



THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences de la Vie, Santé, Agronomie et Environnement
SPÉCIALITÉ
Système d'élevage et agroécologie
Par Lucille STEINMETZ

Fonctionnement et évaluation des systèmes
de productions diversifiés en agriculture biologique :
des références pour la transition agro-écologique

Directeur de thèse : Bertrand DUMONT

Encadrants de thèse : Patrick VEYSSET et Marc BENOIT

Au sein de l'UMR Herbivores, Centre ARA, INRAE

Soutenue publiquement le 30 juin 2021 devant le jury composé de :

M. Laurent RIEUTORT	Professeur	UCA	Président du jury
Mme Marie-Hélène JEUFFROY	Directrice de recherches	INRAE	Rapportrice
Mme Laurence LAMOTHE	Directrice de recherches	INRAE	Rapportrice
M. Jean-Louis PEYRAUD	Directeur de recherches	INRAE	Examinateur
Mme Sylvie COURNUT	Ingénieure de recherches	VetAgroSup	Examinatrice
M. Bertrand DUMONT	Directeur de recherches	INRAE	Directeur de thèse
M. Patrick VEYSSET	Ingénieur de recherches	INRAE	Invité
M. Marc BENOIT	Ingénieur de recherches	INRAE	Invité

Cette thèse a été financée par le Centre Interdisciplinaire pour l'Agriculture Biologique de l'INRAE et par le programme CAP2025 I-site clermont.



La thèse a également bénéficié du soutien financier du projet européen MixEnable



REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mes encadrants Bertrand Dumont, Patrick Veysset et Marc Benoit pour m'avoir accompagné et soutenu au cours de cette thèse. Au-delà de l'encadrement scientifique, je vous remercie également pour votre bonne humeur, votre humour et votre humanité, merci !

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de mon jury de thèse d'avoir accepté d'évaluer mon travail : Marie-Hélène Jeuffroy, Laurence Fortun-Lamothe, Sylvie Cournut, Jean-Louis Peyraud, Laurent Rieutort et Bertrand Dumont.

Je remercie également les membres de mon comité pilotage de thèse Sylvie Cournut, Guillaume Martin et Cyrille Rigolot pour leurs apports constructifs lors de nos réunions et pour leur disponibilité tout au long de la thèse.

Merci à Guillaume Martin, en tant que leader du projet MixEnable, pour avoir coordonné et mené à bout ce projet ambitieux et complexe. J'en profite pour remercier Defne pour avoir coordonné la construction et la gestion de la base de données du projet.

J'ai réalisé ma thèse au sein de l'UMR Herbivores et plus particulièrement au sein de l'équipe Comète. Merci à tous, les titulaires et les non-titulaires, vraiment, pour votre soutien scientifique et technique, mais surtout pour votre accueil et votre bonne humeur. J'ai vraiment passé de très bons moments avec vous et j'ai surtout beaucoup ri, merci ! Une mention spéciale pour Anne et Claire, collègues du bureau, collègues de courses à pied. Merci pour votre bonne humeur, vos encouragements et votre positivisme. Anne, merci pour m'avoir aidé dans les analyses statistiques, dans le codage/programmation sous R et surtout pour ce slogan « sois forte, fière et courageuse » qui m'a fait tenir bon dans les dernières semaines. Merci également à Christophe pour m'avoir accompagné lors des enquêtes en ferme et pour m'avoir aidé à dépouiller les comptas agricoles.

Je remercie également Pascale Francisco pour son appui technique et logistique et pour sa gentillesse, ainsi que toute l'équipe administrative de l'UMRH pour sa disponibilité, une

mention spéciale à Annie, pour m'avoir accompagné au cours des nombreuses démarches administratives liées à mon statut Pep's.

Merci à Loulou et Glanglan, Sam et Clover, aux « spies » pour tous ces bons moments, pour votre soutien, pour cette amitié et ces fous-rires. Louise, merci pour tes rires de baleines, nos longues discussions et surtout tous ces moments de folies. Et merci pour ce « coucou skype » quotidien ! Merci Eglantine, d'être toi, toujours positive, toujours motivée. On aura vécu de sacrés bons moments, mais sachez que le plus beau reste à venir ! En passant, je remercie tout le répertoire de la chanson française, surtout les années 80, pour m'avoir aidé à me vider la tête sous la douche en chantant à tue-tête.

Puis il y a des personnes rencontrées au cours des trois années passées à Clermont qui ont apporté leurs grains de folie à cette épopée auvergnate : Boubou et Elo, merci pour ce trio d'enfer, pour toutes ces aventures sportives, nocturnes et musicales, pour votre soutien jusqu'au bout et pour votre amitié. Merci à Laure, Jimmy, Ale, Clément (mon acolyte alsacien, merci pour ton soutien, même à distance), Hubert, les châtelains, à Elise W. pour s'être perdue en Auvergne pour mon plus grand bonheur. Merci les colocos Félix, Kristell, Solenn, Alex, Etienne et Lucas pour votre soutien, cette petite vie de copains, les apéros du vendredi soir, le UNO et les Titres ! ☺

A mes copains d'Alsace et d'ailleurs: Clo, Toto, Manon, Ari, Loan, Antho, Emile, Mamar, Lainou, Mogui, Elise C, Camille. Merci d'être toujours là ! Grosse mention spéciale à Carole, merci pour tout !

Une pensée pour toute ma famille pour votre présence et votre soutien. Elise, merci pour ton optimisme à tout épreuve et ton soutien pour le sprint final !

Merci pour la vie à deux, d'être là, d'être toi tout simplement.

Et en dernier Louise, merci d'avoir accepté ce challenge de mettre en forme mon manuscrit de thèse. J'ai appris qu'il fallait toujours être bien entourée, avec toi je le suis. Merci pour ce gros coup de main ! Une aventure de plus partagée, une de plus après toutes ces épopées à ski, à vélo, en béquille. Merci !

Reste un dernier remerciement, à cet éleveur dont on gardera l'anonymat, qui m'a dit « votre thèse c'est du flan ! » grâce à lui est né le #mathesecestpasduflan, pour la peine en voici la recette.

La meilleure recette de la tarte au flan

Ingrédients :

- 1 pâte brisée
- 1L de lait
- 3 œufs
- 100g de sucre
- 80g de farine
- 2 cuillères à soupe de sucre roux
- 1 sachet de sucre vanillé



Portez le lait à ébullition. Dans le même temps, battez les œufs entiers avec le sucre et le sucre vanillé puis ajoutez la farine. Versez le lait en filet dans le mélange en mélangeant au fouet.

Beurrez un moule à tarte à bords hauts, et chemisez-le de la pâte brisée.

Piquez le fond avec une fourchette puis versez la préparation à flan dedans. Enfourez pour 50 minutes à 180 °C.

Quelques minutes avant la fin de la cuisson, saupoudrez de sucre roux. Sortez la tarte du four et laissez refroidir .

RÉSUMÉ

La mixité animale, c'est-à-dire l'association d'au moins deux espèces animales sur une exploitation, est annoncée comme susceptible d'améliorer sa capacité productive, tout en limitant l'utilisation d'intrants d'origine exogène. Clairement positionnés suivant les principes de l'agroécologie, ces systèmes se développent en agriculture biologique, où leurs bénéfices semblent dépendre du type de mixité (espèces associées) et des pratiques mises en œuvre. Ce travail de thèse vise à décrire et à comprendre le fonctionnement des systèmes d'élevage mixtes en agriculture biologique et de mettre en regard leur multi-performance, technique, économique, environnementale et sociale. Nous avons utilisé deux méthodes pour décrire le fonctionnement de ces systèmes : i) les réseaux écologiques qui caractérisent les interactions entre ateliers par des flux et qui ont été ici utilisés pour la première fois dans des systèmes d'élevage en zone tempérée, et ii) un jeu d'indicateurs que nous proposons pour représenter le niveau d'intégration des différentes composantes du système au travers de leurs interactions biotechniques, mais aussi de l'organisation du travail et des circuits de commercialisation. Ces deux méthodes sont mises en œuvre dans 17 exploitations associant des bovins allaitants à des ovins, des porcs ou des volailles, en Auvergne et en Occitanie. Nous mobilisons ensuite un réseau plus large de 96 exploitations mixtes d'élevage, couvrant une large gamme d'associations dans six pays européens, pour étudier l'efficacité productive de ces systèmes, à trois niveaux : (i) utilisation d'intrants, (ii) utilisation d'aliments concentrés, (iii) compétition entre l'alimentation animale et l'alimentation humaine. Nous montrons que le fonctionnement et les performances d'un système d'élevage mixte sont non seulement dépendants du type d'espèces animales, mais aussi de leur proportion respective, ainsi que de l'orientation générale du système herbager ou en polyculture-élevage. L'organisation du travail et des circuits de commercialisation sont étroitement liées. L'efficacité productive de ces systèmes est d'abord limitée par la consommation d'aliments concentrés mais aussi par le niveau d'interactions biotechniques entre ateliers. Le facteur humain est un autre déterminant de l'efficacité au travers de la composition et de la polyvalence du collectif de travail. Sur un plan méthodologique, nous proposons d'utiliser des indicateurs d'efficacité relative aux ateliers de production animale, afin de mettre en évidence des déterminants de l'efficacité des systèmes mixtes qui soient liés à leur fonctionnement et non aux différences de productivité entre ateliers. Enfin, nos résultats soulignent l'antagonisme qui peut apparaître entre l'intégration culture-élevage et la compétition entre alimentation animale et humaine, dès lors que les animaux sont alimentés avec un excès de céréales produites sur l'exploitation aux dépens d'une bonne valorisation de l'herbe. Ceci questionne les stratégies d'alimentation des animaux d'élevage qui soient compatibles avec des systèmes alimentaires durables.

Mots-clés : mixité, élevage, ruminants, monogastriques, organisation du travail, circuits de commercialisation, interactions, agroécologie.

SUMMARY

Mixed livestock farming systems, i.e. where two or more animal species are kept on the same farm simultaneously, could potentially enhance system productivity, while limiting the use of external inputs. In line with the agroecological principles, these farming systems are being developed in organic farming, where benefits come from both species combination and implemented practices. This work aims at describing and understanding farm operation of multi-species livestock systems in organic farming as well as analyzing their multi-performance, i.e., technical, economic, environmental and social performance. Two methodologies have been used to describe the farm operation: i) ecological network analysis that characterizes interactions between farm components through fluxes. This method has been applied here for the first time on temperate livestock farms; and (ii) a set of indicators that we proposed to represent the integration level of the different components of the system through agronomic interaction, but also through work organization and sales management. These two methods were implemented on 17 farms, each associating beef cattle with either sheep, pig or poultry in two different regions: Auvergne and Occitanie. Then we used a larger farm network of 96 mixed organic farming systems from six European countries that covered a broader diversity in terms of animal combination in order to study farm productive efficiency at three different levels: (i) use of inputs, (ii) use of concentrates, (iii) animal feed vs. human food competition. Farm operation and performance of multi-species livestock systems depend not only on the animal species that are being combined, but also on species ratio, as well as on the farming system i.e. grassland-based or integrated crop-livestock. Work organization and sales management were shown to be closely related. Systems productive efficiency is primarily limited by animal concentrate consumption but also by the level of interaction between agricultural productions. Systems efficiency is also related to human related factors explained by the composition and versatility of the working collective. On the methodology side, we suggest to use relative efficiency indicators linked solely to the type of animal production in order to highlight factors of efficient mixed systems resulting from their operation and not from differences in productivity between productions. Finally, results show antagonism that can arise between crop-livestock integration and competition between animal feed and human food, when animals are fed with an excess of cereal produced on-farm at the expense of a good management of pastures. This raises questions about feeding strategies for livestock that are compatible with sustainable food systems.

Keywords: mixed farming system, livestock, ruminants, monogastric, work organization, distribution channel, interactions, agroecology.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	17
Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier !.....	18
Les questions de recherche.....	20
Structuration du manuscrit de thèse.....	21
CHAPITRE 1 : POTENTIAL OF MULTI-SPECIES LIVESTOCK FARMING TO IMPROVE THE SUSTAINABILITY OF LIVESTOCK FARM.....	31
1. Introduction	33
2. Potential benefits and limitations of multi-species livestock farming for livestock farm sustainability.....	33
2.1. Environmental sustainability	34
2.1.1. Ressource use efficiency.....	34
2.1.2. Climate change mitigation and biodiversity conservation	34
2.2. Technical and economic sustainability.....	36
2.2.1. Productivity.....	36
2.2.2. Profitability	36
2.3. Social sustainability	37
2.3.1. Animal health and welfare	37
2.3.2. Farmer welfare	38
3. Research areas for multi-species livestock farming.....	38
3.1. Better characterize the management of multi-species livestock farms.....	38
3.2. Further explore the complementarity of livestock species in multi-species settings	39
3.3. Assess and better explain the sustainability of multi-species livestock farms.....	40
3.4. Characterize conditions for success of and obstacles for multi-species livestock farming	
XErrreur ! Signet non défini.	
4. Conclusions and perspectives	40
CHAPITRE 2 : ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS TO LINK INTERACTIONS BETWEEN SYSTEM COMPONENTS AND PERFORMANCES IN MULTISPECIES LIVESTOCK FARMS	44
1. Introduction	46
2. Materials and methods	48
2.1. Farm sample and sampling scheme.....	48
2.2. Data collection	49
2.3. Farm operating analysis integrating the ecological network analysis	51
2.4. Matrix construction and selected ENA indicators.....	54
2.5. Farm structural indicators.....	56
2.6. Farm performance indicators.....	57
2.7. Analysis of the indicators	59
3. Results and discussion	59

3.1.	Farm structure similar to that of French livestock farms.....	59
3.2.	ENA charts the diversity of farm operations	60
3.3.	A typology highlighting five contrasting farming systems.....	61
3.4.	No link between performances and farm typology	63
3.4.1.	Nitrogen efficiency	63
3.4.2.	Economic efficiency	66
3.4.3.	Feed-food competition	66
3.4.4.	Human wellbeing.....	67
4.	Conclusions and perspectives	69
CHAPITRE 3: A NEW ANALYTICAL FRAMEWORK TO ASSESS ON-FARM INTEGRATION IN DIVERSIFIED AGRICULTURAL SYSTEMS.....		77
1.	Introduction	79
2.	Assessing on-farm integration based on farming practices.....	81
3.	Assessing on-farm integration based on work organization.....	87
4.	Assessing on-farm integration based on sales management.....	91
5.	Application of the framework to a case-study	94
5.1.	A network of ten organic multispecies livestock farms	94
5.2.	Data collection and processing	95
5.3.	Results.....	95
6.	Discussion	99
6.1.	Work, sales and farming practices: three key dimensions to describe integration in diversified farms.....	99
6.2.	A multidimensional approach that brings new perspectives for farm typologies	101
6.3.	Research perspectives	102
CHAPITRE 4: SURVEY DATA ON EUROPEAN ORGANIC MULTI-SPECIES LIVESTOCK FARMS		108
1.	Background and summary	110
2.	Methods.....	112
2.1.	Geographic coverage and sampling strategy	112
2.2.	Questionnaire.....	113
2.3.	Data processing and indicator calculation	115
2.4.	Data records.....	115
2.5.	Technical validation	116
2.6.	Usage notes.....	119
CHAPITRE 5: L'UTILISATION DES CONCENTRÉS AU CŒUR DE L'EFFICIENCE PRODUCTIVE DES SYSTÈMES MIXTES D'ÉLEVAGE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE		124
1.	Introduction	127
2.	Matériels et méthodes	128
2.1.	L'échantillon.....	128
2.2.	Les variables	131

2.2.1.	Les variables d'efficience.....	131
2.2.2.	L'efficience relative aux ateliers de production animale	133
2.2.3.	Les variables explicatives.....	135
2.3.	Analyse des données	141
2.3.1.	Test non paramétriques	141
2.3.2.	Régression PLS	141
2.4.	Identification des déterminants.....	142
2.5.	Identification des déterminants.....	144
3.	Résultats	144
3.1.	A l'échelle de la ferme	144
3.2.	Échelle des ateliers animaux.....	145
3.3.	Échelle des productions animales de la ferme	147
3.3.1.	Analyse des modèles.....	147
3.3.2.	Identification des déterminants de l'efficience.....	148
4.	Discussion	152
4.1.	L'aliment concentré, élément central de l'efficience productive du système.....	153
4.2.	Le facteur humain, entre organisation du travail et choix stratégiques	156
4.3.	Méthodologie d'étude des systèmes diversifiés.....	158
5.	Conclusion.....	160
	Annexes	167
	CHAPITRE 6: DISCUSSION GÉNÉRALE.....	187
1.	Décrire et caractériser le fonctionnement des systèmes d'élevage mixte.....	188
1.1.	Deux méthodes complémentaires	188
1.1.1.	Généricité vs précision.....	189
1.1.2.	Méthode de classification.....	190
1.2.	Interprétation des résultats.....	193
1.3.	Pour aller plus loin	195
1.3.1.	Analyser le fonctionnement des 102 fermes européennes	195
1.3.2.	Développer l'approche par les flux.....	196
2.	Caractériser l'efficience et la multi-performances des systèmes d'élevage mixtes en général.....	196
2.1.	Deux approches différentes	196
2.2.	Interprétation des résultats.....	198
2.3.	Pour aller plus loin	200
2.3.1.	Choix et calcul des indicateurs d'efficience	200
2.3.2.	Approche système d'exploitation ou système d'élevage	201
3.	La notion d'intégration des différentes composantes d'un système d'élevage mixte.....	201
3.1.	Faut-il une intégration biotechnique à tout prix ?	202
3.2.	Approche holistique sur trois dimensions	203
3.3.	Approcher un système diversifié de façon holistique : un nécessaire compromis	203
4.	Perspectives pour étude des systèmes diversifiés	204
4.1.	Le projet MixEnable : des moyens insuffisants vis-à-vis objectifs affichés.....	204
4.2.	Comment aborder de manière pertinente les systèmes complexes	205
4.3.	Recommandations scientifiques.....	206
4.4.	Recommandations quant à l'échantillonnage de fermes et la mise en œuvre d'enquêtes	207

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : POTENTIAL OF MULTI-SPECIES LIVESTOCK FARMING TO IMPROVE THE SUSTAINABILITY OF LIVESTOCK FARM 31

Figure 1 : Examples of multi-species farming	33
Table 1 : Summary of benefits and absence of effects on farm sustainability for reviewed multi-species livestock systems and related knowledge gaps	35
Figure 2 : Suggested perspectives to better characterize the management of multi-species livestock farm	38
Figure 3 : Competition, complementarity and facilitation between two components of agrobiodiversity	39

CHAPITRE 2 : ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS TO LINK INTERACTIONS BETWEEN SYSTEM COMPONENTS AND PERFORMANCES IN MULTISPECIES LIVESTOCK FARMS44

Figure 1 : Our farm surveys were conducted on three types of multispecies livestock farms.....	47
Table 1 : Farm operating and structural indicators calculated for the seventeen studied farms.....	50
Figure 2 : Flow diagram and flow matrix	55
Table 2 : Principal nitrogen coefficients used in the analysis.....	56
Figure 3 : Principal component analysis of the 17 studied farms according to operation and structure indicators followed by a hierarchical clustering of principal components analysis.....	64
Figure 4 : Network illustration for the paragon of each cluster.....	65
Figure 5 : Boxplots for eight performance indicators.....	68
Table 3 : Farm performance indicators presented by cluster for the seventeen studied farms.....	69

CHAPITRE 3 : A NEW ANALYTICAL FRAMEWORK TO ASSESS ON-FARM INTEGRATION IN DIVERSIFIED AGRICULTURAL SYSTEM..... 77

Figure 1 : Schematic illustration of the level of integration assessed within each dimension.....	84
--	----

Figure 2: Presentation of the structure of crop-livestock integration indicators.....	85
Table 1: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on farming practices	86
Table 2: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on work organizations	90
Table 3: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on sales management.....	93
Table 4: Key features for the ten multispecies farms from the case analysis.....	94
Figure 3: Visualizing integration indicator values for the ten farms studied with the `ComplexHeatmap` package (Gu et al., 2016).....	98

CHAPITRE 4 : SURVEY DATA ON EUROPEAN ORGANIC MULTI-SPECIES

LIVESTOCK FARMS.....108

Table 1: Livestock combinations surveyed per country.....	112
Figure 1: Graphs used for data validation: a) Animal protein sold according to the number of LU at farm level.....	118

CHAPITRE 5 : L'UTILISATION DES CONCENTRES AU CŒUR DE L'EFFICIENCE DES SYSTEMES MIXTES D'ELEVAGE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE..... 124

Tableau 1 : présentation des caractéristiques structurelles de l'échantillon global.....	130
Figure 1 : Schématisation du calcul des trois indicateurs d'efficacité à l'échelle de l'atelier de production animale.....	132
Figure 2 : Distribution du niveau de production animale exprimé en kg N par UGB pour les six ateliers de production animale présents dans l'échantillon.....	133
Figure 3 : Représentation schématique des trois étapes pour construire un indicateur relatif aux productions animales de la ferme.....	134
Tableau 2 : Variables retenues pour identifier les déterminants de l'efficacité productive des fermes mixtes d'élevage en agriculture biologique.....	137
Figure 4 : Les différentes étapes de la mise en place de la régression PLS.....	143
Figure 5 : Distribution de l'efficacité d'utilisation des intrants à l'échelle des fermes suivant la présence (=1) ou l'absence (=0) de produits végétaux dans la production vendue de la ferme.....	145
Tableau 3 : Performances moyennes des six ateliers animaux recensés dans l'échantillon des 96 fermes d'élevage mixte.	146
Tableau 4 : R ² des modèles PLS analysés au cours de l'étude.....	148
Tableau 5 : Variables explicatives importantes dans les modèles de l'efficacité relative transformée et leur regroupement au sein de déterminants.....	149

Tableau 6 : déterminants de l'efficacité utilisation des concentrés relative transformée pour l'échantillon global..... 152

Annexes..... 167

Tableau S1 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEP) dans fourrages intra-consommées..... 168

Tableau S2 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEP) dans les produits de la ferme..... 169

Tableau S3 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEP) dans l'intrants achetés. 174

Tableau S4 : Indicateurs de performance des modèles. 183

Tableau S5 : Coefficients de régression des variables X sur EUC transformée.....185

Tableau S6 : Coefficients de régression des variables X sur ENA transformée..... 187

Chapitre 6 : Discussion générale.....188

Tableau 1 : Répartition des 17 fermes suivant les variables prises en compte dans classifications. PCPE : polyculture-polyélevage.....192

Figure 1 : Arbres de classification pour les deux approches mobilisées. 193

Tableau 2 : Récapitulatif des performances mobilisés dans les articles 2 et 5.198

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier !

Alors que les exploitations agricoles se sont spécialisées au cours des dernières décennies, un certain nombre d'entre elles ont résisté à cette tendance ou font aujourd'hui le choix de se diversifier. Sous la dénomination « exploitations agricoles diversifiées » on trouve une grande diversité de systèmes de production. La diversification apparaît dès les composantes du système et peut concerner à la fois les ressources, parmi lesquelles les prairies fauchées ou pâturées (Michaud et al. 2012; Galliot et al. 2019), les cultures (Lin 2011; Hofmeijer et al. 2021; Kurdyś-Kujawska et al. 2021), les surfaces en agroforesterie (Murgueitio et al. 2011; García de Jalón et al. 2018), mais aussi les troupeaux caractérisés par leur diversité d'espèces, de races et d'orientations productives et leur variabilité inter-individuelle (Ollion et al. 2016; Magne et al. 2019), et les produits (Vollet and Said 2018; Valenti et al. 2018; Alvarez et al. 2018). Au-delà de leurs activités agricoles, les exploitations se diversifient en développant des nouvelles activités (transformation des produits, ...) voir des activités de services valorisant les ressources de la ferme (agritourisme, location de parcelles ou de bâtiments, travail à façon, ...) (Ilbery 1991; Nihous 2008; Hansson et al. 2008; López-i-Gelats et al. 2011). Depuis le début des années 2000, l'agriculture biologique (AB) se développe fortement en France avec un taux de croissance annuel du marché alimentaire biologique (en valeur) et du nombre d'exploitations agricoles certifiées en AB de plus de 10% (Agence Bio 2020). Toutefois, la majorité des fermes d'élevage en AB sont spécialisées et le niveau d'intégration des ateliers au sein des fermes diversifiées peut rester faible, limitant l'intérêt potentiel des associations présentes. D'après le dernier recensement agricole de 2010, les exploitations françaises en AB sont plus diversifiées que leurs homologues en agriculture conventionnelle (RA, 2010). Ce résultat a été confirmé par une récente méta-analyse qui conclue que les rotations sont plus longues et plus diversifiées dans les systèmes en AB qu'en conventionnel (Barbieri et al. 2017). L'AB se caractérise par un fort lien au sol des productions avec une interdiction d'utiliser des intrants de synthèse (pesticides et engrais) et issus d'OGM, d'après le Règlement Européen No 834/2007 (EU 2007). Par conséquent, les exploitants en AB ne peuvent pas s'appuyer sur ce levier pour assurer ou sauver une production agricole¹, et doivent donc développer d'autres stratégies pour pérenniser et viabiliser leur système de production sans avoir recours à ces intrants. La diversification représente alors l'une de ces stratégies, dont on a pu montrer qu'elle contribuait

¹ En production animale, il est possible d'avoir recours des traitements allopathiques sur prescription vétérinaire sous certaines conditions. Les vaccinations et les traitements antiparasitaires ne sont pas limités en nombre. (Règlement (CE) N° 889/2008)

à la résilience des systèmes agricoles, y compris les systèmes d'élevage (Reidsma and Ewert 2008; Dumont et al. 2020b).

Dans un système diversifié d'un point de vue fonctionnel, c'est-à-dire incluant intentionnellement une diversité de cultures, de prairies et d'animaux d'élevage (Kremen et al. 2012), une part de la performance du système et de sa résilience repose sur cette diversité. L'hypothèse de redondance fonctionnelle postule que les effets de la disparition d'une des composantes du système seraient compensés par « le relais pris » par une autre composante. Une autre hypothèse clé est « l'effet portefeuille » qui suppose que les systèmes diversifiés sont composés d'espèces aux traits et aux capacités adaptatives complémentaires, et qu'ils comportent donc des espèces adaptées à chaque type de perturbation et restent ainsi productifs (Figge 2004). Au-delà des composantes qui constituent les exploitations agricoles diversifiées, la mise en relation des différents ateliers de production dans le temps et dans l'espace, permettrait de bénéficier de synergies et de tirer avantages des services écosystémiques limitant le recours aux intrants pétrochimiques (Hendrickson et al. 2008). Ces systèmes de production agricole sont alors considérés comme vertueux d'un point de vue productif et environnemental et sont particulièrement prisés et encouragés dans le cadre de l'agroécologie et de l'AB (Kremen et al. 2012; Ponisio et al. 2015; Dumont et al. 2020b). En économie, le concept d'économies de gamme stipule que l'utilisation partagée de facteurs de production entre ateliers peut être source de gain économique du fait de la réduction du coût de production de chacun des produits (Panzar and Willig 1981; de Roest et al. 2018).

Les systèmes d'élevage mixtes, c'est-à-dire élevant au moins deux espèces animales simultanément sur l'exploitation associées ou non à des cultures, sont peu étudiés dans la littérature scientifique. La plupart des études réalisées ne se situe pas à l'échelle de la globalité du système sur au moins un cycle de production, mais concerne des pas de temps limités (par exemple la saison de pâturage) et se focalisent sur les composantes du système, parcelles ou lots d'animaux (Dumont et al. 2020b). Pourtant, d'après ces études, la mixité animale pourrait permettre d'augmenter la productivité animale ou l'efficacité d'utilisation des ressources (Fraser et al. 2014; d'Alexis et al. 2014). Des processus spécifiques entre en jeu dans les systèmes herbagers, comme par exemple le pâturage mixte qui « dilue » la charge parasitaire des animaux en raison de la spécificité de la plupart des strongles digestifs à leur hôte (Marley et al. 2006; Mahieu 2013; Forteau et al. 2020). La mixité d'espèces peut également avoir des conséquences néfastes, telles que des contaminations virales entre espèces (Rogdo et al. 2012;

Almeida et al. 2018). Ces résultats globalement prometteurs à l'échelle infra-système méritent d'être validés à l'échelle du système, afin d'identifier les conditions de mises en œuvre et de réussite de ses systèmes d'élevage mixtes. La diversification des productions animales sur une exploitation peut aussi induire une complexité de gestion du système, si bien qu'une mauvaise gestion de la mixité pourrait à la fois pénaliser ses performances et la fourniture de services écosystémiques (Animut and Goetsch 2008; Biggs et al. 2012). L'ensemble des conséquences positives ou négatives qui résultent du fait d'élever simultanément plusieurs espèces animales dans une même exploitation doit donc être analysé, ce que nous proposons de faire ici dans des exploitations conduites selon les principes de l'AB.

Dans ce contexte, l'INRAE a coordonné le projet européen (2018-2021) Core-Organic MixEnable « MIXEd livestock farming for improved sustainABiLity and robustnEss of organic livestock » (encadré 1). Les travaux de recherche menés durant ma thèse sont adossés à ce projet. L'objectif de la thèse est de décrire et de comprendre le fonctionnement des systèmes d'élevage mixtes afin de pouvoir mettre en regard leur fonctionnement et leur multi-performance. Comme pour le projet MixEnable, la thèse porte spécifiquement sur les systèmes d'élevage mixtes conduits en AB. Notre postulat est que les éleveurs diversifiés en AB organisent et gèrent leur système de production en optimisant les processus naturels pour s'affranchir du recours aux intrants d'origine pétrochimique. Notre hypothèse de recherche principale est que les systèmes d'élevage mixtes qui optimisent les processus naturels par la mise en interactions de leurs ateliers de production ont de meilleures performances productives, environnementales et économiques liée à une meilleure efficacité d'utilisation des ressources utilisées pour produire.

Les questions de recherche

L'objectif de la thèse est de répondre à certains manques de connaissances des systèmes d'élevage mixtes en AB, notamment (i) de mieux caractériser leur fonctionnement et (ii) d'évaluer et mieux expliquer leur durabilité. Ces constats font émerger la question suivante qui est au cœur du travail de thèse :

Comment caractériser un système diversifié,
en prenant en compte les interactions entre ateliers,
pour mieux rendre compte de son fonctionnement et de son efficacité ?

Un tel objectif nécessite de proposer des outils pour décrire et comprendre le fonctionnement des systèmes d'élevage mixtes. Nous avons successivement testé la méthode des réseaux écologiques pour évaluer les interactions entre ateliers tel un réseau de flux au sein du système. La question de recherche peut être formulée comme suit : Aborder les interactions entre ateliers d'un système d'élevage mixte comme un réseau de flux de matière permet-il une représentation générique du fonctionnement de ces systèmes ?

Nous avons ensuite fait le choix d'approcher le fonctionnement d'un système d'élevage mixte en considérant non seulement les interactions entre les ateliers du système liées aux pratiques, mais aussi celles qui relèvent de l'organisation du collectif de travail et des circuits de commercialisation. La question de recherche peut être formulée ainsi : Appréhender les interactions intra-système sous l'angle combiné des pratiques agricoles, de l'organisation du travail et de la gestion de la commercialisation des produits apport-il une compréhension plus complète du fonctionnement des systèmes diversifiés ?

Enfin, les outils de description du fonctionnement d'une exploitation élaborés dans cette seconde approche seront ensuite mobilisés pour étudier le lien entre le fonctionnement et l'efficacité productive du système. On peut résumer cette troisième question ainsi : Parmi les contraintes structurelles, les pratiques d'interactions et les choix technico-économiques faits par l'éleveur, quels sont les déterminants de l'efficacité productive des exploitations d'élevage mixtes ?

Structuration du manuscrit de thèse

Le manuscrit de thèse est articulé autour de cinq articles. L'**article 1** est une revue de la littérature sur la durabilité des systèmes d'élevages mixtes. Cette revue de littérature publiée en 2020 dans la revue *Agricultural Systems* est un travail collectif coordonné par le coordinateur du projet MixEnable, à laquelle j'ai activement contribué. Cette revue décrit les atouts et limites de la mixité d'espèces dans les différentes dimensions de la durabilité et ouvre sur des pistes de recherche. Nous proposons aussi un cadre d'analyse des systèmes diversifiés qui invite à prendre en compte non seulement les pratiques d'élevage, mais aussi l'organisation du travail et la gestion de la commercialisation.

