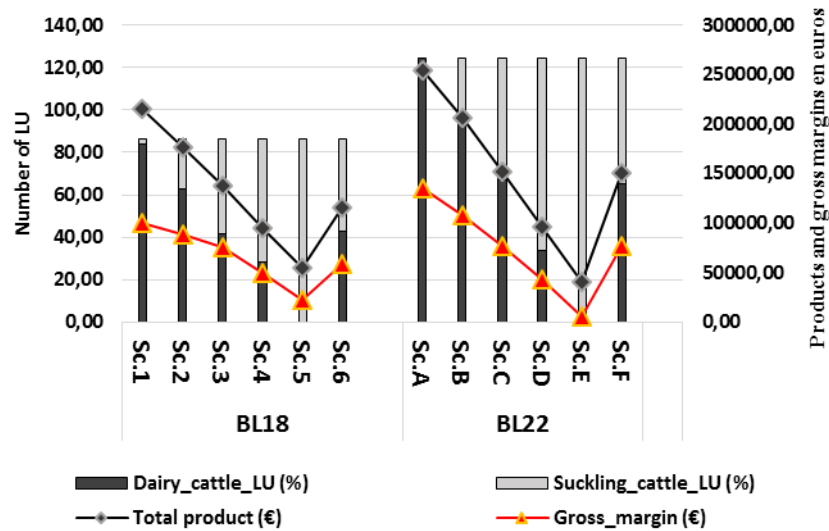


Figure 1: Economic products and gross margins by herd allocations

A better economic product is observed for 100% D systems but heavy loads greatly reduce the gross margin. This gross margin decreases with the increase in the LU of the suckling herd in the farm. Specialized dairy herd are therefore the most economically profitable. Nevertheless, there is a good economic compromise for intermediate distributions (50% D-50% S), which offers a diversity of products (milk and meat), enables to cope with price fluctuations but also to reduce the costs associated with the consumption of concentrates intended for dairy herd.

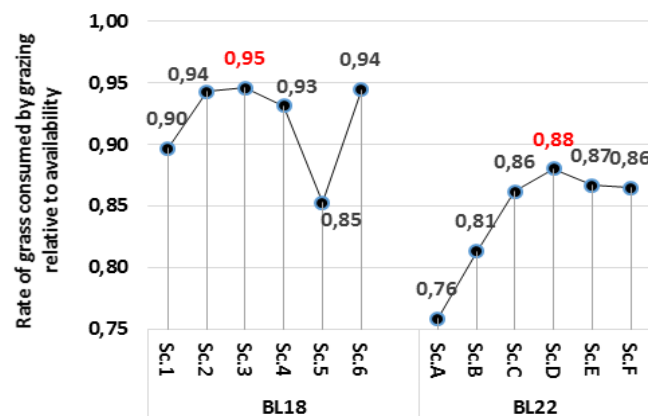


Figure 2: Valuation of available biomass by grazing

Valuation of the grass by grazing is maximum for systems with herd having proportions close to 50% D-50% S. This valuation reaches 95% in the case of BL18 and 88% in the case of BL22. These maximum levels of valuation are different because BL18 operation is more based on grazing than stocks consumption at the opposite of BL22. Valuation of grass by grazing is also good for the quality of dairy products (Farruggia et al., 2008; Martin et al., 2016). This valuation is lower for specialized systems, except for the 100% S system of the BL22 due to its operation and fragmented plot favorable to grass valuation by suckling herds.

Conclusions

Conducting dairy and suckling herds simultaneously with a balanced distribution between herds is an interesting way to improve the valuation of grassland resources by grazing, as well as the diversity of animal products (milk and meat). These balanced systems provide an operational flexibility to better cope with fluctuating milk prices and a good economic compromise. However, we must continue our analyzes to consider whether the simultaneous conduct of herd with a balanced distribution of dairy and suckling herds permit greater resilience of farm.

References

- Brunschwig, G., Josien, E., and Bernhard, C. 2006, Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin laitier et allaitant. Pag 83-95 *Fourrages*, v. 185.
- Farruggia, A., Martin, B., Baumont, R., Prache, S., Doreau, M., Hoste, H., and Durand, D. 2008, Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux. Pag 181-200 *Productions animales*, v. 21.
- Fleury, P., Dubeuf, B., and Jeannin, B. 1996, Forage management in dairy farms: a methodological approach. Pag 199-212 *Agricultural Systems*, v. 52.
- Launay, F., Baumont, R., Plantureux, S., Farrie, J., Michaud, A., and Pottier, E. 2011, Prairies permanentes-des références pour valoriser leur diversité. éd. Paris: *Institut de l'Elevage*.
- Martin, B., Coppa, M., Verdier-Metz, I., Montel, M., Joy, M., Casasús, I., and Blanco, M. 2016, The contribution of mountain pastures to the link to terroir in dairy and meat products. Pag 105-115 *Options Méditerranéennes, A no.116*. 19th Meeting of the FAO-CIHEAM Mountain Pastures Sub-network. 14-16 June, Zaragoza, Spain.
- Mosnier, C., Duclos, A., Lherm, M., Lelyon, B., Agabriel, J., Gac, A. 2015, Orfée : un modèle bioéconomique pour simuler la production, les résultats économiques et les émissions de gaz à effet de serre des exploitations bovines. Pag 89 *Renc. Rech. Ruminants*, v. 22.
- Veyssset, P., Bébin, D., and Lherm, M. 2005, Adaptation to Agenda 2000 (CAP reform) and optimisation of the farming system of French suckler cattle farms in the Charolais area: a model-based study. Pag 179-202 *Agricultural Systems*, v. 83.
- Chambre d'Agriculture Cantal, 2015. Cas types laitiers d'INOSYS Réseaux d'Elevage d'Auvergne-Lozère. <http://www.cantal.chambagri.fr/pages-hors-menu-internet/menu-horizontal/les-etudes-et-references/systemes-laitiers-et-mixtes-cas-types.html>

Grazing performance and the use of concentrate in double herds breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: a bioeconomic simulation analysis

Zakary Diakite, Claire Mosnier, René Baumont, Gilles Brunschwig

Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

E-mail: zakary.diakite@vetagro-sup.fr

Take home message For plots with geographical constraints, double herds breeding systems with dairy and suckling herds allow a better grazed grass utilization rate, leading to good forage autonomy and good economic performances at farm scale.

Introduction Ruminant production is predominant in mountainous areas. In those areas, some plots of grasslands cannot be mechanized or are difficult to reach. Many mountain breeding systems combine in the same farm, a herd of dairy cows and a suckling cattle herd. We hypothesize that double herds allow a better grazed grass utilization rate than specialized herds for plots with constraints. The aim of this study was to characterise which herd distributions allow the best combination between grazed grass utilization, animal production and economical performances.

Material & methods We used the bio economic optimization model Orfee (Mosnier *et al.*, 2017a) and data from two farm-types with dairy and suckling herds in cruising condition from the INOSYS database (Charroin *et al.*, 2005). Farm_1 is a medium size system with a summer mountain pasture and Farm_2 is a large size system with a fragmented plot and cereal crops. These two farms are representative of the mountain double herd cattle farms. The model was adapted to take into account geographical constraints and the heterogeneity of grassland plots based on the French typology of permanent grasslands (Launay *et al.*, 2011). Simulations are based on the two different farms and five scenarios (described as the percentage of livestock units (LU) in the dairy (D) herd): 100D for a single dairy herd, 75D for a dominant dairy herd, 50D for balanced dairy and suckling herds, 25D for a dominant suckling herd and 0D for a single suckling herd.

Milk yield is fixed, and the use of grassland, facilities and machinery are optimized in the simulations. Biotechnical and economic indicators characterizing the feeding system, the animal and the system performances have been analysed for each scenario. This leads to evaluate simultaneously; operating profit per men work unit (MWU), grazed grass utilization rate (ratio of the amount of grazed grass to the amount of available pasture grass), animal production (milk and meat quantities), forage and concentrate consumption, related with the combination of dairy and suckling herds.

Results & discussion The annual cumulative consumption of forage is around 4 tons of dry matter (tDM) per LU in both farms for all the scenarios. Linked to the decrease of dairy LU in herds (Table 1), we observed a trend corresponding to an increase in the stocking rate and a decrease of concentrates intake per LU. Grazed grass utilization rate and operating profit per MWU reach their maximum for mixed herds systems (between 50D and 25D) as 60% of farms with double herds in the Massif Central (France). These systems that maximize grazed grass utilization also allow good economic performances.

Table 1 Levels of main indicators related to different analysed criteria for scenarios corresponding to the farm-types.

Farm-types Scenarios	Farm_1					Farm_2				
	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Total livestock unit (LU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Concentrates (tDM/LU/year)	0.95	0.87	0.76	0.54	0.25	.83	0.85	0.86	0.52	0.33
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Stocking rate (LU/ha)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Milk sold per year (1000L/year)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Meat sold (1000kg/ year)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Operating profit (1000€)/MWU	6.51	7.21	7.64	7.67	5.78	18.82	20.60	21.86	22.34	22.02

Conclusion This study shows that systems with double herds, particularly systems with 25 to 50% dairy cattle LU, maximize the grazed grass utilization rate in a context of mountain grasslands, with constraints of mechanisation and access to dairy cows. These systems that maximize grazed grass utilization also have good animal production and economic performances. However, the structure of the farm plot is essential to specify the optimal herd's distributions, which improve grazing and economic performances.

Acknowledgements This research was supported by grants from Auvergne Region and the French Ministry of Agriculture.

References

- Charroin T, Palazon R, Madeline Y, Guillaumin A and Tchakerian E 2005. Rencontres Recherches Ruminants 12, 335-338.
 Launay F, Baumont R, Plantureux S, Farrié JP, Michaud A and Pottier E 2011. Éd Paris: Institut de l'Elevage.
 Mosnier C, Duclos A, Agabriel J and Gac A. 2017a. Agricultural Systems 157, 202-215.

Performances de pâturage et utilisation de concentrés dans les systèmes d'élevage double troupeaux bovins laitiers bovins allaitants herbagers : analyse bioéconomique

Grazing performances and the use of concentrates in double herds breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: a bioeconomic analysis

DIAKITE Z. (1), MOSNIER C. (1), BAUMONT R. (1), BRUNSCHWIG G. (1)

(1) Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

INTRODUCTION

L'élevage herbivores particulièrement bovin est fortement rependu dans les zones montagneuses riches en ressources herbagères. Toute fois ces zones présentent de fortes contraintes naturelles qui rendent difficilement valorisable les ressources en herbe. Les distances des parcelles au siège de l'exploitation, les pentes et d'attitude sont ainsi des contraintes courantes qui rendent difficile la mécanisation et l'accessibilité des parcelles aux vaches laitières. Pour palier a ces contraintes, dans le Massif Central 75% des élevage mixtes combinent conduite simultanée d'un troupeau laitier et d'un troupeau allaitant (RA, 2010). Nous émettons ainsi l'hypothèse que les doubles troupeaux bovins laitiers et allaitants permettent une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les troupeaux bovins spécialisés dans les zones de contraintes avec de bonnes performances économiques. Cette étude consiste à caractériser les distributions de troupeaux qui combinent une meilleure performance de pâturage, une bonne production animale et de meilleures performances économiques.

1. MATERIELS ET METHODES

On utilise le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Mosnier et al., 2017a) et les données de deux cas types (BL18 (Ferme_1), BL22 (Ferme_2)) avec troupeaux laitiers et allaitants issues de la base de données DIAPASON (Charroin et al., 2005). Ferme_1 est un système lait-viande équilibré à taille moyenne avec estive et Ferme_2 est un système modernisé lait-viande de grande dimension avec parcellaire éclaté et culture. Le modèle a été adapté pour prendre en compte les contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcellaires basées sur la typologie française des prairies permanentes (Launay et al., 2011). Les simulations sont réalisées à partir des deux cas-types avec cinq scénarios chacun (D étant le pourcentage d'UGB laitier et la différence le pourcentage d'UGB allaitant) : on a les scénarios 100D, 75D, 50D, 25D et 0D. Le rendement laitier est fixé tandis que l'utilisation des prairies, des installations et des machines sont optimisées lors des simulations. On évalue ensuite simultanément le profit de l'exploitation par Unité de Main d'Œuvre (UMO), le taux de valorisation de l'herbe par pâturage (rapport entre la quantité d'herbe pâturée et la quantité d'herbe pâturable disponible), la production animale (quantités de lait et de viande).

2. RESULTATS

La consommation annuelle cumulée de fourrage est d'environ 4 tonnes de Matière Sèche (tMS) par Unité Gros Bovin (UGB) pour chacun des scénarios des deux exploitations. Avec la réduction d'UGB laitier dans les troupeaux (**tableau 1**), on a une augmentation du chargement (UGB/ha) et une baisse de

la consommation de concentrés par UGB dans les exploitations. Le taux de valorisation de l'herbe par pâturage et le profit par UMO atteignent leur maximum pour les systèmes mixtes (entre 50D et 25D). Ces systèmes bovins mixtes maximisent le pâturage avec de bonnes performances économiques.

3. DISCUSSION

Des expériences sur le terrain permettraient une évaluation plus fine de l'utilisation du parcellaire. Ces approches s'avèrent cependant coûteuses, chronophages et risquées en cas de mauvaises conduites des expérimentations. Nous faisons ainsi recours à la modélisation qui procure une vue large du fonctionnement des systèmes.

La conduite de troupeaux bovins mixtes permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage, grâce au troupeau allaitant moins exigeant en termes de qualité de l'herbe et déplaçable sur les parcelles éloignées de l'étable (Andrieu et al., 2007). En dépit des meilleures performances de pâturages des troupeaux allaitants, leur moindre rentabilité impose un compromis entre rentabilité et valorisation de l'herbe en les associant à des troupeaux laitiers plus rémunérateurs. Les systèmes bovins mixtes permettent une meilleure valorisation des prairies de montagne, réduisant ainsi l'utilisation d'intrants, ces systèmes favorisent de meilleures performances économiques (Cournut et al., 2012).

CONCLUSION

Les systèmes bovins mixtes, en particulier les systèmes avec 25 à 50% d'UGB bovin laitiers, permettent une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage dans des contextes de prairies de montagne avec des contraintes de mécanisation et d'accès aux vaches laitières. Ces systèmes ont également de bonnes productions animales et de meilleures performances économiques. Toute fois la structure de l'exploitation est essentielle pour spécifier les distributions optimales d'UGB laitier et allaitant qui améliorent les performances de pâturage et économiques.

Etude soutenue par la Région Auvergne et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation

Andrieu N., Josien E., Duru M. 2007. Agriculture, ecosystems & environment. 120 (2-4), 359-369.
Charroin T., Palazon R., Madeline Y., Guillaumin A., Tchakerian E. 2005. Renc. Rech. Rum. 12, 335-338.
Cournut S., Bertrand J., Conrard A., Ingrand S. 2012. Renc. Rech. Rum. 19, 4.
Launay F., Baumont R., Plantureux S., Farrié JP., Michaud A., Pottier E. 2011. Éd Paris : Institut de l'Elevage.
Mosnier C., Duclos A., Agabriel J., Gac A. 2017a. Agricultural Systems. 157, 202-215.
Recensement agricole 2010. www.myinosys.fr (Juin 2016)

Tableau 1 Niveaux des indicateurs liés aux critères analysés pour chacun des scénarios des cas-types.
Profit = (ventes + subventions) - (charges opérationnelles + charges structurelles+ salaires + taxes)

Cas-types Scénarios	Ferme_1					Ferme_2				
	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Nombre total d'UGB	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Concentrés utilisés (tMS/UGB/année)	0,95	0,87	0,76	0,54	0,25	0,83	0,85	0,86	0,52	0,33
Taux de valorisation par pâturage (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Chargement (UGB/ha)	0,93	1,04	1,14	1,18	1,15	1,05	1,17	1,28	1,24	1,20
Lait vendu (1000L/année)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Viande vendue (1000kg/ année)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Profit par UMO (1000€/ UMO)	6,51	7,21	7,64	7,67	5,78	18,82	20,60	21,86	22,34	22,02

Double troupeau**Lait et viande équilibrés**

Prairies permanentes avec estives

**Un système lait et vaches allaitantes avec estives**

Ce cas type est illustratif des doubles troupeaux fortement représentés dans la zone des monts du Cantal. C'est un dérivé du système traditionnel Salers où la production de lait a été confiée à une race spécialisée, les vaches salers ayant été reconverties en allaitantes. Elles permettent de valoriser les surfaces en estive de l'exploitation tandis que le troupeau laitier reste sur la surface de base. De nombreux éleveurs ont profité de la procédure d'échange pour se spécialiser dans une des deux productions.

Ce système est décrit avec 2 UMO (GAEC), un quota laitier de 180000 litres répondant au cahier des charges AOP Cantal et Bleu et 35 vaches Salers.

GAEC familial 2 UMO totales

2 UMO exploitants
1 part PAC
2 parts ICHN

Double troupeau**Lait et viande équilibrés**

Prairies permanentes avec estives

180000 litres de lait vendu par an

32 vaches laitières

5860 L/VL/an

35 Vaches allaitantes

44 UGB viande

88 UGB totaux

50% UGB lait

1,26 UGB/ha SFP

2727 litres de lait/ha SFP

241 Kg de viande/ha SFP

70 ha SAU

0 ha de céréales

70 ha de SFP

dont 70 ha d'herbe

dont 0 ha de cultures fourragères

30 ha d'estive**Domaine de validité**

SAU de 50 à 90 ha

lait produit de 150000 à 230000 L

VL de 28 à 36

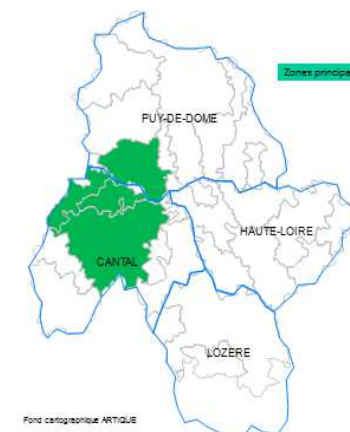
VA de 30 à 40

Chargement de 0,9 à 1,1 UGB/SFP

Sommaire**Les surfaces****Le troupeau laitier****Résultats économiques 2013****Chiffres clés 2013****Coût de production****Localisation**

Monts du Cantal
Cézalier
Artense

Localisation du BL18

**Conseillers départementaux:**

Clémentine LACOUR	CA63	04 73 44 45 46
Olivier ROQUEFEUIL	CA63	05 73 44 45 46
Régine TENDILLE	CA43	04 71 07 21 00
Mathilde BONESTEBE	CA15	04 71 45 55 00
Françoise MONSALLIER	CA15	04 71 45 55 00
Yannick PECHUZAL	CA15	04 71 45 55 00
Patricia LOUBAT	CA48	04 66 65 62 00

Appui régional:

Jean-Luc REUILLON	Institut de l'élevage	04 73 28 52 24
-------------------	-----------------------	----------------

Les surfaces

SAU = 70 ha

Les surfaces en herbe : 70 ha

dont prairies permanentes 70 ha

dont prairies temporaires 0 ha

Blocs (base)	Surface	N	P	K	Rendement des récoltes d'herbe		
Pâturage Troupeau base	29,5 ha	20	10	20	TMS stock/ha		
		5	5	5	1ère C	2ème C	3ème C
Déprimage + Foin + Pâturage	14,0 ha	20	10	20	3,5		
Enrubannage + pâture	26,7 ha	35	20	35	4,0		
Moyenne des surfaces en herbe		26	14	26			

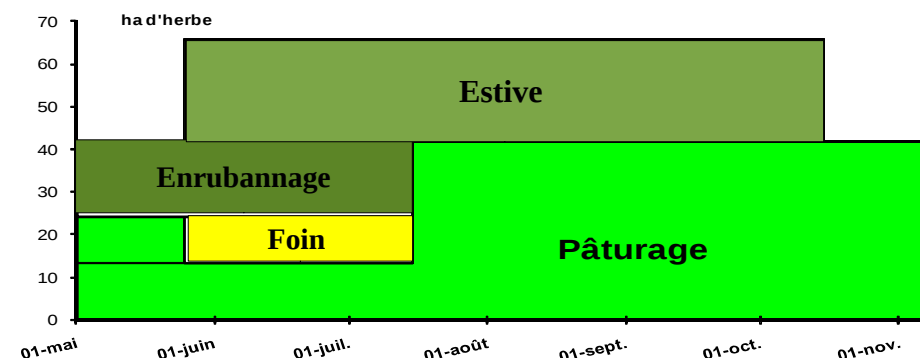
Les cultures fourragères : 0 ha

Culture	Surface	N	P	K	Rendement
Moyenne des cultures fourragères		0	0	0	

Les cultures non fourragères 0 ha

Blocs	Surface	N	P	K	Rendements
Moyenne des cultures non fourragères		0	0	0	

Bilan des minéraux (KG/ha)	N*	P	K
*(hors fixation symbiotique)	25	12	30



L'herbe constitue la seule ressource fourragère pour les deux troupeaux. Les stocks sont réalisés sous forme d'enrubannage et de foin mais pour des raisons structurelles (récoltabilité) ne sont pas suffisants pour assurer l'autonomie. Du foin est acheté chaque année à hauteur de 340 kg par UGB, et destiné à l'alimentation du troupeau allaitant.

La moitié des UGB transhume sur l'estive de l'exploitation pendant 130 jours.

Au final le chargement corrigé des achats de fourrage et de l'estive est de 0,95UGB/ha SFP.

Sur les meilleurs terrains d'alluvions de vallées glaciaires aux sols profonds, il est possible

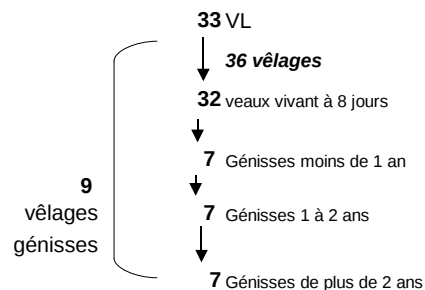
de réduire la fertilisation minérale de 20 N 10 P 20 K. Sur les mauvais terrains de tuf volcanique, peu profonds, la fertilisation sera augmentée de 15-10-15.

Indicateurs surfaces

SFP/SAU	100%
Surfaces pastorales/SFP	30%
Chargement corrigé :	0,96 UGB/ha
ares pat/ VL printemps	38 ares/VL
ares autres UGB printemps	38 ares/VL
Mais fourrage /SFP	0%
1ères coupes/surface en herbe	58%
2èmes coupes/1ères coupes	0%
Fourrages récoltés par UGB :	1,8 TMS
N/ha SFP	26 N
Lait produit par ha SFP :	2727 L.
Kg de viande produits par ha S	242 Kg

Le troupeau laitier

Le cheptel en croisière



ventes annuelles

Lait: **180 000** litres
 Réformes 6000 l Holstein
 veau pur (3s) Holstein
 veau Cr limousin (5s) Holstein

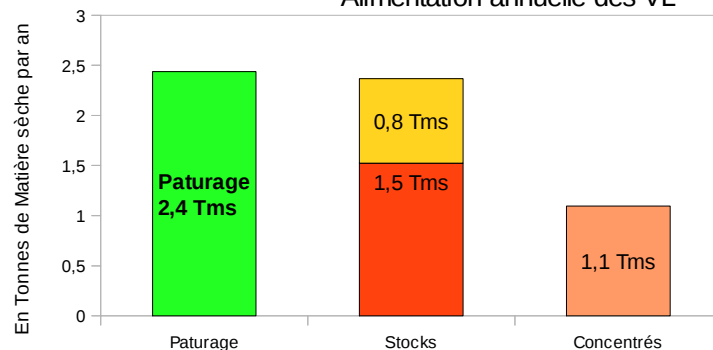
6
14
9

Alimentation

Besoins fourragers par UGB

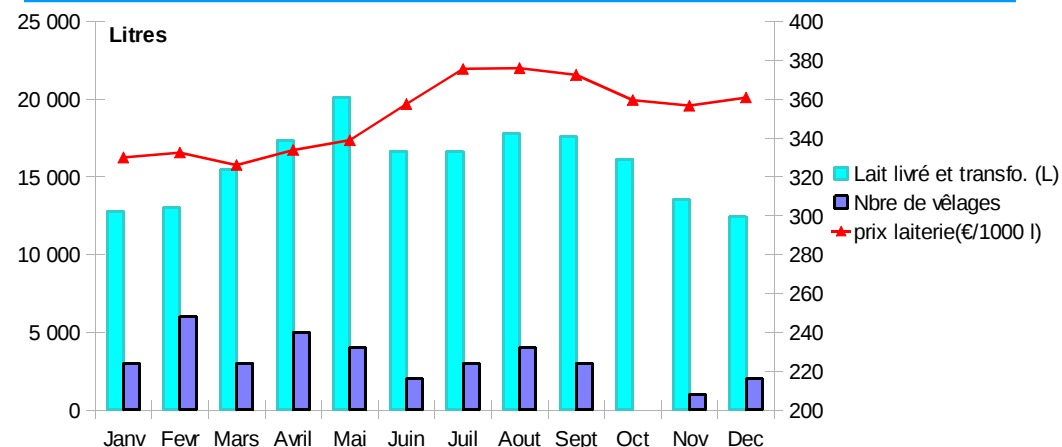
(en T de MS utile)	Vaches laitières	génisses laitières	Troupeau allaitant	Pour le troupeau
Enrubannage 1ère coupe	1,5	0,8	1,1	105,9
Foin 1ère coupe déprimé	0,8	0,9	0,2	48,5
Foin 2ème coupe				
Foin 1ère coupe non déprimé				
Foin acheté			0,7	32,0
Total	2,4	1,7	2,0	186,4

Alimentation annuelle des VL



- Concentré acheté
- Concentré produit
- -
- -
- -
- Foin 1ère coupe déprimé
- Enrubannage 1ère coupe
- Paturage

Répartition mensuelle des vêlages et des livraisons



Le troupeau laitier, de race Prim'Holstein est conduit majoritairement en race pure pour conserver un renouvellement issu de l'exploitation. Les vêlages ont plutôt une tendance à l'étalement, pour une production laitière orientée vers la période de pâture.

Dans certaines exploitations les Salers peuvent être traites partiellement, avant la mise à l'herbe.

L'alimentation est basée sur l'herbe pâturée, le foin et l'enrubannage, totalement en phase avec le décret de l'AOP Cantal.

Le niveau laitier atteint 6000 l/VL avec une consommation optimale de 230g/l de concentré

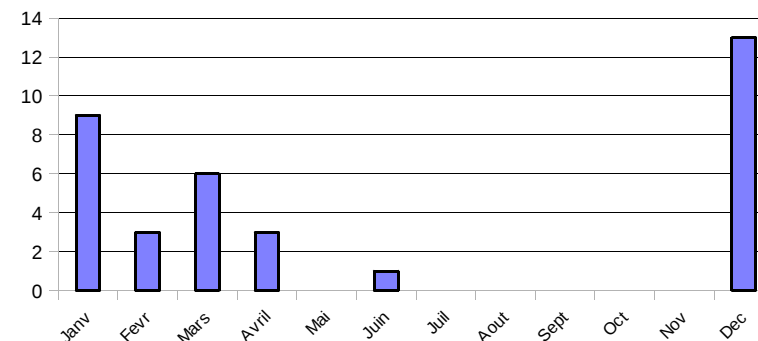
Indicateurs troupeau laitier

UGB lait/UGB totaux	50%
Lait produit par VL :	5861 L
Prix du lait	373 €/1000 L
TB moyen :	40,0 g/L
TP moyen :	33,0 g/L
Taux de renouvellement :	28%
Besoins de fourrage stockés par UGB :	2,1 TMS
Dont fourrage acheté	0,3 TMS
Coût alimentaire lait	118 €/1000 l
Concentré et minéraux par VL	1350 kg
Concentré et minéraux des VL	233 g/L 82€/1000l
% des concentrés BL achetés	100%

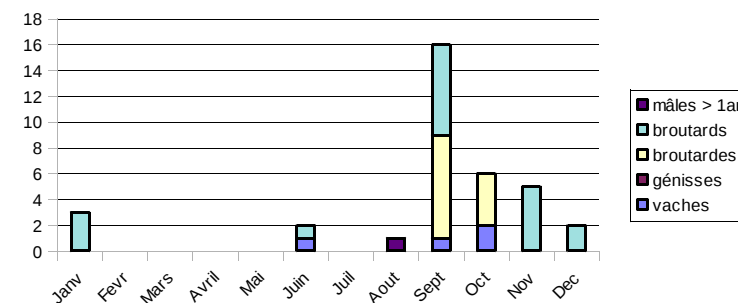
Le troupeau allaitant

BL18 actualisation 2013

Répartition mensuelle des naissances



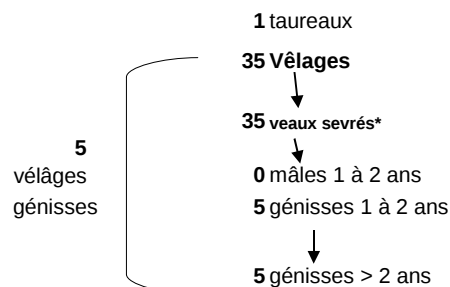
Répartition mensuelle des ventes



Indicateurs troupeau viande

Date moyenne de vêlage	30-janv.
Tx de mortalité des veaux	3%
Tx de renouvellement	14%
Tx de productivité numérique	95%
UGB viande/VA	1,24
Production viande vive	302 Kgv/UGB
Concentrés (kg/UGB viande)	326
% des concentrés BV achetés	100%

Le cheptel en croisière



(* ou vendus avant sevrage)

Le troupeau allaitant a pour origine le troupeau salers qui était auparavant conduit en système traditionnel. Il permet aujourd'hui de valoriser les surfaces et les fourrages délaissés par les vaches laitières.

Les Salers sont parfois traités en fin d'hiver, entre le vêlage et la mise à l'herbe.

ventes annuelles

catégorie	nbre	poids vif
Réforme maigre O Salers	1	620 Kgv
Réforme finie O Salers	1	700 Kgv
Réforme finie R Salers	1	788 Kgv
Broutarde croisée légère	11	300 Kgv
Broutarde pur "export"	1	280 Kgv
vache élevage Salers	1	650 Kgv
Taureau repro Réforme Charolais	1	900 Kgv
brd pur 9-10 mois lourd	6	380 Kgv
brd Cr 9-10 mois lourd	11	390 Kgv
Veau naissant pur Salers	1	50 Kgv
Achats		
Taureau repro Achat 18-20 mois Ch	1	600 Kgv

Le troupeau Salers est conduit majoritairement en croisement pour améliorer la conformation et le prix de vente des produits, essentiellement des broutardes et broutards pour l'export. Néanmoins une part de race pure est maintenue pour produire quelques génisses de renouvellement.

Les vêlages sont concentrés sur la période hivernale, en bâtiment. Les ventes sont ainsi positionnées sur l'automne, au moment du sevrage. Les mâles sont un peu alourdis au pré avec une complémentation concentrée au nourrisseur.

Résultat économique

Année
2 013

Produit Brut

153 226 €

(% sur PB)

76 613 € par UMOF

44%	Lait	180 Mille litres vendus	67 154 €
		100% en laiterie à : 373 €	67 154 €
4%	Viande troupeau lait		5 493 €
		6 Réformes 6000 l Holstein	894 €
		14 veau pur (3s) Holstein	100 €
		9 veau Cr limousin (5s) Holstein	237 €
		2 Génisse d'élevage vél 34-36 mc	-2 600 €
18%	Viande troup. allaitant		28 289 €
		1 Réforme maigre O Salers	992 €
		1 Réforme finie O Salers	1 330 €
		1 Réforme finie R Salers	1 722 €
		11 Broutarde croisée légère	720 €
		1 Taureau repro Réforme Charol.	1 647 €
		6 brd pur 9-10 mois lourd	798 €
		11 brd Cr 9-10 mois lourd	936 €
		1 Veau naissant pur Salers	190 €
0%	Cultures de vente :		- €
		Céréales intra-consommées	0 €
		cultures vendues	0 €
19%	Aides PAC 1er pilier		29 682 €
		Aides couplées*	7 253 €
		Aides découplées*	22 429 €
		219 € DPU net par ha ST	
15%	Aides 2ème pilier		22 608 €
		PHAE 2	6 740 €
		ICHN	15 868 €
0%	Aides conjoncturelles		- €

* après application de la modulation et stabilisateurs

Charges

93 188 €

(% sur PB)

	Charges	Animales	40 712 €
	Opérationnelles	concentrés et min.	22 939 €
		Frais d'élevage	7 613 €
		Frais vétérinaires	5 374 €
		Divers animaux	4 786 €
31%	48 101 €	Surfaces	7 390 €
		Engrais et amend.	5 417 €
		semences et phyto.	0 €
		Divers surfaces	1 973 €
	Charges	Travaux par tiers	0 €
	Structurelles	Charges sociales expl	11 667 €
		salaires et CS	0 €
		Carburants lub.	6 301 €
29%	45 086 €	Entretien matériel	6 844 €
		Entretien bat et fonc.	1 261 €
		Fermages (2/3)	10 086 €
		Assurances	3 857 €
		E.G.E.	1 958 €
		frais gestion	1 530 €
		Divers	1 582 €
39%	E.B.E.	60 038 €	
	soit pour une annuité de	amortissements	16 449 €
10%	14 560 €	Frais financiers	2 912 €
	un disponible de	Revenu agricole	40 677 €
30%	45 478 €		
	22 739 € par UMOF		
	Capital d'exploitation hors foncier:	291 205 €	
		Bâtiments	108 750 €
		matériel	66 352 €
		Cheptel	102 123 €
		Stocks et en terres	13 980 €



Ce système d'exploitation tire généralement partie d'un point de vue économique de la mixité des productions, permettant ainsi de mieux faire face aux conjonctures difficiles. Cependant ce type de système est pénalisé par son manque d'autonomie fourragère qui conduit à des achats. D'autre part la mixité a un inconvénient quand il s'agit de moderniser l'outil de production.

Indicateurs économiques

Marge brute atelier viande	469 €	par UGB viande
Charges opérationnelles animales	461 €	par UGB totale
Fs élevage et div. (hors ach.four)	106 €	par UGB totale
Frais vétérinaires	61 €	par UGB totale
Charges opérationnelles végétales	105 €	par ha SAU
Marge brute atelier lait	239 €	/1000 l
Main d'œuvre	8%	du PB
Foncier	7%	du PB
Mécanisation	9%	du PB
Charges de méca (hors amortis.)	187 €	par ha SAU
EBE hors Main d'œuvre et foncier (en % du PB)	54%	

Double troupeau**Montbéliard et Aubrac**

Système modernisé

**Double troupeau, 300 000 litres de lait + 40 Aubrac (45PMTVA).**

Système mixte lait allaitant de grande dimension très utilisateur d'espace, représentatif de la zone volcanique labourée et accessoirement de la zone granitique. Le quota laitier de 300000 litres est produit avec 49 vaches laitières montbéliardes à 6400 litres par vache, tandis que le troupeau allaitant de race Aubrac, composé de 40 mères produit du broutard alourdi dont une partie en croisement.

Le système fourrager est basé sur l'herbe pâturée et récoltée en ensilage (ou enrubanage) et foin.

La charge technique est de 1,2 UGB/ha SFP et une partie de la SAU est consacrée à la céréale pour la production de grain et de paille.

Ce système peut difficilement se spécialiser car très adapté au parcellaire éclaté de Planèze (traite dehors).