Faisant le constat d'un manque d'outils permettant d'analyser le fonctionnement des systèmes mixtes, les deux articles suivant testent deux méthodes que nous avons testées dans les exploitations dont notre équipe assurait le suivi. La première méthode est présentée dans l'**article 2** et porte sur le fonctionnement biotechnique du système, représenté à l'aide de la méthode des réseaux écologiques. Cette méthode représente les interactions entre ateliers par des flux de biomasse, exprimé en azote dans notre cas. Une typologie de fermes mixtes basée sur le fonctionnement et la structure est réalisée sur 17 exploitations associant des bovins allaitants à des ovins, des porcs ou des volailles (poulets de chair et poules pondeuses). Nous analysons ensuite si les exploitations au sein des différents types se distinguent par leurs performances économiques, et certaines performances environnementales et liées à la perception qu'ont les éleveurs de leur travail. Cet article est accepté pour publication dans la revue *Agronomy for Sustainable Development*.

Dans l'**article 3** nous mettons en œuvre le cadre conceptuel proposé dans la revue de littérature pour aborder les interactions au sein des fermes diversifiées. Pour cela, nous avons proposé en plus des indicateurs décrivant les interactions biotechniques entre les ateliers de production, de nouveaux indicateurs pour décrire la composition et la polyvalence du collectif de travail, et les différentes formes et circuits de commercialisation des produits issus de l'exploitation. Les indicateurs ont été appliqués sur dix fermes mixtes parmi les 17 précédemment étudiées. Cet article est en cours d'évaluation pour la revue *Agricultural Systems*.

L'**article 4** présente la base de données de 128 fermes d'élevage mixtes créée dans le cadre du projet MixEnable dans les sept pays partenaires. Il correspond à un datapaper qui présente les données, le processus de collecte et de vérification-validation des données. Il est porté par la coordinatrice du projet, la coordinatrice du WP2 dédié à l'acquisition et au stockage des données et par moi-même. Il est en cours d'évaluation pour la revue *Frontiers in Sustainable Food Systems*.

Cette base de données est mobilisée dans le **l'article 5** pour étudier l'efficacité productive des systèmes d'élevage mixtes. Nous l'utilisons au sein d'un réseau de 96 exploitations (pour lesquelles nous disposons des données complètes) comprenant une grande diversité d'espèces animales et/ou d'orientations productives dans six pays. L'efficacité est abordée selon trois ressources : les intrants, les aliments concentrés et la part des aliments consommables par l'Homme. Nous cherchons à identifier les déterminants de l'efficacité parmi des variables de

structure, et des indicateurs d'interactions entre ateliers proposés dans l'article 3. Nous affinons ensuite notre analyse dans le cas des systèmes de polyculture-polyélevage (71 exploitations parmi les 96 précédentes), puis pour trois combinaisons d'espèces au sein de cet échantillon : les exploitations associant des bovins allaitants à des ovins viande (16 exploitations), des bovins allaitants à des monogastriques (26 exploitations), ou des bovins laitiers à des monogastriques (16 exploitations). Nous utilisons la méthode des régressions PLS pour identifier les relations entre la structure et le niveau d'intégration au sein des systèmes, et les trois variables caractérisant l'efficacité d'utilisation des ressources au sein de l'ensemble des ateliers de production animale de ces exploitations. Une fois retravaillé et traduit en anglais, nous soumettrons cet article à la revue *Animal*.

Pour conclure ce manuscrit, nous discutons les résultats obtenus dans le cadre de la thèse et proposons des perspectives de recherche dans un dernier chapitre.

Encadré 1 : Le projet européen MixEnable



Le projet MIX-ENABLE est issu de l'appel à projet Core Organic Cofund (2018) visant à approfondir, à l'échelle de l'Europe, la compréhension des stratégies des fermes d'élevage diversifiées en AB (au minimum deux espèces ou orientations productives dans la même exploitation), d'évaluer leurs performances dans différentes dimensions, d'identifier les stratégies les plus durables et robustes, et d'étudier des voies d'optimisation de la résilience et des performances.

L'intégration, au sein d'une même exploitation agricole, de deux ou plusieurs espèces animales avec des productions végétales ou de l'agroforesterie présente de nombreux avantages « sur le papier ». Toutefois, la majorité des fermes d'élevage en AB sont spécialisées et le niveau d'intégration des ateliers au sein des fermes diversifiées peut rester faible, limitant l'intérêt potentiel des associations présentes. Décrire les stratégies mises en œuvre au sein des exploitations d'élevage diversifiées a conduit à prendre en compte, conjointement les pratiques agronomiques, l'organisation du travail et la commercialisation des produits. Ces trois volets sont étudiés conjointement dans le suivi des fermes étudiées.

Organisation du projet

Le projet est structuré en six tâches (WP). Les WP1 et WP6 concernent l'animation et la valorisation, respectivement. Le WP2 correspond à la caractérisation des fermes, à l'acquisition et au stockage des données. Il est alimenté par le suivi par enquêtes de 128 fermes. Les données d'enquêtes sont mobilisées dans le WP3 qui vise à définir les indicateurs d'évaluation (performances de durabilité et niveaux d'intégration des ateliers) et analyser les résultats des fermes. Ces indicateurs sont également mobilisés dans le WP5 dont l'objectif final est l'adaptation de modèles existants (ORFEE et IAT) pour simuler des exploitations de polyculture-polyélevage. Enfin, le WP4 vise à approfondir les connaissances des systèmes d'élevage mixtes par des expérimentations systèmes conduites entre 2 et 4 années en Allemagne, en Suisse et en France. Les mécanismes étudiés concernent la maîtrise du parasitisme, le comportement alimentaire des animaux et la limitation des risques de prédation (effets de protection).

La diversité des approches de recherche conduite dans le projet, enquêtes en exploitation, analyse de jeux d'indicateurs, expérimentations systèmes, modélisation par simulation informatique et démarches participatives est importante. Différents travaux récents (Dumont et al. 2020a; Chopin et al. 2021; Rossing et al. 2021) ont conclu à l'intérêt de combiner ces différentes approches afin de produire des connaissances opérationnelles pour rendre plus durables les systèmes de productions agricoles. Le projet MixEnable devrait ainsi permettre d'en faire la preuve de concept.

Le projet est coordonné par Guillaume Martin (INRAE, Toulouse) et associe neuf autres partenaires : BOKU (Autriche), CRAW (Belgique), FIBL (Suisse), Forschungsring (Allemagne), IDELE (France), ITAB (France), SLU (Suède), Thünen Institute (Allemagne), et l'Université de Tuscia (Italie).

Références

Agence Bio (2020) Dossier de Presse : La consommation bio en hausse en 2019 stimule la production et la structuration des filières françaises. Les chiffres 2019 du secteur bio

Almeida FA de, Bassetto CC, Amarante MRV, et al (2018) Helminth infections and hybridization between *Haemonchus contortus* and *Haemonchus placei* in sheep from Santana do Livramento, Brazil. *Braz J Vet Parasitol* 27:280–288. <https://doi.org/10.1590/s1984-296120180044>

Alvarez A, García-Cornejo B, Pérez-Méndez JA, Roibás D (2018) The profitability of value-added products in dairy farm diversification initiatives. *Spanish Journal of Agricultural Research* 16:0104. <https://doi.org/10.5424/sjar/2018162-11813>

Animut G, Goetsch AL (2008) Co-grazing of sheep and goats: Benefits and constraints. *Small Ruminant Research* 77:127–145. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.03.012>

Barbieri P, Pellerin S, Nesme T (2017) Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Scientific Reports* 7:. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6>

Biggs R, Schlüter M, Biggs D, et al (2012) Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annu Rev Environ Resour* 37:421–448. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-051211-123836>

Chopin P, Mubaya CP, Descheemaeker K, et al (2021) Avenues for improving farming sustainability assessment with upgraded tools, sustainability framing and indicators. A review. *Agron Sustain Dev* 41:19. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00674-3>

d'Alexis S, Sauvant D, Boval M (2014) Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J Agric Sci* 152:655–666. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000622>

de Roest K, Ferrari P, Knickel K (2018) Specialisation and economies of scale or diversification and economies of scope? Assessing different agricultural development pathways. *J Rural Stud* 59:222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.04.013>

Dumont B, Modernel P, Benoit M, et al (2020a) Mobilizing Ecological Processes for Herbivore Production: Farmers and Researchers Learning Together. *Front Sustain Food Syst* 4:. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.544828>

Dumont B, Puillet L, Martin G, et al (2020b) Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front Sustain Food Syst* 4:109: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>

EU (2007) Règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n° 2092/91

EU (2008) Règlement (CE) N° 889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) no 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles

Figge F (2004) Bio-folio: applying portfolio theory to biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 13:827–849. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000011729.93889.34>

Forteau L, Dumont B, Sallé G, et al (2020) Horses grazing with cattle have reduced strongyle egg count due to the dilution effect and increased reliance on macrocyclic lactones in mixed farms. *Animal* 1076–1082. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002738>

Fraser MD, Moorby JM, Vale JE, Evans DM (2014) Mixed Grazing Systems Benefit both Upland Biodiversity and Livestock Production. *PLOS ONE* 9:e89054. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089054>

Galliot J-N, Hulin S, Bonsacquet E, Carrère P (2019) Apprécier les compromis entre services à travers la typologie multifonctionnelle des prairies du Massif central. *Fourrages* 67–74

García de Jalón S, Burgess PJ, Graves A, et al (2018) How is agroforestry perceived in Europe? An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agroforest Syst* 92:829–848. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0116-3>

- Hansson H, Ferguson R, Olofsson C (2008) Understanding the diversification and specialization of farm businesses. *Agricultural and Food Science* 19:269. <https://doi.org/10.2137/145960610794197605>
- Hofmeijer MAJ, Melander B, Salonen J, et al (2021) Crop diversification affects weed communities and densities in organic spring cereal fields in northern Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 308:107251. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107251>
- Ilbery BW (1991) Farm diversification as an adjustment strategy on the urban fringe of the West Midlands. *Journal of Rural Studies* 7:207–218. [https://doi.org/10.1016/0743-0167\(91\)90085-7](https://doi.org/10.1016/0743-0167(91)90085-7)
- Kremen C, Iles A, Bacon C (2012) Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol Soc* 17:44. <https://doi.org/10.5751/ES-05103-170444>
- Kurdyś-Kujawska A, Strzelecka A, Zawadzka D (2021) The impact of crop diversification on the economic efficiency of small farms in Poland. *Agriculture* 11:250. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030250>
- Lin B (2011) Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience* 61:183–193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>
- López-i-Gelats F, Milán MJ, Bartolomé J (2011) Is farming enough in mountain areas? Farm diversification in the Pyrenees. *Land Use Policy* 28:783–791. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.01.005>
- Magne M-A, Nozières-Petit M-O, Cournut S, et al (2019) Gérer la diversité animale dans les systèmes d'élevage : laquelle, comment et pour quels bénéfices ? *INRAE Productions Animales* 32:263–280. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2496>
- Mahieu M (2013) Effects of stocking rates on gastrointestinal nematode infection levels in a goat/cattle rotational stocking system. *Vet Parasitol* 198:136–144. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.08.029>

Marley CL, Fraser MD, Davies DA, et al (2006) The effect of mixed or sequential grazing of cattle and sheep on the faecal egg counts and growth rates of weaned lambs when treated with anthelmintics. *Vet Parasitol* 142:134–141. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.06.030>

Michaud A, Plantureux S, Amiaud B, et al (2012) Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands. *J Agric Sci* 150:219–236. <https://doi.org/10.1017/S0021859611000530>

Murgueitio E, Calle Z, Uribe F, et al (2011) Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management* 261:1654–1663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>

Nihous F (2008) La diversification et la valorisation des activités agricoles au travers des services participant au développement rural. Ministère de l’agriculture et de la pêche

Ollion E, Ingrand S, Delaby L, et al (2016) Assessing the diversity of trade-offs between life functions in early lactation dairy cows. *Livestock Science* 183:98–107. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.11.016>

Panzar JC, Willig RD (1981) Economies of Scope. *American Economic Review* 71:268–72

Ponisio LC, M’Gonigle LK, Mace KC, et al (2015) Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282:20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>

Reidsma P, Ewert F (2008) Regional farm diversity can reduce vulnerability of food production to climate change. *Ecology and Society* 13:. <https://doi.org/10.5751/ES-02476-130138>

Rogdo T, Hektoen L, Slettemeås JS, et al (2012) Possible cross-infection of *Dichelobacter nodosus* between co-grazing sheep and cattle. *Acta Veterinaria Scandinavica* 54:19. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-54-19>

Rossing WAH, Albicette MM, Aguerre V, et al (2021) Crafting actionable knowledge on ecological intensification: Lessons from co-innovation approaches in Uruguay and Europe. *Agricultural Systems* 190:103103. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103103>

Valenti WC, Kimpara JM, Preto B de L, Moraes-Valenti P (2018) Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecol Ind* 88:402–413.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>

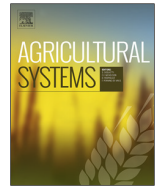
Vollet D, Said S (2018) Vers l'identification de paniers de biens et de services liée à la demande locale dans les territoires d'élevage : illustration à partir de la Planèze de Saint Flour et du bocage bourbonnais. *geocarrefour* 92:.. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.11155>

CHAPITRE 1 :
POTENTIAL OF MULTI-SPECIES
LIVESTOCK FARMING TO IMPROVE
THE SUSTAINABILITY OF LIVESTOCK FARM



Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural Systems

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agsy

Review

Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review



Guillaume Martin^{a,*}, Kerstin Barth^b, Marc Benoit^c, Christopher Brock^d, Marie Destruel^a, Bertrand Dumont^c, Myriam Grillot^a, Severin Hübner^b, Marie-Angéline Magne^e, Marie Moerman^f, Claire Mosnier^c, David Parsons^g, Bruno Ronchi^h, Lisa Schanzⁱ, Lucille Steinmetz^c, Steffen Werne^j, Christoph Wincklerⁱ, Riccardo Primi^h

^a AGIR, Université de Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

^b Johann Heinrich von Thünen Institute, 23847 Westerau, Germany

^c Université Clermont Auvergne, INRAE, Vetagro Sup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^d Forschungsring e.v., Brandschneise 5, D-64295 Darmstadt, Germany

^e AGIR, Université de Toulouse, ENSFEA, INRAE-INPT-ENSAT, France

^f CRAW, 5030 Gembloux, Belgium

^g Swedish University of Agricultural Sciences, 90183 Umea, Sweden

^h Università degli Studi della Tuscia, 01100 Viterbo, Italy

ⁱ University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU), A-1180 Vienna, Austria

^j FiBL, CH-5070 Frick, Switzerland

ARTICLE INFO

Keywords:

Agrobiodiversity
Co-grazing
Mixed farming
Multi-species farming
Sustainability

ABSTRACT

Diversified farming systems are proposed as a major mechanism to address the many sustainability issues of today's agriculture. Multi-species livestock farming, i.e. keeping two or more animal species simultaneously on the same farm, is an option that has received little attention to date. Moreover, most studies of multi-species livestock farming are limited, usually focusing on selected dimensions of farm sustainability and addressing lower organizational levels (i.e. within the farm) and rather limited time horizons (e.g. a few weeks in a grazing season). Thus, a comprehensive assessment of multi-species livestock farming in terms of farm sustainability is lacking. In this context, we outline and discuss potential benefits and limitations of multi-species livestock farming for livestock farm sustainability from existing literature and list issues on multi-species livestock farming requiring further research. We show that multi-species livestock farming has the potential to improve the three dimensions of sustainability reviewed - economic viability for farmers, environmental soundness and social acceptability by being respectful of animals and humans - as long as locally relevant farming practices are implemented, especially an appropriate stocking rate during grazing. If relevant practices are not observed, multi-species livestock farming may produce undesirable effects, such as competition for resource acquisition during grazing, parasitic cross-infection and more intense work peaks. Therefore, we identify four focal research areas for multi-species livestock farming. First, characterizing the management of multi-species livestock farms. To do this, we suggest considering the integration of production enterprises (e.g. cattle and sheep enterprises) within the farm from three perspectives: farming practices (e.g. grazing management), work organization and sales. Second, exploring the complementarity of livestock species on multi-species livestock farms. This is especially true for species combinations that have been largely ignored (e.g. ruminants and monogastrics), even though they may have potential due to complementary diet compositions and resource-acquisition strategies. Third, assessing the sustainability of multi-species livestock farm scenarios (current or alternative) according to the management practices and production conditions, which requires adapting existing methods/models or developing new ones. Fourth, characterizing conditions for success and obstacles for multi-species livestock farming along the value chain from production to consumption, considering stakeholders' objectives, work habits and constraints. Increasing understanding should help prioritize actions and organize them to scale up multi-species livestock farming.

* Corresponding author.

E-mail address: guillaume.martin@inrae.fr (G. Martin).

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>

Received 18 July 2019; Received in revised form 20 December 2019; Accepted 17 March 2020

Available online 22 March 2020

0308-521X/ © 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Globalization, urbanization, population growth and climate change necessitate more sustainable agricultural models. In the context of livestock farming, this means models that provide the farmer with a reasonable and stable income, without negative side effects on the environment, and that are acceptable to society by ensuring both animal and farmer welfare (ten Napel et al., 2011). Several visions have been proposed to drive the redesign of agricultural systems toward improved sustainability, including agroecology (Tomich et al., 2011) and ecological modernization of agriculture (Horlings and Marsden, 2011). These visions rely on greater plant and animal diversity in agricultural systems (Dumont et al., 2014; Duru et al., 2015) and therefore more diversified farming systems. Diversified farming systems intentionally include functional agrobiodiversity (Kremen et al., 2012): crops, sown and permanent pastures, rangelands, and animal genotypes and species chosen by farmers to manage their farms. These systems presumably provide ecosystem services by reducing input use and increasing the stability of production (Kremen et al., 2012). Indeed, diversified farming systems may promote interactions over space and time among farm enterprises (e.g. crops, pastures and animals) and create opportunities for synergies (e.g. resource transfers among enterprises to increase nutrient cycling, joint use of products from different enterprises through on-farm processing, better work organization to mitigate work peaks) (Hendrickson et al., 2008).

Within diversified farming systems, integrated crop-livestock farming is considered one of the most promising options to meet sustainability goals (Kirkegaard et al., 2014; Liang et al., 2018) due to its demonstrated environmental and economic benefits (Bell and Moore, 2012; Veyssat et al., 2014; Ryschawy et al., 2017). Multi-species livestock farming, i.e. keeping two or more animal species (Fig. 1) on the same farm simultaneously (and possibly integrating them with crop production or agroforestry), is another way to diversify farming systems, but it has received less attention, with most studies focusing solely on co-grazing at the field level (e.g. Animut and Goetsch, 2008; Fig. 1). Multi-species livestock farming is often implemented to promote functional diversity, a concept which in recent years has gained increasing interest within agricultural science (Gunton et al., 2011; Rolo et al., 2016). Applied to livestock farming, functional diversity builds on a diversity of animal morphological characteristics (e.g. body size, incisor arcade), physiological characteristics (ruminants vs. hindgut fermenters), feeding preference (herbivore vs. grain feeder, grazer vs. browser, generalist vs. specialist animals) and/or behavioral traits (temperament, previous grazing experience). According to ecological theory, trait diversity promotes resource-use efficiency, productivity and stability of ecosystems (Hooper et al., 2005; Isbell et al., 2015).

Most studies of multi-species livestock farming (e.g. D'Aleix et al., 2014; Fraser et al., 2007; Wright et al., 2006) are limited to selected dimensions of farm sustainability and address lower organizational

levels (usually the field level) over rather limited time horizons (e.g. a few weeks in a grazing season). Thus, a more comprehensive assessment of potential benefits of multi-species livestock farming on farm sustainability is lacking. In this context, this review outlines and discusses potential benefits and limitations of multi-species livestock farming for livestock farm sustainability and identifies four issues related to multi-species livestock farming requiring further research. Here, livestock farm sustainability is understood as the combination of economic viability for farmers, environmental soundness and social acceptability by being respectful of animals and humans (ten Napel et al., 2011). The review is limited to free-ranging systems and excludes confined livestock farming that does not allow for interactions among livestock species.

2. Potential benefits and limitations of multi-species livestock farming for livestock farm sustainability

Sustainability in the context of livestock farming is considered as a multi-dimensional concept (Lebacqz et al., 2013) as in other agricultural systems (Zahm et al., 2019). According to the above definition (based on Ten Napel et al., 2011), the three dimensions often found in sustainability assessments apply to livestock farms (Bernués et al., 2011; Lebacqz et al., 2013):

- Environmental sustainability that encompasses resource-use efficiency, climate change mitigation and biodiversity conservation in grazing lands and crop-livestock areas: reducing the inputs required for production by making more efficient use of internal resources (e.g. pasture biomass in t DM/ha) may address several of the critical points identified by Bernués et al. (2011) by closing nutrient cycles to reduce nutrient leaching (assessed as kg of excess N, P and K per ha) while limiting greenhouse gas emissions (assessed as kg of CO₂ equivalent emitted per ha per year or per kg of product) and sequestering carbon in grassland soils. However, this should not occur at the expense of biodiversity conservation (assessed via the species richness and limitation of invasive species in agricultural landscapes) which requires grazing at a stocking density that does not exceed grassland carrying capacity, and limiting the risks of trampling and pasture degradation (e.g. by pigs).
- Technical and economic sustainability that encompasses productivity and profitability (Bernués et al., 2011): free ranging livestock farms are criticized (e.g. Toro-Mujica et al., 2011) for their sometimes low productivity (assessed as g of meat, milk, egg or wool per day or per unit area) but productivity is at the root of profitability (assessed via farmer income in monetary units) which is key to maintaining farms in the long run (Uematsu and Mishra, 2012). Then, to remain competitive, farms may have to achieve a level of productivity sufficient to ensure their profitability. The latter not only provides farmers with a reasonable income, it helps keep farming attractive despite the high degree of technical skills often



Fig. 1. Examples of multi-species livestock farming with (left) co-grazing of heifers and broilers and (right) cattle and sheep (Photo credits: Severin Hübner and Sophie Prache).

needed to produce livestock, and the higher workload and work constraints (e.g. for dairy production) compared to managing cropping systems.

- Social sustainability that encompasses both animal and farmer welfare: consumers expect livestock farmers to decrease their use of veterinary medicines (assessed via the frequency of treatments per animal per year), in particular antibiotics and anthelmintics and to protect animals from predators (assessed via a mortality rate due to predators) (Lebacqz et al., 2013). Moreover, in an era in which livestock farming is discussed controversially, livestock farmers must consider animal welfare in their management strategies (Zander and Hamm, 2010). Also the increase in farm size observed in Europe for several decades (Eurostat, 2019) has led to serious welfare issues for farmers and agricultural workers. Livestock farmers need to address this issue to remain functional in the long term and keep their activity attractive for following generations (Jansen, 2000) despite a sometimes critical image of livestock farming in the media.

2.1. Environmental sustainability

2.1.1. Resource use efficiency

In a farming context, the diversity of traits within the components of agrobiodiversity determines the complementarity of resource use, or the competition for these resources resulting from overlapping diets. Livestock species are commonly classified according to their digestive system: foregut (ruminant e.g. cattle) and hindgut (cecal e.g. equids) herbivorous fermenters, and monogastrics. Ruminants and equids are well adapted to digesting forage cell walls, while monogastrics are the most efficient converters of feed concentrates. In line with differences in body-size, physiological, morphological and behavioral traits, herbivore species exhibit distinct feeding behaviors and have complementary effects on plant community structure. Body size determines intake capacity and nutrient requirements of ruminants and equids (Rook et al., 2004; INRA, 2015), their ability to feed selectively because of mouth size and, to a lesser extent, their ability to digest forage (Dulphy et al., 1994). Small ruminants generally require more energy relative to their intake capacity than large ones such as cattle, and thus have to select higher-quality diets (Rook et al., 2004). Large ruminants are restricted by a reduction in their bite depth on short swards (Illius and Gordon, 1987). Horses have a higher intake capacity and a double row of incisors, allowing them to graze short swards (Menard et al., 2002); they are thus better adapted to low-quality and hard-to-access herbage than other herbivores (Thériez et al., 1994). Goats are agile climbers (Sanon et al., 2007) with a mouth and tongue highly adapted for selection of specific parts of plants, unlike cattle, which have a mouth and tongue that maximize intake rate when grazing tall swards (NRC, 2007). These factors determine the feeding niche of each livestock species on pastures and their impacts on plant community structure and biodiversity (Rook et al., 2004).

Competition and complementarity for feeding can be analyzed through the lens of dietary overlap (Walker, 1994). Different feeding habits among two or more livestock species raised on the same farm reduce competition for feed. As Walker (1994) indicated, “While a high degree of dietary overlap does not necessarily indicate interspecific competition, a low level of overlap indicates reduced potential for competition”. Comparing several studies conducted across the world, Walker (1994) concluded that dietary overlap between sheep and cattle grazing together remains low unless forage availability becomes too low (Table 1), forcing both sheep and cattle to graze the most available plants, even though they may be less preferred or of lower quality. While sheep were more selective than cattle on a productive pasture, co-grazing of cattle and sheep also led to a more homogeneous defoliation pattern; both species decreased selection of highly preferred *Taraxacum* sect. *Ruderalia* and increased selection of less preferred *Festuca pratensis* (Cuchillo-Hilario et al., 2018). On pastures grazed by sheep and goats or cattle and goats all together, dietary overlap also

increased when forage availability became low (Squires, 1982; Norton et al., 1990). Cattle and horses have high dietary overlap, which indicates a high risk of competition (Menard et al., 2002). In forage-limited conditions, horses maintain diet quality at the same high level (Fleurance et al., 2016) and can thus outcompete cattle on pastures because of their ability to graze short swards. In productive pastures, cattle may, however, benefit from an increase of competitive *Trifolium repens* abundance in the short sward patches created and maintained by grazing horses (Fleurance et al., 2016). Grazing sows prefer clover to grass, and grass leaves to grass stems (Sehested et al., 2004). Yet, herbage-use efficiency of co-grazing heifers and sows can increase overall herbage intake on productive pastures. For example, herbage intake was 9–10 t DM/ha on pastures grazed simultaneously by heifers and sows vs. 5.7–8.8 t DM/ha on pastures grazed by either heifers or sows (Sehested et al., 2004). Potential overlap between feeding niches calls for appropriate management of co-grazed pastures depending on livestock species, sward diversity, season, and herbage availability in order to increase herbage-use efficiency (Jordan et al., 1988; Menard et al., 2002; Cuchillo-Hilario et al., 2018).

Co-grazing can increase sward nutritive value, especially its crude protein content and organic matter digestibility (Walker, 1994; Sehested et al., 2004), but this is not always the case (Abaye et al., 1994; Sormunen-Cristian et al., 2012; Wang et al., 2019). An increase in sward nutritive value is likely to increase diet quality, either directly or as the result of positive feedback between grazing and vegetation regrowth that remains of high nutritive value. Also, the different livestock species may have more opportunity to select their preferred plant species as long as forage availability remains high (Jordan et al., 1988; Sehested et al., 2004). Co-grazing, for instance of cattle and horses or cattle and goats, may lead to more uniform sward defoliation (Menard et al., 2002) and higher nutritive value of the pasture regrowth. In addition, sheep (Nolan and Connolly, 1989) and sows (Sehested et al., 2004), either under simultaneous or sequential grazing, have been observed to graze herbage close to cattle dung, an area that cattle avoid. This herbage has a comparatively higher crude protein content and dry matter digestibility, and thus increases diet quality (Nolan and Connolly, 1989).

2.1.2. Climate change mitigation and biodiversity conservation

The benefits of multi-species grazing for climate change mitigation have not been studied extensively. Only Fraser et al. (2014) compared methane emissions of several systems with varying ratios of cattle and sheep grazing together with a mono-species sheep grazing system. They showed that the sheep grazing system emitted less methane per unit area than the multi-species systems (62.15 kg CH₄/ha vs. 78.08 to 91.18 kg CH₄/ha; Table 1). However, when considering the live weight gain of animals in the assessment, three out of the four multi-species systems had lower emission intensities than the sheep grazing system (438 g CH₄/kg live weight gain/ha vs. 398 to 443 g CH₄/kg live weight gain/ha).

How herbivores shape plant community structure and ecosystem functioning can be analyzed through the lens of ‘patch grazing’ behavior, as herbivores preferentially feed on previously grazed short areas of high nutritive value (Adler et al., 2001). At a lenient stocking rate, this leads to the creation of relatively stable short patches in a matrix of tall vegetation. Patch stability can persist over successive grazing seasons and results in divergent local vegetation dynamics, which benefits biodiversity according to the ‘habitat heterogeneity hypothesis’ (Kruess and Tschamke, 2002; WallisDeVries et al., 2007). The scale at which stability of vegetation patterns took place during two successive years depended on pasture productivity and livestock species; horses created the more stable patches followed by cattle, while sheep were less able to shape vegetation structure (Dumont et al., 2012). Simultaneous grazing of sheep and cattle, however, provided suitable habitats for butterflies. On Welsh upland pastures, bird species density was significantly higher when sheep alone grazed pastures (Fraser et al., 2014; Table 1), but

Table 1
Summary of benefits (+), limitations (-) and absence of effects (=) on farm sustainability for the reviewed multi-species livestock systems and related knowledge gaps.

Sustainability dimension		Sheep-cattle	Sheep-goat	Goat-cattle	Cattle-horse	Cattle-pig	Knowledge gaps
Environmental	Resource use efficiency	+ (± forage availability) (Cuchillo-Hilario et al., 2018; Jordan et al., 1988; Nolan and Connolly, 1989; Walker, 1994)	+ (± forage availability) (Squires, 1982; Norton et al., 1990)	+ (± forage availability) (Squires, 1982; Norton et al., 1990)	+ (± forage availability) (Fleurance et al., 2016)	+ (Scheested et al., 2004)	Sub-dimension poorly studied Effects of pasture composition and forage availability via grazing management requiring further investigation Sub-dimension poorly studied Few studies on sheep-cattle and cattle-horse systems but many other: unexplored combinations
	Clim. chang. Mitigation Biodiversity conservation	Methane emissions + (Fraser et al., 2014) Pasture plant diversity + Insects + Soil organisms + (Wang et al., 2019) Butterflies + Birds + (Fraser et al., 2014)			Pasture plant diversity + (Loucougaray et al., 2004) Invasive sp. control + (Loiseau and Martin-Rosset, 1988; Loucougaray et al., 2004; Ménard et al., 2002)		Strong management effect (e.g. stocking rate at grazing) remaining underexplored Consistent indicators needed Sheep-cattle systems well studied but many other unexplored combinations Strong management effect (e.g. simultaneous vs. sequential grazing) remaining underexplored
Technical and economic	Overall productivity	+ (D'Alexis et al., 2014; Fraser et al., 2014; Walker, 1994)				+ (Scheested et al., 2004)	
	Species productivity	Sheep + Cattle =/+ (Abaye et al., 1994; D'Alexis et al., 2014; Fraser et al., 2007; Fraser et al., 2014; Jordan et al., 1988; Nolan and Connolly, 1989; Taylor Jr, 1985; Walker, 1994; Wright et al., 2006)	Sheep + Goat = (Taylor Jr, 1985)	Cattle = Goat = (Taylor Jr, 1985)		Sows + Heifers + (Scheested et al., 2004)	
Social	Profitability	Sheep +; calves - (Olson et al., 1999) Net income + (Umberger et al., 1983) Fixed costs - (Walker, 1994) Economic efficiency / Economies of scale - (Meyer and Harvey, 1985)	Fixed costs - (Walker, 1994)	Fixed costs - (Walker, 1994)			Sub-dimension poorly studied Strong management effect (e.g. ratio between species, sales management) remaining underexplored Consistent indicators needed Analysis of lock-ins needed Incomplete knowledge due to the diversity of nematodes, bacterial and viral diseases Livestock management effect especially grazing management effect (e.g. simultaneous vs. sequential grazing) underexplored
	Animal health and welfare	Nematodes - for sheep (Arundel and Hamilton, 1975; Brito et al., 2013; Jordan et al., 1988; Maizey et al., 2006) but cases of inter-species transmissions for nematodes (Almeida et al., 2018; Chaudhry et al., 2015; Riggs, 2001) and bacterial and viral diseases (Belay et al., 2004; Braun et al., 2014; Góktuna et al., 2017; Moloney and Whittington, 2008; Passler and Walz, 2010; Raymond et al., 2000; Rogdo et al., 2012; Syrjälä et al., 2006)	Nematodes = (Deplazes et al., 2013) Cases of inter-species transmissions of bacterial and viral diseases (Nettleton et al., 1998; Minguijón et al., 2015; de Pablo-Maiso et al., 2018)	Nematodes - for both cattle and goat (Mahieu, 2013)	Nematodes - for horse (Porteau et al., 2020)	Cases of inter-species transmissions of bacterial and viral diseases (Góktuna et al., 2017; Passler and Walz, 2010)	
	Farmer welfare						Subdimension not studied, yet Consistent indicators needed

butterfly species density was higher with sheep and cattle co-grazing (in a 6:1 ratio). A recent study corroborated the benefits of co-grazing in more fertile pastures. Abundance and diversity measurements made across six groups of above-ground and below-ground organisms (plants, herbivorous insects, predatory insects, soil bacteria, fungi and nematodes) suggested that co-grazing not only benefits biodiversity but that it would also provide higher levels of ecosystem services (Wang et al., 2019). Other livestock combinations can also benefit pasture biodiversity. The ability of horses to feed on coarse vegetation can reduce the rate of encroachment by shrubs, phragmites and competitive grass species (Menard et al., 2002). Thus, co-grazing cattle and horses limited the development of shrubs on upland pastures (Loiseau and Martin-Rosset, 1988) – with a significant impact of horse trampling on *Vaccinium myrtillus* – and of tall patches of highly competitive and non-palatable grasses on coastal pastures (Loucougaray et al., 2004). In this last study, the benefits of co-grazing resulted not only from horse high intake capacity and ability to feed on coarse forages, but also from cattle grazing on horse latrine areas and thus limiting strongly competitive *Elymus repens* and *Agrostis stolonifera*. Consequently, co-grazing cattle and horse produced more species-rich and structurally diverse swards than cattle or horse grazing alone (Loucougaray et al., 2004). Although it was not reported in the reviewed literature, co-grazing or sequential grazing with a too high stocking rate may erode pasture biodiversity over the long run.