GAEC familiale 2,1 UMO totales

2,0 UMO exploitants

0,1 UMO salariées

300000 litres de lait vendu par an

49 vaches laitières

6433 L/VL/an

72 UGB lait

57% UGB lait / UGB totaux

55 UGB viande

40 Vaches allaitantes

Double troupeau**Montbéliard et Aubrac****Système modernisé****1,2 UGB/ha SFP**

2947 litres de lait/ha SFP

263 Kgv de viande/ha SFP

112 ha SAU

5 ha de céréales

108 ha de SFP

dont 107 ha d'herbe

dont 0 ha de cultures fourragères

Conseillers départementaux:

Clémentine LACOUR CA63 04 73 44 45 46

Olivier ROQUEFEUIL CA63 05 73 44 45 46

Régine TENDILLE CA43 04 71 07 21 00

Mathilde BONESTEBE CA15 04 71 45 55 00

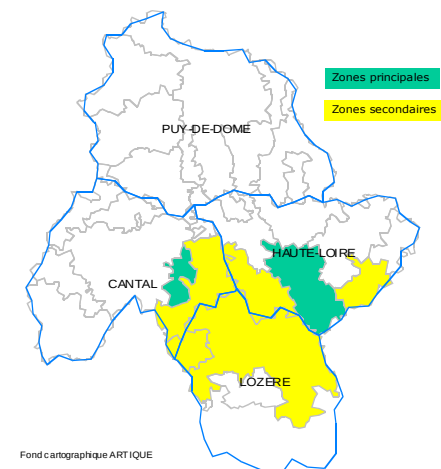
Françoise MONSALLIER CA15 04 71 45 55 00

Yannick PECHUZAL CA15 04 71 45 55 00

Jean-Louis BALME SUAMME CA48 04 66 65 62 00

Appui régional:

Jean-Luc REUILLON Institut de l'élevage 04 73 28 52 24

Domaine de validité**SAU de 80 à 150 ha****lait produit de 180000 à 350000 L****VL de 30 à 40****VA de 35 à 50****Chargement de 1 à 1,2 UGB/SFP****Sommaire****Les surfaces****Le troupeau laitier****Résultats économiques 2013****Chiffres clés 2013****Cout de production****Localisation**Planèze de St-Flour
Velay Volcanique

Les surfaces

SAU = 112 ha

Les surfaces en herbe : 108 ha

dont prairies permanentes 67 ha

dont prairies temporaires 41 ha

Blocs (base)	Surface	N	P	K	Rendement des récoltes d'herbe		
Pâturage Troupeau	39,7 ha	30		10	TMS stock/ha		
					1ère C	2ème C	3ème C
Ensilage + pâturage	12,8 ha	100	10	40	4,1		
Foin + Pâturage	27,0 ha	20	5	20	4,6		
Ensilage + Foin + Pâturage	28,0 ha	100	10	40	4,1	1,8	
Moyenne des surfaces en herbe		54	5	24			

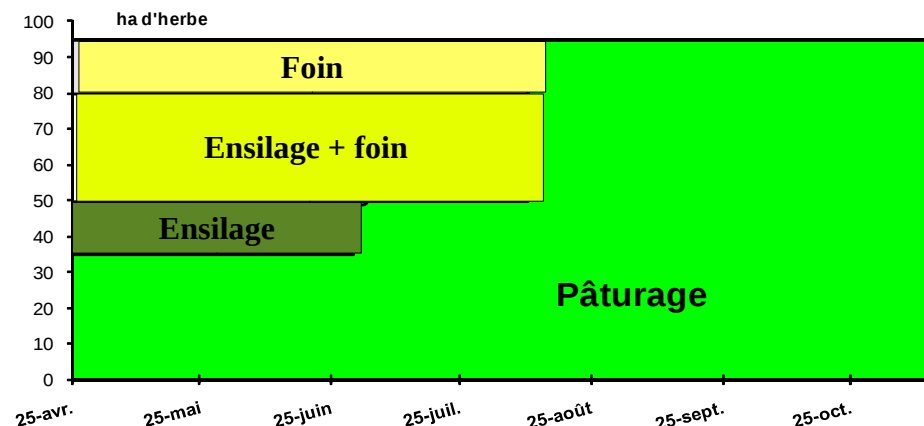
Les cultures fourragères : 0 ha

Culture	Surface	N	P	K	Rendement
Moyenne des cultures fourragères		0	0	0	

Les cultures non fourragères 5 ha

Blocs	Surface	N	P	K	Rendements
Céréales 45-55 Qx	5,0 ha	75			45,0 Qx/ha
Moyenne des cultures non fourragères		75	0	0	

Bilan des minéraux (KG/ha)	N*	P	K
*(hors fixation symbiotique)	53	3	26



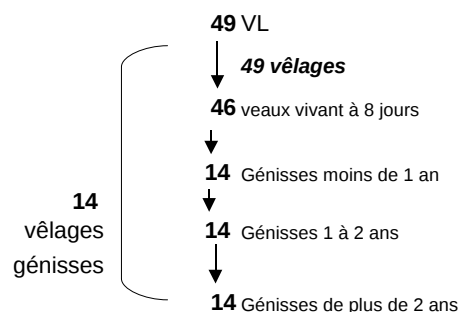
L'ensilage (ou l'enrubannage) permettent d'obtenir un niveau de chargement supérieur À 1,2 UGB/ha de SFP. L'objectif de stock est conséquent notamment pour pouvoir combler le déficit de pâture fréquent sur la période estivale. Le foin (avec parfois un peu de déprimage) complète les chaînes de récoltes. Pour un chargement supérieur à 1 (jusqu'à 1,2) il faut récolter 60% de la surface en herbe en première coupe ce qui est conséquent avec parfois un parcellaire limitant. Les sols sont de bonne qualité, et permettent la culture de céréale avec de bons rendements. Celle-ci est en rotation avec la prairie temporaire, et parfois la luzerne qui permet de sécuriser les rendements en année sèche.

Indicateurs surfaces

SFP/SAU	96%
Surfaces pastorales/SFP	0%
Chargement corrigé :	1,19 UGB/ha
ares pat/ VL printemps	31 ares/VL
ares autres UGB printemps	31 ares/VL
Maïs fourrage /SFP	0%
1ères coupes/surface en herbe	63%
2èmes coupes/1ères coupes	41%
Fourrages récoltés par UGB :	2,7 TMS
N/ha SFP	54 N
Lait produit par ha SFP :	2947 L.
Kg de viande produits par ha S	263 Kg

Le troupeau laitier

Le cheptel en croisière



ventes annuelles

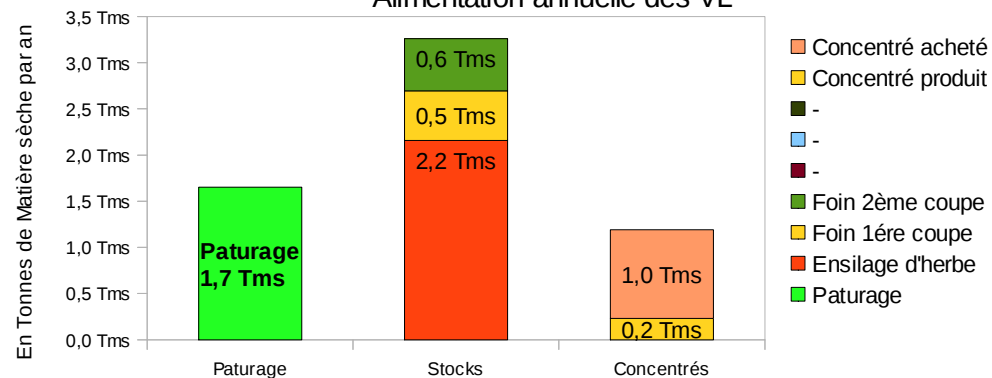
Lait: **300 000** litres
 Réformes 6000 l Montbéliarde **12**
 veau pur (3s) Montbéliarde **18**
 veau cr Charolais (5s) Montbéliarde **14**

Alimentation

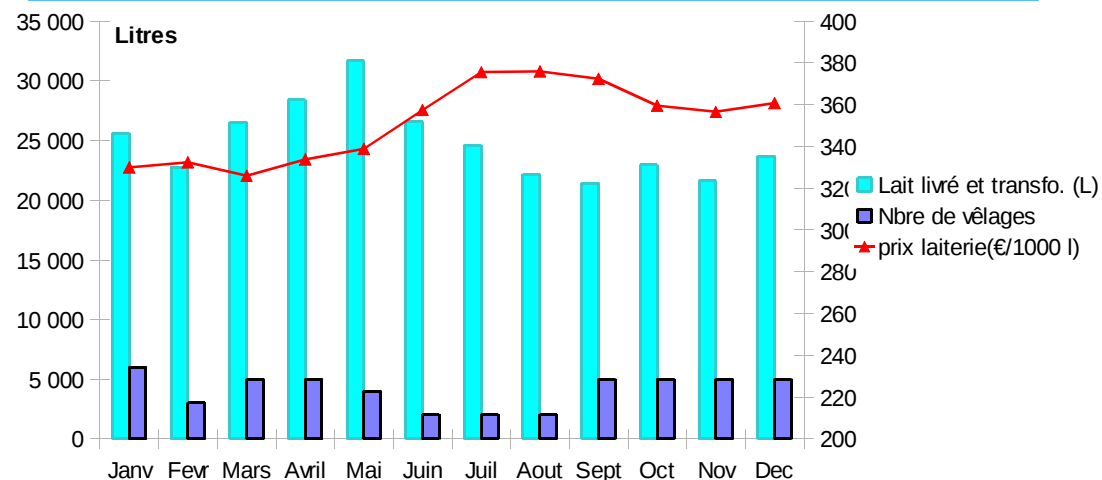
Besoins fourragers par UGB

(en T de MS utile)	Vaches laitières	génisses laitières	Troupeau allaitant	Pour le troupeau
Ensilage d'herbe	2,2	0,5	0,7	160,5
Foin 1ère coupe	0,5	1,4	1,3	137,1
Foin 2ème coupe	0,6		0,2	37,0
Total	3,3	1,9	2,1	334,7

Alimentation annuelle des VL



Répartition mensuelle des vèlages et des livraisons



Les vèlages du troupeau laitier sont ciblés sur l'automne, avec la majeure partie en race pure pour autorenouvellement. L'alimentation hivernale est basée sur l'ensilage (ou l'enrubannage dans certains systèmes) et le foin. Avec un rendement laitier de 6400 l et un niveau concentré de 1500 kg (230g/l) le lait peut entrer dans l'AOP Cantal La cabanne à traire permet de valoriser par la pâture le parcellaire morcelé de la Planèze. La période séchante de l'été doit être compensée par la distribution de stock. 2,6 à 2,8 Tonnes de matière sèche récoltée par UGB lait est l'objectif à atteindre.

Indicateurs troupeau laitier

UGB lait/UGB totaux	57%
Lait produit par VL :	6433 L
Prix du lait	374 €/1000 L
TB moyen :	41,0 g/L
TP moyen :	33,0 g/L
Taux de renouvellement :	28%
Besoins de fourrage stockés par UGB :	2,6 TMS
Dont fourrage acheté	0,0 TMS
Coût alimentaire lait	111 €/1000 l
Concentré et minéraux par VL	1469 kg
Concentré et minéraux des VL	227 g/L 77€/1000l
% des concentrés BL achetés	75%

Le troupeau allaitant

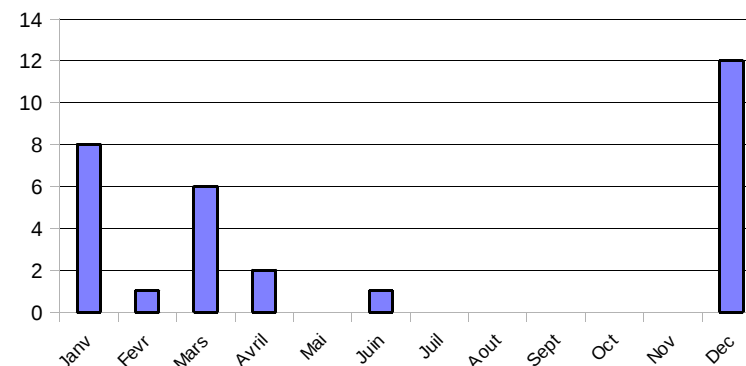
Le cheptel en croisière	ventes annuelles		
	catégorie	nbre	poids vif
8 vèlages gènis 2 taureaux 43 Vèlages 42 veaux sevrés* 0 mâles 1 à 2 ans 8 gènis 1 à 2 ans 8 gènis > 2 ans (* ou vendus avant sevrage)	Réforme finie R Aubrac	4	692 Kgv
	Réforme maigre Aubrac	3	540 Kgv
	Broutarde croisée 10 mois Aubrac	11	340 Kgv
	Broutarde pure 10 mois Aubrac	2	295 Kgv
Achat	brd pur 12 m Aubrac	10	430 Kgv
	brd cr 12 m Aubrac	11	435 Kgv
	Taureau repro Réforme Charolais	1	900 Kgv
	Taureau repro Achat 12-15 mois Ch	1	Kgv

Les vèlages sont calés en fin d'automne pour dessaisonner la vente des broutards allourdis. Une partie du troupeau est conduite en race pure pour assurer le renouvellement, le reste en croisement Charolais pour améliorer la conformation et le prix de vente sur le marché italien. Les réformes sont engraisées, certaines étant commercialisées en Bœuf Fermier Aubrac.

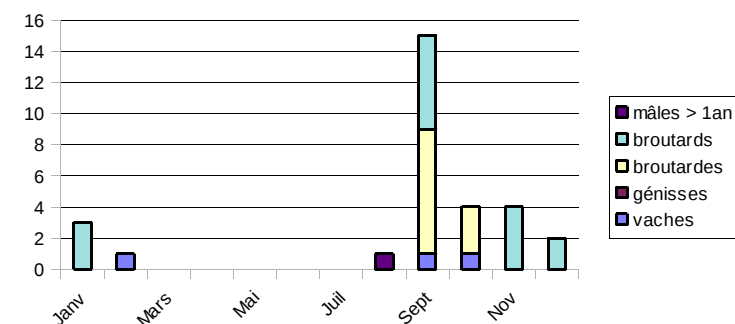
La ration hivernale comprend de l'ensilage (ou enrubannage) et du foin. Les mâles repoussés sont sevrés et reçoivent du foin et de l'aliment. Celui-ci est majoritairement acheté, les céréales produites sur l'exploitation étant plutôt destinées au troupeau laitier.

Le troupeau allaitant permet de valoriser les blocs de parcelles inaccessibles au troupeau laitier (éloignement ou pente). Il est souvent destinataire des fourrages moins bons et des pâtures après passage des laitières.

Répartition mensuelle des naissances



Répartition mensuelle des ventes



Indicateurs troupeau viande

Date moyenne de vèlage	15-nov.
Tx de mortalité des veaux	5%
Tx de renouvellement	19%
Tx de productivité numérique	92%
UGB viande/VA	1,35
Production viande vive	339 Kgv/UGB
Concentrés (kg/UGB viande)	385
% des concentrés BV achetés	86%

Résultat économique

Année
2 013

Produit Brut

240 501 €

(% sur PB)

120 250 € par UMOF

47%	Lait	300 Mille litres vendus	112 235 €
		100% en laiterie à : 374,12 €	112 235 €
9%	Viande troupeau lait		22 636 €
	12	Réformes 6000 l Montbéliarde	1 024 €
	18	veau pur (3s) Montbéliarde	220 €
	14	veau cr Charolais (5s) Montbéli	457 €
19%	Viande troup. allaitant		44 667 €
	4	Réforme finie R Aubrac	1 602 €
	3	Réforme maigre Aubrac	891 €
	11	Broutarde croisée 10 mois Aub	884 €
	2	Broutarde pure 10 mois Aubrac	738 €
	10	brd pur 12 m Aubrac	1 054 €
	11	brd cr 12 m Aubrac	1 109 €
	1	Taureau repro Réforme Charol	1 647 €
2%	Cultures de vente :		4 023 €
		Céréales intra-consommées	4 023 €
		cultures vendues	0 €
15%	Aides PAC 1er pilier		35 990 €
	Aides couplées*	11 897 €	
	Aides découplées*	24 094 €	
		205 € DPU net par ha ST	
9%	Aides 2ème pilier		20 950 €
	PHAE 2	5 082 €	
	ICHN	15 868 €	
0%	Aides conjoncturelles		- €

Charges

140 411 €

(% sur PB)

	Charges	Animales	56 601 €
	Opérationnelles	concentrés et min.	34 364 €
		Frais d'élevage	11 936 €
		Frais vétérinaires	8 087 €
		Divers animaux	2 214 €
		Surfaces	16 183 €
		Engrais et amend.	10 320 €
		semences et phyto.	3 321 €
		Divers surfaces	2 543 €
	Charges	Travaux par tiers	6 369 €
	Structurelles	Charges sociales expl	14 440 €
		salaires et CS	2 929 €
		Carburants lub.	8 835 €
28%	67 626 €	Entretien matériel	9 869 €
		Entretien bat et fonc.	1 587 €
		Fermages (2/3)	10 037 €
		Assurances	5 319 €
		E.G.E.	3 990 €
		frais gestion	1 850 €
		Divers	2 400 €
42%	E.B.E. 100 090 €		
	soit pour une annuité de	amortissements	38 297 €
12%	28 419 €	Frais financiers	5 684 €
	un disponible de	Revenu agricole	56 110 €
30%	71 671 €		
	35 836 € par UMOF		

Capital d'exploitation hors foncier:	568 382 €
Bâtiments	210 637 €
matériel	150 959 €
Cheptel	181 685 €



Ce type de système jouit généralement d'une bonne efficacité économique, les deux productions se complétant bien en terme d'occupation de l'espace, de valorisation des fourrages avec une certaine souplesse apportée par le troupeau allaitant. Il est par contre très exigeant en terme de main d'œuvre et d'organisation du travail, de même qu'en bâtiments et installation de traite (double équipement: cabane+ fixe). L'année 2013 est économiquement marquée par un prix du lait en hausse et une conjoncture viande stable.

Indicateurs économiques

Marge brute atelier viande	617 €	par UGB viande
Charges opérationnelles animales	442 €	par UGB totale
Fs élevage et div. (hors ach.four)	111 €	par UGB totale
Frais vétérinaires	63 €	par UGB totale
Charges opérationnelles végétales	144 €	par ha SAU
Marge brute atelier lait	288 €	/1000 l
Main d'œuvre	7%	du PB
Foncier	4%	du PB
Mécanisation	10%	du PB
Charges de méca (hors amortis.)	223 €	par ha SAU
EBE hors Main d'œuvre et foncier (en % du	53%	

* après application de la modulation et stabilisateurs

BL22

Double troupeau

Montbéliard et Aubrac

Système modernisé

Chiffres clés
2013**Double troupeau, 300 000 litres de lait + 40 Aubrac (45PMTVA).**

Système mixte lait allaitant de grande dimension très utilisateur d'espace, représentatif de la zone volcanique labourée et accessoirement de la zone granitique. Le quota laitier de 300000 litres est produit avec 49 vaches laitières montbéliardes à 6400 litres par vache, tandis que le troupeau allaitant de race Aubrac, composé de 40 mères produit du broutard alourdi dont une partie en croisement.

Le système fourrager est basé sur l'herbe pâturée et récoltée en ensilage (ou enrubannage) et foin.

La chargement technique est de 1,2 UGB/ha SFP et une partie de la SAU est consacrée à la céréale pour la production de grain et de paille.

Ce système peut difficilement se spécialiser car très adapté au parcellaire éclaté de Planèze (traite dehors).

La main d'œuvre
2,1 UMO

GAEC familiale

2,0 UMO familiales

0,1 UMO salariées

Le troupeau
128 UGB

49 Vaches laitières

40 Vaches allaitantes

73 UGB lait

55 UGB viande

57% UGB lait / UGB totaux

Dont 14,49€/1000 l pour AOP Cantal et Bleu

Le lait
316830 L produit

300000 litres vendus

374 € par 1000 litres

6 433 litres par VL

La viande
28 T produites

9 620 Kgv BL vendus

2,35 € par Kg vif

18 704 Kgv BV vendus

2,39 € par Kg vif

339 Kgv/UGB bovin viande

Les surfaces
112 ha SAU

112 ha SAU

108 ha SFP

107 ha d'herbe

1,2 UGB/ha SFP

2 947 litres de lait/ha SFP

263 Kgv de viande/ha SFP

L'alimentation

2,6 TMS de fourrages par UGB

227 g de concentrés VL par litre de lait

L'économie
Un disponible de
35836 €/UMOf

Produit Brut

240 501 €

Charges opérationnelles

72 784 €

30% du PB

Charges Structurelles

67 626 €

28% du PB

EBE

100 090 €

42% du PB

Capital :

€568 382

4443 €/UGB

Annuité moyenne

28 419 €

12% du PB

Disponible

71 671 €

Disponible/UMO non salariée

35 836 €

Coût de production de l'atelier lait

300000 L de lait vendu en 2013

Coût de production total (€/1000L)	523 €
Achats d'aliments	78 €
dt Concentrés et minéraux	78 €
dt Achats de fourrages	0 €
Approvisionnement des surfaces	33 €
dt Engrais et amendements	20 €
dt Semences	4 €
dt Autres charges végétales	9 €
Frais d'élevage	50 €
dt Frais vétérinaires	16 €
dt Autres frais d'élevage	30 €
dt Achats de litière	4 €
dt Frais de transformation et commercialisation	0 €
Mécanisation	100 €
dt Travaux par tiers	13 €
dt Carburants et lubrifiants	20 €
dt Entretien du matériel	22 €
dt Achat petit matériel et divers matériels	0 €
dt Crédit bail	0 €
dt amortissements du matériel	45 €
Bâtiments	63 €
dt Eau	0 €
dt Electricité et gaz	10 €
dt Entretien et location de bâtiments	4 €
dt amortissements des bâtiments	49 €
Frais divers de gestion	22 €
dt Transport, dep., assurances, comptabilité	22 €
dt autres amortissements	0 €
Foncier et capital	51 €
dt Fermage et frais du foncier	19 €
dt Rémunération des terres en propriété	10 €
dt amortissement des améliorations foncières	0 €
dt Frais financiers	12 €
dt Rémunération du capital propre	10 €
Travail	127 €
dt salaires et charges salariales	7 €
Rémunération forfaitaire du travail	120 €

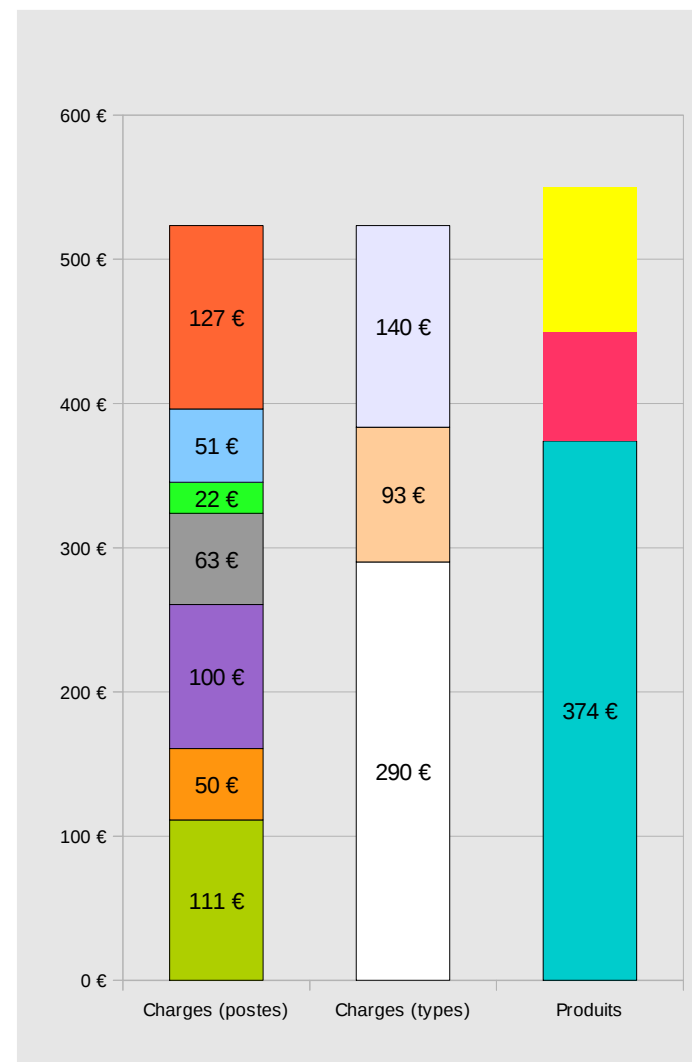
Détail des produits (€/1000L)	550 €
Prix du lait	374 €
Viande de l'atelier lait	75 €
Dont achats d'animaux (en -)	0 €
Autres produits joints	0 €
Aides totales	100 €
Dt Aides couplées	14 €
dont aides découplées (DPU)	47 €
dont aides du 2° Pilier	40 €

graphique 1ère colonne ->

Postes de charges (€/1000L)	523 €
Travail	127 €
Capital	51 €
Frais de gestion	22 €
Bâtiments	63 €
Mécanisation	100 €
Frais d'élevage	50 €
Alimentation	111 €

graphique 3ème colonne ->

Postes de produits (€/1000L)	550 €
Prix du lait	374 €
Produits viande	75 €
autres produits joints	0 €
Aides totales	100 €



Résultats

Rémunération du travail exploitant [€ / 1000 lit.]	147 €
Soit, en nb de SMIC brut annuel par UMO exploitant	1,83 SMIC
Nombre d'UMO salarié + exploitant	1,45 UMO
Lait vendu par UMO total (L/UMO)	207 365 L
Prix de revient du lait	
1-Prix de revient pour 0 SMIC par UMOs	227 €
2-Prix de revient pour 1,5 SMIC par UMOs	348 €
Prix de fonctionnement	
1-Prix de fonctionnement pour 0 SMIC par UMOs	163 €
2-Prix de fonctionnement pour 1,5 SMIC par UMOs	283 €

Répartition du coût de production par type de charge

(voir graphique 2ème colonne)

Charges courantes	290 €
Amortissements	93 €
Charges supplétives	140 €

Coût de production de l'atelier bovin viande

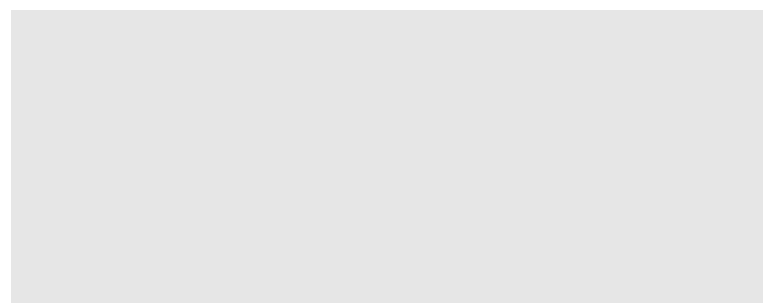
18704 kgv de viande vive produite en 2013

Coût de production total atelier	378 €
Approvisionnement des animaux	36 €
dt Concentrés et minéraux	36 €
dt Achats de fourrages	0 €
Approvisionnement des surfaces	33 €
dt Engrais et amendements	23 €
dt Semences	4 €
dt Autres charges végétales	6 €
Frais d'élevage	39 €
dt Frais vétérinaires	18 €
dt Autres frais d'élevage	16 €
dt Achats de litière	5 €
dt Frais de transformation et commerciaux	0 €
Mécanisation	79 €
dt Travaux par tiers	14 €
dt Carburants et lubrifiants	15 €
dt Entretien du matériel	17 €
dt Achat petit matériel et divers matériels	0 €
dt Crédit bail	0 €
dt amortissements du matériel	33 €
Bâtiments	28 €
dt Eau	0 €
dt Electricité et gaz	5 €
dt Entretien et location de bâtiments	2 €
dt amortissements des bâtiments	22 €
Frais divers de gestion	16 €
dt Transport, dep., assurances, comptables	16 €
dt autres amortissements	0 €
Foncier et capital	54 €
dt Fermage et frais du foncier	22 €
dt Rémunération des terres en propriété	11 €
dt amortissement des améliorations foncières	0 €
dt Frais financiers	11 €
dt Rémunération du capital propre	9 €
Travail	92 €
dt salaires et charges salariales	5 €
Rémunération forfaitaire du travail	87 €
MSA affectable à l'atelier (pour info)	(24 €)

Rémunération du travail exploitant [€ / 1000 lit.]	92 €
Soit, en nb de SMIC brut annuel par UMO exploitant	0,70
Nbre d'UMO salarié + exploitant	0,70
Kg vif produits par UMO total (X 100 kg)	286

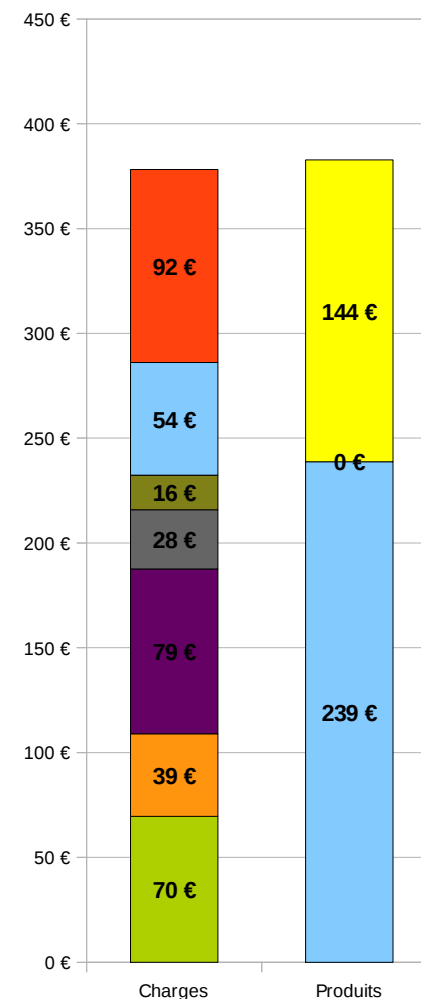
Prix de revient des 100 kg de viande produits

1-Prix de revient pour 0 SMIC par UMOs	147 €
2-Prix de revient pour 1,5 SMIC par UMOs	234 €



Postes de charges	378 €
Travail	92 €
Capital	54 €
Frais de gestion	16 €
Bâtiments	28 €
Mécanisation	79 €
Frais d'élevage	39 €
Alimentation	70 €
Postes de produits	383 €
Ventes – achats	239 €
Produits viande	0 €
Aides totales	144 €

Détail des produits de l'atelier	383 €
ventes	239 €
Achats	0 €
Aides totales	144 €
Dt Aides couplées	42 €
dont aides découplées (DPU)	54 €
dont aides du 2° Pilier	48 €



Capacités des troupeaux bovins laitiers et allaitants à valoriser les ressources herbagères en zones contraignantes : Utilisation d'un modèle d'optimisation bioéconomique



Z. Diakité^{2,1*}, C. Mosnier^{1,2}, R. Baumont^{1,2}, G. Brunswig^{2,1}
¹INRA, UMR1213 Herbivore, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France;
²Université Clermont Auvergne, VetAgro-Sup, UMR1213 Herbivore BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France
 *zakary.diakite@vetagro-sup.fr

PROBLEMATIQUE : Influence de la composition des troupeaux sur les performances du système d'élevage

Les systèmes d'élevage bovins doubles troupeaux lait et viande, présents dans le Massif central, sont réputés pour permettre une bonne valorisation des ressources herbagères et présenter une performance économique équilibrée.

Nous étudions ici l'influence de la composition des troupeaux sur la valorisation des ressources herbagères et les performances économiques de ces systèmes.

MATERIEL : Un modèle d'optimisation bioéconomique

- Utilisation du modèle d'optimisation bioéconomique Orfée (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier., 2015).
 ➢ Adaptations : Intégration de contraintes géographiques et de l'hétérogénéité du parcellaire.
- Utilisation de deux Cas-types doubles troupeaux du sud de l'Auvergne : Fermes fictives à l'équilibre construites à partir de données issues de fermes réelles (cf. BL18 et BL22).

Cas-type BL18	Cas-type BL22
Système lait-viande équilibré à taille moyenne avec une estive	Système modernisé lait-viande de grande dimension avec parcellaire éclaté et des cultures
2,00 UMO -44 UGB lait 44 UGB viande-70 ha SAU -30 ha d'estives-1,26 UGB/ha SF	2,00 UMO -72 UGB lait -55 UGB viande-112 ha SAU-5 ha de céréales-1,2 UGB/ha SFP

DEMARCHE : Une expérience in silico

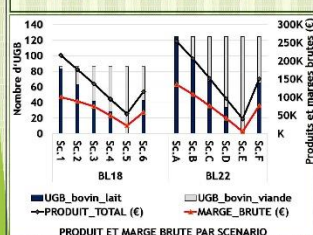
- Paramétrage du modèle pour représenter les deux cas-types
- Simulations des scénarios du plan d'expérience présentant 6 situations : (L pour UGB laitier et A pour UGB allaitant) 100%L, 75%L-25%A, 50%L-50%A, 25%L-75%A, 100%A et la répartition des cas-types considérés.

PLAN D'EXPERIENCE	Culture	Fausse	Estives	Répartitions UGB laitier (L) UGB allaitant (A)					% cf. cas-types
				100%L 0%A	75%L 25%A	50%L 50%A	25%L 75%A	0%L 100%A	
Cas-type BL18	0	+++	+++	Sc.1	Sc.2	Sc.3	Sc.4	Sc.5	Sc.6
Cas-type BL22	+++	+++	0	Sc.A	Sc.B	Sc.C	Sc.D	Sc.E	Sc.F

- Analyse des résultats des simulations sur les critères: Economie, consommations, productions animales et végétales

RESULTATS : Des systèmes mixtes plus équilibrés que les systèmes spécialisés

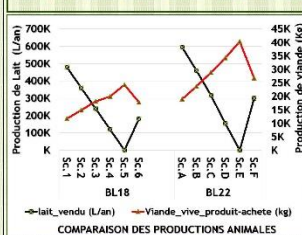
1-Economie : Produit total et Marge brute



Contrairement aux systèmes 100%A, les systèmes 100%L ont un meilleur produit avec de lourdes charges.

- Meilleur compromis économique pour les systèmes intermédiaires.

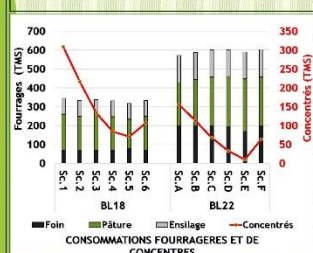
2-Productions de lait et de viande



Les systèmes intermédiaires autour de 50%L-50%A offrent des quantités de viande et de lait équilibrées.

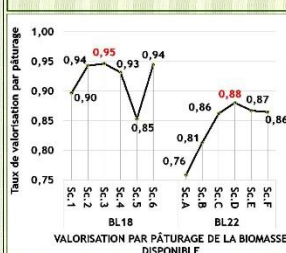
- Diversité de produits animaux qui permettrait de mieux faire face aux fluctuations de prix.

3-Consommations fourragères et de concentrés



- Les systèmes 100%L utilisent de grandes quantités de concentrés.
- L'utilisation de concentrés décroît avec l'augmentation de la part d'UGB allaitant dans le troupeau.
- Utilisation modérée de concentrés pour les systèmes intermédiaires.

4-Valorisation de l'herbe par pâturage



Valorisation moindre pour les systèmes spécialisés sauf pour le système 100%A du BL22 du fait de sa structure et son fonctionnement.