2.2. Technical and economic sustainability

2.2.1. Productivity

Co-grazing systems tend to have higher productivity per unit area than single-species grazing systems (Table 1). Compiling results of 14 experiments conducted across the world, Walker (1994) showed that co-grazing (cattle, sheep and/or goat) always increased productivity per unit area compared to cattle-only grazing (by 24%, on average on a weight gain (g/day) per ha basis) and usually increased productivity per unit area compared to sheep-only grazing (by 9%, on average on a weight gain (g/day) per ha basis). A more recent meta-analysis confirmed the benefits of cattle-sheep co-grazing systems, which had higher productivity (g/day) per ha than cattle- or sheep-only systems (D'Aleixis et al., 2014). Co-grazing of ruminants and monogastrics has seldomly been investigated, but a similar increase in productivity (g/day) was observed when co-grazing heifers and sows (Sehested et al., 2004). Total animal weight gain per ha was higher in co-grazing systems (by 140–250 g/day for heifers and 42–61 g/day for sows, either simultaneous or sequential) than in single-species grazing systems.

Usually, only one of the species involved benefits from co-grazing (Table 1). Compared to single-species grazing systems, simultaneous or sequential grazing of cattle and sheep increased average daily weight gain by 14.5 g per animal for sheep but did not change it for cattle (D'Aleixis et al., 2014). This confirms earlier findings (Abaye et al., 1994; Fraser et al., 2007; Fraser et al., 2014; Jordan et al., 1988; Wright et al., 2006). Similarly, 20 years of research in Texas (USA) revealed that co-grazing of cattle, sheep, and goats increased performance of sheep (weight gain and wool production) but did not affect cattle or goat performance (weight gain and mohair production) (Taylor Jr, 1985). Olson et al. (1999) even found a decrease in average daily weight gain for calves co-grazed with sheep, and only one study reported increased liveweight gain for cattle co-grazed with sheep (Nolan and Connolly, 1989). Several reasons have been suggested to explain this trend, including higher competitive ability of sheep during grazing (Walker, 1994), fewer helminths in co-grazed sheep (Jordan et al., 1988), higher relative growth rate of lambs than calves and higher prolificacy of ewes than cows (Matthews et al., 1986; Wilson and Graetz, 1980).

The variability observed in these studies of the productivity of co-grazing systems is related to the type of grazing management, stocking rates and the relative proportions of each species. Kiteisa and Nicol

(2001) observed that cattle simultaneously co-grazed with sheep had lower average daily weight gain than those sequentially grazed with sheep (804 and 706 vs. 1039 and 1028 g/day in two trials, respectively), while sheep were nearly unaffected by grazing management (150 and 155 vs. 138 and 147 g/day in two trials, respectively). The authors suggested that the disadvantage for cattle co-grazing with sheep in simultaneous grazing systems was related to the latter's more competitive use of herbage compared to that in sequential grazing systems. It may be compensated by management decisions on which species grazes first, which very much depends on farmers' priorities. Competition for feed may also depend on the stocking rate during grazing. For example, decreasing the space allowance (from 267 to 67 m² per animal) decreased average daily weight gain of red deer hinds and ewes more under co-grazing (211 vs. 141 g/day for hinds, 202 vs. 170 g/day for ewes, respectively) than under single-species grazing (225 vs. 185 g/day for hinds, 185 vs. 175 g/day for ewes, respectively) (Blanc et al., 1999). Thus, decreasing the space allowance by increasing the stocking rate increased competition for herbage and decreased productivity in the multi-species groups. The meta-analysis of D'Aleixis et al. (2014) further revealed that overall productivity of sheep-cattle grazing systems peaks when the proportion of sheep liveweight in total (cattle + sheep) liveweight equals 0.4.

2.2.2. Profitability

The profitability of multi-species livestock farms has not been studied extensively. This may be because profitability can vary with the proportion of each livestock species, the operational costs of each production enterprise and the relative values of livestock products, which varies considerably among years, countries or even regions. As mentioned, multi-species livestock farms tend to have higher meat productivity per unit area as long as locally relevant management practices are implemented, in particular an appropriate stocking rate during grazing. In addition, co-grazing may use herbage more efficiently and reduce farm dependency on feed inputs. Umberger et al. (1983) also reported a 29% increase in farm net income when combining cattle and sheep compared to that of a cattle farm, as long as steer prices were ca. 20% higher than lamb prices (Table 1).

Economies of scope apply when producing two or more products simultaneously costs less than producing each product separately (Chavas and Kim, 2007). Thus multi-species livestock farms can obtain economies of scope when inputs that can be shared among production enterprises lower the total cost of producing two or more products. The machines and equipment to produce, store and distribute feed can be common to different species. Walker (1994) suggested that a 20% increase in stocking rate allowed by multi-species livestock grazing would decrease fixed costs per head by 17%, assuming no capital improvements were needed for the second species. Fencing requirements are similar for some co-grazed livestock species (e.g. sheep and goats) but not for others (e.g. sheep and cattle) (Animut and Goetsch, 2008). Fences that will contain sheep and goats will also contain cattle, but the opposite is not true (Walker, 1994). Sheep can also be housed in the fodder shed after cattle have consumed some forage, since sheep generally graze later in winter. In spring, ewes can be housed in the cattle barn for lambing while cattle have returned to pasture; however, this approach requires some time to adapt the barn. Another way to generate economies of scope is to use by-products from one enterprise as an input for another enterprise (e.g. feeding piglets whey from milk processed into cheese).

Although economies of scope may be possible, multi-species livestock farmers need to manage more groups and types of animals. Overall, more skills and time to train and market products are needed. Farmers may perform less well when managing more complex systems such as multi-species livestock farms, and some time-saving technologies that are profitable only above a given scale cannot be adopted (de Roest et al. Almeida et al., 2018). Moreover, one species is usually less profitable than the other (Meyer and Harvey, 1985), thereby reducing

the efficiency of resource allocation to the enterprises. This reduces economies of scale, which are defined as a decrease in the cost per unit of output of the farm as output increases. As Chavas (2008) highlighted, trade-offs exist between (i) economic gains due to complementarity (economies of scope) between enterprises and risk-reducing effects and (ii) economic losses due to lower economies of scale and allocation of some farm resources to a less profitable enterprise (at least in the short term). As Bell and Moore (2012) highlighted, empirical evidence from a farm sample is lacking to identify the conditions under which multi-species livestock farms are profitable.

Other economic advantages of multi-species livestock farming are similar to those of any diversified farming system (Bowman and Zilberman, 2013; van Keulen and Schiere, 2004). Since different species have different sensitivities to risks (e.g. markets, prices, climate, workforce, public policies), a good outcome for one enterprise can offset a poor outcome for the other one in a given year. It may also allow farmers to easily adjust herd sizes or adapt the type of livestock products sold (e.g. lean or fattened animals) to the conditions of a given year (Nozières et al., 2011). This strengthens the farm's ability to cope with unexpected events, thereby promoting stability in the farmer's income (Esmail, 1991; Darnhofer et al., 2010). Thus, multi-species livestock farming is a way to mitigate risks (Bowman and Zilberman, 2013) that can both increase mean profit and decrease profit variability.

Diversified farms such as multi-species livestock farms tend to sell their products through multiple marketing channels that often focus on distinctive food products and increase economic viability (de Roest et al., 2018). Marketing products from more than one livestock species increases farm income by enabling farmers to market products throughout the year. Diversifying production enterprises can be an asset for short supply channels and, conversely, developing short supply channels to add value to products can lead to diversification of types of production, including potential processing of raw products to increase added value. This way of marketing, however, is an activity in itself and can obscure the technical performance and profitability of the enterprises providing raw materials. Further studies are needed to refine these inter-relationships between enterprise practices and technical performances, processing methods and sales practices, and workload and work organization that determine the overall profitability of diversified farms.

2.3. Social sustainability

2.3.1. Animal health and welfare

Combining different livestock species on the same pasture, simultaneously or sequentially, takes advantage of the host specificity of most gastrointestinal nematodes (Table 1). For example, since sheep and goats host the same species of nematodes (Deplazes et al., 2013), co-grazing them will not decrease nematode infections. However, lambs frequently have fewer gastrointestinal nematodes or excrete fewer nematode eggs when co-grazed with cattle than when sheep alone are grazed (Arundel and Hamilton, 1975; Brito et al., 2013; Jordan et al., 1988; Marley et al., 2006). Rotational grazing of tropical pastures by goats and heifers reduced faecal egg excretion and mortality in kids; the kids also grew faster while heifers were not significantly affected by gastrointestinal nematodes and grew normally (Mahieu, 2013). Similar benefits were recently observed in saddle horses; young horses grazed with cattle excreted twice less strongyle eggs than those grazed alone in specialized horse farms (Forteau et al., 2020). Surveys made in the same farm network revealed that only one third of the mixed farmers were aware that co-grazing of horses with cattle could be used as part of their strongyle control strategy. Beyond these benefits, some inter-species transmission have, however, also been reported, e.g. bovine-specific *Haemonchus placei* can infest sheep, and ovine-adapted *Haemonchus contortus* can infest cattle (Riggs, 2001; Almeida et al., 2018) with harmful effects on animal health and welfare. These two nematode

species have even hybridized (Chaudhry et al., 2015).

Beside the risk for parasitic cross-infection, multi-species livestock farming systems also face the challenge of cross-species transmission of bacterial and viral diseases (Rogdo et al., 2012; Table 1). Managing these risks requires knowledge of (i) how long a specific pathogen remains infectious under given circumstances and (ii) which animals can serve as an intermediate host of a pathogen to which another species is clinically susceptible. Knowledge in this area of research is incomplete, however, and requires further investigation. Examples of such diseases include malignant catarrhal fever (Syrjälä et al., 2006), ovine herpesvirus 2, ovine John's disease (Moloney and Whittington, 2008) and chronic wasting disease (Raymond et al., 2000; Belay et al., 2004). For some diseases, such as malignant catarrhal fever and ovine herpesvirus 2, sheep are asymptomatic carriers that infect clinically susceptible species such as cattle. For other diseases, such as ovine John's disease and chronic wasting disease, cattle are carriers and thus pose a risk to clinically susceptible species such as small ruminants.

Certain pathogens can clinically affect several species and therefore pose a greater threat to multi-species livestock farming; examples include anthrax (Beyer and Turnbull, 2009; Owen et al., 2015) and brucellosis (Taleski et al., 2002). Diseases with high mutation rates, such as small-ruminant lentiviruses, commonly transmitted horizontally in sheep and goats via bodily fluids (Nettleton et al., 1998), also threaten multi-species livestock farming. Generally, RNA viruses (e.g. small-ruminant lentiviruses) have high mutation rates and are therefore more likely to transcend the species boundary (Minguijón et al., 2015; de Pablo-Maiso et al., 2018). For example, avian influenza recently spread from birds to humans and swine (Forrest and Webster, 2010; Bourret et al., 2017). Similarly, a close relationship among different strains of a virus or bacteria genus could lead to cross-species transmission or indicate recent transcendence of the species boundary. The viruses that cause bovine viral diarrhoea, border disease and classical swine fever are all pestiviruses in the family Flaviviridae and hence closely related (Braun et al., 2014; Göktuna et al., 2017). Passler and Walz (2010) suggested that all three strains can be transmitted between species, and Braun et al. (2014) confirmed it experimentally for sheep and calves.

Although simultaneous grazing of livestock species may also modify behavior, interspecific behavior of livestock species sharing a pasture has received little attention. Most co-grazing studies focus on sheep kept with goats (Hulet et al., 1989; Animut and Goetsch, 2008), cattle (Cuchillo-Hilario et al., 2018) or horses (Patkowski et al., 2018), but these studies mainly cover issues such as bonding management or nutrient requirements. To our knowledge, only one study addressed changes in behavior: cattle ruminated and rested longer when simultaneously grazed with sheep, while sheep covered more distance than those in single-species systems, which may have been due to cattle pushing sheep from preferred grazing spots (Cuchillo-Hilario et al., 2017).

One specific type of combination of livestock species is the use of guardian animals. Flocks of sheep are sometimes guarded by an individual animal (e.g. llama, donkey; see Smith et al. (2000) for an evaluation of several guardian species) or group of animals from a different species (e.g. cattle; Hulet et al., 1989; Anderson, 1998). Regarding the latter, in extensive farming systems, some species that do not naturally associate but rather create independently moving single-species groups can be forced to bond (e.g. goats and sheep: Gipson et al., 2003; cattle and sheep: Anderson, 1998; Anderson et al., 2012; Hulet et al., 1989). One way to force two groups of different species to bond is to increase proximity, which can create one cohesive group over time. After bonding, one species remains near the other species or seeks it out in times of danger (e.g. predators), even without fences (e.g. cattle and sheep: Anderson, 1998; Anderson et al., 2012; cattle, sheep and goats: Hulet et al., 1989; horses and sheep: Patkowski et al., 2018). Hulet et al. (1989) reported reduced stress in lambs at weaning when the flock had bonded with cattle.

2.3.2. Farmer welfare

Farmer welfare depends greatly on work organization, which has gained increasing interest in the agricultural science literature in recent years (Fiorelli et al., 2007; Hostiou and Dedieu, 2012; Cournut et al., 2018). To date, however, no empirical study has been published on work organization on multi-species livestock farms (Table 1). Ideally, farm work must be organized in a way that meets a farmer's expectations for working conditions, quality of life and income, while addressing livestock management issues, particularly animal welfare (Cournut et al., 2018). In practice, achieving these goals depends on social, cultural and structural conditions of the context; effectiveness of farm-management strategies; external constraints (e.g. economic) and the farmer's perception of the work (David et al., 2010; Cournut et al., 2018). These strategies and perceptions are driven by different motivations for being a farmer that tend to disconnect issues of workload and income to some extent. High workload and/or low income do not necessarily result in a low social satisfaction of the farmer (Fiorelli et al., 2007; Besser and Mann, 2015).

Production diversity increases the number of activities and thus the number of tasks on a farm. Even though it may imply a higher total workload and management complexity for the farmer (Kingwell, 2011), the actual workload per worker may not increase if diversification is accompanied by re-organization of work and/or by improved management of production processes (Darnhofer et al., 2010; Hostiou, 2013). Still, farmers may have difficulties identifying appropriate individual options to achieve these goals. Further, options such as the simplification of processes may conflict with other management goals, especially animal welfare. Delegation to employees is another option but it is only possible if a farm's economic performance allows for it. In a diversified farming context, this may imply concentrating on niche markets rather than increasing production of standard goods, a result also indicated by David et al. (2010).

Production diversity may promote flexibility in work organization. Allocation of the workforce can shift with changes in the production context (Bell and Moore, 2012). However, work flexibility may decrease as workload per worker increases. This situation arises when tasks are time-consuming (e.g. due to limited mechanization) and/or the size of the workforce (e.g. Carneiro dos Santos Filho et al., 2012). Again, the most obvious solutions to increase flexibility are to increase the workforce (e.g. by delegation) or work efficiency (e.g. by mechanization) (Hostiou et al., 2015). Increasing the workforce may be possible with diversification if the new activities generate additional income. In contrast, options for mechanization are limited in livestock farming systems, and investments may prevent economic viability in small management units (Bowman and Zilberman, 2013; Morel et al., 2017). Another option may be to re-design the structure and processes of the farming system, as indicated by studies of work organization patterns on organic suckler-sheep farms (Hostiou, 2013) and of development patterns of organic farms (David et al., 2010).

3. Research areas for multi-species livestock farming

3.1. Better characterize the management of multi-species livestock farms

Multi-species livestock farming could represent a promising option for improving sustainability of livestock farming systems; however, according to Animum and Goetsch (2008), this practice does not always improve the sustainability of multi-species farms. Among the reasons they identified, a key one is maladapted integration of livestock species, or of pasture and livestock enterprises, leading to inappropriate management of stocking density, sward diversity, etc. As illustrated in the previous section, management practices can either promote benefits or adverse effects of multi-species livestock farming. This highlights the key role of farmer management in the integration of agrobiodiversity components and farm enterprises in space and time (Hendrickson et al., 2008). As mentioned, however, the management dimension is often

poorly understood beyond the effects of stocking rate and livestock species (Table 1). We claim that this is a central dimension for scaling-up multi-species livestock farming and that it thus requires further investigation to better characterize the management of multi-species livestock farms.

Several analytical frameworks have been developed to assess farm-level integration (Sumberg, 2003; Hendrickson et al., 2008; Bell and Moore, 2012). They rely on a vision centered on farming practices, (i.e. whether enterprises are co-located or segregated in space, simultaneous or sequential in time) and/or on nutrient fluxes (Stark et al., 2018) and resource exchanges (products and by-products such as straw and manure). However, interactions among farm enterprises go beyond technical aspects and can lead to innovations in work organization and in processing and marketing channels. Three perspectives could be considered to characterize overall farm management:

- Integration through farming practices results from simultaneous temporal or spatial interactions among enterprises (instead of managing system components separately). Integration of crops, pastures and livestock has been shown to increase nutrient cycling (Soussana and Lemaire, 2014), reduce pest and disease pressure (Marley et al., 2006) and adapt the range of products (e.g. selling lean or fattened animals) to feed availability (Nozières et al., 2011).
- Integration through work organization (i.e. versatility of workers across enterprises vs. their specialization) in either a simultaneous (working together) or sequential (working one after the other) mode may help avoid work peaks and distribute workload better. Integration also allows risks to be managed at the farm scale and among workers by making collective production decisions (Martin et al., 2016) and offers greater management flexibility to cope with unexpected events (Nozières et al., 2011).
- Integration through sales (i.e. sales channels similar among enterprises vs. specific to each enterprise), either at similar or different times of the year, may increase economic efficiency (by decreasing sales costs), promote economies of scope (Veysset et al., 2014), ease access to short supply channels with a wider range of products, and reduce economic vulnerability of farming systems (Esmail, 1991; Russelle et al., 2007; Sneessens et al., 2019) Fig. 2.

Accordingly, a farm can have integrated farming practices but not have integrated work organization and/or sales management. That is, it may have specialized workers and/or specific sales channels per enterprise. In contrast, a farm can have versatile workers without integration in farming practices, with two enterprises segregated in space. For example, a farm with poultry and dairy-cattle enterprises managed by the same farmer can use different fields to produce the feed required



Fig. 2. Suggested perspectives to better characterize the management of multi-species livestock farms.

for each enterprise and different marketing channels for each one. Limited integration, however, may decrease most of these potential benefits of multi-species livestock farming.

By considering these three perspectives on multi-species livestock farming, one may explore the diversity of management options and their impacts on farm sustainability more easily.

3.2. Further explore the complementarity of livestock species in multi-species settings

To explain the lack of consistent improvements in sustainability performances of multi-species livestock farms, Animut and Goetsch (2008) highlighted the maladaptiveness of some species combinations, which increases dietary overlap, parasite susceptibility or disease transfer among species. As shown by the literature reviewed, resource-use efficiency, productivity and animal health of some combinations (e.g. cattle and sheep) have been extensively studied. However, systems analysis of these combinations considering management practices and related sustainability benefits at the farm level are lacking. Other species combinations remain largely ignored (Table 1), mainly those combining ruminants and monogastrics (e.g. cattle and poultry), although they may have some potential due to their complementary diet compositions and resource-acquisition strategies. For example, co-grazing of cattle and poultry may offer several benefits: cattle protect poultry from birds of prey and provide them with another protein source, since insectivorous birds forage in dung pads of pastured cattle and feed on beetles and fly larvae (Valiela, 1969). Dung pads pecked and scratched apart by birds degrade up to one year faster than intact pads (Anderson and Merritt, 1977), contributing to rapid dung removal, which is desired (Wall and Beynon, 2012). While simultaneous co-grazing of ruminants and poultry might contradict efforts to control zoonotic microorganisms in the food chain, (e.g. *Salmonella* spp.), it may reduce parasite pressure for at least one of the species involved.

The field of ecology has long studied complementarity processes in ecosystems, particularly in pastureland ecosystems (Hooper et al., 2005; Fargione et al., 2007), and constitutes a promising source of inspiration to extend its concepts and analytical frameworks to the field of animal science. In ecology, niche differences among species are used to explain coexistence of large numbers of species and the increase in the provision of ecosystem services allowed by greater species diversity. In an ecosystem, species may compete for the same limited resources or be complementary by using different resources (Fig. 3; Hinsinger et al., 2011). Facilitation is a third relationship, with some species helping others benefit from a resource. The dietary overlap concept (Section 2.1) is an initial step toward characterizing niche differences and thus complementarity among livestock species. However, it needs to be implemented in a wider range of management situations (e.g. stocking rates, pasture types) and extended beyond the focus on grazing. At the farm level, competition, complementarity or facilitation should be determined for a wider range of resources, especially workforce, and a wider range of issues, especially animal health and welfare, depending on the transmissibility of parasites and diseases and the cohabitation ability of the species involved.

3.3. Assess and better explain the sustainability of multi-species livestock farms

The literature reviewed focused mainly on specific dimensions of farm sustainability rather than a comprehensive assessment. However, a comprehensive assessment is essential to develop consistent recommendations for improving existing multi-species livestock farms or introducing a new livestock species to a farm specialized in one livestock species. Previous analysis, assessment and modeling studies have focused mainly on single-species livestock farms, possibly due to the inherent complexity of multi-species livestock farms.

A range of sustainability assessment methods is already available in

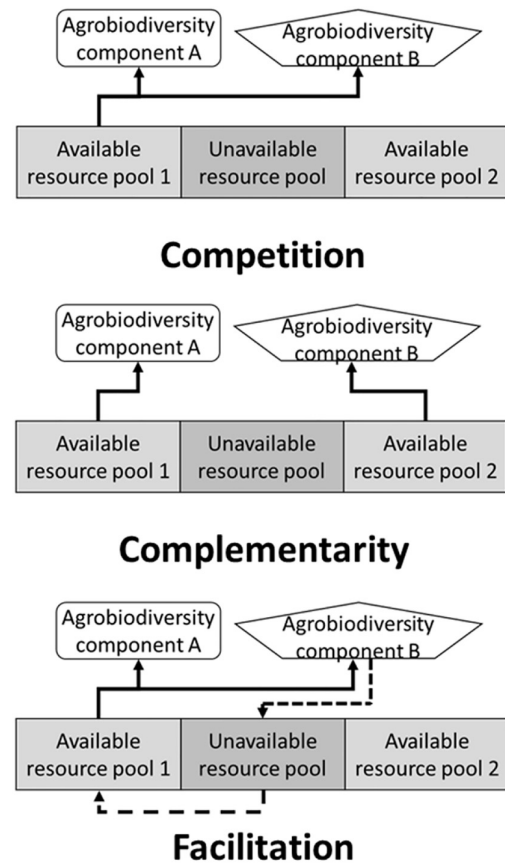


Fig. 3. Competition, complementarity (resource-use partitioning), and facilitation between two components of agrobiodiversity (A and B). Pools 1 and 2 represent different forms of a single resource (e.g. feed). Solid arrows indicate uptake of the resource, while dashed arrows indicate mechanisms by which component B can alter resource availability, increasing the size of the available pool at the expense of the unavailable pool, thereby increasing uptake of the resource by component A (facilitation). (Adapted from Hinsinger et al. (2011)).

the literature (De Olde et al., 2016), such as SAFA (FAO, 2013), IDEA (Zahm et al., 2008, 2019) and RISE (HAFL, 2014). Most of these methods cover the three common dimensions of farm sustainability - economic, environmental and social - and were built on assumptions about farm sustainability and practices. For example, high agrobiodiversity on a farm is considered to be positive without considering threshold effects, interactions, or how crops, pastures and livestock are managed in space and over time. These assumptions need to be re-considered, since it is currently unknown whether underlying assumptions and thus existing methods apply to multi-species farming systems. Moreover, certain dimensions of sustainability are more critical on multi-species livestock farms, such as work organization. Methods to assess work organization exist (e.g. Hostiou and Dedieu, 2012; Cournot et al., 2018) but have not yet been integrated into holistic sustainability assessments for farms. Two coefficients are usually calculated, one for workload and organization by relating workload to the available workforce, and another for the amount of flexible work time available. Adapting existing methods or developing new ones to assess sustainability of multi-species livestock farms is necessary (Table 1), especially to relate sustainability to the management practices implemented. It is a challenge to find simple and robust methods that can be extended to fit the complexity of multi-species livestock farms.

Another option to assess the sustainability of multi-species livestock

farms is simulation modeling, which allows the dynamic nature of the system to be related to variability in the production context. Like the sustainability assessment methods mentioned, however, available models were developed for farms with one livestock species (Rotz et al., 2005; Joven and Baumont, 2008; Vayssières et al., 2009). Furthermore, existing models usually focus on, for example, trade-offs between productivity and biodiversity conservation (Joven and Baumont, 2008), whereas a holistic and dynamic modeling approach is required to represent the complexity of multi-species livestock farming. Developments are needed to simulate different livestock species in one farming system, especially species previously overlooked (e.g. goats, broilers). Furthermore, the relationship between multiple livestock species and their impact on, for example, herbage-use efficiency or parasite load on pastures needs further investigation, because understanding these relationships is necessary to build models and ultimately assess sustainability. Based on these models, alternative scenarios of multi-species livestock farms, differing in, for example, the degree to which they integrate livestock production enterprises can be simulated to identify the minimum levels of integration required to take advantage of the benefits of livestock diversity. Moreover, models simulating a wider range of sustainability dimensions under a diversity of climatic and economic conditions should be developed.

3.4. Characterize conditions for success of and obstacles for multi-species livestock farming

The benefits of multi-species livestock farming have been mainly studied in semi-extensive (or free ranging) farms and areas but they remain under-explored in more intensive conditions. One reason may be that in intensive farms, multiple species of livestock are uncommon because of multiple lock-in effects such as those documented by Meynard et al. (2018) that hindered crop diversification in France. Crop diversification is a widely known mechanism to increase sustainability of cropping systems by, among other things, decreasing inputs, promoting ecosystem services, and stabilizing yields and income. Short-duration crop rotations with 1–3 crops remain dominant, however, in the French context described by the authors due to lock-ins that have developed in the sector. Lock-ins occur when relationships among environments, organizations, technologies, knowledge and values create strong interdependencies among stakeholders in a sector (Kallis and Norgaard, 2010). For crop diversification, several studies (Magrini et al., 2016, 2018; Meynard et al., 2018) have analyzed components of these lock-ins, which include low availability of well-suited cultivars and plant-protection solutions, scarcity of empirical data on best management options, lack of farmer knowledge and skills, logistical constraints on collection and storage of a diversity of grains, inability of value chains to process minor or emerging crops into food products and little demand by consumers for these products. Thus, lock-ins apply at all levels of agricultural products, from production to consumption.

Characterizing conditions for success of and obstacles for multi-species livestock farming is a precondition to its wider development (Table 1). This kind of socio-technical analysis will identify stakeholders active along the value chain from production to consumption, their respective objectives, work habits, and constraints. Increasing understanding should help prioritize actions (e.g. increasing genetic research focused on traits of relevance to multi-species livestock farming, inventing new forms of slaughterhouses able to process a diversity of animals, establishing empirical evidence of economic benefits of multi-species livestock farming) and organize them into pathways toward diversified livestock farms. These pathways will rely on a set of technological, organizational and institutional innovations (Magrini et al., 2016) and on simultaneous and coordinated mobilization of a wide range of stakeholders, from farmers to consumers (Meynard et al., 2018).

4. Conclusions

Multi-species livestock farms are a potential conduit to increase diversity in agriculture; however, they have not previously been studied or discussed in a comprehensive way. This review assessed the available literature concerning multi-species livestock, with a focus on farm sustainability. Many positive effects were identified, particularly in the areas of resource use efficiency, biodiversity conservation, productivity, profitability, and animal health and welfare. A limited number of negative interactions were identified, and these mainly involve the potential for inter-species transmission of parasites and pathogens.

The review also identifies four areas of needed research relating to multi-species livestock farming. These comprise better characterizing the management of multi-species livestock farms; further exploring complementarity of livestock species; developing methods for assessing farms designs in the context of sustainability, for example through the use of simulation models; and, socio-technical analysis of the conditions for success and obstacles for multi-species livestock farming. This review highlights the value and potential of multi-species livestock farms, and can assist researchers and policy makers in prioritizing efforts to promote them and improve their sustainability.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support for the MIX-ENABLE project provided by transnational funding bodies, being partners of the H2020 ERA net project, CORE Organic Cofund, and the cofund from the European Commission.

References

- Abaye, A.O., Allen, V.G., Fontenot, J.P., 1994. Influence of grazing cattle and sheep together and separately on animal performance and forage quality. *J. Anim. Sci.* 72, 1013–1022. <https://doi.org/10.2527/1994.7241013x>.
- Adler, P.B., Raff, D.A., Lauenroth, W.K., 2001. The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecol.* 128, 465–479.
- Almeida, F.A.D., Bassetto, C.C., Amarante, M.R.V., Albuquerque, A.C.A.D., Starling, R.Z.C., Amarante, A.F.T.D., 2018. Helminth infections and hybridization between *Haemonchus contortus* and *Haemonchus placei* in sheep from Santana do Livramento, Brazil. *Rev. Bras. Parasitol. Vet.* 27, 280–288.
- Anderson, D.M., 1998. Pro-active livestock management – capitalizing on animal behavior. *J. Arid Land Stud.* 7S, 113–116.
- Anderson, J.R., Merritt, R.W., 1977. The impact of foraging meadowlarks, *Sturnella neglecta*, on the degradation of cattle dung pads. *J. Appl. Ecol.* 14, 355–362.
- Anderson, D.M., Fredrickson, E.L., Estell, R.E., 2012. Managing livestock using animal behavior: mixed-species stocking and flocks. *Animal* 6, 1339–1349. <https://doi.org/10.1017/s175173111200016x>.
- Animut, G., Goetsch, A.L., 2008. Co-grazing of sheep and goats: benefits and constraints. *Small Rumin. Res.* 77, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.03.012>.
- Arundel, J.H., Hamilton, D., 1975. The effect of mixed grazing of sheep and cattle on worm burdens in lambs. *Aust. Vet. J.* 51, 436–439.
- Belay, E.d., Maddox, R.A., Williams, E.S., Miller, M.W., Gambetti, P., Schonberger, L.B., 2004. Chronic wasting disease and potential transmission to humans. *Emerg. Infect. Dis.* 10, 977–984.
- Bell, L.W., Moore, A.D., 2012. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. *Agric. Syst.* 111, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>.
- 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. *Livest. Sci.* 139, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.018>.
- Besser, T., Mann, S., 2015. Which farm characteristics influence work satisfaction? An analysis of two agricultural systems. *Agric. Syst.* 141, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.10.003>.
- Beyer, W., Turnbull, P.C.B., 2009. Anthrax in animals. *Mol. Asp. Med.* 30, 481–489.
- Blanc, F., Thériez, M., Brelurut, A., 1999. Effects of mixed-species stocking and space allowance on the behaviour and growth of red deer hinds and ewes at pasture. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 63, 41–53. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(98\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(98)00242-1).