- Valorisation maximale de l'herbe pour les systèmes à proportions proches de 50%L-50%A.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

On a une meilleure valorisation des ressources herbagères par pâturage et un bon compromis économique pour les systèmes à répartitions équilibrées entre UGB laitiers et allaitants.

Cependant un tel équilibre procure-t-il à ces systèmes une plus grande résilience de fonctionnement ?

Capacities of dairy and suckling herds to valorize grassland resources in mountain areas: use of a bio economic optimization model to study the influence of the structure of livestock systems



Z. Diakité^{2,1*}, C. Mosnier^{1,2}, R. Baumont^{1,2}, G. Brunschwig^{2,1}

¹INRA, UMR1213 Herbivore, F-63122 Saint-Genès-Champagnelle, France;

²Université Clermont Auvergne, VetAgro-Sup, UMR1213 Herbivore BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

*zakary.diakite@vetagro-sup.fr

ISSUE: Influence of herd composition on livestock system performance

Cattle farming systems with dairy and suckling herds in mountainous areas would improve the valuation of grassland resources and offer better economic performance than specialized herd systems.

In this study, we evaluate the influence of combinations of dairy and suckling herds on the economic performance and grass valuation in the case of mountain cattle farming systems.

MATERIALS: a bio economic optimization farm model

- Use of the bio economic farm model "Orfee" Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment (Mosnier., 2015) With the addition of geographical constraints and enrichment of the representation of grassland productions.
- Simulations based on two Farm-types of south of Auvergne, France (ref. BL18 and BL22): built on data from real farms.

Farm-type BL18	Farm-type BL22
Medium-sized milk-meat systems with a summer mountain pasture,	Large size milk-meat system with an fragmented plot and cereal crops

METHODS: an in-silico experiment

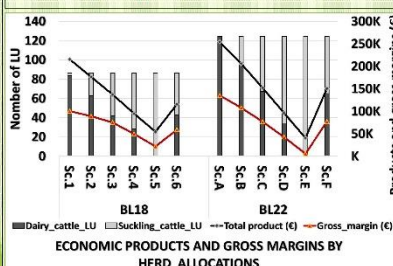
Experimental plan use for simulations presents six herds compositions: (D for dairy herd and S for suckling herd, in LU%) 100% D, 75% D-25% S, 50% D-50% S, 25% D-75% S, 100% S and the last corresponding to the given Farm-type.

	Culture	cutting	Summer Moutain pasture	Proportions dairy LU (D) suckling LU (S)					Farm-types
				100%D	75%D	50%D	25%D	0%D	
BL18	0	+++	+++	0%S	25%S	50%S	75%S	100%S	Sc.6
BL22	+++	+++	0	Sc.A	Sc.B	Sc.C	Sc.D	Sc.E	Sc.F

We analyze simultaneously the technical and economic results

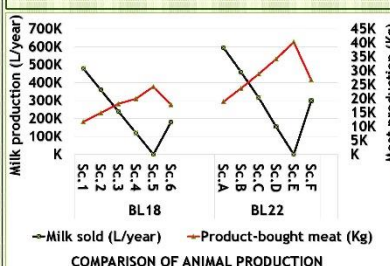
RESULTS: Mixed systems more balanced than specialized systems

1-Economy: Total Product and Gross Margin



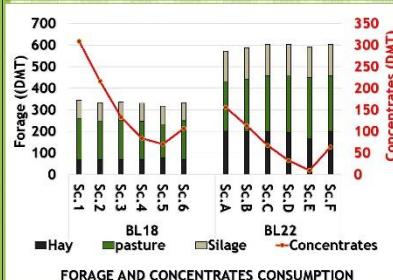
- A better economic product for 100% D.
- Gross margin decreases with the increase of the suckling herd LU in the farm.
- Good economic compromise for intermediate distributions (50% D-50% S).

2-Milk and meat production



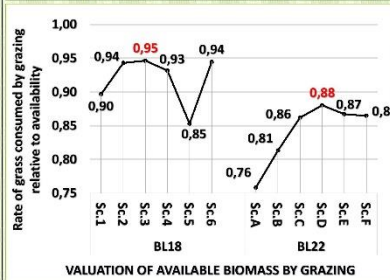
- Good quality and diversity of animal products (milk and meat).
- Intermediate systems (50% D-50% S) offer balanced quantities of meat and milk.
- Capacity to cope with price fluctuations.

3-Forage and Concentrates Consumption



- 100% D systems use large amounts of concentrates.
- Concentrates consumption decrease with the increase of the suckling herd LU in the farm.
- Moderate use of concentrates for intermediate distributions (50% D-50% S).

4-Grass valuation by grazing



- Valuation reaches 95% in the case of BL18 and 88% in the case of BL22.
- Valuation of the grass by grazing is maximum for systems with herd having proportions close to 50% D-50% S.

CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Conducting dairy and suckling herds simultaneously with a balanced distribution between herds is an interesting way to improve the valuation of grassland resources by grazing, thus allowing to have good qualities of animal products (milk and meat). However, we must continue our analysis to consider whether such management allows greater resilience of farm.

Capacities of dairy and suckling herds to valorize grassland resources in mountain areas: use of a bio economic optimization model to study the influence of the structure of livestock systems



Z. Diakité^{2,1*}, C. Mosnier^{1,2}, R. Baumont^{1,2}, G. Brunshwig^{2,1}
¹INRA, UMR1213 Herbivore, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France;
²Université Clermont Auvergne, VetAgro-Sup, UMR1213 Herbivore BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France
 *zakary.diakite@vetagro-sup.fr



ISSUE: Influence of herd composition on livestock system performance

Cattle farming systems with dairy and suckling herds in mountainous areas would improve the valuation of grassland resources and offer better economic performance than specialized herd systems.

In this study, we evaluate the influence of combinations of dairy and suckling herds on the economic performance and grass valuation in the case of mountain cattle farming systems.

MATERIAL: a bio economic optimization farm model

- Use of the bio economic farm model "Orfee" Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment (Mosnier., 2015) with the addition of geographical constraints and enrichment of the representation of grassland productions.
- Simulations based on two Farm-types of south of Auvergne (ref. BL18 and BL22): built on data from real farms.

Farm-type BL18	Farm-type BL22
Medium-sized milk-meat systems with a summer mountain pasture	Large size milk-meat system with an fragmented plot and cereal crops

METHODS: an in-silico experiment

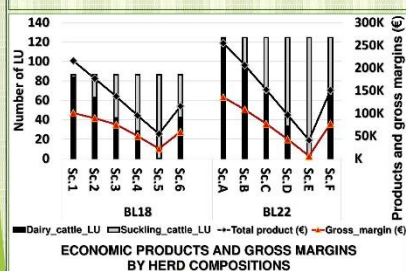
Experimental plan use for simulations presents six herds compositions: (D for dairy herd and S for suckling herd, in LU%) 100% D, 75% D-25% S, 50% D-50% S, 25% D-75% S, 100% S and the last corresponding to the given Farm-type.

	Culture	cutting	Summer Moutain pasture	Proportions: dairy LU (D), suckling LU (S)					Farm-types
BL18	0	+++	+++	100%D 0%S	75%D 25%S	50%D 50%S	25%D 75%S	0%D 100%S	Sc.6
BL22	+++	+++	0	Sc.1	Sc.2	Sc.3	Sc.4	Sc.5	Sc.F

We analyze simultaneously the technical and economic results

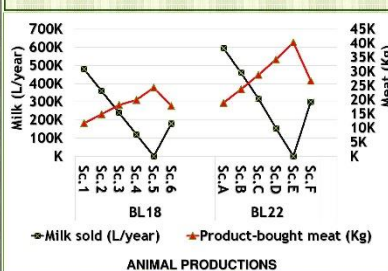
RESULTS: Mixed systems more balanced than specialized systems

1-Economy: Total Product and Gross Margin



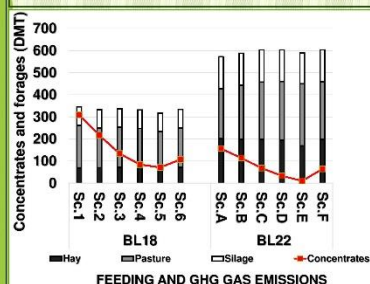
- A better economic product for 100% D.
- Gross margin decreases with the increase of the suckling herd LU in the farm.
- Good economic compromise for intermediate distributions (50% D-50% S).

2-Milk and Meat production



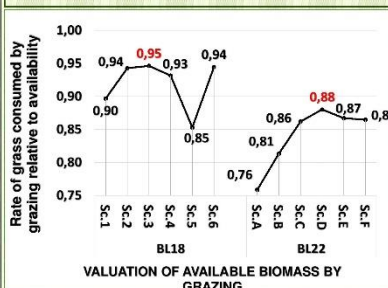
- Good quality and diversity of animal products (milk and meat).
- Intermediate systems (50% D-50% S) offer balanced quantities of meat and milk.
- Capacity to cope with price fluctuations.

3-Feeding and GHG gas emissions



- Farm total greenhouse gas emissions and concentrates consumption decrease with the increase of the suckling herd LU in the farm.
- Moderate GHG gas emissions and use of concentrates for intermediate distributions (50% D-50% S).

4-Grass valuation by grazing



- Valuation reaches 95% in the case of BL18 and 88% in the case of BL22.
- Valuation of the grass by grazing is maximum for systems with herd having proportions close to 50% D-50% S.

CONCLUSION AND PERSPECTIVE

Conducting dairy and suckling herds simultaneously with a balanced distribution between herds is an interesting way to improve the valuation of grassland resources by grazing, thus allowing to have good qualities of animal products and moderate GHG gas emissions. However, we must continue our analysis to consider whether such management allows greater resilience of farm.

Grazing performance and the use of concentrate in double herds breeding systems with dairy cow and suckling cattle herds in mountain areas: a bioeconomic simulation analysis



Z. Diakité^{1*}, C. Mosnier¹, R. Baumont¹, G. Brunschwig¹
¹Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores,
F-63122 Saint-Genès-Champagnelle, France

*zakary.diakite@vetagro-sup.fr



ISSUE: Grazing performance and the use of concentrate in bovine mixed herds systems

Cattle farming systems with dairy cows and a suckling cattle herd in mountainous areas would improve their grazed grass utilization rate to have good forage autonomy and good economic performances.

The aim of this study was to characterize which herd distributions allows the best combination between grazed grass utilization, animal production and economical performances.

MATERIAL: a bio economic optimization farm model

- Use of the bio economic farm model "Orfee" **Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment** (Mosnier et al., 2017a) with the addition of geographical constraints and enrichment of the representation of grassland productions.
- Simulations based on two **farms representative of the mountain double herd cattle farms of south Auvergne (ref. BL18 and BL22).**

METHOD: an in-silico experiment

Experimental plan use for simulations presents five herd distributions for each farm as a **decreasing percentage of dairy cattle** in the total number of Livestock Unit (LU): 100% (dairy herd, **100D**), 75% (dairy herd larger than beef herd, **75D**), 50% (dairy and beef herds equal, **50D**), 25% (dairy herd smaller than beef herd, **25D**) and 0% (beef herd, **0D**).

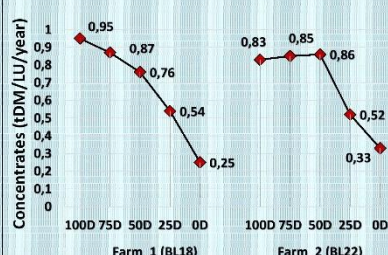
TABLE 1. Recapitulation of main characteristics of explored farms: Farm_1 (BL18: **medium size with a summer mountain pasture**) and Farm_2 (BL22: **large size with a fragmented plot and cereal crops**) LU = AU (Animal Unit).

Characteristics	Farm_1 (BL18)	Farm_2 (BL22)
Beef cattle breed	Salers	Aubrac
Dairy cattle breed	Prim'Holstein	Montbéliard
No. of dairy animal units (AU)	44	72
No. of beef AU	44	55
Milk production (L/dairy cow/yr)	5860	6433
Stocking rate (AU/ha on-farm forage area)	1.26	1.18
Utilized agricultural area (ha)	70	112
Summer pastures (ha)	30	0
Cereal area (ha)	0	5

We analyze simultaneously technical and economic indicators predicted: **Forage and concentrates consumption, Grazed grass utilization rate, Operating profit per Men Work Unit (MWU), Animal productions.**

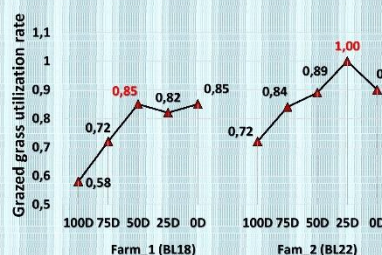
RESULTS & DISCUSSION: Better grazed grass utilization, low concentrates intake and good forage autonomy for bovine mixed herds

Forage and concentrates consumption



Annual cumulative consumption of forage is around 4 tons of dry matter (tDM) per LU in both farms for all the scenarios and we have an **increase of the stocking rate (TABLE 2.) and a decrease of concentrates intake (per LU per year) with the decrease of dairy LU in herds.**

Grazed grass utilization rate



- Grazed grass utilization reaches **85%** in the case of **Farm_1** (BL18) and is **maximum (100%)** in the case of **Farm_2** (BL22).
- Grazed grass utilization rate is **maximum for mixed herds systems** with LU distribution (between 50D and 25D).

TABLE 2. Main indicators related to different analyzed criteria for scenarios corresponding to the farms

Farm-types Scenarios	Farm_1 (BL18)					Farm_2 (BL22)				
	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Total livestock unit (LU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Concentrates (tDM/LU/year)	0.95	0.87	0.76	0.54	0.25	0.83	0.85	0.86	0.52	0.33
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Stocking rate (LU/ha)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Milk sold per year (1000L/year)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Meat sold (1000kg/ year)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Operating profit (1000€/MWU)	6.51	7.21	7.64	7.67	5.78	18.82	20.60	21.86	22.34	22.02

- Grazed grass utilization rate and operating profit per MWU reach **their maximum for mixed herds.**
- We have **diversity of animal products** (milk and meat) for mixed herds systems.
- Mixed herds systems offer **balanced quantities of meat and milk.**

CONCLUSION

This study shows that **bovine mixed herds systems**, particularly systems with 25 to 50% dairy cattle LU, **maximize the grazed grass utilization rate in a context of mountain grasslands with constraints of mechanization and access to dairy cows.** These systems have also good animal productions and economic performances at farm scale. However, the structure of the farm plot is essential to specify the optimal herd's distributions which improve grazing and economic performances.

PERFORMANCES DE PÂTURAGE ET UTILISATION DE CONCENTRÉS DANS LES SYSTÈMES D'ÉLEVAGE DOUBLE TROUPEAUX BOVINS LAITIERS BOVINS ALLAITANTS HERBAGERS : ANALYSE BIOÉCONOMIQUE



Z. Diakité^{1*}, C. Mosnier¹, R. Baumont¹, G. Brunschwig¹

¹Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

*zakary.diakite@vetagro-sup.fr



PROBLEMATIQUE : Performances de pâturage et utilisation de concentrés dans les systèmes bovin mixtes laitier-allaitant

La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants favorise une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage en vue d'une meilleure autonomie fourragère et de bonnes performances économiques.

L'objectif était de mettre en évidence des compositions de troupeaux qui permettent une bonne combinaison entre valorisation de l'herbe par pâturage, production animale et les performances économiques des systèmes d'élevages bovin herbagers.

MATERIELS : un modèle d'optimisation bioéconomique

- Utilisation du modèle d'optimisation bioéconomique Orfee "Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental Assessment" (Mosnier et al., 2017) adapté pour prendre en compte les contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcelles basées sur la typologie française des prairies permanentes (Launay et al., 2011).
- Simulations basées sur deux fermes représentatives des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant du sud de l'Auvergne (ref. BL18 and BL22 base de données des exploitations DIAPASON).

METHODE : une expérience in silico

Plan expérience de simulations avec cinq distributions de troupeau pour chaque ferme (D le pourcentage en Unité de Gros Bétail (UGB) laitier, la différence le pourcentage en UGB allaitant) : 100D (100% laitier), 75D (75% laitier & 25% allaitant), 50D (50% laitier & 50% allaitant), 25D (25% laitier & 75% allaitant) and 0D (100% allaitant).

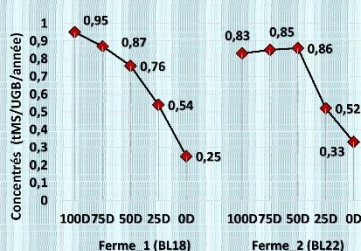
Tableau 1. Principales caractéristiques de Ferme_1 (BL18 : Système lait-viande équilibré à taille moyenne avec estive) et Ferme_2 (BL22 : Système modernisé lait-viande de grande dimension avec parcellaire éclaté et des cultures).

Caractéristiques	Ferme_1	Ferme_2
Race allaitante	Salers	Aubrac
Race laitière	Prim'Holstein	Montbéliard
Nombre d'Unités de Gros Bétail (UGB) troupeau laitier	44	72
Nombre d'UGB troupeau allaitant	44	55
Potentiel laitier (L/vache laitière/an)	5860	6433
Chargement (UGB/ha de Surface Fourragère Principale)	1,26	1,18
Surface agricole utile (ha)	70	112
Estives (ha)	30	0
Surface de céréales (ha)	0	5

Analyse simultanée des indicateurs techniques et économiques prédits : consommation de fourrage et de concentrés, taux de valorisation de l'herbe par pâturage (taux de pâturage), Profit par Unité de Main d'Œuvre (UMO), productions animales (lait et viande).

RESULTATS & DISCUSSION : Meilleure taux de pâturage, faible consommation de concentrés pour les troupeaux bovins mixtes laitier

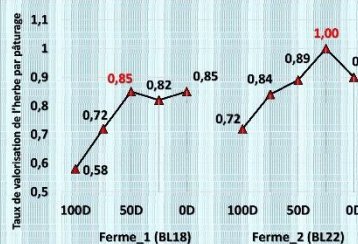
Consommation de concentrés et de fourrage



Concentrés : Baisse de la consommation de concentrés (tMS / UGB / année) et augmentation du chargement avec le nombre d'UGB allaitant dans la ferme (Tableau 2).