- Bourret, V., Lyall, J., Frost, S.D.W., Teillaud, A., Smith, C.A., Leclaire, S., Fu, J., Gandon, S., Guérin, J.-L., Tiley, L.S., 2017. Adaptation of avian influenza virus to a swine host. *Virus Evol.* 3, vex007.
- Bowman, M.S., Zilberman, D., 2013. Economic factors affecting diversified farming systems. *Ecol. Soc.* 18, art33. <https://doi.org/10.5751/ES-05574-180133>.
- Braun, U., Reichle, S.F., Reichert, C., Hässig, M., Stalder, H.P., Bachofen, C., Peterhans, E., 2014. Sheep persistently infected with border disease readily transmit virus to calves seronegative to BVD virus. *Vet. Microbiol.* 168, 98–104.
- Brito, D.L., Dallago, B.S.L., Louvandini, H., dos Santos, V.R.V., Torres, S.E.F.D.A., Gomes, E.F., do Amarante, A.F.T., Melo, C.B., de McManus, C.M., 2013. Effect of alternate and simultaneous grazing on endoparasite infection in sheep and cattle. *Rev. Bras. Parasitol. Vet.* 22, 485–494.
- Cameiro dos Santos Filho, J., Hostiou, N., Damasceno, J.C., Dedieu, B., 2012. Room for manoeuvre in time of the workforce in dairy production systems. *Rev. Bras. Zootec.* 41, 2450–2457. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012001200010>.
- Chaudhry, U., Redman, E.M., Abbas, M., Muthusamy, R., Ashraf, K., Gilleard, J.S., 2015. Genetic evidence for hybridisation between *Haemonchus contortus* and *Haemonchus placei* in natural field populations and its implications for interspecies transmission of anthelmintic resistance. *Int. J. Parasitol.* 45, 149–159.
- Chavas, J.-P., 2008. On the economics of agricultural production. *Aust. J. Agric. Resour. Econ.* 52, 365–380.
- Chavas, J.P., Kim, K., 2007. Measurement and sources of economies of scope: a primal approach. *J. Inst. Theor. Econ.* 163, 411–427. <https://doi.org/10.1628/093245607781871354>.
- Cournut, S., Chauvat, S., Correa, P., Santos, Filho, Dos, J.C., Diéguez, F., Hostiou, N., Pham, D.K., Servière, G., Srairi, M.T., Turliot, A., Dedieu, B., 2018. Analyzing work organization on livestock farm by the work assessment method. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0534-2>.
- Cuchillo-Hilario, M., Wrage-Mönnig, N., Isselstein, J., 2017. Behavioral patterns of (co-) grazing cattle and sheep on swards differing in plant diversity. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 191, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.02.009>.
- Cuchillo-Hilario, M., Wrage-Mönnig, N., Isselstein, J., 2018. Forage selectivity by cattle and sheep co-grazing swards differing in plant species diversity. *Grass Forage Sci.* 73, 320–329. <https://doi.org/10.1111/gfs.12339>.
- D'Aleixis, S., Sauviant, D., Boval, M., 2014. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J. Agric. Sci.* 152, 655–666. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000622>.
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 545–555. <https://doi.org/10.1051/agro/2009053>.
- David, C., Mundler, P., Demarle, O., Ingrand, S., 2010. Long-term strategies and flexibility of organic farmers in southeastern France. *Int. J. Agric. Sustain.* 8, 305–318. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0497>.
- de Olde, E.M., Oudshoorn, F.W., Sørensen, C.A.G., Bokkers, E.A.M., de Boer, I.J.M., 2016. Assessing sustainability at farm-level: lessons learned from a comparison of tools in practice. *Ecol. Indic.* 66, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.047>.
- de Pablo-Maiso, L., Doménech, A., Echeverría, I., Gómez-Arrebola, C., de Andrés, D., Rosati, S., Gómez-Lucía, E., Reina, R., 2018. Prospects in innate immune responses as potential control strategies against non-primate Lentiviruses. *Viruses* 10, e435.
- de Roest, K., Ferrari, P., Knickel, K., 2018. Specialisation and economies of scale or diversification and economies of scope? Assessing different agricultural development pathways. *J. Rural. Stud.* 59, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.04.013>.
- Deplazes, P., Eckert, J., Samson-Himmelstjerna, G., Zahner, H., 2013. *Lehrbuch der Parasitologie für die Tiermedizin*, 3. ed. Enke Verlag, Stuttgart.
- Dulphy, J.P., Jouany, J.P., Martin-Rosset, W., Thériez, M., 1994. Aptitudes comparées de différentes espèces d'herbivores domestiques à ingérer et digérer des fourrages distribués à l'auge. *Ann. Zootech.* 43, 11–32.
- Dumont, B., Rossignol, N., Loucougaray, G., Carrère, P., Chadoeuf, J., Fleurance, G., Bonis, A., Farruggia, A., Gaucherand, S., Ginane, C., Louault, F., Marion, B., Mesléard, F., Yaverovskii, N., 2012. When does grazing generate stable vegetation patterns in temperate pastures? *Agric. Ecosyst. Environ.* 153, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.003>.
- Dumont, B., González-García, E., Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Ducrot, C., Dourmad, J.Y., Tichit, M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal* 8, 1382–1393. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001281>.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1259–1281. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>.
- Esmail, S.H.M., 1991. Multispecies grazing by cattle and sheep. *Rangelands* 13, 35–37.
- Eurostat, 2019. Farm Structure Statistics. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Farm_structure_statistics.
- FAO, 2013. Sustainability Assessment of Food and Agriculture systems (SAFA). Available at: <http://www.fao.org/nr/sustainability/sustainability-assessments-safa/en/>.
- Fargione, J., Tilman, D., Dybzinski, R., Lambers, J.H.R., Clark, C., Harpole, W.S., Knops, J.M.H., Reich, P.B., Loreau, M., 2007. From selection to complementarity: shifts in the causes of biodiversity-productivity relationships in a long-term biodiversity experiment. *Proc. Biol. Sci.* 274, 871–876. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0351>.
- Fiorelli, C., Dedieu, B., Pailleux, J.-Y., 2007. Explaining diversity of livestock-farming management strategies of multiple-job holders: importance of level of production objectives and role of farming in the household. *Animal* 1, 1209–1218. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000432>.
- Fleurance, G., Farruggia, A., Lanore, L., Dumont, B., 2016. How does stocking rate influence horse behavior, performances and pasture biodiversity in mesophile grasslands? *Agric. Ecosyst. Environ.* 231, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.044>.
- Forrest, H.L., Webster, R.G., 2010. Perspectives on influenza evolution and the role of research. *Anim. Health Res. Rev.* 11, 3–18.
- Forteau, L., Dumont, B., Sallé, G., Bigot, G., Fleurance, G., 2020. Horses grazing with cattle have reduced strongyle egg count due to the dilution effect and increased reliance on macrocyclic lactones in mixed farms. *Animal* 14, in press. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002738>.
- Fraser, M.D., Davies, D.A., Vale, J.E., Hirst, W.M., Wright, I.A., 2007. Effects on animal performance and sward composition of mixed and sequential grazing of permanent pasture by cattle and sheep. *Livest. Sci.* 110, 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.11.006>.
- Fraser, M.D., Moorby, J.M., Vale, J.E., Evans, D.M., 2014. Mixed grazing systems benefit both upland biodiversity and livestock production. *PLoS One* 9 (2), e89054.
- Gipson, T.A., Villaquiran, M., Joseph, J., Goetsch, A.L., 2003. Spatial-temporal relationships of grazing goats and sheep and their guardian dog monitored by global positioning system collars. *J. Anim. Sci.* 81 (Suppl. 1), 326.
- Göktuna, P.T., Alpaly, G., Öner, E.B., Yesilbag, K., 2017. Co-existence of bovine viral diarrhoea and border disease viruses in a sheep flock suffering from abortus and diarrhoea. *Turk. J. Vet. Anim. Sci.* 41, 590–597.
- Gunton, R.M., Petit, S., Gaba, S., 2011. Functional traits relating arable weed communities to crop characteristics. *J. Veg. Sci.* 22, 541–550. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01273.x>.
- HAFL, 2014. RISE – Getting Sustainability down to Earth. Available at: <https://www.bfch.hafl/en/research/reference-projects/riase/>.
- Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Tanaka, D.L., Sassenrath, G., 2008. Principles of integrated agricultural systems: introduction to processes and definition. *Renew. Agric. Food Syst.* 23, 265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>.
- Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., Zhang, F., 2011. P for two, Sharing a Scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiol.* 156, 1078–1086. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175331>.
- Hooper, D.U., Chapin, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A.J., Vandermeer, J., Wardle, D.A., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.* 75, 3–35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>.
- Horlings, L.G., Marsden, T.K., 2011. Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could “feed the world.”. *Glob. Environ. Chang.* 21, 441–452. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.004>.
- Hostiou, N., 2013. Work flexibility of organic suckler sheep farms in France. *Org. Agric.* 3, 111–121. <https://doi.org/10.1007/s13165-013-0050-2>.
- Hostiou, N., Dedieu, B., 2012. A method for assessing work productivity and flexibility in livestock farms. *Animal* 6, 852–862. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002084>.
- Hostiou, N., Cialdella, N., Vazquez, V., Müller, A.G., Le Gal, P.-Y., 2015. Work organization on smallholder dairy farms: a process unique to each farm. *Trop. Anim. Health Prod.* 47, 1271–1278. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0859-7>.
- Hulet, C.V., Anderson, D.M., Smith, J.N., Shupe, W.L., Taylor, C.A.J., Murray, L.W., 1989. Bonding of goats to sheep and cattle for protection from predators. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 22, 261–267.
- Illius, A.W., Gordon, I.J., 1987. The allometry of food intake on grazing ruminants. *J. Anim. Ecol.* 56, 989–999.
- INRA, 2015. In: Martin-Rosset, W. (Ed.), *Equine Nutrition. INRA Nutrient Requirements, Recommended Allowances and Feed Tables*. Wageningen Academic Publishers, the Netherlands (691 pp).
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T.M., Bonin, C., Bruelheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J.N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S.T., Mori, A.S., Naeem, S., Niklaus, P.A., Polley, H.W., Reich, P.B., Roscher, C., Seabloom, E.W., Smith, M.D., Thakur, M.P., Tilman, D., Tracy, B.F., van der Putten, W.H., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W.W., Wilsey, B., Eisenhauer, N., 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* 526, 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>.
- Jansen, K., 2000. Labour, livelihoods, and the quality of life in organic agriculture in Europe. *Biol. Agric. Hortic.* 17, 247–278.
- Jordan, H.E., Phillips, W.A., Morrison, R.D., Doyle, J.J., McKenzie, K., 1988. A 3-year study of continuous mixed grazing of cattle and sheep: parasitism of offspring. *Int. J. Parasitol.* 18, 779–784. [https://doi.org/10.1016/0020-7519\(88\)90119-1](https://doi.org/10.1016/0020-7519(88)90119-1).
- Jouven, M., Baumont, R., 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. *Agric. Syst.* 96, 260–272.
- Kallis, G., Norgaard, R.B., 2010. Coevolutionary ecological economics. *Ecol. Econ.* 69 (4), 690–699.
- Kingwell, R., 2011. Managing complexity in modern farming*. *Aust. J. Agric. Resour. Econ.* 55, 12–34. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2010.00528.x>.
- Kirkegaard, J.A., Conyers, M.K., Hunt, J.R., Kirkby, C.A., Watt, M., Rebetzke, G.J., 2014. Sense and nonsense in conservation agriculture: principles, pragmatism and productivity in Australian mixed farming systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 187, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.011>.
- Kitessa, S.M., Nicol, A.M., 2001. The effect of continuous or rotational stocking on the intake and live-weight gain of cattle co-grazing with sheep on temperate pastures. *Anim. Sci.* 72, 199–208. <https://doi.org/10.1017/S1357729800055697>.
- Kremen, C., Iles, A., Bacon, C., 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol. Soc.* 17. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2012\)17\[1:DA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2012)17[1:DA]2.0.CO;2).

- org/10.5751/ES-05103-170444.
- Kruess, A., Tschamtké, T., 2002. Grazing intensity and the diversity of grasshoppers, butterflies, and trap-nesting bees and wasps. *Conserv. Biol.* 16, 1570–1580. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01334.x>.
- Lebacqz, T., Baret, P.V., Stilmant, D., 2013. Sustainability indicators for livestock farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 311–327. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>.
- Liang, Y., Wai Hui, C., You, F., 2018. Multi-objective economic-resource-production optimization of sustainable organic mixed farming systems with nutrient recycling. *J. Clean. Prod.* 196, 304–330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.040>.
- Loiseau, P., Martin-Rosset, W., 1988. Evolution à long terme d'une lande de montagne pâturée par des bovins et des chevaux. I. Conditions expérimentales et évolution botanique. *Agronomie* 8, 873–880.
- Loucougaray, G., Bonis, A., Bouzillé, J.B., 2004. Effects of grazing by horses and/or cattle on the diversity of coastal pastures in western France. *Biol. Conserv.* 116, 59–71.
- Magrini, M.-B., Anton, M., Cholez, C., Corre-Hellou, G., Duc, G., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Pelzer, E., Voisin, A.-S., Walrand, S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecol. Econ.* 126, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>.
- Magrini, M.-B., Anton, M., Chardigny, J.-M., Duc, G., Duru, M., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Micard, V., Walrand, S., 2018. Pulses for sustainability: breaking agriculture and food sectors out of lock-in. *Front. Sustain. Food Syst.* 2, 64. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00064>.
- Mahieu, M., 2013. Effects of stocking rates on gastrointestinal nematode infection levels in a goat/cattle rotational stocking system. *Vet. Parasitol.* 198, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.08.029>.
- Marley, C.L., Fraser, M.D., Davies, D.A., Rees, M.E., Vale, J.E., Forbes, A.B., 2006. The effect of mixed or sequential grazing of cattle and sheep on the faecal egg counts and growth rates of weaned lambs when treated with anthelmintics. *Vet. Parasitol.* 142, 134–141.
- Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.-A., Asai, M., Sarthou, J.-P., Duru, M., Therond, O., 2016. Crop-livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 53. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>.
- Matthews, D.H., Foote, W.C., Hurst, R.L., Bowns, J.E., 1986. Response of cattle and sheep under various grazing systems on high elevation summer ranges. *Prof. Anim. Sci.* 2, 18–23. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)32429-3](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)32429-3).
- Menard, C., Duncan, P., Fleurance, G., Georges, J.Y., Lila, M., 2002. Comparative foraging and nutrition of horses and cattle in European wetlands. *J. Appl. Ecol.* 39, 120–133.
- Meyer, H.H., Harvey, T.G., 1985. Multispecies livestock systems in New Zealand. In: *Proceedings of a Conference on Multispecies Grazing*, 25–28 June 1985. Winrock International, Morrilton, AR, pp. 84–92.
- Meynard, J.-M., Charrier, F., Pares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., Messéan, A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>.
- Minguijón, E., Reina, R., Pérez, M., Polledo, L., Villoria, M., Ramírez, H., Leginagoikoa, I., Badiola, J.J., García-Marín, J.F., de Andrés, D., Luján, L., Amorena, B., Juste, R.A., 2015. Small ruminant lentivirus infections and diseases. *Vet. Microbiol.* 181, 75–89.
- Moloney, B.J., Whittington, R.J., 2008. Cross species transmission of ovine John's disease from sheep to cattle: an estimate of prevalence in exposed susceptible cattle. *Aust. Vet. J.* 86, 117–123.
- Morel, K., San Cristobal, M., Léger, F.G., 2017. Small can be beautiful for organic market gardens: an exploration of the economic viability of French microfarms using MERLIN. *Agric. Syst.* 158, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.008>.
- National Research Council, 2007. Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats. In: *Cervids, and New World Camelids*. The National Academies Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/11654>.
- Nettleton, P.F., Gilray, J.A., Russo, P., Dliissi, E., 1998. Border disease of sheep and goats. *Vet. Res.* 29, 327–340.
- Nolan, T., Connolly, J., 1989. Mixed v. mono-grazing by steers and sheep. *Anim. Sci.* 48, 519–533.
- Norton, B.W., Kennedy, P.J., Hales, J.W., 1990. Grazing management studies with Australian cashmere goats. 3. Effects of season on the selection of diet by cattle, sheep, and goats from two tropical grass-legume pastures. *Aust. J. Exp. Agric.* 30, 783–788.
- Nozières, M.O., Moulin, C.H., Dedieu, B., 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal* 5, 1442–1457. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000486>.
- Olson, K.C., Wiedmeier, R.D., Bowns, J.E., Hurst, R.L., 1999. Livestock response to multispecies and deferred-rotation grazing on forested rangeland. *J. Range Manag.* 52, 462. <https://doi.org/10.2307/4003773>.
- Owen, J.L., Yang, T., Mohamadzadeh, M., 2015. New insights into gastrointestinal anthrax infection. *Trends Microbiol.* 21, 154–163.
- Passler, T., Walz, P.H., 2010. Bovine viral diarrhoea virus infections in heterologous species. *Anim. Health Res. Rev.* 11, 191–205.
- Patkowski, K., Pluta, M., Lipiec, A., Gregula-Kania, M., Gruszecki, T.M., 2018. Foraging behavior patterns of sheep and horses under a mixed species grazing system. *J. Appl. Anim. Welf. Sci.* 3, 1–7.
- Raymond, G.J., Bossers, A., Raymond, L.D., O'Rourke, K.I., McHolland, L.E., Bryant III, P.K., Miller, M.W., Williams, E.S., Smits, M., Caughey, B., 2000. Evidence of a molecular barrier limiting susceptibility of humans, cattle and sheep to chronic wasting disease. *EMBO J.* 19, 4425–4430.
- Riggs, N.L., 2001. Experimental cross-infections of *Haemonchus placei* (place, 1893) in sheep and cattle. *Vet. Parasitol.* 94, 191–197.
- Rogdo, T., Hektoen, L., Slettemeås, J.S., Jørgensen, H.J., Østerås, O., Fjeldaas, T., 2012. Possible cross-infection of *Dichelobacter nodosus* between co-grazing sheep and cattle. *Acta Vet. Scand.* 54, 19.
- Rolo, V., Rivest, D., Lorente, M., Kattge, J., Moreno, G., 2016. Taxonomic and functional diversity in Mediterranean pastures: insights on the biodiversity-productivity trade-off. *J. Appl. Ecol.* <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12685>.
- Rook, A.J., Dumont, B., Isselstein, J., Osoro, K., WallisDeVries, M.F., Parente, G., Mills, J., 2004. Matching type of livestock to desired biodiversity outcomes in pastures – a review. *Biol. Conserv.* 119, 137–150.
- Rotz, C.A., Buckmaster, D.R., Comerford, J.W., 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm systems. *J. Anim. Sci.* 83, 231–242.
- Russelle, M.P., Entz, M.H., Franzluebbers, A.J., 2007. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America. *Agron. J.* 99, 325–334. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0139>.
- Ryschawy, J., Martin, G., Moraine, M., Duru, M., Therond, O., 2017. Designing crop-livestock integration at different levels: toward new agroecological models? *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 108, 5–20. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9815-9>.
- Sanon, H.O., Kaboré-Zoungrana, C., Ledin, I., 2007. Behaviour of goats, sheep and cattle and their selection of browse species on natural pasture in a Sahelian area. *Small Rumin. Res.* 67, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.09.025>.
- Sehested, J., Søgaard, K., Danielsen, V., Roepstorff, A., Monrad, J., 2004. Grazing with heifers and sows alone or mixed: herbage quality, sward structure and animal weight gain. *Livest. Prod. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2003.11.008>.
- Smith, M.E., Linnell, J.D.C., Odden, J., Swenson, J.E., 2000. Review of methods to reduce livestock degradation: I guardian animals. *Acta Vet. Scand.* 50, 279–290.
- Sneessens, I., Sauvé, L., Randrianasolo-Rakotobe, H., Ingrand, S., 2019. A framework to assess the economic vulnerability of farming systems: application to mixed crop-livestock systems. *Agric. Syst.* 176, 102658.
- Sormunen-Cristian, R., Manninen, M., Oksanen, A., 2012. Mixed grazing by suckler cows, calves and lambs in a cultivated pasture. *Livest. Sci.* 145, 258–265.
- Soussana, J.F., Lemaire, G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>.
- Squires, V.R., 1982. Dietary overlap between sheep, cattle, and goats when grazing in common. *J. Range Manag.* 35, 116–119.
- Stark, F., González-García, E., Navegantes, L., Miranda, T., Pocard-Chapuis, R., Archimede, H., Moulin, C.H., 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>.
- Sumberg, J., 2003. Toward a dis-aggregated view of crop-livestock integration in Western Africa. *Land Use Policy* 20, 253–264. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00021-8).
- Syrjälä, P., Saarinen, H., Laine, T., Kokkonen, T., Veijalainen, P., 2006. Malignant catarrhal fever in pigs and a genetic comparison of porcine and ruminant virus isolates in Finland. *Vet. Rec.* 159, 406–409.
- Taleski, V., Zerva, L., Kantardžiev, T., Cvetic, Z., Erski-Biljic, M., Nikolovski, B., Bosnjakovski, J., Katalinic-Jankovic, V., Panteliadou, A., Stojkoski, S., Kirandziski, T., 2002. An overview of the epidemiology and epizootology of brucellosis in selected countries of central and Southeast Europe. *Vet. Microbiol.* 90, 147–155.
- Taylor Jr., C.A., 1985. Multi-species grazing research overview (Texas). In: *Proceedings of a Conference on Multispecies Grazing*, 25–28 June 1985. Winrock International, Morrilton, AR, pp. 65–83.
- ten Napel, J., van der Veen, A.A., Oosting, S.J., Koerkamp, P.W.G.G., 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livest. Sci.* 139, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.007>.
- Thézier, M., Petit, M., Martin-Rosset, W., 1994. Caractéristiques de la conduite des troupeaux allaitants en zones difficiles. *Ann. Zootech.* 43, 33–47.
- Tomich, T.P., Brodt, S., Ferris, H., Galt, R., Horwath, W.R., Kebreab, E., Leveau, J., Liptzin, D., Lubell, M., Merel, P., Michelmore, R., Rosenstock, T., Scow, K., Six, J., Williams, N., Yan, L., 2011. Agroecology: a review from a global-change perspective. *Ssm.* <https://doi.org/10.3109/10428199709068284>.
- Toro-Mujica, P., García, A., Gómez-Castro, G., Acero, R., Perea, P., Rodríguez-Estévez, V., Aguilar, C., Vera, R., 2011. Technical efficiency and viability of organic dairy sheep farming systems in a traditional area for sheep production in Spain. *Small Rumin. Res.* 100, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.06.008>.
- Uematsu, H., Mishra, A., 2012. Organic farmers or conventional farmers: where's the money? *Ecol. Econ.* 78, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.03.013>.
- Umberger, S.H., McKinnon, B.R., Eller Jr., A.L., 1983. Adding Sheep to Cattle for Increased Profits. *Sheep Science and Technology*. Virginia Cooperative Extension Service Publication, Blacksburg, VA, pp. 410–851.
- Valiela, I., 1969. An experimental study of the mortality factors of larval *Musca autumnalis* DeGeer. *Ecol. Monogr.* 39, 199–225.
- van Keulen, H., Schiere, H., 2004. Crop-livestock systems: Old wine in new bottles? In: *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia, 26 Sep. – 1 Oct. 2004. Available at: http://www.cropscience.org.au/icsc2004/symposia/2/1/211_vankeulenh.htm.
- Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.M., Lecomte, P., 2009. GAMEDE: a global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises part I - whole-farm dynamic model. *Agric. Syst.* 101, 128–138.
- Veyssat, P., Lherm, M., Bébin, D., Rouleau, M., 2014. Mixed crop-livestock farming systems: a sustainable way to produce beef? Commercial farms results, questions and perspectives. *Animal* 8, 1218–1228. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000378>.
- Walker, J.W., 1994. Multispecies grazing: the ecological advantage. *Sheep Res. J.* 52–64.
- Wall, R., Beynon, S., 2012. Area-wide impact of macrocyclic lactone parasiticides in cattle dung. *Med. Vet. Entomol.* 26, 1–8.
- WallisDeVries, M.F., Parkinson, A.E., Dulphy, J.P., Sayer, M., Diana, E., 2007. Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing

- systems. 4. Effects on animal diversity. *Grass For. Sci.* 62, 185–197. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00568.x>.
- Wang, L., Delgado-Baquerizo, M., Wang, D., Isbell, F., Liu, J., Feng, C., Liu, J., Zhong, Z., Zhu, H., Yuan, X., Chang, Q., Liu, C., 2019. Diversifying livestock promotes multi-diversity and multifunctionality in managed pastures. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116, 6187–6192. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807354116>.
- Wilson, A.D., Graetz, R.D., 1980. Cattle and sheep production on an *Atriplex vesicaria* (saltbush) community. *Aust. J. Agric. Res.* 31, 369–378.
- Wright, I.A., Jones, J.R., Davies, D.A., Davidson, G.R., Vale, J.E., 2006. The effect of sward surface height on the response to mixed grazing by cattle and sheep. *Anim. Sci.* 82, 271–276. <https://doi.org/10.1007/s10519-005-9029-4>.
- Zahm, F., Viaux, P., Vilain, L., Girardin, P., Mouchet, C., 2008. Assessing farm sustainability with the IDEA method – from the concept of agriculture sustainability to case studies on farms. *Sustain. Dev.* 16, 271–281.
- Zahm, F., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., Boureau, H., Del’homme, B., Gafsi, M., Gasselin, P., Girard, S., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A., Redlingshöfer, B., 2019. Évaluer la durabilité des exploitations agricoles. La méthode IDEAv4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cah. Agric.* 28, 5.
- Zander, K., Hamm, U., 2010. Consumer preferences for additional ethical attributes of organic food. *Food Qual. Prefer.* 21, 495–503. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2010.01.006>.

CHAPITRE 2 :
ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS
TO LINK INTERACTIONS BETWEEN SYSTEM
COMPONENTS AND PERFORMANCES
IN MULTISPECIES LIVESTOCK FARMS

Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms.

Lucille Steinmetz *, Patrick Veysset, Marc Benoit, Bertrand Dumont.

Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

Accepted for publication in *Agronomy for Sustainable Development*, April 20th 2021 (DOI: 10.1007/s13593-021-00696-x)

Abstract

Organic farming relies on ecological processes to replace chemical inputs, and organic farmers have developed various strategies, including several forms of diversification, to remain viable. Herein, we hypothesized that diversified organic farming systems can enhance their performance by increasing the level of interactions between system components. We therefore performed an ecological network analysis to characterize both within-farm and farm-environment interactions. Flows were expressed on an annual basis according to the quantity of biomass exchanges multiplied by nitrogen content. Seventeen organic farms were surveyed in French grassland areas, each associating beef cattle with either sheep, pigs or poultry. The ecological network analysis was then coupled with the assessment of farm economic, environmental, and social performances. An hierarchical clustering on principal components distinguished five groups of farms based on farm and herd size, presence of monogastrics, percentage of crops in the farm area and system activity indicators. A large farm size, in terms of area or number of workers, can limit the implementation of a homogeneous flow network within the system. A higher level of within-system interactions did not lead to better farm economic, environmental and social performances. Systems with large monogastric production enterprises were highly dependent on inputs, which led to less homogeneous flow networks and a poor farm nitrogen balance without gaining economic efficiency. Managing a complex system with a dense and complex flow network did not appear to increase farmers' mental workload. To our knowledge, this study is the first to quantify farm-scale interactions using ecological

network indicators in temperate livestock farms and to analyze the links between farm performance and operating processes. The ecological network analysis thus potentially provides a common framework for comparing a wide range of livestock farms. Given the variability of multispecies livestock farms, a larger database will be used to extend our conclusions.

Keywords: organic farming, indicators, beef cattle, sheep, poultry, pig, efficiency.

1. Introduction

Agricultural production systems have become highly specialized, resulting in the intensive use of various production factors (labor, inputs and capital) and generating direct and indirect negative impacts on the environment. A broad consensus has been reached on the need to move away from the most heavily industrial forms of livestock farming and toward more sustainable models. These models would provide fair and stable remuneration for farmers, preserve natural resources and limit environmental losses to the atmosphere and hydrosphere while meeting societal expectations in terms of human and animal welfare, health, and product quality (ten Napel et al. 2011). Diversified systems, which intentionally include functional agrobiodiversity, i.e., diversity of crops, pastures, and animals bred by farmers (Kremen et al. 2012), are highly valued in agroecology and organic farming (Kremen et al. 2012; Ponisio et al. 2015; Dumont et al. 2020). Diversified systems could indeed make farm components interact in time and space to benefit from synergies, to be less dependent on inputs and to take advantage of ecosystem services (Hendrickson et al. 2008). For instance, cograzing by sheep and cattle is assumed to increase resource-use efficiency through their complementary feeding habits (d'Alexis et al. 2014) and to reduce the sheep parasite burden (Marley et al. 2006), while combining crops and livestock reduces the dependence on external inputs by enhancing farm self-sufficiency for feed and using manure instead of mineral fertilizers. These interactions result from practices adopted by farmers and define how the system operates. Within diversified systems, farm operations and how they relate to farm performances have been well analyzed in integrated crop-livestock systems (Bell and Moore 2012; Ryschawy et al. 2014), but not as much in multispecies livestock (MSL) systems, i.e., where two or more animal species are kept on the same farm

simultaneously (Martin et al. 2020). In this study, we aim to fill this knowledge gap. In particular, we want to describe within-system interactions and system-environment interactions as a proxy of farm operations and link farm operations to the performance of MSL farms.

Our study is based on organic farms in French grassland areas. We focus on organic farming (OF) systems, as these systems are assumed to optimize natural processes to face the challenge of not using chemical inputs. Indeed, OF is characterized by a strong link to the soil and a ban on chemical inputs, according to European Council Regulation No 834/2007 (EU 2007). After presenting the study sample of mixed beef cattle farms associated with either sheep, pigs or poultry (Fig. 1), we applied an ecological network analysis (ENA) to represent farm operations, as previously conducted by Stark et al. (2018) in tropical crop-livestock systems. We then define farm clusters based on farm structural characteristics and ecological network indicators and compare farm technical efficiency, farm nitrogen (N) balance, and farmer wellbeing among clusters. Our analysis of farm operations is thus coupled to a multicriteria assessment of farm performance based on the three pillars of sustainability – economy, environment and society. This comparative farm-scale study is indeed the first to analyze processes operating in three types of MSL farms with the same method and then test how within-system diversity and interactions are linked to multiperformance. These ecological network and performance indicators will enable a survey of a number of multispecies farms in a reasonable amount of time, thus allowing us to analyze the range of farmers' adaptive strategies and farm resilience.

Figure 1: Our farm surveys were conducted on three types of multispecies livestock farms, where beef cattle were associated with pigs, sheep or poultry Photo credits: Lucille Steinmetz, Eglantine Thiery and Solenn Brioude.



2. Materials and methods

2.1. Farm sample and sampling scheme

We sampled farms according to several criteria. First, eligible farms had two commercial livestock production enterprises, i.e., beef cattle associated with either meat sheep, pigs or poultry. Second, the whole farm was managed according to OF principles and had completed the conventional-to-organic conversion period. Third, at least a half full-time equivalent (FTE) worker was managing the system to ensure that the farms sampled were viable enterprises.

Once these three criteria were met, we opted to sample grassland farms at different altitudes (in lowlands and uplands) with contrasting marketing strategies (direct sales, integrated supply chain, etc.) and with or without crops or on-farm processing (meat-cutting workshop, mill, etc.). Farms in the sample sometimes counted a third animal species (e.g., horses or backyard chickens), but not for economic purposes.

Farms were surveyed during the MixEnable project (<https://projects.au.dk/coreorganiccofund/core-organic-cofund-projects/mix-enable/>). We consulted the administrative and advisory services of the Auvergne, Limousin and Occitanie regions to obtain a list of farms meeting these criteria. Sixteen farmers agreed to be interviewed. An additional farm is the Salamix farmlet experiment (<https://www6.inrae.fr/experimentations-systeme/Les-experimentations/Elevage/Mixte/Salamix>), which is a beef cattle–sheep grazing system managed by a half FTE worker at the INRAE Herbipôle research facility in Massif Central uplands (45°39'02.9 N 2°44'01.0 E).

In the final sample of 17 organic farms, beef cattle were associated with meat sheep (n=7), pigs (n=6) or poultry (n=4), with each species representing at least 10% of farm livestock units (LUs). Three farms with direct sales were below this species-ratio threshold but were retained to increase the diversity of the sampled MSL systems. The LU concept is widely employed in livestock farming system analyses to quantify the farm stocking density. It is based on the same shared unit among species and types of animal products but does not account for within-species variability in animal size and feeding requirements. Hence, for herbivores, we adjusted the LU coefficients according to cow and ewe metabolic weight to account for breed differences, as metabolic weight is the variable used to calculate maintenance requirements and additional

requirements for production and draught power (IPCC 2019). We therefore multiplied the LU coefficient of each animal category by the ratio of the metabolic weight of the dam to the metabolic weight of a baseline dam counted as one animal unit (Smith et al. 2017). In France, one LU corresponds to a 600 kg liveweight dairy cow producing 3000 kg of milk and eating 3000 feed units (FU) per year (where 1 FU is the energy content of 1 kg of barley; INRA 2018) or 4500 kg of dry matter for forages (Institut National de Gestion et d'Economie Rurale 1989). Based on this information and using an equivalence based on metabolic weight, a standard meat ewe weight of 52 kg corresponds to 0.15 LU. Monogastric LU coefficients were adapted based on energy and thus concentrate consumption in OF with the help of experts (Antoine Roinsard, ITAB, France and Marie Moerman, CRA-W, Belgium). We considered that an organic finishing pig consumes an average of 420 kg of concentrate (1 kg concentrate=1 FU) regardless of the age at slaughter; therefore, we used a coefficient of 0.14 LU ($0.14=420/3000$) for each pig sold. An organic sow consumes an average of 1500 kg of concentrate in one year, and all types of systems combined correspond to a coefficient of 0.5 LU ($0.5 = 1500/3000$). Replacement sows were counted for 0.14 LU and piglets for 0.055 LU (Cohen and Zahm 2011). Organic laying hens consume an average of 44.5 kg of concentrate per year, corresponding to 0.014 LU ($0.014= 44.5/3000$), while organic broilers consume an average of 6.2 kg of concentrates regardless of the length of the rearing period, which corresponds to 0.002 LU ($0.002= 6.2/3000$) for each broiler.

2.2. Data collection

The survey was built to obtain the data needed to obtain an overview of the farm structure, management and performance in a reasonable time, i.e., no more than 3-4 hours for the whole survey (a necessary condition for farmers to accept to receive us). It was composed of eight parts: farm structure (i.e., agricultural area and numbers of full-time and part-time workers), livestock, pastures, crops, sales, input purchased and use of byproducts, economics and farmers' perceptions of their work. Each farmer was visited once for the 3-4 hour interview, and many questions assessing quantitative or binary data were asked. Open-ended questions were also asked on practices related to grazing and pasture, effluent and crop management. Farmers were also asked to provide (for later office analyses) the farm's accounts to calculate economic and quantitative indicators of sales and purchased inputs. Economic data were recorded for 2017, which is considered an average year in terms of climate and market conditions. Only 13 of the

16 commercial farmers agreed to share their farm's accounts; therefore, the economic assessment was not performed for three farms or for the INRAE farmlet experiment.

Table 1: Principal nitrogen coefficients used in the analysis. DM: dry matter, LW: liveweight; FM: fresh matter, PG: permanent grassland; TG: temporary grassland

Product	Nitrogen content	Unit	Source
Cereals	19	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
Mix cereal legumes	21.5	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
Legume grain	37.5	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
Crop residues	15.2	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
Cover crop	20.6	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
Straw	5.6	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
PG grass	22.4	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
PG hay, bale, and silage	17.6	kg N. T DM ⁻¹	INRA, 2018
TG grass	25.6	kg N. T DM ⁻¹	Pelletier, 2011
TG hay, bale, and silage	21.3	kg N. T DM ⁻¹	Pelletier, 2011
Seed	0.2	kg N. T DM ⁻¹	Comifer, 2013
Beef cattle	25.28	kg N. T LW ⁻¹	Laisse et al., 2018
Meat sheep	28.8	kg N. T LW ⁻¹	Laisse et al., 2018
Pig	25.8	kg N. T LW ⁻¹	Laisse et al., 2018
Broiler	28.96	kg N. T LW ⁻¹	Laisse et al., 2018
Hen	16.48	kg N. T LW ⁻¹	Laisse et al., 2018
Egg	19.2	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Powdered milk	36	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Beef cattle feed	28.8	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Meat sheep feed	44.8	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Pig feed	27.2	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Broiler feed	35.2	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Hen feed	26.4	kg N. T FM ⁻¹	Idele, 1999
Mixed cattle–sheep manure	6.4	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013
Mixed cattle–pig manure	6.9	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013
Mixed cattle–poultry manure	15.4	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013
Mixed cattle–sheep compost	6.7	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013
Mixed cattle–pig compost	6.5	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013
Mixed cattle–poultry compost	14.65	kg N. T FM ⁻¹	Personal calculation based on Comifer, 2013

2.3. Farm operating analysis integrating the ecological network analysis

We used ENA, a holistic approach, to describe, quantify and analyze interactions among farm components. First developed for econometrics, Hannon (1973) applied this input-output analysis to ecology to describe the structure of the ecosystem and quantify within-system relationships. Rufino et al. (2009) applied a network analysis to “quantify the degree of integration and diversity of farm household systems using a set of indicators”. Stark et al. subsequently proposed a new way of understanding and characterizing complex systems by considering the interactions between system components using indicators derived from ENA and used this method to analyze the benefits of crop-livestock integration in Latino-Caribbean farms (Stark et al. 2016, 2018). Here, we adapt this conceptual model to the case of MSL farms in temperate areas. Model implementation involved two stages: conceptualization and modeling.

The conceptualization stage consisted of defining system boundaries - in space and time - and components and identifying interactions among system components and between the system and its environment. Here, we worked at the farm level and adapted the segmentation of system components to fit the study objectives. Two animal components (beef cattle plus either meat sheep, pigs or poultry) accounted for livestock, possibly with a third not-for-profit animal component being added to some farms. Annual grain crops and forage crops (such as corn silage or forage meslin) were aggregated into a single crop component. Grasslands were subdivided into two components, i.e., permanent (PG) or temporary (TG) grasslands, as each has its own management practices and a specific role in coupling carbon and N cycles. Consistent with Stark’s model (Stark et al. 2016), we represented effluent and food storage as two distinct components. This distinction provided a link to the conceptual framework for levels of crop-livestock integration proposed by Bell and Moore (2012). We represented direct and indirect flows between components. For example, between grasslands and animals, direct flows occurred during grazing (grass intake and dejection) and were collocated interactions. Indirect flows relied on stored fodder or manure flows and were segregated interactions between animals and land. For example, animal dejections indoor were stored and then allocated to PG, TG or crops according to farmer strategy. We split the fodder and grain storage sites to represent fodder flows from catch crops or cover crops separately from grain flows. In the present study, a cover crop was defined as a fast-growing crop that was grown between successive sowings

of a main crop. It could be destroyed and left on the field, grazed by livestock or harvested for silage. One or more processing components, such as a meat-cutting plant or a mill, were added to some farms. Inputs corresponded to all the biomass entering the farm gate, i.e., feed, animals, organic fertilizers, seeds, and manure, whether purchased, received or exchanged with neighbors. Input flows came from outside the system and arrived directly to the component where they were used. Outputs included sold, self-consumed or exchanged farm products. Plant and effluent outflows left the system from their respective storage component, while animal outflow left the system from the animal component. On-farm processed products left the system from the processing component. Interactions corresponded to biomass flows between components or with the environment, and they reflected management practices such as feeding, harvesting and manuring. The system runs over a production cycle of one year, and thus we assessed all the flows (purchases, sales, agricultural practices) and performances on this yearly basis.

Modeling consisted of selecting a unit and quantifying flows and storage changes. Flows were reported annually based on the quantity of biomass exchanged and multiplied by the N content (Table 2). We chose N as a common unit because N is an essential and mostly limiting nutrient in agriculture (Rufino et al. 2009). Moreover, N is viewed as a resource supporting production and as an environmental burden. Some biomass flows were not recorded on-farm and had to be estimated, such as grass intake and dung and urine excretions. Forage intake from cover crops or crop residues was estimated according to theoretical animal requirements of 4500 kg of dry matter per LU per year for the standard dairy cow (Institut National de Gestion et d'Economie Rurale 1989), number of grazing days and herd size. Theoretical animal requirements were used, assuming that the needs of the animals were covered. Grass intake on pastures was estimated on a daily basis from animal requirements minus the consumption of hay and silage and estimated forage intake of cover crops and crop residues.

For animal components, the total amount of N excreted was calculated as the difference between N inputs (feed and animals purchased) and N outputs (sales or self-consumption). Effluent-related gaseous emissions were deducted from the N excreted to estimate the amount of N reaching the ground. These effluent-related gaseous emissions were calculated using the method reported by Gac et al. (2007), accounting for farming practices and the type of manure. Nitrogen that is not lost is assumed to be applied on pastures or crops. Plowing a TG makes N available for the next crop. The amount of N released after plowing grassland depends on the

nature of the soil, age of the grassland, and grazing practice (Davies et al. 2001). However, as this accurate information was not available from the surveys, we worked with a fixed value of 100 kg N.ha⁻¹ (Comifer 2013) that was multiplied by the average area of TG turned into cropland area each year. As grasslands were separated into TG and PG, we allocated forage production (grazed and harvested) to these two categories. This information was unable to be collected in the surveys, as the farmers were unable to provide a detailed grazing schedule. We thus proposed an approach that allocates fodder production to the TG and PG according to the management method. This approach required a series of assumptions: (1) a grassland that was only mowed was qualified as TG, as it was probably a pure legume or very productive grassland; (2) ‘harvested then grazed’ grassland area was compared to the TG area. If the former was higher than the latter, then we considered that all TGs were ‘harvested then grazed’, and some PGs were also managed in this manner to obtain the hectares of ‘harvested then grazed’ grasslands. If the ‘harvested then grazed’ grassland area was less than TG area, then the ‘harvested then grazed’ grassland area was considered as TG; (3) a grassland that was only grazed was considered as non mechanizable and therefore as PG; and (4) wrapped-bale and grass silage were produced by mowing TG. These assumptions allowed us to calculate the relative share of hay (for example) area from TG and PG. Knowing the total quantity of forage (hay, silage and wrapped) produced over the year and the distribution ratios between TG and PG enabled us to allocate the quantities of harvested forage to PG and TG components. We then calculated a ‘corrected fodder stocking rate’, i.e., the number of herbivore LUs per fodder area (grassland + forage area) corrected by the number of LU equivalents fed with fodder from crops (intercropped and covered) and fodder purchased off-farm. This corrected fodder stocking rate allowed us to estimate a potential yield for grassland. We considered a similar potential yield for both TG and PG, as (i) PGs were productive mesophile grasslands and (ii) no additional information was provided by farmers. This potential yield enabled us to calculate the total potential production in tons of dry matter for each component. We then deducted the respective quantities of forage harvested to estimate the amount of grass potentially grazed in TG and PG.

N losses (run-off, leaching and volatilization) largely depend on soil type, climate and plot management. Accounting for these factors would require many approximations. For instance, the soil type cannot be precisely characterized, as some of the farms are located in areas where the soil type is not registered on national soil maps, while different soil types are also present on the same farm. We therefore did not quantify N losses at the farm level. N symbiotic fixation

and N deposition were also not considered in the farm operation model to ensure a consistent input-output approach, as described in the studies by Rufino et al. (2009) and Stark et al. (2018). As some systems were not at equilibrium, inventory changes (end stock – beginning stock) were considered by adding positive changes to exports and negative changes to imports.

2.4. Matrix construction and selected ENA indicators

A matrix was then created with rows as the origin of N flows (0 to n components) and columns as the destination of N flows (1 to n+2 components), where n is the number of system components. The value of the flow reported in kg of N per hectare of usable agricultural area (UAA) per year is at the intersection. Row 0 corresponds to the inflows, i.e., imports (purchases). The last column corresponds to nonvaluable outflows, such as animal losses and gaseous emissions, and the penultimate column corresponds to valuable outflows sold, exchanged with neighbors, or self-consumed.

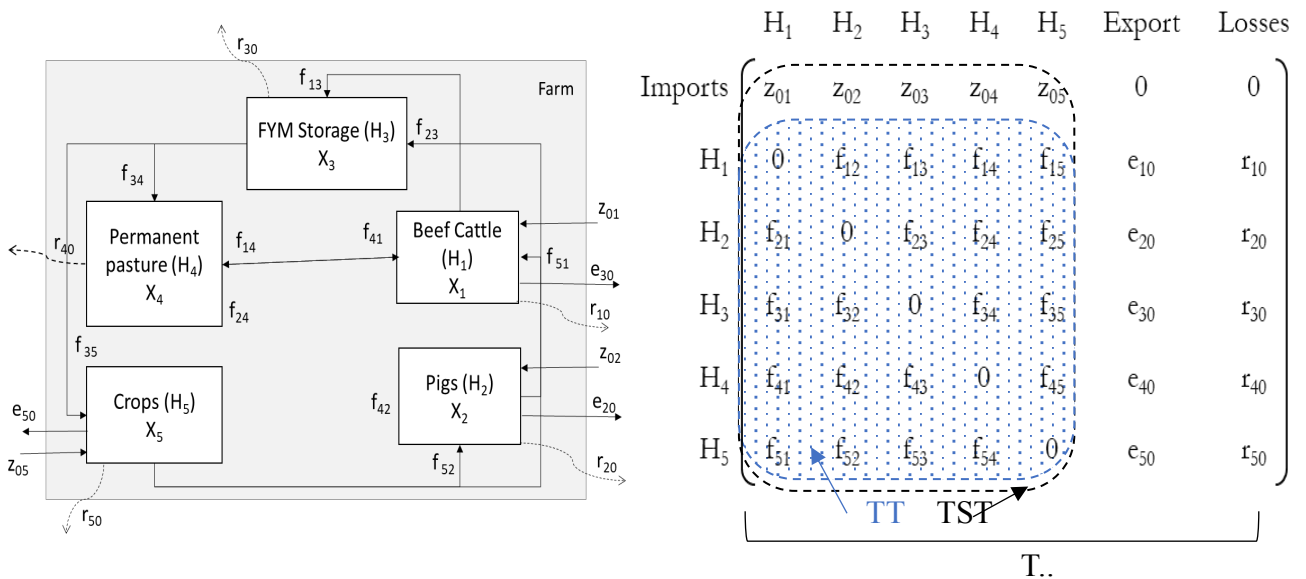
Five network analysis indicators were calculated from this matrix, as described below. System activity corresponds to the total system throughflow (TST), which represents the sum of all flows circulating throughout the system, including both inflows and throughflows (Finn 1980; see Fig. 2). Total internal throughflow (TT) is the sum of all flows circulating among components, which represents the interaction activity. Link density (LD) is the ratio of the number of internal flows to the number of components (Latham 2006) and represents the internal flow density. The average mutual information (AMI) and the statistical uncertainty (Hr) are used to assess the level of organization of the network of flows (Rutledge et al. 1976; Rufino et al. 2009; Stark et al. 2018). The AMI quantifies the organization of the flow network, where Hr is its upper bound. Hr illustrates the diversity of possible flows given the size of the system and the amount of throughput (T.), corresponding to the total quantity of N from all inflows, outflows and flows within the system. If the total flow in a system is divided equally between all components and all components are connected, then AMI will be zero or very close to zero. Conversely, if the flow network is unbalanced with only a few main flows connecting few components, the AMI value will be close to its upper boundary (Hr). The AMI/Hr ratio is the proportion of diversity achieved based on the possible connections between system components (Rufino et al. 2009).

Both AMI and Hr consider the inflows and internal flows in their calculations. Here, we proposed a new indicator inspired by AMI/Hr that only considered the internal flows to strictly assess internal flow organization (eqs. 1 and 2). We defined the internal flow organization indicator as $1 - AMI_{intern}/Hr_{intern}$. The value of this indicator approaches 1 when flows are equally distributed among all components, indicating that the flow distribution is homogenous and approaches 0 when the flow distribution is heterogeneous. T_{ij} is the value of the flow from component i to component j , where i is the number of rows and j is the number of columns. $T_{i..}$ is the total outflow for component i , and $T_{.j}$ is the total inflow for component j :

$$AMI_{intern} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \quad (1)$$

$$Hr_{intern} = - \sum_{i=1}^n \frac{T_{i.}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{i.}}{T_{..}} \quad (2)$$

Figure 2: Flow diagram and flow matrix. The blue dotted line indicates the flows used to calculate the internal flow organization. H1 is component 1; here, we have five components. X1 is the stock variation for component 1. e10 and r10 are export and loss flows, respectively.



All flows were calculated using Excel to build a matrix. One file was created per farm. The indicators were calculated with R software using the enaR package (Lau et al. 2017). We adapted the calculation code for the organization indicator included in the R package to account only for internal flows and thus calculated the internal flow organization indicator.

Table 2: Farm operating and structural indicators calculated for the seventeen studied farms. TT: Total internal throughflow, TST: total system throughflow, LD: link density. ^a Kilograms of nitrogen per hectare per year; ^b unitless; ^c number of herbivore LUs per hectare of fodder area; ^d total (monogastric + herbivore) number of LUs per hectare of UAA; UAA: usable agricultural area; ha = hectares; LU = livestock unit; FTE = full time equivalent; S: sheep, Pi: pig, Po: poultry

Farm	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Po1	Po2	Po3	Po4	Pi1	Pi2	Pi3	Pi4	Pi5	Pi6
<i>Operation indicators</i>																	
number of components	8	8	8	8	8	5	5	8	9	9	6	8	9	8	8	6	8
interaction activity ^a (TT)	247	175	135	227	266	177	205	345	214	142	245	136	174	328	233	138	161
system activity ^a (TST)	268	184	149	232	266	201	217	586	221	144	271	164	176	420	262	149	175
internal flow organization ^b	0.66	0.57	0.60	0.63	0.64	0.65	0.61	0.55	0.41	0.55	0.58	0.51	0.56	0.49	0.49	0.57	0.45
internal flow density ^b (LD)	3.4	2.9	2.9	3.1	2.9	2.0	2.0	2.4	2.1	2.4	1.7	2.4	2.4	2.3	2.4	1.7	1.9
<i>Structure indicators</i>																	
usable agricultural area (ha)	75	116	198	117	107	40	30	94	300	135	34	330	119	121	77	195	46
permanent grassland (% UAA)	47	58	59	55	44	100	100	51	44	48	67	76	53	33	22	100	46
crops (% UAA)	20	7	15	10	19	0	0	12	45	11	0	3	27	25	30	0	43
livestock (LU)	73	78	94	109	108	32	28	144	156	80	40	270	71	218	82	134	36
beef cattle (% LU)	41	51	57	78	81	57	27	58	96	92	97	59	94	59	84	85	78
total workers (FTE)	1.0	1.3	2.3	1.0	1.5	0.5	1.0	1.0	4.0	2.2	1.2	3.0	2.6	1.9	1.3	2.5	2.0
fodder stocking rate ^c	1.2	0.7	0.6	1.0	1.2	0.8	0.9	1.0	0.9	0.6	1.2	0.5	0.8	1.3	1.2	0.6	1.1
global stocking rate ^d	1.0	0.7	0.5	0.9	1.0	0.8	0.9	1.5	0.5	0.6	1.2	0.8	0.6	1.8	1.1	0.7	0.8

2.5. Farm structural indicators

Farm operations mainly depend on farm structure factors, i.e., farm area, different workers, herd size and composition, etc. Moreover, the farm structure can influence indicator values (TT and TST), as farm size influences herd management and the technical efficiency of the production system (Veysset et al. 2015). The level of crop-livestock integration also affects farm performance (Ryschawy et al. 2012; Lemaire et al. 2014). We therefore included structural indicators in the analysis. We used UAA in hectares, the total number of workers in FTE and

the total number of LUs to characterize the size of the farm. The percentage of crops (*%crops/ha*), i.e., annual crops, including fodder crops, and the percentage of PG (*%permanent_grassland/ha*) within the UAA, provided additional information on the farm structure. The percentage of beef cattle LUs among total LUs (*%beef_cattle/LU*) on the farm provided information on the level of species mixing. The ‘fodder stocking rate’, calculated using the method described in section 2.3 without the correction, was used to evaluate the level of intensification of the fodder area. The ‘global stocking rate’, defined as the total (monogastric and herbivore) number of LUs per hectare of UAA, assessed the level of animal density at the farm level.

2.6. Farm performance indicators

We assessed the multiperformance of MSL farms by accounting for the three dimensions of sustainability. We retained three criteria: resource-use efficiency, environmental impact, and human wellbeing. The efficiency analysis highlights farms that are able to produce a large amount of output with little use of inputs or a moderate output with no inputs, thus defining low-input systems. Resource-use efficiency was assessed under N, economic and net protein efficiency (NPE) conditions. N efficiency, which was calculated from the ENA matrix, was defined as the ratio of N output to N input. Economic efficiency was defined as the ratio of added value to gross farm output (including subsidies in both variables). Added value corresponded to the gross farm output (sum of products sold and of stock variations minus purchased animals) minus intermediate consumption (i.e., the sum of goods and services purchased that are required to produce) and depreciation cost of equipment. Ruminants receive CAP subsidies that are essential to achieve profitability. We therefore integrated subsidies into the calculation of added value to compare the economic efficiency of different farm types. Economic efficiency was calculated from the farms’ accountancy data. We also calculated farm NPE, i.e., the ratio of human-edible proteins contained in the food products to human-edible proteins in the feed consumed by the animals, using the corresponding human-edible protein content for each product proposed by Laisse et al. (2018). NPE facilitates an assessment of feed–food competition. A farm is a net producer of human-edible protein if it produces more food protein than it uses feed protein, i.e., if the ratio value of both variables reported in kg of edible protein is higher than one.

Environmental impact was assessed through N balances. We applied the Economic Input:Output (EIO) budget to calculate the N balance and the Biological Input:Output (BIO) budget to calculate the N balance with biological N fixation (BNF) (Watson and Atkinson 1999). Both parameters were calculated at the farm scale and accounted for N sales and N purchases over the farm gate. N sales corresponded to N outputs in the ENA matrix and N purchases to N inputs. In the N balance with BNF, the budget includes inputs from symbiotic N fixation and atmospheric N deposition, which enables the integration of the potential of legumes for closing the N cycle, which is especially important in OFs where chemical inputs are banned. BNF was calculated from the equation provided in the study by Anglade et al. (2015) applied to harvested yields, which includes belowground contributions such as N cycling associated with roots, nodules, and rhizodeposition. For the cereal legume mixture, the percentage of legumes in the crop was set to 20% (Vertès et al. 2015). For grasslands, we set a specific legume content for each type of grassland as follows: 13.3% for TG and 11% for PG (INRA 2018). The yield of a meadow, which was used to assess N export, corresponded to the sum of the grazed and harvested amount of grass. Field N deposition is a surface-dependent parameter. For this study, we used a single value of $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Dentener et al. 2006), which was multiplied by the UAA of each farm.

Farmer wellbeing at work was addressed by measuring three indicators: physical difficulty of work, mental workload and overall satisfaction. The OECD also uses subjective indicators of wellbeing to analyze the impacts of their policies on the population (Boarini et al. 2012). Here, physical difficulty and mental workload were assessed because work is often considered more difficult physically in MSL systems due to the limited mechanization options (Martin et al. 2020). Labor is also quantitatively different from that in specialized systems with different types of knowledge, skills and farmer capacities for monitoring system performance that can increase the mental workload (Kingwell 2011). In cattle-sheep systems, farmers also mentioned the pleasure of varied work and flexibility of the work organization as a matter of satisfaction (Mugnier et al. 2020). The assessment of these three indicators was based on farmers' perceptions, which is commonly used to evaluate farmer wellbeing (Besser and Mann 2015). During the surveys, farmers were asked three questions, one on each indicator, and farmers' perception indicators were scored on a four-point scale, with a score of 1 indicating less satisfied and a score of 4 indicating most satisfied.

2.7. Analysis of the indicators

After performing univariate and bivariate analyses, a principal component analysis (PCA) was carried out on thirteen active variables (eight structural variables and five ENA variables) (Table 1) using R software and the FactoMineR package (Lê et al. 2008). Performance indicators were considered illustrative variables, and thus they were not included in the construction of principal components. We then conducted a hierarchical clustering on principal components (HCPC) analysis of the four first factors, again using the FactoMineR package. From the HCPC results, we calculated the ratio of intra inertia to total inertia, which illustrates the percentage of data variability in the HCPC analysis. We conducted a nonparametric test of multiple pairwise comparisons (Dunn) to determine whether the clusters performed identically in terms of the distributions and median values. The significance threshold was set to a p -value of 5%. Each cluster was illustrated by its paragon (individual closest to the barycenter of the cluster) using the R package igraph (Ognyanova 2016) to represent the flows between system components and between components and the environment. The thickness of the arrow illustrates the intensity of the flow. The number of arrows according to the number of components illustrates the density of flow. Flow organization was defined as homogeneous when all the arrows had a similar thickness. When arrows of different thicknesses were observed, the flow organization was considered heterogeneous.

3. Results and discussion

3.1. Farm structure similar to that of French livestock farms

The average UAA for the 17 farms was 125.5 ha. Average values for the other size indicators were 103.1 LUs and 1.78 FTE. On average, 15.8% of farm UAA was cultivated (annual crops + fodder crops), 59.0% was PG, and the remaining area corresponding to TG was included in crop rotations. The percentage of beef cattle in the farm herd ranged from 41% to 97% of LUs, with an average of 70.5% (Table 1). Four of the 17 farms had no crops and were considered pure grassland farms (Table 1). In the absence of references on MSL systems, we compared the structure of these farms to the French national network FADN-France 2017 (https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/RICA_METRO/detail/). The size of farms in our sample was comparable to the average for French commercial farms with livestock

(cattle, sheep or goat) and mixed crop-livestock farms: the weighted average size of the farms from FADN-France 2017 was 111 ha, 103 LUs, and 1.68 FTE. Our farm sample was thus not different from the average French farm structures.

3.2. ENA charts the diversity of farm operations

The interaction activity (TT) and system activity (TST) ranged from 135 to 345 and 145 to 586 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. The range of variation was identical, regardless of the species associated with beef cattle (Table 1). These indicators are correlated with the global stocking rate (Spearman's correlation coefficient of 0.81 for TT and 0.83 for TST). More animals per hectare leads to more resources consumed and more effluents excreted, all of which increase the amount of internal and total N circulating through the system. The internal flow organization indicator ($1 - \text{AMI}_{\text{intern}}/\text{Hr}_{\text{intern}}$) ranged from 0.41 for the most heterogeneous network of flows to 0.66 in the most homogenous network. Cattle–sheep farms scored higher (average value of 0.62) than cattle–monogastric farms, where internal flow organization averaged 0.51 for cattle–pig and 0.52 for cattle–poultry farms. Rearing two herbivore species on the same farm thus results in a more balanced flow network because both species make use of fodder from grasslands and crop areas. This result also explains why higher values for the internal flow density (LD) were observed in cattle–sheep farms (average value of 2.73) than in the other species combinations (2.16 for cattle–pig farms and 2.15 for cattle–poultry farms). The range of variations in LD and internal flow organization reflects the diversity of management practices implemented on farms, such as grazing crop residues, making fodder out of cover crops and feeding animals bran produced on farms. Cograzing or grazing crop residues is more common in multispecies herbivore farms, but monogastrics also value these resources. For example, poultry systems with mobile houses moving over TG, PG or crop areas throughout the year will lead to direct plant-animal interactions and increase internal flow density. In our sample, variability in both the size and production (broilers or hens) of beef–poultry systems resulted in the highest variability of intensity and internal flow organization indicators: two farms ran a small laying hen operation for direct sale, a third one had a subcontracted broiler system, and the fourth had a small broiler operation for direct sale. This diversity among cattle–poultry farms results from the different orientations and feeding strategies for poultry, which enables farmers to intensify production without increasing the farm area. This finding shows the potential of ENA indicators to reveal the diversity of within-system and system-

environment interactions in MSL farms and thus to analyze farm operations through the organization and density of flows.

3.3. A typology highlighting five contrasting farming systems

Principal component analysis of the 13 structural and ENA variables showed that the first plane explained 62.5% of the variability in our 17 MSL farm sample. Figure 3A shows the projection of active variables on this plan. System activity and interaction activity were positively correlated and positively correlated with the fodder stocking rate and global stocking rate. System activity and interaction activity were slightly negatively correlated with farm structure, i.e., to UAA and total workers. UAA and total workers were correlated, with a Spearman R_S of 0.79. The internal flow organization was negatively correlated with the farm structure (Fig. 3A), especially with the number of workers, with a Spearman R_S of -0.63. It was also negatively correlated with the percentage of crops in the UAA (Spearman R_S = -0.53). The percentage of PG in UAA was as expected opposed to the percentage of crops. The percentage of crops was positively correlated with the number of system components. The LU indicator and internal flow density mainly characterized the third and fourth PCA dimensions, respectively, which accounted for 13.9% and 12.9% of the variability. System activity and interaction activity were not correlated with the internal flow organization. This finding suggests that the homogeneity of the flow network is not linked to the amount of N circulating within it.

An HCPC analysis based on the four main factor components distinguished five groups of farms based on the UAA, LU, farming system and farm activity (Fig. 3B). The ratio of internal inertia to total inertia associated with the partition into five classes was 65%, indicating that this typology accounts for approximately two-thirds of the data variability. Each cluster was graphically represented by its paragon (Fig. 4). Clusters did not necessarily group farms with the same combination of animal species, i.e., cattle with either sheep, pigs or poultry. Thus, the two animal species of the paragon were not representative of the species combination found in all the farms of the cluster. Cluster 1 included large-UAA farms with a low animal density (global stocking rate), as illustrated by the thin arrows between cattle and grassland (Fig. 4.1) and was therefore qualified as ‘large extensive land-related farms’. Cluster 2 was characterized by a high number of components, a high percentage of crops in the UAA and a dominance of cattle in the farm herd, as evidenced by a predominance of cattle-connected flows (Fig. 4.2)

and a heterogeneous flow organization. Cluster 2 was qualified as ‘mixed crop–livestock farms with beef cattle and a small monogastric enterprise’. In contrast, cluster 3 was characterized by a homogeneous flow organization and a high internal flow density. It only included relatively species-balanced beef cattle–sheep farms. Figure 4.3 clearly illustrates the ability of cattle and sheep to graze and exploit stored fodder. Cluster 3 was named ‘beef cattle–sheep farms in mixed crop–livestock systems’. Cluster 4 was characterized by small-UAA and low-LU farms with a high percentage of PG in the UAA. Despite the limited number of components, components were well interconnected and arrows had similar thicknesses, which explained the high value for the flow organization for this cluster. Cluster 4 was qualified as ‘small grassland farms’ compared to the average size of the whole sample. Cluster 5 grouped two beef cattle–monogastric farms characterized by a high interaction and system activity due to the high livestock density and high reliance on inputs, as illustrated by thicker arrows within and entering the system compared to other clusters. Cluster 5 was qualified as an ‘intensive beef cattle-monogastric farms’. Notably, the four cattle-poultry farms were distributed among three clusters as a result of the diverse orientation and animal intensification of these farms.