Fourrage : Consommation annuelle de fourrage autour de 4 tonnes de Matière Sèche (tMS) par UGB pour chaque ferme et scénario (Tableau 2).

Taux de valorisation de l'herbe par pâturage



Le taux de valorisation de l'herbe par pâturage atteint un seuil de 85% dans Ferme_1 (BL18) et est de 100% dans Ferme_2 (BL22).

Ces valeurs maximales de taux de pâturage sont associées aux systèmes mixtes laitier-allaitant avec des répartitions d'UGB entre 50D et 25D

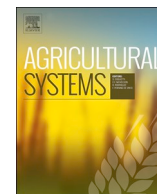
Tableau 2. Principaux indicateurs liés aux critères analysés pour les différents scénarios des exploitations

Cas-types	Ferme 1					Ferme 2				
Scénarios	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Nombre total d'UGB	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Concentrés utilisés (tMS/UGB/année)	0,95	0,87	0,76	0,54	0,25	0,83	0,85	0,86	0,52	0,33
Taux de valorisation par pâturage (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Chargement (UGB/ha)	0,93	1,04	1,14	1,18	1,15	1,05	1,17	1,28	1,24	1,20
Lait vendu (1000L/année)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Viande vendue (1000kg/ année)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Profit par UMO (1000€/ UMO)	6,51	7,21	7,64	7,67	5,78	18,82	20,60	21,86	22,34	22,02

- Taux de pâturage et le profit par UMO des Fermes sont maximum pour les systèmes bovins mixtes
- Diversité de produits animaux (lait et viande) pour les systèmes bovin mixtes laitier-allaitant.
- Systèmes bovins mixtes laitier-allaitant (scénarios 50D) offrent des quantités équilibrées de viande et de lait.

CONCLUSION

Partant de nos résultats, les systèmes bovins mixtes laitier-allaitant, en particulier les systèmes mixtes avec 25 à 50% de bovins laitiers, maximisent le pâturage dans les zones de montagne avec des contraintes de mécanisation et d'accès aux vaches laitières. Ces systèmes ont également de bonnes performances de productions animales et économiques à l'échelle exploitation. Cependant, la prise en compte de la structure des parcelles est essentielle à la spécification des répartitions de troupeau qui optimisent les performances de pâturage et économiques.



Profit stability of mixed dairy and beef production systems of the mountain area of southern Auvergne (France) in the face of price variations: Bioeconomic simulation

Z.R. Diakité^{a,*}, M.S. Corson^b, G. Brunschwig^a, R. Baumont^a, C. Mosnier^a

^a Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^b UMR SAS, INRA, AGROCAMPUS OUEST, F-35000 Rennes, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Mixed cattle system
Sensitivity analysis
Whole farm model
Bioeconomic optimization
Risk management

ABSTRACT

Mountain farmers face additional structural constraints (e.g., steep slopes, high elevations, fragmented fields) along with the regular risks inherent to agriculture, such as economic fluctuations. We thus hypothesized that simultaneously producing dairy and beef herds (i.e., “mixed cattle systems”) on mountain farms is a good compromise between a farm's expected profits and the variation in these profits. To explore the profit stability of mixed cattle systems in the face of price variations, we used the bioeconomic optimization model Orfee to simulate one farm strategy: adjusting the number of cattle. The model simulated three mixed cattle systems (dairy and beef herds) and two specialized cattle systems (dairy or beef herd) on two farms in southern Auvergne (France) that differed in agronomic potential, field configurations and animal productivity. A local sensitivity analysis of beef, milk and feed price was combined with a global sensitivity analysis based on metamodels. Results indicated that the number of cattle was adjusted as a function of resource availability, farm structure, and product prices on the market. Compared to specialized systems, mixed cattle systems usually seemed an effective strategy to manage economic risk, with good compromise between expected profits and variation in profits.

1. Introduction

In the Massif Central, a mountainous region in central France, 80% of the agricultural area is covered by permanent grasslands (AGRESTE, 2011), which are favorable for grazing cattle. The region contains many livestock farms, but its agronomic and geographic characteristics render livestock production more difficult than that at lower elevations. For example, high elevations of fields make crop production impractical and shorten grazing periods, steep slopes prevent mechanization, long distances between fields and the farm headquarters consume time and fuel and impede animal movement, and remoteness from main transport routes increases transportation costs (Brunschwig et al., 2006; Andrieu et al., 2007). These structural constraints not only decrease the competitiveness of mountain farms but can also reduce their ability to manage the risks inherent to all agriculture: climate risks and economic fluctuations (Baumont et al., 2008; Mosnier et al., 2009). Variability in prices of agricultural inputs and products has increased in part due to more liberal business policies (e.g., end of milk quotas, decrease in production-based subsidies, intervention of the European Union

Common Agricultural Policy in international trade). Diversification can be an effective way of reducing farmers' risk exposure, since different agricultural products are not necessarily subject to the same economic fluctuations (Chavas, 2008). Farms in mountainous regions, however, have limited ability to diversify agricultural production. Those that produce dairy cattle and beef cattle at the same time can render their income streams from milk and beef more equal than they would be if they specialized in dairy or beef production. Risk management generally comes at a cost (Abson et al., 2013), though, since diversification requires producing products besides the most profitable one and can come at the expense of economies of scale (Chavas, 2008). Nonetheless, complementarity and synergy between products can decrease the cost of diversification. Several studies have investigated economic gains obtained from complementary effects of farm products. For example, Chavas and Aliber (1993) estimated that mixed crop-livestock farming resulted in substantial economies of scope, and Kim et al. (2012) found significant productivity gains in diversified rice farms in Korea. In addition, simultaneous production of several livestock species has been shown to decrease climatic, health, and economic risks (Bonaudo et al.,

* Corresponding author.

E-mail address: zakary.diakite@icloud.com (Z.R. Diakité).

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.012>

Received 22 July 2018; Received in revised form 28 December 2018; Accepted 30 January 2019

0308-521X/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

2014; Tichit et al., 2011).

Production systems that combine dairy and beef cattle (i.e., “mixed cattle systems”) are common in mountainous regions such as Auvergne, in the Massif Central, where they represent 75% of mixed livestock farms producing milk (AGRESTE, 2011). To our knowledge, however, no studies have analyzed the cost-effectiveness of mixing types of animal production to reduce risk exposure by explicitly assessing the complementarity among herds. Complementarity between dairy cattle herds and beef cattle herds can result in more efficient grass use on the farm, especially by the beef herd, which does not require such high-quality grass and can be grazed on pastures further from the barn (Morlon and Benoit, 1990; Brunschwig et al., 2006; Andrieu et al., 2007; Diakité, in review). In addition, managing dairy and beef herds simultaneously can increase a farm's adaptation ability by modifying the production of the herds. The question thus becomes whether simultaneous production of dairy and beef herds is a cost-effective strategy for managing risk, particularly in mountainous areas, considering the ability of farms to adapt their production system. We hypothesized that mixed cattle systems on mountain farms are a good compromise between a farm's expected profits and the variation in these profits.

Simulation modeling provides an overall view of the functioning of systems by considering many of their elements and interactions among them. Many simulation models simulate agricultural practices and predict impacts of external fluctuations (e.g., climate, economy) on agricultural, environmental, and economic performances of farms. Bioeconomic models represent farm functioning and are generally used to simulate optimal production decisions for a given economic objective (Janssen and Van Ittersum, 2007). Studies have simulated impacts of price fluctuations (Lambert, 1989; Ridier and Jacquet, 2002), climate fluctuations (Olson and Mikesell, 1988; Kingwell et al., 1993; Jacquet and Pluvinage, 1997; Kobayashi et al., 2007), or both (Mosnier et al., 2009) on specialized production systems. Model use is usually preceded by sensitivity analysis, which assesses the relative influence of input parameters on one or more model outputs (Cariboni et al., 2007). Sensitivity analysis serves in particular to understand and evaluate complex models (Hamby, 1994), as well as in decision support, developing recommendations, and understanding and assessing systems (Pannell, 1997). To our knowledge, bioeconomic modeling and sensitivity analysis have not been used together to address the ability of mixed cattle systems to decrease the sensitivity of profits of cattle farms to price fluctuations. This study assessed the sensitivity of production decisions and profit of simulated cattle farms with variable percentages of dairy and beef cows in the total number of Animal Units (AU) by considering their ability to adapt the production system by varying the stocking rate. To this end, we used the bioeconomic optimization model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier et al., 2017) to simulate farms with a beef and/or dairy herd, forage production, and crop production.

2. Materials and methods

2.1. Model description

Orfee (Fig. 1) represents annual production of a livestock farm at equilibrium (i.e., crop allocations and the number of animals by type are the same from year to year under average climate conditions) (Mosnier et al., 2017). Equilibrium is ensured by constraints on crop rotations and the regulation of herd size/composition (through the number of cows, calving periods, replacement of heifers). Economic results obtained from this equilibrium production are calculated under different economic contexts. Orfee has been used to optimize monthly decisions about herd size, ration composition, pasture use, and feed purchases to maximize the expected net profit (Mosnier et al., 2017). Net profit equals farm income (sales plus subsidies) minus farm operating costs and building and equipment depreciation. The optimal type

and quantity of feed in animal diets (e.g., hay, silage, grass of different qualities, silage maize, concentrated feeds) maximize the objective function while covering animal needs in energy and protein for maintenance, gestation, milk production, and growth, and while not exceeding animals' intake capacity. These requirements are calculated based on the INRA feeding system (INRA, 2007). The total quantity of forage consumed cannot exceed the amount produced. In contrast, cereals and straw can be either purchased or sold if feed requirements do not equal feed production.

Most of the agricultural land simulated in this study was composed of permanent grasslands (Table 1). Orfee was adapted to represent the geographic constraints and heterogeneity of permanent grasslands in more detail. Five mountain grassland types characterized by elevation and botanical composition (Launay et al., 2011) were considered. We also considered four pasture management strategies commonly used in cattle production in the Massif Central (Diakité et al., in review): i) grazing all year (April–October), ii) late spring grass cutting (hay produced at the end of June) with summer and autumn grazing, iii) mid-spring grass cutting (silage or wrapped bales at the end of May) with summer and autumn grazing, and iv) mid-spring grass cutting (silage or wrapped bales at the end of May) with summer grass cutting and autumn grazing. Feed values of grass, hay, silage, and wrapped bales were differentiated by grassland type.

For each area of grassland type present on the farm, the model optimizes management strategies under constraints of mechanizable area (some areas with steep slopes or stones can only be grazed). In addition, dairy cows can graze only as much grass as is produced on fields that they can access (Table S7). Structural and depreciation costs related to housing and milking are proportional to herd size. The number of hours of machine use depends on the management strategy chosen. Costs related to machines are not exactly proportional to the number of hours of use since minimum annual maintenance and depreciation costs are included if a machine is used for at least 1 h per year. Orfee runs on the General Algebraic Modeling System (GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA) and uses the Mixed Integer Programming solver CPLEX. It is a static linear optimization model, but integer variables are used to model indivisibilities of investments and conditional subsidies. It is interfaced with Microsoft® Excel input and output data files.

During simulations, the model uses input data about soil characteristics (e.g., soil type and fertility), pasture yields, forage values, field areas, and the type of herd management, described by the distribution of weaning periods, milking, and grazing. It uses animal-production data about biological and production characteristics (e.g., growth rates, reproduction performance, feed requirements, housing requirements) and economic data (e.g., subsidies, labor opportunity cost, input prices). Orfee also uses farm structural data, such as the types of buildings and equipment (but their capacities are optimized by the model). As output, Orfee predicts land use, fertilization, plant production and consumption, animal rations, animal production (milk/beef), herd demographics, input purchases, product sales, economic results, the amount of work performed, and environmental impacts, in particular greenhouse gas emissions.

2.2. Production systems studied

We considered five herd distributions (i.e., scenarios) for each farm as a decreasing percentage of dairy cattle in the total number of AU: 100% (dairy herd, 100D), 75% (dairy herd larger than beef herd, 75D), 50% (dairy and beef herds equal, 50D), 25% (dairy herd smaller than beef herd, 25D) and 0% (beef herd, 0D). In this study, the percentage of the farm's AU that were dairy cattle remained fixed, while the total number of AU, land use, and animal rations were optimized. The five distributions were applied to two case-study farms (“Farm_1” and “Farm_2”) that have both dairy and beef herds (Table 1). Selected from INOSYS Breeding Network References (farm BL18 and BL22,

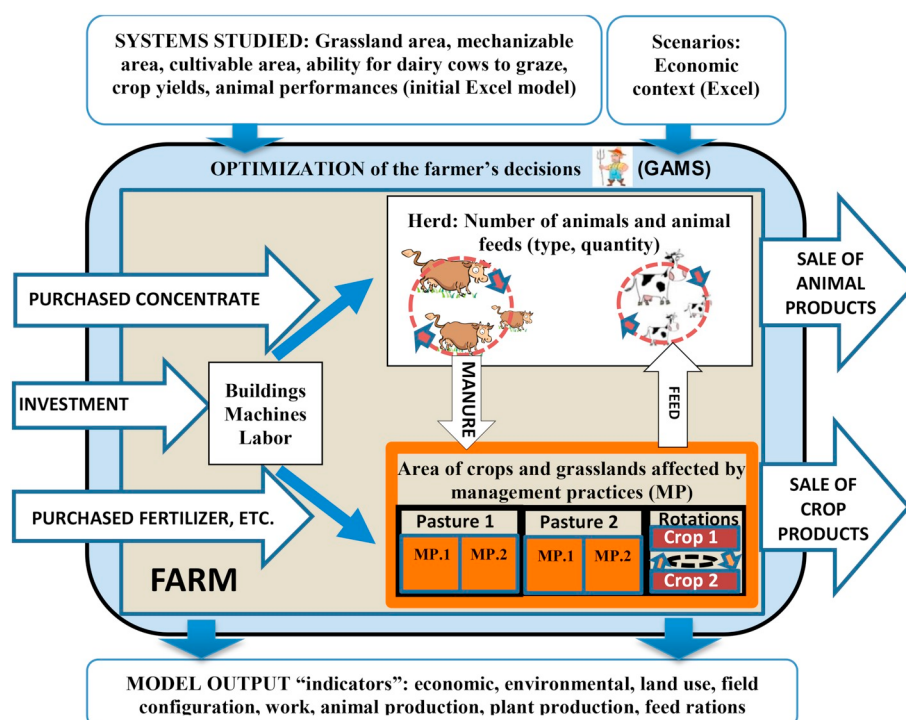


Fig. 1. Diagram of the model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment). GAMS = General Algebraic Modeling System.

Table 1

Main characteristics of mixed cattle systems Farm_1 (moderate size with summer grazing) and Farm_2 (large size with scattered fields and some crops) (Farms BL18 and BL22, respectively, in [Chambre d'Agriculture du Cantal \(2015\)](#)).

Characteristic	Farm_1	Farm_2
Beef cattle breed	Salers	Aubrac
Dairy cattle breed	Prim'Holstein	Montbéliard
No. of dairy animal units (AU)	44	72
No. of beef AU	44	55
No. of dairy cows	32	49
No. of beef cows	35	40
Milk sold (kL/yr)	180	300
Milk production (L/dairy cow/yr)	5860	6433
Stocking rate (AU/ha on-farm forage area)	1.26	1.18
Utilized agricultural area (ha)	70	112
Summer pastures (ha)	30	0
On-farm forage area (ha)	70	108
Pasture area (ha)	70	107
Cereal area (ha)	0	5
Forage crop area (ha)	0	0

respectively) ([Charroin et al., 2005](#)), they are representative models of viable farms in southern Auvergne and are constructed with actual farm data from an extensive network of commercial farms plus specialized knowledge. They mirror the coherent running of well-run, profitable farms for a given system and context ([Charroin et al., 2005](#)). Although both mountain farms, they differed greatly in their herd sizes, cattle breeds, farm sizes, and field configurations. Farm_1 was of moderate size with equal percentages of dairy (Holstein) and beef (Salers) cattle. Some of its forage area was composed of summer mountain pastures. Farm_2 was a large farm with modern dairy (Montbéliarde) (57% of total AU) and beef (Aubrac) production. Its fields were scattered, and some of them were used to produce cash crops. The farms correspond to those in specific areas of southern Auvergne: Cézalier (Mounts of Cantal) for Farm_1 and Planèze de Saint-Flour (area of Velay volcanique) for Farm_2. These baseline farms produced all of their own forage for their cattle. To ensure that, when simulated, they continued

to contain only as many cattle as their grasslands could support, Orfee was set to prohibit forage purchases, allowing only concentrated feed purchases. The differences in herds, field configurations, farm operation and the characteristics of these farm types made it possible to use them for simulations to validate model changes but also to generalize our results to the farms of the study area.

2.3. Experimental design for price variations

Orfee considered the annual variability in economic context observed over the period 2000–2015 to choose the optimal production system that maximized farm profit over the entire period. Thus, it did not simulate any adaptation of the production system to each annual context (i.e. the system remains the same for all 16 years). To test how the farm would adapt to changes in prices, a statistical experimental design ([Kleijnen, 1995a; b](#)) was implemented. We considered only the most important sources of economic risk for the farms considered: prices of milk and beef (the main products contributing to farm income), and those of feed inputs. Since they were based on pasture, the farms considered required few mechanized activities, pesticides, or fertilizers. Input prices were determined from French prices and price indices from 2000 to 2015 ([INSEE, 2018](#)). Adjusted for inflation, the price variations observed over this period (Appendix 1) were higher for cereal-based products (coefficient of variation (CV) = 20%) than for milk (CV = 9%) or beef (CV = 8%). Since correlations between prices of these three products were weak (from -0.17 to 0.05), we explicitly assumed no covariance among them. Variations of $\pm 25\%$ of each individual price were first simulated in increments of 5% to observe potential nonlinearities. In a second step, price variations were tested in combination to represent unfavorable or favorable price contexts. We varied the three prices simultaneously among three levels (-25% , baseline, $+25\%$) (i.e., factors of 0.75, 1.00, and 1.25, respectively), yielding $27 (= 3^3)$ combinations.