In our farm sample, within-system interactions appeared to be limited by large farm areas associated with a large number of workers. We assume that a large farm area will lead to a simplification of management practices, which was, for instance, observed in the research-development project RED SPyCe, where a total of 673 mixed crop-livestock and grassland farms were sampled across France. The authors used several structure and management practice indicators proposed by Martel et al. (2017) to evaluate the strength of crop–livestock interactions. They showed that larger farms were less integrated than smaller farms (Mischler et al. 2018). Considering the negative correlation between internal flow organization and the size of the worker collective, one may wonder if a threshold effect exists at which the size of the collective becomes a limiting factor. This negative correlation might result from the small sample size and MSL diversity rather than from a direct effect of the number of workers on internal flow organization. Meanwhile, increasing the number of workers also increases coordination costs, whereas a low number of workers does not enable fine monitoring of the system and could lead to stagnation.

We show that ENA can represent different ruminant and/or monogastric systems with or without crops within the same conceptual framework. This approach allows us to generalize both the calculation of indicators and the representation of components and within-system

interactions, helps understand the functioning of the system and provides a synthetic vision. ENA was applied on temperate commercial farms for the first time, and the clustering results were consistent with the typology of European livestock farming systems (Dumont et al. 2019). Indeed, the farm structure (area, grassland vs mixed crop–livestock system), animal feeding intensification and presence of monogastrics are factors with major effects on the system organization, according to our clustering analysis. These factors could be mobilized in future research when sampling farms to (i) select farms with a comparable structure and commercialization constraints/opportunities to study differences in farm operation, (ii) select farms representing a wide range of structures and animal feeding intensification to identify a potential link between them, and (iii) select farms with the same animal combination with a gradient of proportions of each animal species.

3.4. No link between performances and farm typology

The five clusters did not differ significantly in terms of farm performance, according to the nonparametric test of multiple pairwise comparisons (Dunn). However, we did observe some interesting relationships.

3.4.1. Nitrogen efficiency

We addressed efficiency at three levels. For N use efficiency, our sample counted four efficient farms with a value greater than 1, mainly in cluster 2 (Table 3). Farms S5 and Po3 reached extreme values (328.94 and 15.33, respectively) due to their low feed and fertilizer purchases. Their only expenses were on seeds and chicks, respectively. This high N use efficiency was associated with a negative N balance. However, when considering symbiotic N fixation and atmospheric deposition, the N balance remained positive (Table 3), indicating that legumes play a major role in closing the N cycle and in the agronomic sustainability of the system. The two ‘intensive beef cattle-monogastric farms’ of cluster 5, which were highly input-dependent, had very low N efficiency with high negative environmental impacts in terms of N surplus, as revealed by the high value for the N balance.

Figure 3: Principal component analysis of the 17 studied farms according to operation and structure indicators followed by a hierarchical clustering of principal components analysis. Graph A represents the distribution of active variables along the first two components. Graph B represents the distribution of the studied farms along the first two components. Colors and shapes illustrate the results of the clustering analysis. Red circles: farms from cluster 1. Green-yellow squares: cluster 2. Green diamonds: cluster 3. Blue triangles: cluster 4. Purple inverted triangles: cluster 5.

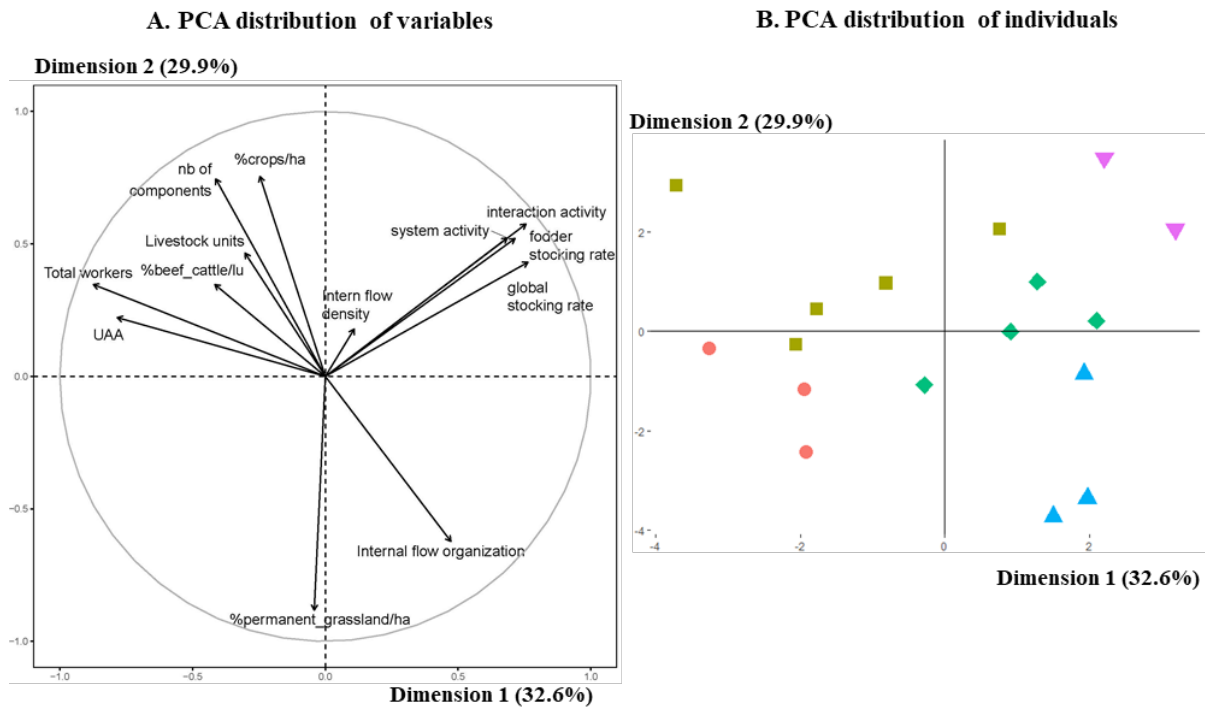
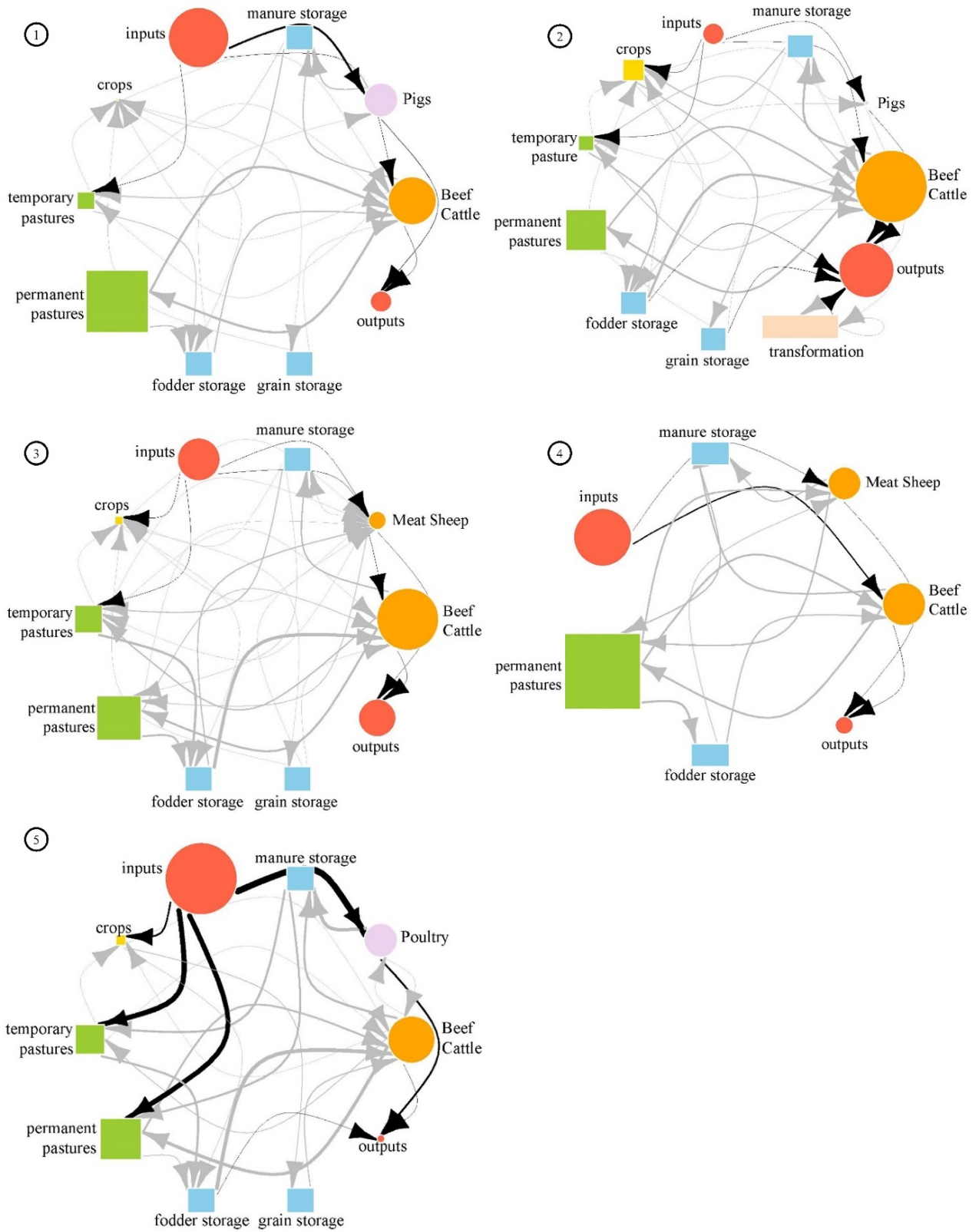


Figure 4: Network illustration for the paragon of each cluster. The size of animal components depends on the percentage of the total LUs represented by each of them. The size of plant-biomass components (crops, permanent and temporary pastures) depends on the percentage of the UAA represented by each of them. The size of the storage and transformation components is fixed. The upstream and downstream entities (inputs and outputs) are represented as components to chart inflows and outflows. The size of the input component represents the share of inflows in the sum of inflows and outflows. Thicker arrows illustrate a greater quantity of nitrogen in kilograms per hectare per year exchanged between components. Black arrows represent inflows and outflows, and gray arrows represent throughflows. Crops component gathers annual grain crops and forage crops. Inputs corresponded to all the biomass entering the farm gate, i.e., feed, animals, organic fertilizers, seeds, and manure, Outputs included sold, self-consumed, or exchanged farm products. Transformation represents a processing component, such as a meat-cutting plant or a mill.



3.4.2. Economic efficiency

The economic efficiency of our sample was not very good overall. Substantial intracluster variability was observed (Fig. 5), but the two farms (Po2 and Pi2) with the best economic efficiency (0.45 and 0.50, respectively), both in cluster 2, were also the only ones to have an on-farm processing operation. This finding raises the question of whether processing products on farms guarantees a better economic efficiency. It is a method to increase added value on the farm. Farm S2 sold breeding animals that were better remunerated than fattened animals, which also allows it to have good economic efficiency (0.41). Our assessment of economic efficiency was based on the ratio of added value to gross product but added value also considers the intermediate costs and depreciation. Thus, financial and management choices, such as marketing decisions, selling prices, product diversity, and animal intensification, all have similar effects on economic performance to within-system interactions. Our observations were consistent with other findings in beef (Veysset et al. 2015) or dairy cattle (Perrot et al. 2013), where no consistent economic advantage was observed for mixed crop–livestock or grassland-based systems when analyzing only the benefits of interactions per se. Indeed, economic performance does not appear to be linked to specialization or diversification of farm activity but to farmers' choices in terms of input management and adaptation strategies (Dumont et al. 2020; Martin et al. 2020).

3.4.3. Feed-food competition

Feed–food competition was evaluated through NPE. Only one farm (Po2) was a net producer of human-edible protein (NPE = 1.7) due to the presence of an important cash crop enterprise (45% of UAA) on the farm. Indeed, crop products contain a higher proportion of human-edible protein and have a higher yield per hectare than animal products. For other systems, we observed a positive correlation between NPE and internal flow organization (Spearman $R_s = 0.30$, with $R_s = 0.9$ for beef-pigs combination), suggesting that enhancing the use of farm resources by allowing farm enterprises to interact would allow a decrease in feed-food competition. This observation may be valid only if animals consume resources that are not edible by humans, i.e., grass or fodder. The beef cattle–sheep farm S6 had a neutral protein efficiency (NPE = 1), i.e., the farm produced as much human-edible protein as it consumed. Farm S6 is the INRAE farmllet experiment based on good animal productivity and optimized

grass utilization. This result extends the study by Laisse et al. (2018), who showed that some self-sufficient, grassland-based dairy or sheep-meat systems can produce more protein than they consume.

3.4.4. Human wellbeing

Human wellbeing was assessed by farmers' perceptions of their work conditions: physical difficulty, mental workload and overall satisfaction. We observed no effects of the farm structure and operation on human wellbeing (Table 3), while farmers in cluster 3 of beef cattle–sheep farms with many within-system interactions did not find their system more complex to manage than other farmers (Fig. 5). For example, farmer S5, who managed one of the most homogeneous flow network (internal flow organization = 0.64, Table 1), assessed his work as usually easy to manage (mental workload = 3, Table 3). We assume that the farmer is well organized and not overwhelmed by the diversity of tasks to be completed or that management complexity is viewed as a strength to keep from getting bored and not as a load (Salmona 1994; Mugnier et al., 2020). These preliminary results on human wellbeing were based on farmers' self-assessments, which may be influenced by the conditions and farmer's state of mind at the time of the interview (Conceição and Bandura 2008). This approach could be combined with other methods relying on a longer immersion in the routine of farm life, focusing on farmers with contrasted adaptive strategies. Systemic studies still underaccount for the human factor in the system. However, the socioecological and economic contexts have an impact on organic farmers through the management and orientation of his/her system (Bouttes et al. 2019). For example, Nkurunziza et al. (2020) have shown that the performance of barley production in organic farming is determined by socioecological factors, whereas in conventional agriculture, it mainly depends on mineral fertilizer. We therefore must apply transdisciplinarity, notably associating technical-economic and sociological approaches, to understand the choices made by organic mixed breeders.

Figure 5: Boxplots for eight performance indicators. The x-axis represents the five clusters. Arduousness, complexity and overall satisfaction are rated from a score of 1 indicating less satisfied and a score of 4 indicating most satisfied. Farm nitrogen balance and farm nitrogen balance with BNF are presented in kilograms of nitrogen per hectare per year. The three efficiency indicators are unitless. A gray crossbar represents the median of each cluster.

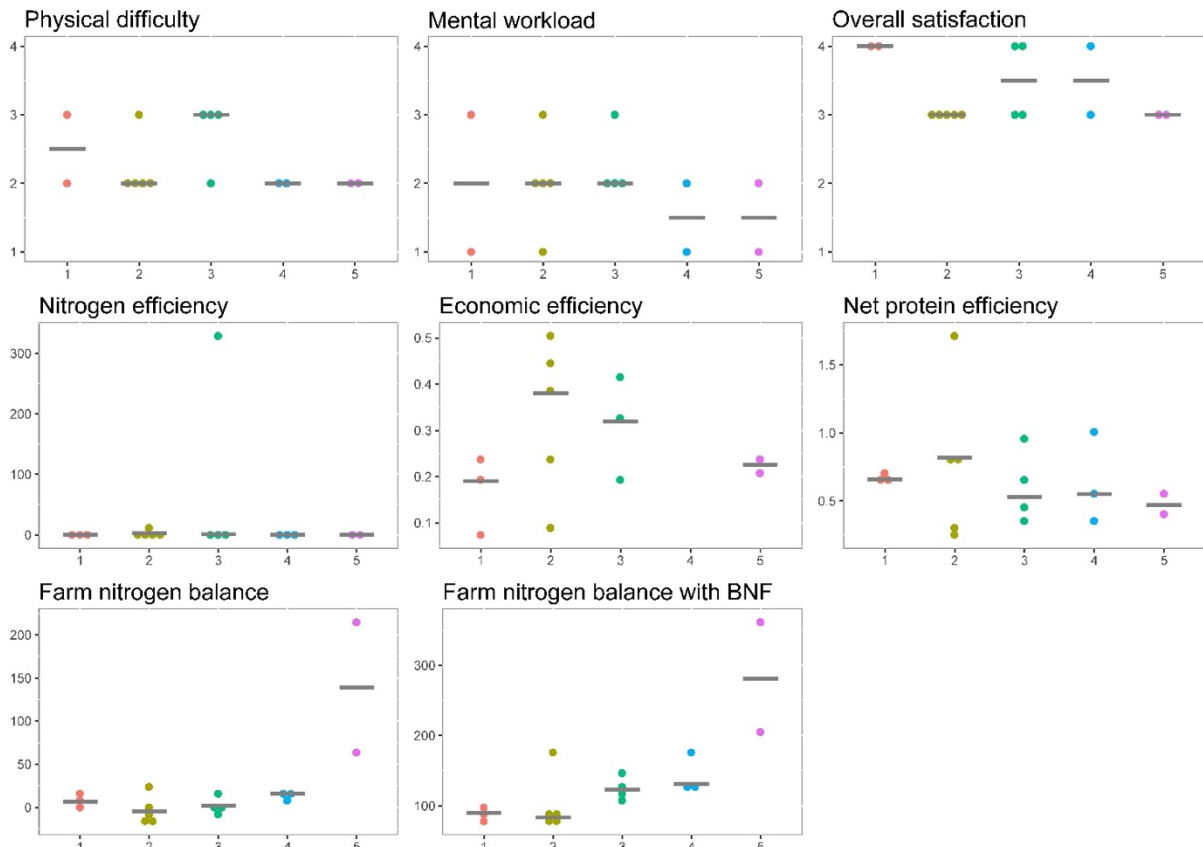


Table 3: Farm performance indicators presented by cluster for the seventeen studied farms. Efficiency indicators are unitless. Environmental indicators are reported in kilograms of nitrogen per hectare per year. Social indicators have values from 1(-) to 4(+). S: sheep, Pi: pig, Po: poultry; NA: no data available; N: nitrogen, BNF: biological nitrogen fixation.

Cluster	1			2					3				4			5	
Farm	S3	Pi1	Pi5	Po2	Po3	Pi2	Pi4	Pi6	S1	S2	S4	S5	S6	S7	Po4	Po1	Pi3
<i>Efficiency</i>																	
N efficiency	0.76	0.35	0.39	3.32	15.33	2.55	0.18	0.79	0.31	0.66	0.86	329	0.31	0.29	0.25	0.11	0.29
Economic efficiency	0.07	0.19	0.23	0.45	0.38	0.50	0.24	0.09	0.32	0.41	0.20	NA	NA	NA	NA	0.21	0.24
Net protein efficiency	0.70	0.66	0.66	1.72	0.82	0.83	0.29	0.26	0.43	0.63	0.91	0.34	0.99	0.34	0.55	0.39	0.55
<i>Environmental impact</i>																	
N balance	3	17	7	-17	-12	-5	21	3	14	3	1	-6	16	9	19	214	64
N balance with BNF	75	97	90	91	79	83	177	82	128	109	119	149	128	131	173	358	203
<i>Social indicators</i>																	
Physical difficulty	NA	3	2	2	2	2	3	2	3	3	3	2	NA	2	2	2	2
Mental workload	NA	1	3	1	2	2	2	3	2	2	2	3	NA	1	2	1	2
Overall satisfaction	NA	4	4	3	3	3	3	3	4	3	4	3	NA	4	3	3	3

4. Conclusions and perspectives

The scientific literature identifies diversified livestock farming systems as promising options in terms of meeting environmental and societal demands, but the issue is not ‘cut-and-dry’, and clearly scope exists to further explore the topic. The ENA is a generic approach for calculating indicators and representing farm operations across a range of production systems. Here, the ENA enabled us to compare MSL farms on a common basis and to represent the strengths and directions of interactions among farm components. However, our farm sample accounting for three types of animal species combinations is too small to statistically link farm operations and farm multiperformance. This first series of surveys facilitated the identification of key structural variables, such as farm size, grassland-crop balance and size of the monogastric enterprise, that strongly drive the network structure and thus must be considered in a forthcoming sampling strategy. A wider farm sample should also account for the range of sales of processed products and for direct selling that strongly impact farm economic efficiency. This wider farm sample structured by these key variables would allow us to support solidly powered statistical analyses to identify the factors influencing performance in MSL farms. Then, the challenge is

compounded by the complexity of defining what would be the adequate number of interactions among the most ideal potential benefits and timing of interactions. A sufficiently dense network of interactions is needed to provide adaptation levers, but the right choice also depends on the presence of alternative interactions that could be mobilized to adapt to any condition of a fluctuating environment. For instance, crop residues are viewed as an alternative resource to temporarily decrease the fodder stocking rate and provide flexibility to face climatic hazards. Finally, although we proposed indicators based on the three dimensions of sustainability, the surveys mainly provide information on the technico-economic dimension. Our focus on a small number of performance indicators is thus a limitation, but we successfully included key environmental and societal dimensions within a reasonable time for conducting the survey and provided an analytical method to link the interaction network to farm multiperformance. This link is highly valued in agroecology and OF. A reasonable survey time would allow farmers involved in the agroecological transition to be monitored over time in order to understand their adaptive strategies and analyze farm resilience.

Acknowledgments

The authors thank all the farmers who cooperatively agreed to answer our questions, C. Troquier who participated in farm surveys, F. Stark for his advice on the ENA methodology, and G. Martin for coordinating the MIX-ENABLE project. The authors also thank the two reviewers for their insightful comments, which allowed us to improve the manuscript.

Ethics declaration

Funding

This study was supported by the financial support for the MIX-ENABLE project provided by transnational funding bodies, namely, partners of the H2020 ERA net project, CORE Organic Cofund, and the cofund from the European Commission. L. Steinmetz is supported by the French government IDEX-ISITE initiative 16-IDEX-0001 (CAP 20-25).

Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare that are relevant to the content of this article.

Ethical approval

Not applicable

Consent to participate

Verbal informed consent was obtained prior to the interview.

Consent for publication

Verbal informed consent was obtained from farmers for publish their data anonymously.

Data availability statement

The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the authors

Code availability statement

Not applicable

Authors' contributions

Conceptualization: LS, PV, MB and BD; Software: LS; Methodology: LS, PV, MB and BD; Formal analysis: LS; Visualization: LS; Writing–original draft: LS; and Writing–review and editing: LS, PV, MB and BD.

References

Anglade J, Billen G, Garnier J (2015) Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6:37.

<https://doi.org/10.1890/ES14-00353.1>

Bell LW, Moore AD (2012) Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agric Syst* 111:1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>

Besser T, Mann S (2015) Which farm characteristics influence work satisfaction? An analysis of two agricultural systems. *Agric Syst* 141:107–112.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.10.003>

Boarini R, Comola M, Smith C, et al (2012) What makes for a better life?: the determinants of subjective well-being in OECD countries – evidence from the Gallup World Poll. OECD Publishing

Bouttes M, Darnhofer I, Martin G (2019) Converting to organic farming as a way to enhance adaptive capacity. *Org Agr* 9:235–247. <https://doi.org/10.1007/s13165-018-0225-y>

Cohen S, Zahm F (2011) IDEA: Outils d’application. Calcul des UGB - A10-. In: Indicateurs de Durabilité des Exploitation Agricoles. <https://idea.chlorofil.fr/utilisation/outils-dapplication.html>. Accessed 14 Mar 2020

Comifer (2013) Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l’établissement des prescriptions locales, Comifer. Comifer, Paris, France

Conceição P, Bandura R (2008) Measuring subjective wellbeing: a summary review of the literature. *United Nations Dev Program* 1–35

d’Alexis S, Sauvant D, Boval M (2014) Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J Agric Sci* 152:655–666. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000622>

Davies M, Smith K, Vinten A (2001) The mineralisation and fate of nitrogen following ploughing of grass and grass-clover swards. *Biol Fertil Soils* 33:423–434. <https://doi.org/10.1007/s003740100348>

Dentener F, Drevet J, Lamarque JF, et al (2006) Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global Biogeochem Cy* 20:21. <https://doi.org/10.1029/2005GB002672>

Dumont B, Puillet L, Martin G, et al (2020) Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front Sustain Food Syst* 4:109. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>

Dumont B, Ryschawy J, Duru M, et al (2019) Review: Associations among goods, impacts and ecosystem services provided by livestock farming. *Animal* 13:1773–1784. <https://doi.org/10.1017/S1751731118002586>

EU (2007) Council Regulation (EC) No 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No 2092/91

Finn JT (1980) Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology* 61:562–571. <https://doi.org/10.2307/1937422>

Gac A, Béline F, Bioteau T, Maguet K (2007) A French inventory of gaseous emissions (CH₄, N₂O, NH₃) from livestock manure management using a mass-flow approach. *Livest Sci* 112:252–260. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.006>

Hannon B (1973) The structure of ecosystems. *J Theor Biol* 41:535–546. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(73\)90060-X](https://doi.org/10.1016/0022-5193(73)90060-X)

Hendrickson JR, Hanson JD, Tanaka DL, Sassenrath G (2008) Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew Agric Food Syst* 23:265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>

IDELE (1999) Le bilan des minéraux - le cahier de l'éleveur.

INRA (ed) (2018) INRA feeding system for ruminants. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands

Institut National de Gestion et d'Economie Rurale (1989) Le mot juste: 250 termes et expressions pour analyser les résultats de gestion des exploitations agricoles. Paris, IGER, Paris, France

IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories

Kingwell R (2011) Managing complexity in modern farming. *Aust J Agric Resour Econ* 55:12–34. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2010.00528.x>

Kremen C, Iles A, Bacon C (2012) Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol Soc* 17:44. <https://doi.org/10.5751/ES-05103-170444>

Laisse S, Baumont R, Dusart L, et al (2018) L'efficience nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à

l'alimentation humaine. *INRAE Prod Anim* 31:269–288.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355>

Latham LG (2006) Network flow analysis algorithms. *Ecol Model* 192:586–600.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.029>

Lau MK, Hines DE, Singh P, Borrett SR (2017) *enaR: Ecological Network Analysis with R*

Lê S, Josse J, Husson F (2008) *FactoMineR* : an R package for multivariate analysis. *J Stat Soft* 25:. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

Lemaire G, Franzluebbers A, Carvalho PC de F, Dedieu B (2014) Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric Ecosyst Environ* 190:4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

Marley CL, Fraser MD, Davies DA, et al (2006) The effect of mixed or sequential grazing of cattle and sheep on the faecal egg counts and growth rates of weaned lambs when treated with anthelmintics. *Vet Parasitol* 142:134–141. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.06.030>

Martel G, Guilbert C, Veysset P, et al (2017) Effectively combining crop and livestock systems on conventional and organic farms: a means for increasing system sustainability? *Fourrages* 235–245

Martin G, Barth K, Benoit M, et al (2020) Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric Syst* 181:102821. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>

Mischler P, Tresch P, Jousseins C, et al (2018) Savoir caractériser les complémentarités entre cultures et élevage pour accompagner la reconception des systèmes de polyculture-élevage dans leurs transitions agroécologiques. In: *Reconception des systèmes d'élevage*. Paris, France, pp 11–20

Mugnier S, Husson C, Cournut S (2020) Why and how farmers manage mixed cattle–sheep farming systems and cope with economic, climatic and workforce-related hazards. *Renew Agric Food Syst* 1–9. <https://doi.org/10.1017/S174217052000037X>

Nkurunziza L, Watson CA, Öborn I, et al (2020) Socio-ecological factors determine crop performance in agricultural systems. *Sci Rep* 10:4232. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60927-1>

Ognyanova K (2016) *Network Analysis and Visualization with R and igraph*

Pelletier P (2011) Contribution d'essais analytiques sur les prairies multi-espèces à l'autonomie fourragère d'un système bovin viande naisseur-engraisseur biologique.

Perrot C, Caillaud D, Chambaut H (2013) Économies d'échelle et économies de gamme en production laitière. *Notes et études socio-économiques* 30

Ponisio LC, M'Gonigle LK, Mace KC, et al (2015) Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282:20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>

Rufino MC, Hengsdijk H, Verhagen JMF (2009) Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr Cycling Agroecosyst* 84:229–247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>

Rutledge RW, Basore BL, Mulholland RJ (1976) Ecological stability: An information theory viewpoint. *J Theor Biol* 57:355–371. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(76\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0022-5193(76)90007-2)

Ryschawy J, Choisis N, Choisis J-P, et al (2012) Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? *Animal* 6:1722–1730. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000675>

Ryschawy J, Joannon A, Gibon A (2014) Mixed crop-livestock farm: definitions and research issues. A review. *Cahiers Agricultures* 346–356. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0727>

Salmona M (1994) *Les paysans français, les métiers, la transmission des savoirs*, L'Harmattan

Smith L, Hicks J, Lusk S, et al (2017) Does size matter? Animal units and animal unit months. *Rangelands* 39:17–19. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2016.12.002>

Stark F, Fanchone A, Semjen I, et al (2016) Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *Eur J Agron* 80:9–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>

Stark F, González-García E, Navegantes L, et al (2018) Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agron Sustain Dev* 38:11. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>

ten Napel J, van der Veen AA, Oosting SJ, Koerkamp PWGG (2011) A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livest Sci* 139:150–160. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.007>

Vertès F, Jeuffroy M-H, Louarn G, et al (2015) Legume use in temporary pastures: supplying nitrogen in crop-rotation system. *Fourrages* 221–232

Veysset P, Lherm M, Roulenc M, et al (2015) Productivity and technical efficiency of suckler beef production systems: trends for the period 1990 to 2012. *Animal* 9:2050–2059. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002013>

Watson CA, Atkinson D (1999) Using nitrogen budgets to indicate nitrogen use efficiency and losses from whole farm systems: a comparison of three methodological approaches. *Nutr Cycling Agroecosyst* 53:259–267. <https://doi.org/10.1023/A:1009793120577>

CHAPITRE 3:
A NEW ANALYTICAL FRAMEWORK
TO ASSESS ON-FARM INTEGRATION
IN DIVERSIFIED AGRICULTURAL SYSTEMS

A new analytical framework to assess on-farm integration in diversified agricultural systems

Lucille Steinmetz¹, Guillaume Martin², Bertrand Dumont¹, Patrick Veysset¹, Defne Ulukan², Marie Moerman³, Marc Benoit¹

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

² AGIR, Université de Toulouse, INRAE, F-31320 Castanet-Tolosan, France

³ CRA-W, B-5030 Gembloux, Belgium

Under review since April 9th 2021 in *Agricultural Systems*

Abstract

Agricultural science has mainly focused on specialized farming systems, so understanding the management of more diversified systems remains a challenge. Several analytical frameworks have been proposed to assess on-farm integration, i.e., the management of spatial and temporal interactions among farm enterprises (crops, pastures, and animals). However, they rely on a vision centered on farming practices, whereas farmers' decisions regarding this integration largely depend on the available workforce, worker skills, range of products, and distribution channels. Here, we propose a new analytical framework to assess farm integration according to farming practices, work organization, and sales management and apply this framework to a case study. We iteratively conducted a review of the literature and brainstorming among experts to develop a set of indicators for assessing integration on these three dimensions. The integration of farming practices is assessed through interactions between crops, pastures, livestock, and on-farm processing enterprises. Integration of work organization is assessed through the versatility of workers and the temporal distribution of farming activities. The integration of sales management is assessed based on the use of short distribution channels, customer behavior, the range of products, and the temporality of sales from the different farm enterprises. We applied this analytical framework to a case study with ten organic and multispecies livestock farms and performed a hierarchical clustering analysis to compare different ways of assessing farm

integration. Our analytical framework includes 54 integration indicators, including 23 related to farming practices, 16 to work organization, and 15 to sales management. The application of this framework to ten organic livestock farms highlights consistency among hierarchical clustering based on work organization and sales management indicators. For instance, selling farm products on short distribution channels to customers buying several farm products and spreading sales over the year were related to an increased overlap of activities due to the processing and on-farm sales that add to agricultural activities. Conversely, the level of farming practice interactions was variable within each cluster. This demonstrates the need to extend the assessment of integration beyond farming practices to provide a holistic description of on-farm integration. This framework provides a tool to better understand how diversified agricultural systems operate and how farm enterprises are managed in time and space. It will improve our understanding of how farm integration can enhance farm performance and reveal the most promising management options for diversified agricultural systems.

Keywords: Indicator; diversification; organic; livestock; management; sales; work organization

1. Introduction

Against the many environmental concerns of specialized agriculture (soil and water pollution, soil erosion, land-use change; Conway and Pretty, 2013; Sumberg, 2003), scientists have proposed developing more diversified farming systems (Kremen et al., 2012; Ponisio et al., 2015). Diversified farming systems intentionally include functional agrobiodiversity, i.e., the diversity of crops, pastures sown and conserved, and animals bred by farmers (Kremen et al., 2012) to provide ecosystem services to farmers (mainly soil conservation and fertility, water retention, biological control of weeds, pests and diseases, and pollination); farmers benefit from these input services and can thus reduce the use of chemical inputs (Isbell et al., 2011; Tilman et al., 2006).

Multispecies livestock systems (i.e., rearing two or more animal species on a farm simultaneously, associated or not with crops) are diversified systems that require further studies at the system scale. Most studies were carried out at the herd or field-scale over a limited period

(e.g., during the grazing season) (d'Alexis et al., 2014; Fraser et al., 2014) and did not account for all sustainability dimensions. Mixing animal species can provide a number of benefits related to increased animal productivity or resource use efficiency (Marley et al., 2006; d'Alexis et al., 2014; Fraser et al., 2014; Dumont et al., 2020), as well as some adverse effects, e.g., the transmission of infectious or viral diseases (Martin et al., 2020a). In addition, inappropriate management of mixed grazing can lead to overgrazing and penalize farm sustainability (Animut and Goetsch, 2008). Farmers play a key role in managing farm diversity, i.e., in the integration of agrobiodiversity. Integration refers to the management of interactions over space and time among farm agrobiodiversity components (crops, pastures, and animals) and more broadly among farm enterprises (Sumberg 2003, Hendrickson et al. 2008, Bell et Moore 2012). A high level of integration reflects farm management seeking synergies and complementarities among farm enterprises, whereas a low level of integration corresponds to segregated farm enterprises. Several analytical frameworks have been proposed to assess integration on a farm (Bell and Moore, 2012; Hendrickson et al., 2008; Sumberg, 2003). They all rely on a vision centered on farming practices, i.e., whether farm enterprises are colocated or segregated over space and synchronized or rotated over time and to what extent they exchange resources (products and byproducts such as straw and manure). However, farmers' decisions also depend on the available workforce, on the skills of each worker, on sales distribution channels, and his/her objectives in terms of products sold. Therefore, complementarities and synergies allowed by integration can also be sought at the dimensions of work organization and sales management. In line with Martin et al. (2020a), we propose a framework where integration is addressed according to farming practices, work organization, and sales management.

Integration through work organization (i.e., versatility vs. specialization of workers across farm enterprises) is assumed to limit working peaks and lead to a better workload distribution. The integration of work organizations also allows collective production decisions to be made (Martin et al., 2016) and offers greater management flexibility to cope with unexpected events (Nozières et al., 2011).

Integration through sales management (i.e., similar sales channels among enterprises vs. specific to each enterprise) is assumed to increase economic efficiency in saving sales costs, promotes economies of scope (i.e., a cost advantage when a complementary range of products are produced; Chavas and Kim, 2007), reduces risks against market fluctuations (Russelle et al., 2007), and thus stabilizes farmer income (Esmail, 1991).

By iteratively reviewing the literature and brainstorming among experts, we implemented this analytical framework. We developed a set of indicators suited to assess on-farm integration in diversified agricultural systems according to the three abovementioned dimensions. In the first three sections of this article, we present how we developed the set of indicators. We then applied these indicators to ten French organic and multispecies livestock farms, associating beef cattle with either sheep, pigs, or poultry. We finally discuss the opportunities and limitations of this set of indicators.

2. Assessing on-farm integration based on farming practices

Building on Sumberg (2003), Bell and Moore (2012) proposed four levels of crop–livestock integration: specialization, segregation, rotation, and synchronization. Specialization is not relevant when dealing with diversified agricultural systems. Segregation is opposed to colocation and “captures the idea that [enterprises] can be more or less geographically proximate” (Sumberg, 2003). Rotation is opposed to synchronization and “captures the idea that [enterprises] can take place simultaneously or can be temporally segregated (in sequence)” (Sumberg, 2003). Here, we apply these concepts and consider five types of interactions among crops, pasture, and livestock and among production and processing enterprises (Fig. 1). This analytical framework includes a total of 23 integration indicators that are related to farming practices.

1. **Crop-pasture interactions:** Ley pastures provide many ecosystem services, including input (soil conservation, soil fertility through nutrient cycling, soil water retention, biological control of pests and weeds) and output (forage production) ecosystem services (Martin et al., 2020b). These services are essential to crop farmers and require adequate management of the spatial and temporal interactions between crops and leys (Martin et al., 2020b; Sulc and Franzluebbers, 2014). Of particular importance in organic farms is the colocation of crops and pastures (indicator 1.1, Table 1) via longer and more complex crop rotations (Barbieri et al., 2017) to provide the aforementioned input services. To assist in analyzing crop-livestock and crop-pasture integration, we considered the proportion of crop area in the usable agricultural area (indicator 1).

2. **Crop-livestock interactions:** Two-way beneficial flows can occur between crops and livestock in integrated crop-livestock systems. Livestock can be fed with products from cropping systems, and in return, produced manure can be spread to fertilize crops (indicator 1.5), which is critical in organic farms where synthetic fertilizers are banned. We used two complementary approaches to quantify feeding flows between crops and livestock, i.e., via the proportion of crop areas allocated to animal feeding and via the proportion of animal requirements covered by crops produced on-farm. A farm can use its whole crop area to feed animals while only covering a low proportion of animal requirements. Conversely, the totality of the herd feeding requirements can be covered by crops produced on-farm, though only part of the cropping area is allocated to animal feeding. With both indicators, we aimed to identify which crop resources were consumed by the animals and how (see Fig. 2). The proportion of crop area allocated to animal feeding (indicator 1.2) provides a global view of crop-livestock integration in terms of area (Martel et al., 2017). We propose to break down this indicator to clarify which crop resources are being used. The cropping area was thus split into cash crop area (indicator 1.22) and annual fodder area. In the cash crop areas, animals can be fed either grain (indicator 1.221) or graze crop residues (indicator 1.222). Catch crops and cover crops can be either grazed (indicator 1.222) or harvested (indicator 1.223) to make fodder (Gardner and Faulkner, 1991). In line with animal requirements, the starting point is their proportion covered by annual crop resources produced on-farm (indicator 1.3), which may come from grain (indicator 1.321) or other crop resources. Within cash crops, ruminants can make use of grain and fodder (indicators 1.34, 1.341, 1.342, 1.343), whereas monogastrics rely solely on grain (indicator 1.33), although they consume fodder but to a lesser extent. Straw was only considered bedding for livestock (indicator 1.4) (Russelle et al., 2007). Some of these interactions can even take place when crop and livestock enterprises are segregated (e.g., straw harvested from cropping areas and used for bedding housed animals; indicator 1.4), while others (e.g., grazing crop residues, indicators 1.222 and 1.342) require colocation to provide direct and indirect benefits, e.g., internal recycling of nutrients and lower fuel consumption thanks to livestock grazing, respectively.
3. **Pasture-livestock interactions:** Again, two-way beneficial flows can occur among pasture and livestock to promote internal recycling of nutrients. Livestock directly benefits from pasture production by grazing or through hay or silage consumption (indicator 1.6). Manure returns to pasture either directly via dungs and urine or indirectly after excretion and storage in the barn and spraying on the fields. Some of these interactions (e.g., feeding livestock

with silage) can occur even when pasture and livestock enterprises are segregated, while processes related to grazing imply colocation and synchronization. The extent and duration of the grazing season (indicator 1.61) determines the relative importance of direct and indirect pasture-animal interactions.

4. **Livestock-livestock interactions:** Interactions among livestock enterprises can yield possible synergies regarding various aspects, including the limitation of structural costs, for instance, when animals from the two enterprises are housed in the same building (indicator 1.71), the dilution of parasite burden as herbivore species usually host different gastrointestinal parasites (Marley et al., 2006), and the complementary use of feed resources due to different feeding niches (d'Alexis et al., 2014). Most of these synergies required colocation of livestock species (indicator 1.8) and, in some cases, their synchronicity by cograzing (indicator 1.82), e.g., the protection of sheep or poultry from predators in mixed-grazing systems (Martin et al., 2020a).

5. **Interactions among production and processing enterprises:** When considering the possible on-farm processing of raw farm production, additional material flows can occur. On-farm processing often requires the cracking of raw products, which leads to several fractions, some being of interest as foodstuffs (e.g., flour, cheese) while others are mainly used as feeds (e.g., bran, whey). This process generates flows among production and processing enterprises, e.g., when feeding pigs with whey from cheese production (Wlcek and Zollitsch, 2004). These flows contribute to nutrient recycling and farm autonomy for livestock feed. The number of flows and amounts of byproducts exchanged (indicators 1.9 and 1.10) were of particular importance to characterize the degree of integration among production and processing enterprises.

Figure 1: Schematic illustration of the level of integration assessed within each dimension.

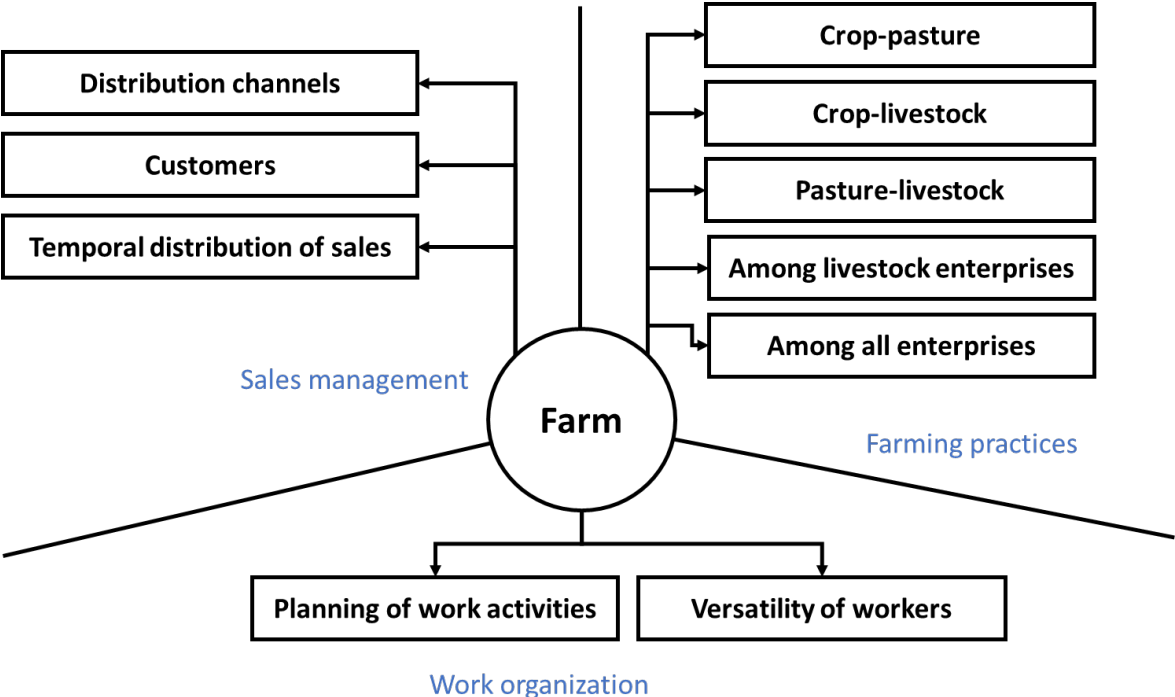


Figure 2: Presentation of the structure of crop-livestock integration indicators. A) Decomposition of how we split crop areas used to feed livestock into cash crop areas and annual fodder areas. B) Decomposition of how animal feeding requirements are covered by resources produced on farms. Numbers in the hexagon correspond to indicators listed in Table 1. The size of the rectangle is noncontractual. AFR: animal feeding requirements.

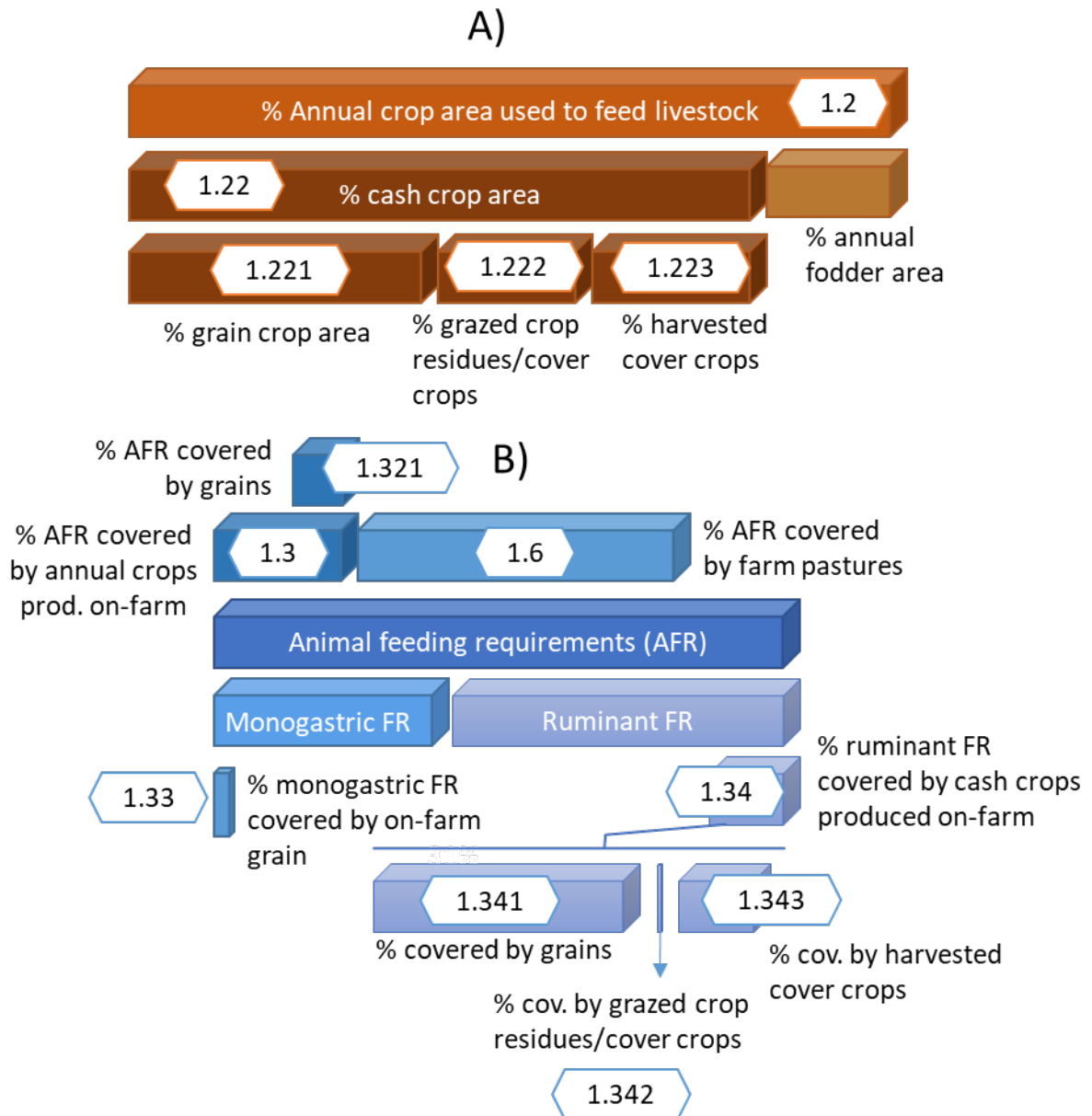


Table 1: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on farming practices. uaa = usable agricultural area, cc= cover crop or catch crop, cr = crop residue, ha= hectare, T = tons, kg = kilogram, harvest. = harvested, FU = fodder unit, sim = simultaneously, alt. = alternately, LU = livestock unit, herb = herbivores.

Code	Name	Calculation
Crop - pasture		
1	Crop area (% of uaa)	$= \frac{\text{ha of crop area}}{\text{ha of uaa}}$
1.1	Pastures within crop area (% of crop area)	$= \frac{\text{ha temporary pasture in rotation with crop}}{\text{ha of annual crop area}}$ (Rotation over a 6-year timeframe)
Crop – livestock		
1.2	Area used to feed livestock (% of annual crop area)	$= \frac{\left[\begin{array}{l} \text{ha of fodder crop} + \\ \text{ha of cash crop used to feed livestock} \end{array} \right]}{\text{ha of annual crop area}}$
1.22	Proportion of cash crops in the area used to feed livestock (1.2)	$= \frac{\text{ha of cash crop used to feed livestock}}{\text{Area used to feed livestock}}$
1.221	Proportion of grain crop area in the cash crop area used to feed livestock (1.22)	Cash crop area can produce grain, crop residues, cover crops or catch crops.
1.222	Proportion of grazed crop residues, cover crops and catch crops in the cash crop area used to feed livestock (1.22)	$= \frac{\sum_{\text{grain crop } i} (T_{\text{crop } i \text{ for livestock}} / [T/\text{ha}_i])}{\sum_{\text{grazed CR and cc}} \text{ha}}$
1.223	Proportion of harvested cover crops and catch crops in the cash crop area used to feed livestock (1.22)	Same for harvested cover crops and catch crops
1.3	Proportion of animal feeding requirements (% of total energy requirements) covered by annual crop resources produced on-farm	$= \frac{\left[\begin{array}{l} \text{FU}_{\text{onfarm grain}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm grain}} \\ + \text{FU}_{\text{grazed CR}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed CR}} \\ + \text{FU}_{\text{grazed and harvest.CC}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed and harvest.CC}} \end{array} \right]}{\left[\text{FU}_{\text{onfarm annual fodder crop}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm annual fodder crop}} \right]}$ where kg of grazed crop residues $= \left(\sum_{\text{CR enterprise}} \sum \text{LU}_j \cdot \text{days}_j \right) \cdot \frac{4750}{365}$ (same way to calculate kg of grazed cover crops and catch crops)
1.321	Proportion of grain crop resources produced on-farm that cover animal feeding requirements (1.3)	$= \frac{\text{FU}_{\text{onfarm grain}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm grain}}}{1.3}$
1.33	Proportion of cash crop resources produced on-farm that cover monogastric feeding requirements	$= \frac{\text{FU}_{\text{onfarm grain, monogastric}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm grain, monogastric}}}{\text{LU}_{\text{monogastric}} \cdot 3000}$
1.34	Proportion of cash crop resources produced on-farm that cover ruminant feeding requirements	$= \frac{\left[\begin{array}{l} \text{FU}_{\text{onfarm grain}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm grain}} \\ + \text{FU}_{\text{grazed CR}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed CR}} \\ + \text{FU}_{\text{grazed and harvest.CC}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed and harvest.CC}} \end{array} \right]_{\text{ruminant}}}{\text{LU}_{\text{ruminant}} \cdot 3000}$
1.341	Proportion of grains produced on-farm among cash crop resources that cover ruminant feeding requirements (1.34)	$= \frac{(\text{FU}_{\text{onfarm grain}} \cdot \text{kg}_{\text{onfarm grain}})_{\text{ruminant}}}{1.34}$
1.342	Proportion of grazed crop residues, cover crops and catch crops among cash crop resources that cover ruminant feeding requirements (1.34)	$= \frac{\left(\begin{array}{l} \text{FU}_{\text{grazed CR}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed CR}} \\ + \text{FU}_{\text{grazed CC}} \cdot \text{kg}_{\text{grazed CC}} \end{array} \right)_{\text{ruminant}}}{1.34}$

1.343	Proportion of harvested cover crops and catch crops among cash crop resources that cover ruminant feeding requirements (1.34)	$= \frac{(FU_{\text{harvest.CC.}} * kg_{\text{harvest.CC.}})_{\text{ruminant}}}{1.34}$
1.4	Proportion of straw harvested from farm cropping area for animal bedding	$= \frac{T_{\text{harvested straw for bedding}} * T/\text{ha}}{ha_{\text{harvested straw}}}$
1.5	Proportion of the annual crop area where manure was spread over the last 5 years	$= \frac{\text{ha with manure spread over the last 5 years}}{\text{ha of annual crop area}}$
Pasture - livestock		
1.6	Proportion of herbivore feeding requirements covered by grass from farm pastures (grazed, hay, silage)	$FU_{\text{Herb.}} = \frac{\left[\begin{array}{l} \sum_{\text{Herbiv.}} \text{LU} \cdot 3000 - \\ \text{purchased conc. and fodder} \\ + \text{onfarm grain} \\ + \text{grazed crop residues} \\ + \text{grazed and harvested CC} \\ + \text{onfarm annual fodder crops} \end{array} \right]}{\sum_{\text{herbivores}} \text{LU} \cdot 3000}$
1.61	Proportion of the year herbivores graze pastures	If two herbivores species, $= \frac{\text{nb days at grazing}_{\text{herb},1} * pLU_{\text{herb},1} + \text{nb days at grazing}_{\text{herb},2} * pLU_{\text{herb},2}}{365}$ <p>Where $pLU_{\text{herb},1}$ = share of $LU_{\text{herb},1}$ in the total LU herbivores</p>
Among livestock enterprises		
1.71	Are animals from two enterprises housed in the same building simultaneously or successively? (binary)	Use of the same building by several animal enterprises (Yes = 1, No = 0)
1.8	Proportion of pastures that are grazed simultaneously or successively by two or more animal species, or by beef and dairy cattle	$= \frac{\text{ha pasture}_{\text{sim.}} + \text{ha pasture}_{\text{alt.}} + \text{ha CR}_{2\text{species,sim+alt}} + \text{ha CC}_{2\text{species,sim+alt}}}{\text{ha pasture} - \text{ha pasture}_{\text{o.h.}} + \sum_{\text{CCi}} \text{CR}_i \text{ha}_i \cdot \text{share grazed}_i}$ <p>Where $\text{pasture}_{\text{sim}}$ = simultaneously grazed by two or more species, $\text{pasture}_{\text{alt}}$ = alternatively grazed by two or more species, $\text{pasture}_{\text{o.h.}}$ = only harvested</p>
1.82	Proportion of pastures that are simultaneously grazed by two or more species (or by beef and dairy cattle)	$= \frac{\text{ha pasture}_{\text{sim.}} + \text{ha CR}_{2\text{species,sim}} + \text{ha CC}_{2\text{species,sim}}}{\text{ha pasture} - \text{ha pasture}_{\text{o.h.}} + \sum_{\text{CCi}} \text{CR}_i \text{ha}_i \cdot \text{share grazed}_i}$
Among all enterprises		
1.9	Byproduct exchanges (Tons dry matter/LU)	$= \frac{\sum_{\text{byproducts } i} T_{\text{DMi}}}{\text{Total LU}}$
1.10	Average number of flows of byproducts between farm enterprises	$= \frac{\text{number of flows of by products between enterprises}}{\text{Number of enterprises}}$

3. Assessing on-farm integration based on work organization

Only Sumberg (2003) has raised the issue of work organization in relation to crop-livestock integration so far. He proposed recording whether the management of crop, pasture, and livestock enterprises is in the hands of one or several individuals and pointed out that limited interactions could reduce management efficiency. In line with his proposal, we consider that the issue of human work management and organization is crucial in multispecies livestock farms and integrated crop-livestock farms. These farms require multiple skills (Martin et al.,

2020a), including smart planning and management of the interactions among farm enterprises. We address this issue by considering two distinct processes: planning of work activities and worker versatility (Fig. 1). This analytical framework includes a total of 16 integration indicators that are related to work organization.

- 1. Planning of work activities over time:** Work peaks are one of the main aspects to consider when assessing work organization on a farm (Cournut et al., 2018). Beyond seasonality, the relative duration of these seasonal activities throughout the year is of major importance to understand work flexibility on the farm (Hostiou and Dedieu, 2012). These peaks add to farm workers' routine management of crops, pastures, and livestock, e.g., for feeding, bedding, and care (Cournut et al. 2018). Smart planning of crops, pastures, and livestock can be part of a strategy to smooth seasonal work peaks. In crop-herbivore systems, calving and lambing periods, which are among the main seasonal work peaks, usually do not overlap with crop sowing and harvests. This allows flattening the seasonal workload curve. Mugnier et al. (2020) reported contrasting strategies when dairy or beef cattle were associated with meat sheep. Farmers distributed calving and lambing throughout the year to avoid work peaks in dairy farms, while they grouped calving just before or during spring lambing to make best use of grass in beef-sheep farms; this can require the assistance of additional, often volunteer, workers. We thus aimed to identify the co-occurrence of work peaks among enterprises (including different livestock enterprises) for various types of activities (crop harvest, hay or silage cut, calving, lambing or start of a new batch in monogastric enterprises, processing, direct selling) and their relative duration throughout the year (indicator 2.1 to 2.120, Table 2). Indicators 2.1 to 2.120 were expressed as $1 - \text{indicator } 2.i$ in figure 3 so that the highest values represent limited activity overlap and thus a smooth work organization.
- 2. Versatility of workers:** Promoting synergies among enterprises requires planning their management and monitoring their status. According to Sumberg (2003), this is made easier when decisions are in the hands of the same individual. However, workers on a farm can be either versatile or specialized in each farm enterprise. Versatility can be addressed when the working collective consists of at least two people; otherwise, a farmer working alone is *de facto* considered versatile (indicator 2.2). Such criteria need to be assessed by accounting for the number of farmworkers and farm enterprises (indicator 2.21). The integration of work organizations can be limited by large working collectives and by enterprise diversity. Recent observations in Massif Central mixed cattle-sheep farms revealed that versatility was common in beef-sheep systems, probably as similar skills were required, while farmworkers

were more specialized when meat-sheep were farmed with dairy cattle (Mugnier et al., 2020). A major consideration was the description of how workers assign their tasks among the different farm enterprises. Having a single person working on a farm enterprise could penalize work continuity if this person is absent (indicator 2.22) while having several workers with skills for this enterprise secures its operation based on worker substitutability (indicator 2.24). To ensure a holistic approach to the farm, the versatility of each farmworker, i.e., his/her ability to manage all farm enterprises (worker versatility), can also be considered an asset (indicator 2.23) because versatility could encourage the accurate management of interactions among farm enterprises due to the understanding of possible synergies. Indicator 2.2 was expressed as $1 - \text{indicator 2.2}$ in figure 3 so that high values reveal opportunities for worker substitutability, consistent with what high values for 2.23 and 2.24 reveal.

Table 2: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on work organization. Each worker has a score representing his versatility for each enterprise. The versatility scores (v.scores) were 1: no skills/unable to manage, 2: skills for substituting to the manager, 3: manager, and 4: supervisor.

Code	Name	Calculation
Planning of work activities		
2.1	Proportion of the year with at least two time-consuming activities (harvest, calving, lambing, start of a new batch in monogastric enterprises, processing, direct selling)	For each indicator, number of two – week sessions with at least two demanding activities $= \frac{\quad}{24}$
2.111	Proportion of the year when calving, lambing, or start of a new monogastric batch overlap	
2.112	Proportion of the year when hay or silage cut overlap with calving, lambing, or start of a new monogastric batch	
2.113	Proportion of the year when crop harvest overlap with calving, lambing or start of new monogastric batch	
2.114	Proportion of the year with an overlap between pasture or crop harvest and a work peak on animals	
2.115	Proportion of the year when pasture and crop harvest overlap	
2.116	Proportion of the year when calving, lambing, start of a new monogastric batch overlap with direct selling	
2.117	Proportion of the year when pasture or crop harvest overlap with direct selling	
2.118	Proportion of the year when processing overlap with direct selling	
2.119	Proportion of the year when calving, lambing or start of a new monogastric batch overlap with processing	
2.120	Proportion of the year when pasture or crop harvest overlap with processing	
Versatility of workers		
2.2	More than one worker	Binary : Yes = 1, No = 0
2.21	Average number of workers per enterprise	$= \frac{\text{total number of workers}}{\text{number of enterprises}}$ Enterprise considered: one enterprise per livestock species, for all crops and for pastures
2.22	Proportion of farm enterprises that are managed by a single worker	
2.23	Proportion of farm workers who are able to manage all farm enterprises, i.e., worker versatility	$= \frac{\sum_{\text{worker}}[\text{if v. score} \geq 2 \text{ for each enterprise}]}{\text{Number of workers}}$
2.24	Proportion of farm enterprises for which all workers involved have management skills, i.e., worker substitutability	$= \frac{\sum_{\text{enterprise}}[\text{if v. score} \geq 2 \text{ for each worker}]}{\text{Number of farm enterprises}}$

4. Assessing on-farm integration based on sales management

Integration through sales management, i.e., using similar distribution channels among farm enterprises, is likely to ease access to short distribution channels, as a wider range of products can be directly sold to consumers and thus to hit the added value created by farm enterprises. Having a wider range of products for sale could also enhance customer interest in local products. For instance, consumers from small French towns were more prone to buy products on-farm when farmers proposed a beef-pork-vegetable ‘basket’ (Vollet and Saïd, 2018). Product diversification also leads to more regular cash inflows and thus indirectly enhances cattle farm resilience when pigs or poultry that have a short production cycle are associated with beef cattle (Dumont et al., 2020). We address this issue by considering three different types of interactions (Fig. 1), and this analytical framework includes a total of 15 integration indicators related to sales management.

1. **Integration of sales channels:** A major consideration relies on how distribution channels are shared among the different farm enterprises. Farmers may choose to either cosell products from different enterprises or rely on distinct distribution channels for many reasons, including simplicity of organization and opportunities to increase economic efficiency by decreasing sales costs (e.g., for delivery). Coselling products from different farm enterprises to the same customer is complicated in long distribution channels because of their specialization. Opportunities depend not only on farmers’ decisions but also on cooperatives and industrials that operate in the territory. Hence, there is a need to assess integration through the sales distribution channel and quantify the relative economic importance of short and long distribution channels in farm sales (indicators 3.11, 3.2, Table 3). This integration can be further characterized by i) the proportion of farm enterprises (indicators 3.111, 3.21) and ii) the equitability of farm enterprise contributions to each distribution channel (indicators 3.112, 3.22), and by iii) the proportion of customers from each distribution channel purchasing products from several farm enterprises (indicators 3.113, 3.23). When several farm products are sold to the same customer using a long distribution channel, it can reveal part of the farmer's strategy to work with trustworthy partners. For the short distribution channel, a relevant indicator is the proportion of the year when a diversified basket of products is proposed to local consumers (indicators 3.114 and 3.1141). Finally, farm diversification could enhance the level of integration through sales

management when processed products sold on-farm are made of ingredients (raw material?) coming from two different farm enterprises (indicator 3.13).

2. **Integration through customers:** One opportunity offered by farm diversification is the possibility to mobilize the same customer portfolio for different enterprises. Working with the same customers for different enterprises allows us to establish a bilateral relationship of trust and to decrease transaction costs but may also increase farmer vulnerability through increased dependency. Identifying the economic weight of such customers to farm agricultural products allows us to evaluate the strength of farm integration through its customers (indicator 3.3). Although the structuration of industrial chains by livestock production leaves little room for sharing customers in long distribution channels, it makes sense to calculate the proportion of farm products sold to customers buying products from several farm enterprises through short distribution channels (indicator 3.31).