2.4. Sensitivity indexes

Two types of sensitivity analysis were used to understand the

Table 2

Baseline values of technical, biological, and economic outputs for the five scenarios of the two farms. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

Technical output	Farm_1					Farm_2				
	100D	75D	50D	25D	0D	100D	75D	50D	25D	0D
Mean net profit (k€/yr)	8.2	8.9	9.0	7.8	4.7	39.5	43.2	45.9	40.3	33.1
Animal units (AU)	65	73	80	82	80	113	125	137	132	128
Stocking density (AU/ha forage area)	0.93	1.04	1.14	1.18	1.15	1.05	1.17	1.28	1.24	1.20
Milk produced (kL/yr)	257	215	158	82	0	486	403	302	146	0
Beef produced (t/yr)	9	12	15	17	19	18	26	34	40	45
Milk sold (k€/yr)	88	74	54	28	0	166	138	103	50	0
Beef sold (k€/yr)	13	20	28	34	39	28	47	69	84	99
Concentrated feed purchased (t/yr)	62	63	61	44	20	82	97	110	55	26
Concentrated feed produced (t/yr)	0	0	0	0	0	21	21	21	21	21
Concentrated feed consumed (t/AU/yr)	0.95	0.86	0.76	0.54	0.25	0.73	0.94	0.96	0.58	0.37
Mean concentrated feed purchased (k€/yr)	18	18	17	13	7	25	28	29	18	11
Total pasture grass available (t DM)	247	239	230	219	202	276	310	344	340	348
Grazed grass utilization rate (%)	58	72	85	82	85	72	84	89	100	90
Total grazed grass (t DM)	144	173	195	179	171	199	260	305	340	312
Grazed grass per AU (t DM/AU)	2.21	2.39	2.45	2.18	2.13	1.76	2.08	2.23	2.57	2.43
Total grass harvested (t DM)	143	148	155	162	173	342	320	282	290	269
Grass harvested per AU (t DM/AU)	2.20	2.05	1.94	1.97	2.15	3.04	2.56	2.07	2.19	2.10
Total fodder consumed (t DM)	287	322	350	341	343	541	580	587	630	580
Fodder consumed per AU (t DM/AU)	4.42	4.41	4.38	4.16	4.29	4.79	4.64	4.28	4.77	4.53

adaptation potential of the systems and analyze the sensitivity of net profit to price fluctuations: “local”, to focus on a change in a specific price (using the full Orfee model), and “global”, to consider interactions between prices and calculate profit-price elasticities (using Orfee metamodels). System adjustments caused by price fluctuations were captured by examining changes in the total number of AU. Sensitivity indices calculated from these adjustments provided information about the flexibility with which each farm could adjust the number of AU and the stability of each farm's net profit.

2.4.1. Local sensitivity analysis to observe changes in the number of AU and sensitivity of net profit to individual prices

We started with a local “one-at-a-time” sensitivity analysis, which varies parameters independently over a fixed interval (Hamby, 1994; O'Neill et al., 1980). Local sensitivity analysis reveals the influence of a change in each price on model output. Local sensitivity analysis was performed for each year (2000–2015) of the five scenarios for each farm. Each year represented a specific economic context, with its own prices for agricultural inputs and products. For each year and each scenario, we individually varied the price of milk, beef, or “concentrated feed” (a weighted mean of several feeds) by $\pm 25\%$. After varying each price, we noted the relative change in the number of AU and calculated a local sensitivity index (LSI) (Hoffman and Gardner, 1983) for the influence of each price on net profit. According to Hamby (1994), LSI is more robust than 14 other, more complex, sensitivity indices. LSI equals $(P_{\max} - P_{\min})/P_{\max}$, where $P_{\max}$ and $P_{\min}$ equal net profit when the price of the product is set at its maximum ($+25\%$) and minimum (-25%) value, respectively. For each scenario for each farm, the relative change in the number of AU and the LSI for each price were averaged over the 16 simulated years into a mean percentage change and a mean sensitivity index (MSI), respectively.

2.4.2. Metamodel construction

To assess sensitivity of net profit to interactions among the prices, we constructed metamodels from results of the full Orfee model and calculated price-profit elasticities. From the input parameters (prices) and output (net profits) of this experimental design (Tables S1 and S2, Supplementary Material), a metamodel of each scenario for each farm simulated in Orfee was constructed using multivariate regression in R software (R Core Team, 2018).

2.4.3. General metamodel

$$\begin{aligned} \text{Op} = & \gamma_0 + \gamma_{1x} \text{MilkPrice} + \gamma_{2x} \text{BeefPrice} + \gamma_{3x} \text{FeedPrice} \\ & + \gamma_{12x} (\text{MilkPrice} \times \text{BeefPrice}) + \gamma_{13x} (\text{MilkPrice} \times \text{FeedPrice}) \\ & + \gamma_{23x} (\text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) \\ & + \gamma_{123x} (\text{MilkPrice} \times \text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

where Op equals net profit; MilkPrice, BeefPrice and FeedPrice equal the price of milk, beef, and “concentrated feed”, respectively; γ_0 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_{12} , γ_{13} , γ_{23} , and γ_{123} are coefficients determined from the regression for each scenario of each farm, and ε_i represents the errors.

This metamodel considers interactions among prices but makes the strong assumption of a linear response to them. The change in net profit (Op) is estimated as a function of each change in price via partial derivatives, thus yielding an analytical form of elasticity between each price (milk, beef, and “concentrated feed”) and net profit. The price-profit elasticities for each scenario of each farm represent the level of increase or decrease in profit due to the increase in the price of milk, beef, or “concentrated feed” by 1 unit.

2.4.4. Example of estimating the elasticity of net profit to milk price

$$\begin{aligned} \partial(\text{Op})/\partial(\text{MilkPrice}) = & \gamma_1 + \gamma_{12x} (\text{BeefPrice}) + \gamma_{13x} (\text{FeedPrice}) \\ & + \gamma_{123x} (\text{BeefPrice} \times \text{FeedPrice}) \end{aligned} \quad (2)$$

Elasticity between each of the prices and net profit is a function of the other two prices and thus includes interactions between the prices. To estimate each metamodel, beef price, milk price and feed prices were aggregated into three proxies (used only to construct the metamodel). The feeds included in “concentrated feed” were wheat, triticale, barley, weaner feed and soybean meal, and the prices of these feeds used to calculate the weighted mean price of “concentrated feed” in the metamodels were those from the reference year (2010) (Appendix 2). For the reference year, the mean price of milk, beef and “concentrated feed” was 0.32 €/L, 2.39 €/kg and 223.03 €/t, respectively.

3. Results

3.1. Reference values of technical data

Orfee calculated baseline values of technical data for each scenario for each farm (Table 2) based on the 2000–2015 baseline prices. The



Fig. 2. Number of animal units (AU) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25). Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

number of AU predicted was smallest when composed of only dairy cattle, due to their greater nutritional requirements and their under-use of some remote pastures that were too far from the milking parlor. The number of AU predicted was largest in certain mixed systems because pasture was used more (beef cows could access remote pastures) and the greater profitability of dairy production encouraged an increase in milk production per ha by buying more concentrated feed. Logically, income from milk sales increased as the percentage of dairy cattle in total AU increased, as did that from beef sales as the percentage of beef cattle increased. For Farm_1, which had less productive grasslands and no cash crops, the amount of concentrated feed consumed per AU increased as the percentage of dairy cattle increased. Net profit was lowest for specialized beef systems and highest for mixed cattle systems, which could use more of the farm's grass (Table 2).

3.2. Farm potential to adapt stocking rate in the face of price variations

Optimizing net profit resulted in a positive correlation between milk or beef price and number of AU, and a negative correlation between “concentrated feed” price and number of AU (Fig. 2). In particular, when the price of “concentrated feed” decreased, farms increased the number of AU and purchased more feed to increase production. These changes were not linear, however: for example, a 25% decrease in “concentrated feed” price increased the number of AU in all scenarios of both farms except 0D of Farm_1. Also, a 25% increase in “concentrated feed” price decreased the number of AU in all scenarios of both farms except 25D and 0D of Farm_2. Since Farm_2 had more grassland area and beef production is less profitable than dairy production, its number of AU in scenario 0D increased more than in the other scenarios when



Fig. 3. Mean net profit (€) for the five scenarios of the two farms as a function of a change in price of beef, milk, or “concentrated feed” (a mean of several feeds) by $\pm 25\%$ (from a factor of 0.75 to 1.25). Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

the price of beef increased or that of “concentrated feed” decreased. Generally, asymmetries in the number of AU as prices increased or decreased reflected differences in the amount of grass available on the farm and in profitability. Since beef cattle can graze more of a farm’s grass, farms in scenario 0D maximized income from beef by maximizing the number of AU.

3.3. Sensitivity of net profit to price variations

3.3.1. Profit response to individual and interacting price variations

The magnitudes of variations in net profit were nearly proportional to those in individual prices (Fig. 3). Creating the metamodels as linear functions of variations in beef, milk, and feed prices was thus justified, although the linearity of interactions between prices was not tested. Regressions confirmed that interactions between the three prices (milk,

beef, and “concentrated feed”) had significant effects on net profit (i.e., the F-statistic always exceeded the critical value) (Tables S3 and S4, Supplementary Material). For the three prices considered, the mean values of interactions (the elasticity related to coefficient γ_{123} (when $\gamma_1 = \gamma_{12} = \gamma_{13} = 0$)) for the two farms were 0.542, 0.537, 0.664, 0.628, and 0.001 in scenarios 100D, 75D, 50D, 25D, and 0D, respectively, indicating that mixed systems had the largest interactions between prices.

3.3.2. Sensitivity of net profit to price variations

Based on slopes of the change in net profit as a function of each price in the local sensitivity analysis (Fig. 2), as expected, i) farms with a greater percentage of beef cows were more sensitive to beef price, ii) farms with a greater percentage of dairy cows were more sensitive to milk price, and iii) farms using less concentrate feed, such as 0D, were

Table 3

Mean local sensitivity indices and global sensitivity indices (elasticities) calculated for the five scenarios of the two farms over 16 simulated years. Bold values are maximum absolute values among scenarios for a given change in price. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd.

Farm	Sensitivity index	Price varied	100D	75D	50D	25D	0D
Farm_1	Local	Beef	0.77	0.85	0.99	1.16	1.58
		Milk	1.47	1.36	1.25	1.08	0.00
		Feed	-2.69	-1.61	-1.12	-1.31	-0.94
	Global	Beef	1.54	2.11	2.89	4.12	8.20
		Milk	9.92	7.59	5.47	3.21	0.00
		Feed	-2.29	-2.05	-1.91	-1.68	-1.56
Farm_2	Local	Beef	0.31	0.44	0.56	0.71	0.90
		Milk	1.03	0.89	0.73	0.48	0.00
		Feed	-0.44	-0.40	-0.40	-0.30	-0.21
	Global	Beef	0.89	1.19	1.53	2.04	2.89
		Milk	4.09	3.09	2.16	1.21	0.00
		Feed	-0.67	-0.63	-0.61	-0.51	-0.52

less sensitive to “concentrate feed” price.

According to the elasticities, Farm_2, which had higher profit, was generally less sensitive to price variations than Farm_1 (Table 3). In agreement with the local sensitivity analysis, elasticities were positive for beef and milk prices and negative for “concentrated feed” prices. Thus, net profit increased when milk and beef price increased and decreased when “concentrated feed” price increased, all else being equal.

Sensitivity indices of Farm_1 were larger in absolute value than those of Farm_2, mainly due to much lower net profits of Farm_1 (Table 2). In absolute value, the largest sensitivity indices for net profit occurred in scenario 100D when milk or “concentrated feed” price varied and in scenario 0D when beef price varied. Overall, indices had intermediate values for mixed systems, hence the lower sensitivity of mixed systems to price variations than specialized systems. Milk prices influenced net profit more than the other prices as long as milk income contributed more to net profit than beef income or feed expenses.

In response to variation in the three prices, net profit of mixed systems (especially 25D) varied less than that of specialized systems (Fig. 4). One could expect a specialized dairy system to have more stable profit than a specialized beef system since the former sells both beef and milk. Orfee predicted the opposite, however, because net profit was more sensitive to milk price than beef price. Consequently, Scenario 25D had the lowest variability in net profit because it had relatively less dairy production. This pattern corresponds to the mixed systems, which had intermediate elasticities for the three prices (Table 3).

Median net profits of the five scenarios for each farm described a concave-down curve that peaked in scenario 50D (Fig. 4). Although scenario 100D was more profitable than 0D, adding a beef herd to the dairy herd used more grass on the farm, which increased mean net profit.

4. Discussion

4.1. Local and global sensitivity indices

The local sensitivity analysis served as an initial analysis of the sensitivity of farm structure and net profit to independent variations in price using the full Orfee model. The local sensitivity analysis thus assessed the potential of systems to adapt the number of AU by examining precise points in the solution space. In contrast, the global sensitivity analysis used metamodels, which made strong assumptions about the functional form of responses, but which assessed interactions between prices. The MSI's inability to consider these interactions, as well as differences in how the two indices were calculated (MSI being a normalized difference, elasticity being a partial derivative), explain their differences in value. The strong correlation between the MSIs and elasticities confirm the reliability of the overall analysis. While ignoring correlations between prices in the local sensitivity analysis may appear overly simplistic, it did broaden the analysis beyond restricted or pre-conceived conceptual limits.

4.2. Influence of case-study farm characteristics on results

As models of viable farms, the case-study farms had certain baseline characteristics (e.g., 50–57% of AU as dairy cattle) that may have rendered their metamodels less representative in certain scenarios (e.g., 0% dairy cattle, Tables S5 and S6). For example, Farm_2's large increase in the number of AU in scenario 0D when beef price decreased or “concentrated feed” price increased may have influenced the corresponding metamodel to operate at the edge of its range of validity. Thus, while the set of metamodels used provided a general overview of a wide range of mixed cattle systems, their predictions for specialized systems should be taken with greater caution.

4.3. Potential of farms to adapt to price fluctuations

The simulations reveal that modifying the number of AU allows farms to adapt to price variations to increase income or decrease costs. This agrees with results of previous studies that show a decrease in production when economic conditions become unfavorable (Veyss  et al., 2002; Mosnier et al., 2010). Mixed systems, however, do not necessarily modify their systems more than specialized systems in response to economic conditions. Compared to real mixed systems, those simulated in the study had less flexibility because the experimental design required them to keep the percentages of dairy and beef cattle fixed, while the interest of mixed systems lies in increasing milk or beef production according to the economic conditions. Thus, model results represent conservative predictions. Decreasing concentrated feed prices increased net profit in all scenarios but did so the most for systems with a dairy herd equal to or larger than a beef herd, since the dairy herd required more concentrated feed. Farmers can make adaptations that

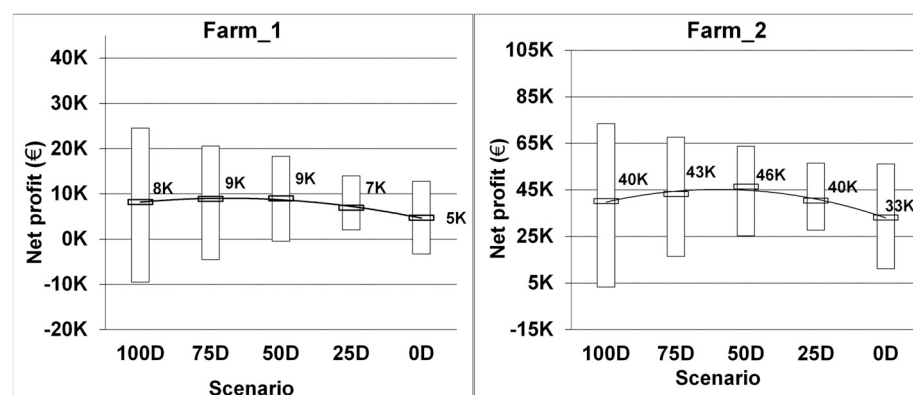


Fig. 4. Boxplots of net profit from 27 simulations in scenarios of Farm_1 and Farm_2 in which prices of milk, beef, and “concentrated feed” varied simultaneously among three levels. Scenarios: 100D = dairy cattle herd, 75D = 75% dairy cattle, 50D = 50% dairy cattle, 25D = 25% dairy cattle, 0D = beef cattle herd and K = kilo (10^3).

are more substantial than simply adjusting the number of AU: modifying production cycles, especially of beef cattle (Mosnier et al., 2010), by diversifying varieties of marketable animals in the beef herd, lengthening production cycles, and adding fattening of beef steers (Lambert, 1989). These additional adaptations represent potential sources of flexibility in the face of price fluctuations. Sustainable adaptations of livestock systems over time may become difficult, however, due to the continual changes in prices of agricultural products and inputs. In addition, large decreases in production cannot decrease fixed costs of farm structure (Veyssset et al., 2002), and infrastructure cannot always be increased to increase the number of AU. It is thus necessary to design and manage systems by choosing the most stable practices and strategies over the long term (Lev and Campbell, 1987).

4.4. Cost effectiveness of mixed cattle systems to reduce variability in net profit

Net profit of cattle systems with a larger dairy or beef herd was more sensitive to milk or beef price, respectively. In contrast, the sensitivity of net profit to “concentrated feed” price depended on whether the system was limited by the amount of grass available. Variations in “concentrated feed” price influenced most the farms with the lowest feed autonomy (i.e. percentage of the feed and fodder consumed that is produced on the farm). Increased feed autonomy, via grass availability, is thus a factor that can decrease variability in net profit by decreasing the dependence of farms on purchased feeds, as examined in previous studies (e.g. Aubron et al. (2010)). We show that mixed systems had less variable net profit than specialized systems, especially than the specialized dairy system; however, net profit of the 50D scenario was not the least variable. Diversifying a farm with a riskier type of production may increase variability in net profit. Since mixed systems also provided the highest mean net profit, they appeared to be a cost-effective strategy to increase profit. This increase in mean profit, however, depends greatly on the potential complementarity considered and the profitability of each herd. Orfee did reflect that dairy cows cannot graze some of the grasslands. Managing the two herds maximized use of the grass available on the farm. Modifying the grassland area would have changed the economic optimum. It is not surprising that scenario 50D had the highest mean profit since it corresponded to the initial situation of the representative model farms simulated. Modifying the type of equipment, such as adding a mobile milking parlor, could also decrease incentives to manage a beef herd. Note that beef cows can complement dairy cows in the use of grasslands, but the opposite is not really true. More generally, the greater the difference in profitability between the two types of cows, the greater is the cost of diversification.

Combining both dairy and beef herds appears to be a cost-effective risk management strategy. According to their level of risk aversion, farmers would value more the strategies that maximize average profit or that minimize variability in profit. Both strategies were associated with mixed systems but with different percentages of dairy cows in the systems. Some limits of these findings must be highlighted. It is unlikely that having only a small number of dairy cattle on a farm could be profitable, since dairy production requires relatively large investments and specific management practices. Managing two herds with different needs requires more work and technical ability than managing a single herd of the same size, due to the larger number of tasks to perform and the need to master a wider technical field. Nonetheless, managing dairy and beef herds simultaneously requires fewer additional skills than other diversification options such as product processing, other types of livestock, or tourism.

5. Conclusion

This study assessed whether and to what degree simultaneous management of dairy and beef herds was a good strategy for managing economic risks. To estimate the degree by which the number of AU was

adjusted and its subsequent influence on the stability of profit in the farms analyzed, parallel local and global sensitivity analyses helped understand potential structural adaptations of farms to changes in individual prices and the sensitivity of net profit to interacting variations in prices, respectively. Results indicated that mixed cattle systems, by modifying the number of AU as a function of resource availability, farm structure, and product and input prices, favor economic viability. Mixed cattle systems have high capacity to adjust the number of AU as a function of the potential profit of agricultural products and the availability of feed and forage resources on the farm. Thus, despite price fluctuations, mixed systems can generate higher and more stable net profits mainly by diversifying their animal production, but also by decreasing input purchases. Compared to specialized systems, mixed cattle systems usually seemed an effective strategy to manage economic risk, with good compromise between expected profits and variation in profits. However, it is essential to plan adjustment of herd sizes over time and, in particular, compare the amount of work required by simultaneous management of two herds to the amount and variability of net profit that it generates.

Acknowledgements

This research was supported by Auvergne Region and the French Ministry of Agriculture, Agrifood and Forestry through the Herbivores Mixed Research Unit (National Institute for Agricultural Research and VetAgro-Sup).

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.01.012>.

References

- Abson, D.J., Fraser, E.D., Benton, T.G., 2013. Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agric. Food. Secur.* 2 (1), 2.
- AGRESTE, 2011. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/>, Accessed date: 22 January 2019.
- Andrieu, N., Josin, E., Duru, M., 2007. Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120 (2–4), 359–369.
- Aubron, C., Lurette, A., Moulin, C.H., 2010. Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier. *Rencontre Recherche Ruminants* 17, 249–252.
- Baumont, R., Jouven, M., Deux, N., Farruggia, A., 2008. A how can farms with beef cattle systems based on permanent pasture cope with extreme climatic years? Results of a study using the whole-farm simulator SEBIEN. In: *Proceedings of the 8th European International Farming Systems Association Symposium*, pp. 8–10.
- Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., ... Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur. J. Agron.* 57, 43–51.
- Brunschwig, G., Josien, E., Bernhard, C., 2006. Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin laitier et allaitant. *Fourrages* 185, 83–95.
- Cariboni, J., Gatelli, D., Liska, R., Saltelli, A., 2007. The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecol. Model.* 203 (1–2), 167–182.
- Chambre d'Agriculture du Cantal, 2015). *Référentiel Cantal cas-types lait 2016 (conjoncture 2015)*.
- Charroin, T., Palazon, R., Madeline, Y., Guillaumin, A., Tchakerian, E., 2005. Le système d'information des Réseaux d'Élevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* 12, 335–338.
- Chavas, J.P., 2008. On the economics of agricultural production. *Aust. J. Agric. Resour. Econ.* 52 (4), 365–380.
- Chavas, J.P., Aliber, M., 1993. An analysis of economic efficiency in agriculture: a non-parametric approach. *J. Agric. Resour. Econ.* 1–16.
- Core Team, R., 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Hamby, D., 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environ. Monit. Assess.* 32 (2), 135–154.
- Hoffman, F.O., Gardner, R.H., 1983. Evaluation of uncertainties in environmental radiological assessment models. In: Till, J.E., Meyer, H.R. (Eds.), *Radiological Assessment: A Textbook on Environmental Dose Assessment*. 11 U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA 1.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. In: *Valeurs*

- des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Versailles, France 310p.
- INSEE, 2018. Indices des prix dans l'agriculture: IPPAP, prix de gros alimentaires (indexation de contrats). In: IPAMPA, Ancienne Base (2010), . <https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/102413565/>.
- Jacquet, F., Pluvinage, J., 1997. Climatic uncertainty and farm policy: a discrete stochastic programming model for cereal-livestock farms in Algeria. *Agric. Syst.* 53 (4), 387–407.
- Janssen, S., Van Ittersum, M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models. *Agric. Syst.* 94 (3), 622–636.
- Kim, K., Chavas, J.P., Barham, B., Foltz, J., 2012. Specialization, diversification, and productivity: a panel data analysis of rice farms in Korea. *Agric. Econ.* 43 (6), 687–700.
- Kingwell, R.S., Pannell, D.J., Robinson, S.D., 1993. Tactical responses to seasonal conditions in whole-farm planning in Western Australia. *Agric. Econ.* 8 (3), 211–226.
- Kleijnen, J.P., 1995a. Sensitivity analysis and optimization in simulation: design of experiments and case studies. In: *Simulation Conference Proceedings*. Winter. IEEE, pp. 133–140.
- Kleijnen, J.P., 1995b. Sensitivity analysis and optimization of system dynamics models: regression analysis and statistical design of experiments. *Syst. Dyn. Rev.* 11 (4), 275–288.
- Kobayashi, M., Howitt, R.E., Jarvis, L.S., Laca, E.A., 2007. Stochastic rangeland use under capital constraints. *Am. J. Agric. Econ.* 89 (3), 805–817.
- Lambert, D.K., 1989. Calf retention and production decisions over time. *West. J. Agric. Econ.* 9–19.
- Launay, F., Baumont, R., Plantureux, S., Farrie, J., Michaud, A., Pottier, E., 2011. *Prairies permanentes – des références pour valoriser leur diversité*. Ed. Institut de l'Élevage, Paris.
- Lev, L., Campbell, D.J., 1987. The temporal dimension in farming systems research: the importance of maintaining flexibility under conditions of uncertainty. *J. Rural. Stud.* 3 (2), 123–132.
- Morlon, P., Benoit, M., 1990. Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie* 10 (6), 499–508.
- Mosnier, C., Agabriel, J., Lherm, M., Reynaud, A., 2009. A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. *Agric. Syst.* 102 (1–3), 77–88.
- Mosnier, C., Agabriel, J., Veyssset, P., Bebin, D., Lherm, M., 2010. Évolution et sensibilité aux aléas des résultats technico-économiques des exploitations de bovins allaitants selon les profils de production. *INRA Prod Anim* 23 (1), 91–102.
- Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J., Gac, A., 2017. Orfee: a bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agric. Syst.* 157, 202–215.
- Olson, K., Mikesell, C.L., 1988. The range stocking decision and stochastic forage production. In: *Staff Papers 13502*. University of Minnesota, Department of Applied Economics.
- O'Neill, R., Gardner, R., Mankin, J., 1980. Analysis of parameter error in a nonlinear model. *Ecol. Model.* 8, 297–311.
- Pannell, D.J., 1997. Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples. *Agric. Econ.* 16, 139–152.
- Ridier, A., Jacquet, F., 2002. Decoupling direct payments and the dynamics of decisions under price risk in cattle farms. *J. Agric. Econ.* 53 (3), 549–565.
- Tichit, M., Puillet, L., Sabatier, R., Teillard, F., 2011. Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: functional diversity matters. *Livest. Sci.* 139 (1–2), 161–171.
- Veyssset, P., Lherm, M., Bébin, D., 2002. Conséquences de la crise bovine en 2001 sur les résultats économiques des exploitations d'élevage bovin allaitant charolais. *Renc. Rech. Rum.* 9, 177.

SUMMARY

Permanent pastures represent potential reservoirs of forage and cover more than 66% of the area of mountain zones, such as the Massif Central, where they cover nearly 80% of the agricultural area of the Auvergne region. Nonetheless, these zones have strong natural limitations that make it difficult to use herbage resources. Geographic characteristics of fields and farm organization must thus be considered in more detail in the management of forage areas to improve pasture-based livestock systems functioning. Simultaneous production of dairy and beef cattle herds (i.e. "mixed dairy-beef cattle systems") falls within the scope of agroecological approaches and may appear as factor favoring the functioning of cattle systems with greater forage autonomy and better economic and environmental performances. In addition, a high degree of forage autonomy at the farm scale seems to ensure improvement in the economic performance of farms, decreasing in particular the use of concentrated feed. Also, increased diversity of pastures vegetation seems to make them easier to exploit and increase the resistance of the forage system to climate variations.

In this thesis, we analyzed and modeled the functioning of these mixed dairy-beef cattle systems to explore compromises between livestock management and the production level of the herds, overall forage autonomy, use of the geographical diversity, level and variability of profits and sustainability of pasture use.

To address this issue, we tested three hypotheses: (I) - Mixed dairy-beef cattle systems use grazed herbage better than specialized cattle systems (dairy or beef) in zones with constraints while maintaining good economic performance. (II) - Under conditions of optimal economic functioning, mixed dairy-beef cattle systems adapt better to price variations, generating more stable and higher profits, than specialized cattle systems. (III) - Mixed dairy-beef cattle systems use biomass well, with better environmental performances, while conserving ecosystem services of the vegetation.

From these hypotheses, three study axes were developed: (1) - Ability of mixed dairy-beef cattle systems to optimize use of geographic diversity by grazing herbage in mountain livestock systems (2) - Adaptation and stability of profits of mixed dairy-beef cattle systems in the face of price variations (3) - Conservation of ecosystem services and decrease of environmental impacts of mixed dairy-beef cattle systems

The method used was based on simulation under conditions of optimal economic functioning of farms. We used the bioeconomic optimization model Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment), developed to assess livestock systems that can grow cash crops in France, based on data from two farms in a steady state (case studies BL18 and BL22 from the French livestock-network database DIAPASON). Orfee was adapted to consider geographic constraints and field heterogeneity based on the French typology of permanent prairies. We then used the model to predict the best equilibria, corresponding to optimal conditions of functioning of farms, represented by the two case studies in five scenarios (100D, 75D, 50D, 25D and 0D, where D represents the percentage of dairy cattle in the herd). Methods of exploration and analysis (experimental design, sensitivity analysis, statistical analysis, metamodeling, comparison of environmental performances, juxtaposition of pasture typologies) with the simulations yielded robust biotechnical and economic indicators for assessing mixed dairy-beef cattle systems in mountain zones.

Based on the results, mixed dairy-beef cattle systems with 25-50% dairy cattle maximize the use of grazed herbage in zones with constraints on mechanization and access of dairy cows to pastures. These systems also have a greater ability to adapt to economic variations, with better levels of animal production and more attractive and less variable economic performances than those of specialized cattle systems. These systems also have interesting environmental performances (greenhouse gas emissions, energy use and conservation of ecosystem services related to vegetative cover).

Overall, mixed dairy-beef cattle systems, especially those with 50% dairy cattle, favor higher efficiency and greater forage autonomy, while ensuring higher flexibility and better environmental performances, than specialized cattle systems.

This study also provided a simulation model (an adaptation of Orfee) that represents field heterogeneity and geographic characteristics of mountain zones when assessing performances of pasture-based livestock systems.

Keywords: simulation model, bioeconomic optimization, mixed cattle systems, field arrangement, pastures, grazing, case study, typology, dairy cattle, beef cattle, profit, adaptation, flexibility, sustainability, ecosystem services, biomass

RESUME

Les prairies permanentes constituent des réservoirs potentiels d'alimentation fourragère et occupent plus de 2/3 des surfaces dans les zones de montagne à l'instar du Massif central où elles représentent près de 80% de la surface agricole auvergnate. Toutefois ces zones présentent de fortes contraintes naturelles qui rendent difficile la valorisation des ressources en herbe. Les caractéristiques géographiques des parcelles et la structure des exploitations doivent donc être mieux prises en compte dans la gestion des surfaces fourragères pour améliorer le fonctionnement des systèmes d'élevage bovins herbagers. La conduite simultanée de troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants, s'inscrit dans une démarche relevant de l'agroécologie et qui peut apparaître comme un facteur favorable au fonctionnement des systèmes d'élevage bovins avec une plus grande autonomie fourragère et de meilleures performances économiques et environnementales. Par ailleurs, un haut niveau d'autonomie fourragère à l'échelle de l'exploitation semble être un gage d'amélioration de la performance économique des exploitations en limitant notamment l'utilisation d'aliments concentrés. D'autre part la diversité des végétations de prairies semble favoriser leur souplesse d'exploitation et la résistance du système fourrager aux aléas climatiques.

Dans cette thèse nous avons analysé et modélisé le fonctionnement de ces systèmes d'élevage mixtes avec doubles troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants pour explorer les compromis entre conduite d'élevage et niveau de production des troupeaux, autonomie fourragère globale, valorisation de la diversité géographique, niveaux et variabilité des profits et durabilité de l'utilisation des prairies.

Pour répondre à cette problématique nous avons testé trois hypothèses : (I) - La conduite simultanée de troupeaux mixtes bovins laitiers et bovins allaitants permet une meilleure valorisation de l'herbe par pâturage que les systèmes bovins spécialisés dans les zones de contraintes tout en maintenant de bonnes performances économiques. (II) - Dans des conditions optimisées de fonctionnement économiques, les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant s'adaptent mieux aux aléas de prix pour générer des profits plus stables et plus élevés, comparés aux systèmes bovins spécialisés. (III) - Les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant permettent une utilisation maîtrisée de la biomasse avec de meilleures performances environnementales tout en maintenant les services écosystémiques des végétations.

Ces hypothèses ont été déclinées en trois axes d'étude : (1) - Capacité des systèmes mixtes double troupeaux bovins laitiers et bovins allaitants à valoriser la diversité géographique, via la valorisation de l'herbe par pâturage en élevage de montagne (2) - Adaptation et stabilité des profits des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant face aux aléas de prix (3) - Conservation des services écosystémiques et limitation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant

La méthodologie employée s'est appuyée sur des simulations dans les conditions de fonctionnement économique optimales des exploitations. Nous avons utilisé le modèle d'optimisation bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) développé pour explorer les systèmes d'élevages, pouvant comporter des cultures de rente en France, associé à des données d'exploitations en régime de croisière (choix des cas-types BL18 et BL22) issues de la base de données des exploitations, baptisée DIAPASON. Le modèle a été adapté pour prendre en compte les contraintes géographiques et l'hétérogénéité des parcellaires basée sur la typologie française des prairies permanentes. Nous avons ainsi souhaité observer les meilleurs équilibres correspondants aux conditions optimales de fonctionnement des exploitations représentées par deux cas-types déclinés selon cinq scénarios (D% étant le pourcentage d'UGB bovin laitier avec la différence en UGB bovin allaitant) : scénarios 100D, 75D, 50D, 25D et 0D. Des méthodes d'exploration et analyses (Plans d'expérience, Analyse de sensibilité, Analyse statistique, métamodélisation, comparaison des performances environnementales, juxtaposition de typologies de prairie) ont permis via les simulations d'obtenir des indicateurs biotechniques et économiques robustes pour évaluer les systèmes bovins mixtes herbagers dans les zones de montagnes.

Selon les résultats obtenus, les systèmes bovins mixtes intégrant de 25 à 50% d'UGB bovin laitier, maximisent la valorisation de l'herbe par pâturage dans les zones soumises à des contraintes de mécanisation et d'accès aux vaches laitières. Ces systèmes d'exploitation présentent également les meilleures capacités d'adaptions aux aléas économiques avec de bonnes productions animales, des performances économiques intéressantes et moins variables, comparées aux systèmes bovins spécialisés. Ces systèmes présentent également d'intéressantes performances environnementales (émissions de gaz à effet de serre, efficacité énergétique et la préservation services écosystémiques liées aux couverts végétaux).

Globalement les systèmes d'élevage bovins mixtes laitier-allaitant, et plus particulièrement les systèmes équilibrés entre troupeau bovins laitiers et troupeau bovins allaitants, favorisent une meilleure efficacité et une meilleure autonomie alimentaire tout en garantissant un bon niveau de flexibilité et de bonnes performances environnementales comparés aux systèmes bovins spécialisés.

Nos travaux ont fourni par ailleurs un simulateur (Orfee adapté par nos soins) à même de prendre en compte l'hétérogénéité du parcellaire et les caractéristiques géographiques des zones de montagnes dans l'évaluation les performances des systèmes d'élevage herbagers.

Mots clés : modèle de simulation, optimisation bioéconomique, systèmes bovin mixte, parcellaire, prairie, pâturage, cas-type, typologie, bovin laitier, bovin allaitant, profit, adaptation, flexibilité, durabilité, services écosystémiques, biomasse