3. **Temporal sales distribution:** The seasonality of sales is another key aspect to consider when assessing sales management on a farm (Sraïri and Ghabiyel, 2017). In short distribution channels, farmers generally seek to propose a diversified basket of goods to customers and, therefore, organize their farming activities by distributing calving and lambing periods or launching new batches of young animals throughout the year. Spreading sales also offers opportunities to lead to more regular cash inflows (Dumont et al., 2020) and cope with market price fluctuations. However, this is constrained by differences in production cycles among farm enterprises. Identifying the co-occurrence of sales among farm enterprises (including different livestock production) (indicator 3.41) is thus a key dimension of integration through sales management.

Table 3: The set of indicators for analyzing on-farm integration based on sales management. SDC = short distribution channel, nb = number, LDC = long distribution channel

Code	Name	Calculation
Sales channel		
3.11	Proportion of finished products sold through short distribution channels in the total value of agricultural products	$= \frac{\text{€ sold products in SDC}}{\text{€ total sold products}}$
3.111	Proportion of farm enterprises selling through short distribution channel	$= \frac{\text{nb enterprises involved in SDC}}{\text{nb of enterprises}}$
3.112	Equitability in the contribution of farm enterprises to products sold through short distribution channel	$= \frac{-\sum_i p_i * \log_2(p_i)}{\log_2(E)}$ With i = enterprise involved in SDC $p_i = \text{€ sold products from i in SDC} / \text{€ total sold product in SDC}$ $E = \text{nb of farm enterprise involved in SDC}$
3.113	Proportion of customers from short distribution channels purchasing products from several enterprises	$= \frac{\text{nb SDC clients of several enterprises}}{\text{nb of SDC clients}}$
3.114	Proportion of the year when a diversified basket of goods from several farm enterprises is available	
3.1141	Proportion of the year when a diversified basket of goods from several livestock enterprises is available	
3.13	Number of products sold on-farm for human consumption whose ingredients come from at least two enterprises	
3.2	Proportion of products (finished and unfinished) sold through long distribution channel in the total value of agricultural products	$= \frac{\text{€ sold products in LDC}}{\text{€ total sold products}}$
3.21	Proportion of farm enterprises selling through long distribution channel	$= \frac{\text{nb enterprises involved in LDC}}{\text{nb of enterprises}}$
3.22	Equitability in the contribution of farm enterprises to (finished and unfinished) products sold in long distribution channel	$= \frac{-\sum_i p_i * \log_2(p_i)}{\log_2(E)}$ With i = enterprise involved in LDC $p_i = \text{€ sold products from i in LDC} / \text{€ total sold product in LDC}$ $E = \text{nb of farm enterprise involved in LDC}$
3.23	Proportion of customers from long distribution channels purchasing products from several enterprises	$= \frac{\text{nb LDC clients of several enterprises}}{\text{nb of LDC clients}}$
Customers		
3.3	Proportion of the total value of agricultural products sold to customers buying products from several farm enterprises	$= \frac{\text{€ sold product to mixed customers}}{\text{€ total sold products}}$ Mixed customers are those buying products from several enterprises
3.31	Proportion of the total value of agricultural products sold to customers buying products from several farm enterprises through short distribution channels	$= \frac{\text{€ sold product to mixed SDC client}}{\text{€ total sold products}}$
Temporal sales distribution		
3.4	Proportion of the year with sales	$= \frac{\text{nb of weeks with sales}}{52}$
3.41	Proportion of the year with sales from several enterprises	$= \frac{\text{nb of weeks with sales from several enterprise}}{52}$

5. Application of the framework to a case-study

5.1. A network of ten organic multispecies livestock farms

We applied our analytical framework to ten organic and multispecies livestock farms from northern French Massif Central that can be found in the MIX-ENABLE project database compiled at <https://doi.org/10.15454/AKEO5G>. These ten farms meet the following criteria: (i) they have at least two commercial livestock enterprises, (ii) they are managed by at least half of a full-time equivalent worker to avoid hobby farming systems, (iii) they are managed according to organic farming principles, and (iv) farmers accepted to share their detailed farm account. These farms raise beef cattle associated with sheep, pigs, or poultry, and most of these also have cropping areas for selling or animal feeding (Table 4). However, we do not assume that these ten farms represent the whole diversity of organic mixed-beef farms from the Massif Central, as this information is not available.

Table 4: Key features for the ten multispecies farms from the case analysis. There are beef cattle in all farms. UAA = usable agricultural area; ha = hectares; LU = livestock unit; FTE = full-time equivalent; annual crops account for both fodder and cash crops; S: sheep, Pi: pig, Po: poultry; S, Pi or Po represents the species associated with beef cattle; ^a in number of herbivore lus per hectare of fodder area; ^b in total farm lus per hectare of uaa.

Farm	S1	S2	S3	Po1	Po2	Pi1	Pi2	Pi3	Pi4	Pi5
Usable agricultural area (ha)	75	116	117	94	300	330	119	121	77	195
Permanent grassland (% UAA)	47	58	55	51	44	76	53	33	22	100
Annual crops (% UAA)	20	7	10	12	45	3	27	25	30	0
Livestock (LU)	73	78	109	144	156	270	71	218	82	134
Beef cattle (% LU)	41	51	78	58	96	59	94	59	84	85
Total workers (FTE)	1.0	1.3	1.0	1.0	4.0	3.0	2.6	1.9	1.3	2.5
Fodder stocking rate ^a	1.2	0.7	1.0	1.0	0.9	0.5	0.8	1.3	1.2	0.6
Farm level stocking rate ^b	1.0	0.7	0.9	1.5	0.5	0.8	0.6	1.8	1.1	0.7

5.2. Data collection and processing

Data were collected during on-farm interviews based on the survey guide built as part of the European MIX-ENABLE project (Ulukan et al., 2021). This survey guide enabled the collection of quantitative and qualitative data on farm structure, livestock, crop and pasture management, work organization, and sales. For the ten selected farms, we also had access to the work schedule required for calculating work organization indicators 2.1 to 2.120 and the detailed farm account for 2017 for calculating sales management indicators.

The 54 proposed indicators were calculated for the ten farms using R software (R core Team, 2020; RStudio Team, 2019) for farming practice indicators and an Excel sheet for work organization and sales management. They were then compiled in a database, on which we performed a hierarchical cluster analysis using R software. First, we calculated Euclidean distances between farms, and then we conducted hierarchical clustering by using the ward method (ward.D2). The Ward method consists of grouping classes so that the increase in interclass inertia is maximal. We cut the dendrogram into four groups, which enabled us to explain 70% of the variability (70%) and to have at least two farms in three of the groups. For these three groups, we calculated the coefficient of variation for uaa, lu, and fte.

5.3. Results

The four groups (Fig. 3) showed different ways of integrating production, sales, and workforce on the farm, and this was independent of farm structure, i.e., agricultural area, livestock number, and number of workers. The animal species associated with beef cattle was also not group-specific. For instance, the three animal species (meat sheep, pigs, and poultry) are represented in group 4. The coefficient of variation of the UAA is 0.72, 0.66, and 0.24 in groups 1, 3, and 4, respectively; the coefficient of variation of LU is 0.45, 0.66, and 0.50, and that of FTE workers is 0.51, 0.61, and 0.40. We thus concluded that our integration clustering was independent of farm structure.

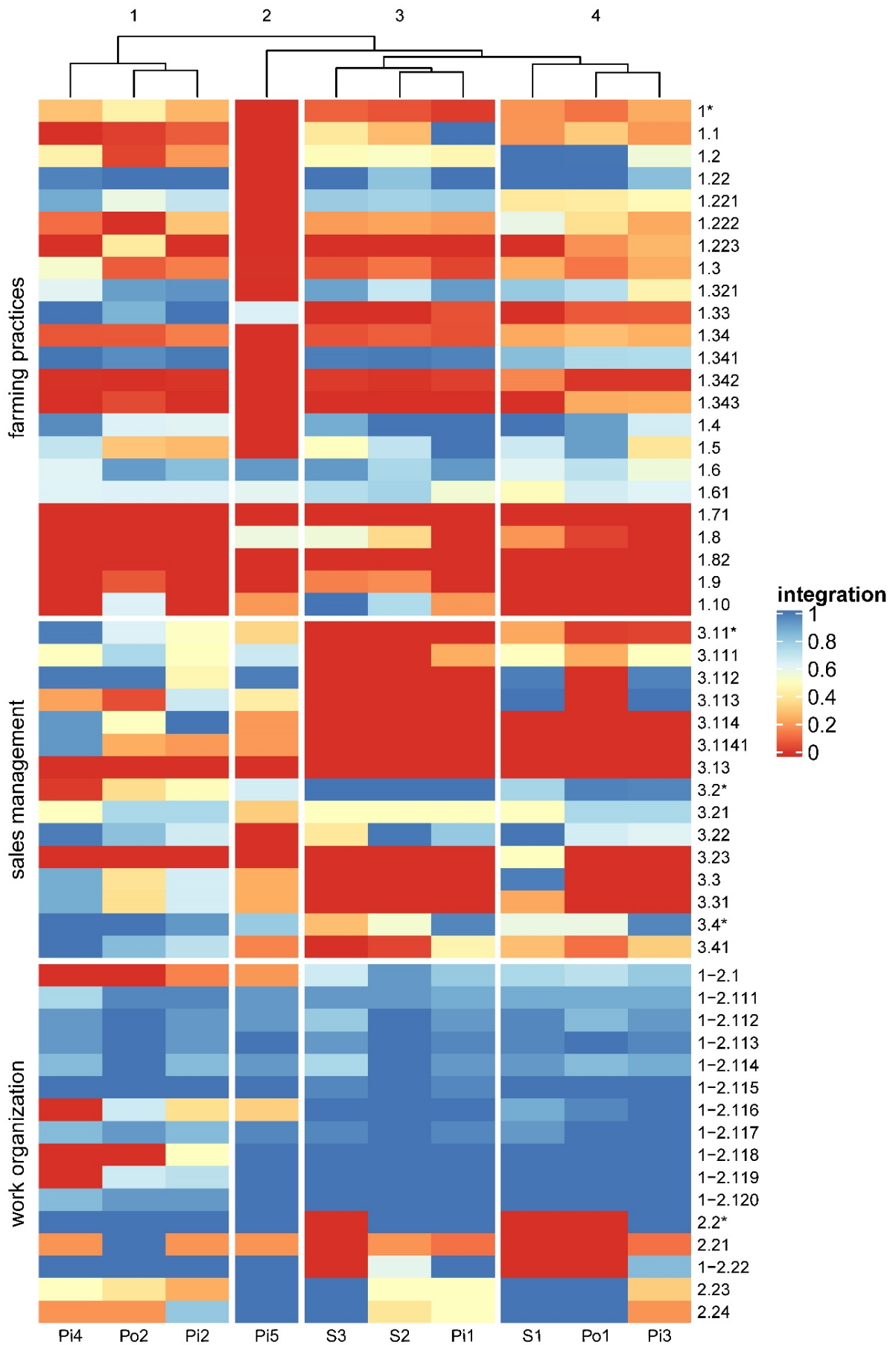
Group 1 is made of three farms that mainly rely on short distribution channels (indicator 3.11). We observed in this group a strong integration of farm enterprises through sales organizations with shared distribution channels and customers and the spreading of sales throughout the year. The short distribution channel indeed concerned most farm enterprises (indicator 3.111) and

made it possible to propose customers a diversified basket of goods throughout the year (indicators 3.114 and 3.1141). Sales were spread throughout the year (indicator 3.4), including those of products from several farm enterprises (indicator 3.41), and most consumers bought products from several farm enterprises (indicators 3.3 and 3.31). This had consequences on work organization with a high overlap of time-consuming activities (1 - indicator 2.1 was low), as processing (indicators 2.118 to 2.119) and direct sales (indicator 2.116) add to calving periods or the start of a new monogastric batch. Conversely, we did not observe any consistent trend in worker versatility or level of farming practice integration within this group.

Group 2 consisted of a single grassland-based farm (indicator 1), which thus cannot benefit from crop-livestock and crop-pasture interactions (indicators 1.1 to 1.5). Preferential use of short distribution channels (but to a lesser extent than in Group 1) also led to sharing customers between farm enterprises by proposing them a diversified basket of farm products and spreading sales throughout the year (indicators 3.11 to 3.1141). Time-consuming activities overlapped (indicator 2.1), especially when direct sales added to work peaks related to calving or starting a piglet batch (indicator 2.116). On this farm, workers were versatile (indicators 2.23, 2.24, and 1- indicator 2.22) and were all able to manage the farm.

Group 3 and group 4 were multispecies livestock farms with crops, with products mostly sold through long distribution channels (indicator 3.2) and specific customers for each enterprise (indicators 3.23, 3.3, and 3.31). In group 4, a number of farm enterprises were involved in short distribution channels but less than farms from group 1 (indicator 3.111). Differences in farming practice interactions further distinguished the two groups. In group 3, farms had the highest proportion of ley pastures within crop area (indicator 1.1) and thus mainly relied on pasture-livestock integration while also feeding animals with grain produced on-farm (indicators 1.21, 1.221, and 1.321). The proportion of animal feeding requirements covered by annual crop resources produced on-farm was low (indicator 1.3), while that covered by farm pastures was high (indicator 1.6). Cograzing by cattle and sheep was common on farms S2 and S3. A wider range of practices related to crop-livestock integration was observed in group 4. A high proportion of cash crops and fodder crops was used to feed livestock on these farms (indicators 1.2 and 1.22), including a high proportion of grazed crop residues, cover crops, and catch crops (indicator 1.222). Conversely, intraconsumption of grains produced on-farm was less than in group 3 (indicator 1.221). Animal feeding requirements were more covered by annual crop resources produced on-farm and less covered by pastures than in group 3 (indicators 1.3 and 1.6).

Figure 3: Visualizing integration indicator values for the ten farms studied with the 'ComplexHeatmap' package (Gu et al., 2016). Farms are grouped into four groups according to the hierarchical clustering made on indicators. We used a gradation of colors from 0 to 1, representing specialization and the highest level of integration, respectively. Indicator 2.22 was expressed as $1 - \text{indicator 2.22}$ to respect the aforementioned rule, as well as indicators 2.1 to 2.120. The majority of the indicators are bounded by construction between 0 and 1. Only three of them (indicators 1.1, 1.2, and 2.21) were normalized $((\text{value} - \text{min})/(\text{max} - \text{min}))$ between 0 and 1 to enable better visualization. Indicators identified with an asterisk are not integration indicators but key structural indicators.



6. Discussion

We proposed a new analytical framework to assess farm integration according to farming practices, work organization, and sales management. We identified 23 indicators to assess on-farm integration based on farming practices, while 16 other indicators were related to work organization and 15 to sales management. The application case on 10 organic multispecies livestock farms revealed that beyond their characterization based on agronomic practices, accounting for work organization and sales management brings additional keys to analyzing farmers' strategy and distinguishing among different consistencies of overall farm management.

6.1. Work, sales and farming practices: three key dimensions to describe integration in diversified farms.

Addressing farm integration by these three dimensions extends the notion of enterprise integration beyond the quantity of biomass exchanges and other biological interactions among farm enterprises. Our clustering was independent of farm structure, i.e., farm size, animal species association, stocking density, and number of workers. For instance, the application case brought out a group of farms (group 1) of very different size and number of workers, in which beef cattle were either associated with pigs or poultry but characterized by a common sales management strategy. This sales organization was based on short distribution channels, shared customers, and the spreading of sales throughout the year. Farms in this group had similar work organizations to cope with the overlap of time-consuming activities but contrasting levels of integration of farming practices.

So far, integration framework analyses have focused on structure and farming practice indicators, i.e., on the interactions between farm enterprises. For instance, crop-livestock systems were classified by Martel et al. (2017) according to the level of coupling between crop and livestock enterprises and a number of structural variables, such as farm size and production. Within a network of 1190 crop-livestock farms sampled across France, organic farms appeared to be more integrated than conventional farms. Ecological network analyses allow quantification of within-farm and farm-environment interactions based on the quantity of biomass exchanges multiplied by nitrogen content. These analyses account for farming

practices and directly assess a number of spatial interactions from flows circulating among farm components (Rufino et al., 2009; Stark et al., 2018). Recently, Steinmetz et al. (2021) combined farm structure and ecological network indicators and identified five contrasting types of organic multispecies farms from a network of 17 farms, including those from the current case study. In terms of area or number of workers, the large farm size was shown to limit the implementation of a homogeneous flow network within the system, but beyond the number of farmworkers, work organization was not considered. Sumberg (2003) addressed integration through four dimensions: time, space, management, and ownership. Management refers to whether farm enterprise management is in the hands of the same individual (or group) or not, and ownership refers to whether farm enterprises are owned by the same individuals or not (Sumberg, 2003). Management and ownership are two social dimensions considered by Sumberg (2003) in addition to temporal and spatial interactions among farm components, but once again, this framework did not account for work organization, i.e., for interactions between farmworkers. Hendrickson et al. (2008) also accounted for management decisions in their integration framework. Their assessment of farm integration is based on how flexible decisions made by farmers are, i.e., is the farmer adapting his/her decisions according to the situation of the year/moment or not? Management refers to how decisions are made, but neither considers work management nor work organization. Integration through sales management is not mentioned in any of these analytical frameworks.

Indeed, assessing on-farm integration based on farming practices relies on implementing synergies to limit the use of inputs bought outside the farm (e.g., feed, fertilizer). Such synergies are expected thanks to resource transfers among farm enterprises, such as the intraconsumption of grains produced on farms that decrease dependence on external inputs. Associating the dimensions of work organization and sales management with farming practices makes it possible to broaden the vision of integrating activities at the farm level and describing farmers' strategy and the consistency of their production system. For instance, selling products from several farm enterprises through short distribution channels to propose to customers a diversified basket of goods can attract local customers (Vollet and Said, 2018) and decrease commercialization costs among farm enterprises. In addition, having versatile farmworkers brings flexibility in work organization, as several workers may intervene in the same activity and replace each other. This flexibility of work organization is an asset for resilience.

6.2. A multidimensional approach that brings new perspectives for farm typologies

The three dimensions we proposed to analyze on-farm integration offer new perspectives for farm typology. While previous typologies were largely based on a farming practices perspective, coupling these indicators to new indicators describing work organization and sales management leads to a holistic description of on-farm integration. Our multidimensional approach also allows us to consider other ways of characterizing a farm. A farm typology could be first constructed based on the organization of the working collective by distinguishing farms managed by a single farmer from collective farms to sharpen the description of system operation. Such a typology would help farmers refer to farming systems that have the same working collective as in their farm, which means the same constraints and opportunities. Sales management could also be the basis of a typology construction, with, for instance, the first distinction between farms that rely on short distribution channels and those that do not. These different ways of conducting a farm typology would enable analyzing farms from different perspectives, highlighting a wider range of opportunities or threats, and moving away from the farming practices centered approach.

A constraint to developing such a holistic approach is that it implies collecting more information on each farm to assess on-farm integration based on several dimensions. To collect this information within an acceptable time spent on-farm, the set of indicators needs to be parsimonious (as simple as possible) but sufficient (Lebacqz et al., 2013) and implies targeting easily accessible farm data. The selection of indicators could be achieved according to available knowledge that enables the identification of key drivers of a system. Considering multispecies livestock farming systems, evidence reveals that the benefits of diversity are grounded in how plant and animal production combine, and interindividual or interspecies variability in response to environmental conditions (Dumont et al., 2020). However, most of these studies focus on a single dimension of farm sustainability and address limited time horizons (Martin et al., 2020a). Incomplete knowledge of diversified systems implies an imbalanced level of detail when describing the different integration dimensions. Studies on work organization and sales management are scarce (Vollet and Said, 2018; Mugnier et al., 2020), and we proposed indicators that aid in describing key points for diversified systems. We decided to assess work organization through synthetic qualitative indicators, easily accessible to the detriment of a complete work survey as proposed in the Work Assessment Method (Cournut et al., 2018). The

complete assessment of work would imply half a day interview but would provide quantitative indicators about work time, available free time, and work type. We also choose to calculate sales management indicators from the farm accounts, which enables us to limit the interview time on this dimension, as all the analyses of the accounts are later done at the office. However, these choices imply access to farm accounts, which requires farmers to share this information. Our set of indicators is specific to multispecies livestock farms, but the approach based on the three dimensions is generic for all systems.

6.3. Research perspectives

The set of indicators proposed in the article enables the identification of farm integration levels among different dimensions. These levels of integration can be context-dependent. For instance, crop-livestock integration is associated with lowlands having high agronomic potential. Strong sales integration via a high reliance on short distribution channels can benefit from the proximity of important consumption hubs. In the same way, a large number of farm workers can be found when farms are located in an area of high socioeconomic activity. Thus, production factors of the farm and their levels of integration can indirectly be associated with contextual elements that need to be considered for understanding the conditions for setting up integrated and diversified production systems. This set of 54 indicators could evolve depending on the context or the type of system studied and according to the ability to collect additional information, especially in the work organization and sales dimensions. Its application on ten farms illustrates its capacity to discriminate contrasting types of organic multispecies farms and confirms the need for not limiting the evaluation to farming practices but rather to couple them to work organization and sales management indicators to ensure a holistic description of on-farm integration.

The scientific literature postulates that diversity within a farm improves its multiperformance but does not fully address the management of this diversity so that its expected benefits can be optimized. Our set of indicators can be seen as a tool for better understanding how diversified systems operate. Integration is assessed by managing interactions between farm enterprises in time and space within farming practices, work organization, and sales management. This management is the result of a reflection carried out by the farmer(s) to reconcile their objectives in terms of production, distribution channel, and working rhythm, with available agricultural

(farm area, livestock, housing capabilities) and human (number of workers, skills) resources. There may not be a direct causal link between the level of farm integration and farm multiperformance. However, the way this integration is done may explain part of farm performance and resilience, and our analytical framework allows such analyses in future research.

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support for the MIX-ENABLE project provided by transnational funding bodies, being partners of the H2020 ERA net project, CORE Organic Cofund, and the cofund from the European Commission. L.S. work is supported by the French government IDEX-ISITE initiative 16-IDEX-0001 (CAP 20-25). The authors thank the farmers interviewed and the intern M. Destruel who participated in the development of the first version of the indicators. Authors acknowledge the help they received when drafting this article from the UMR Herbivores Scientific Writing Workshop chaired by Isabelle Veissier and Isabelle Ortigues-Marty.

Statement of availability

The ten farms used to test the analytical framework are farms N°33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42 and 45 in the MIX-ENABLE project database compiled at <https://doi.org/10.15454/AKEO5G> (Ulukan et al., 2021).

Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Animut, G., Goetsch, A.L., 2008. Co-grazing of sheep and goats: Benefits and constraints. *Small Ruminant Research*, Special Issue: Sheep and Goat Farming: grazing systems of production and development 77, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.03.012>
- Barbieri, P., Pellerin, S., Nesme, T., 2017. Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Scientific Reports* 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6>

Bell, L.W., Moore, A.D., 2012. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agric. Syst.* 111, 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>

Chavas, J.-P., Kim, K., 2007. Measurement and Sources of Economies of Scope: A Primal Approach. *Journal of Institutional and Theoretical Economics (JITE)* 163, 411–427.

<https://doi.org/10.1628/093245607781871354>

Conway, G.R., Pretty, J.N., 2013. *Unwelcome Harvest: Agriculture and pollution*, Routledge. ed, Agriculture and Pollution.

Cournut, S., Chauvat, S., Correa, P., Santos Filho, J.C.D., Diéguez, F., Hostiou, N., Pham, D.K., Servièrè, G., Sraïri, M.T., Turlot, A., Dedieu, B., 2018. Analyzing work organization on livestock farm by the Work Assessment Method. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 58.

<https://doi.org/10.1007/s13593-018-0534-2>

d’Alexis, S., Sauvant, D., Boval, M., 2014. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J. Agric. Sci.* 152, 655–666.

<https://doi.org/10.1017/S0021859613000622>

Dumont, B., Puillet, L., Martin, G., Savietto, D., Aubin, J., Ingrand, S., Niderkorn, V., Steinmetz, L., Thomas, M., 2020. Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front. Sustain. Food Syst.* 4.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>

Esmail, S.H.M., 1991. Multispecies Grazing by Cattle and Sheep. 13.

Fraser, M.D., Moorby, J.M., Vale, J.E., Evans, D.M., 2014. Mixed grazing systems benefit both upland biodiversity and livestock production. *PLOS ONE* 9, e89054.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089054>

Gardner, J.C., Faulkner, D.B., 1991. Use of cover crops with integrated crop-lives tock production systems, in: Hargrove, W.L. (Ed.), *Cover Crops for Cleaner Water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA., pp. 185–191.

- Gu, Z., Eils, R., Schlesner, M., 2016. Complex heatmaps reveal patterns and correlations in multidimensional genomic data. *Bioconductor version: Release (3.12)*.
<https://doi.org/10.18129/B9.bioc.ComplexHeatmap>
- Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Tanaka, D.L., Sassenrath, G., 2008. Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew. Agric. Food Syst.* 23, 265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>
- Hostiou, N., Dedieu, B., 2012. A method for assessing work productivity and flexibility in livestock farms. *Animal* 6, 852–862. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002084>
- Isbell, F., Calcagno, V., Hector, A., Connolly, J., Harpole, W.S., Reich, P.B., Scherer-Lorenzen, M., Schmid, B., Tilman, D., Ruijven, J. van, Weigelt, A., Wilsey, B.J., Zavaleta, E.S., Loreau, M., 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* 477, 199–202. <https://doi.org/10.1038/nature10282>
- Kremen, C., Iles, A., Bacon, C., 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol. Soc.* 17, 44.
<https://doi.org/10.5751/ES-05103-170444>
- Lebacqz, T., Baret, P.V., Stilmant, D., 2013. Sustainability indicators for livestock farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 311–327. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>
- Marley, C.L., Fraser, M.D., Davies, D.A., Rees, M.E., Vale, J.E., Forbes, A.B., 2006. The effect of mixed or sequential grazing of cattle and sheep on the faecal egg counts and growth rates of weaned lambs when treated with anthelmintics. *Vet. Parasitol.* 142, 134–141.
<https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.06.030>
- Martel, G., Guilbert, C., Veysset, P., Dieulot, R., Durant, D., Mischler, P., 2017. Effectively combining crop and livestock systems on conventional and organic farms: a means for increasing system sustainability? *Fourrages* 231, 235–245.
- Martin, G., Barth, K., Benoit, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont, B., Grillot, M., Hübner, S., Magne, M.-A., Moerman, M., Mosnier, C., Parsons, D., Ronchi, B., Schanz, L., Steinmetz, L., Werne, S., Winckler, C., Primi, R., 2020a. Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric Syst* 181, 102821.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>

- Martin, G., Durand, J.-L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., Louarn, G., Médiène, S., Moreau, D., Valentin-Morison, M., Novak, S., Parnaudeau, V., Paschalidou, F., Vertès, F., Voisin, A.-S., Cellier, P., Jeuffroy, M.-H., 2020b. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 40, 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00620-9>
- Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.-A., Asai, M., Sarthou, J.-P., Duru, M., Therond, O., 2016. Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 53. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>
- Mugnier, S., Husson, C., Cournut, S., 2020. Why and how farmers manage mixed cattle–sheep farming systems and cope with economic, climatic and workforce-related hazards. *Renew. Agric. Food Syst.* 1–9. <https://doi.org/10.1017/S174217052000037X>
- Nozières, M.O., Moulin, C.H., Dedieu, B., 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal* 5, 1442–1457. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000486>
- Ponisio, L.C., M'Gonigle, L.K., Mace, K.C., Palomino, J., de Valpine, P., Kremen, C., 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282, 20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
- R core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RStudio Team, 2019. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, Inc., Boston, MA.
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., Verhagen, J.M.F., 2009. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84, 229-247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- Russelle, M.P., Entz, M.H., Franzluebbers, A.J., 2007. Reconsidering Integrated Crop–Livestock Systems in North America. *Agronomy Journal* 99, 325–334. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0139>

Sraïri, M.T., Ghabiyel, Y., 2017. Coping with the work constraints in crop-livestock farming systems. *Annals of Agricultural Sciences* 62, 23-32.

<https://doi.org/10.1016/j.aoas.2017.01.001>

Stark, F., González-García, E., Navegantes, L., Miranda, T., Pocard-Chapuis, R., Archimède, H., Moulin, C.H., 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 11. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>

Steinmetz, L., Veysset, P., Benoit, M., Dumont, B., 2021. Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agronomy for Sustainable Development*, under revision.

Sulc, R.M., Franzluebbers, A.J., 2014. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. *European Journal of Agronomy* 57, 21–30.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.007>

Sumberg, J., 2003. Toward a dis-aggregated view of crop–livestock integration in Western Africa. *Land Use Policy* 20, 253–264. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00021-8)

Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J.M.H., 2006. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature* 441, 629–632. <https://doi.org/10.1038/nature04742>

Ulukan, D., Steinmetz, L., Moerman, M., Bernes, G., Blanc, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont, B., Lang, E., Meischner, T., Moraine, M., Oehen, B., Parsons, D., Primi, R., Ronchi, B., Schanz, L., Vanwindekens, F., Veysset, P., Winkler, C., Martin, G., Benoit, M., 2021, Survey data on European organic multi-species livestock farms,

<https://doi.org/10.15454/AKEO5G>, Portail Data INRAE, V3

Vollet, D., Said, S., 2018. Vers l'identification de paniers de biens et de services liée à la demande locale dans les territoires d'élevage : illustration à partir de la Planèze de Saint Flour et du bocage bourbonnais. *geocarrefour* 92. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.11155>

Wlcek, S., Zollitsch, W., 2004. Sustainable pig nutrition in organic farming: By-products from food processing as a feed resource. *Renew. Agric. Food Syst.* 19, 159–167.

<https://doi.org/10.1079/RAFS200476>

CHAPITRE 4:
SURVEY DATA ON EUROPEAN ORGANIC
MULTI-SPECIES LIVESTOCK FARMS

Survey data on European organic multi-species livestock farms

Defne Ulukan^{1,*}, Lucille Steinmetz^{2,*}, Marie Moerman^{3,*}, Gun Bernes⁴, Mathilde Blanc⁴, Christopher Brock⁵, Marie Destruel¹, Bertrand Dumont², Elise Lang¹, Tabea Meischner⁵, Marc Moraine⁶, Bernadette Oehen⁷, David Parsons⁴, Riccardo Primi⁸, Bruno Ronchi⁸, Lisa Schanz⁹, Frédéric Vanwindekens³, Patrick Veysset², Christoph Winckler⁹, Guillaume Martin¹, Marc Benoit²

¹ AGIR, Université de Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

² Université Clermont Auvergne, INRAE, Vetagro Sup, UMR Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

³ Centre wallon de Recherches agronomiques, Département durabilité, systèmes et prospectives Gembloux, Belgium

⁴ Swedish University of Agricultural Sciences, 90183 Umea, Sweden

⁵ Forschungsring e.v., Brandschneise 5, D-64295 Darmstadt, Germany

⁶ UMR 0951 Innovation, INRAE, CIRAD, SupAgro, 34060 Montpellier, France

⁷ FiBL, CH-5070 Frick, Switzerland

⁸ Università degli Studi della Tuscia, 01100 Viterbo, Italy

⁹ University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU), A-1180 Vienna, Austria

* All three authors contributed equally

Under review since March 25th 2021 in *Frontiers in Sustainable Food Systems*

Abstract

While there is increasing evidence of the sustainability benefits of diversified systems in the organic cropping sector, this has been much less investigated with organic livestock farming. To fill this knowledge gap, we surveyed a sample of 128 European organic multi-species livestock farms located across seven countries – Austria, Belgium, France, Germany, Italy, Sweden and Switzerland – and covering a large range of livestock species combinations. We recorded 1574 variables as raw data out of which we calculated 107 indicators describing farm structure, management and several sustainability dimensions: resource use efficiency and conservation, animal, land and work productivities, animal and human welfare. After technical validation of the data, we withdrew 26 farms and the database covers 102 farms. This database

is well suited to unveil relationships between various dimensions of organic multi-species livestock farm sustainability and their structure and management. It can help reveal sustainable strategies for organic multi-species livestock farming systems and understand levers or barriers to their development.

1. Background and summary

The livestock sector is being highly criticized. First, this sector uses 2 billion hectares of pastures and about 700 million hectares of the arable land used for cropping, which is approximately half of the global agricultural area¹. Livestock also consumes one third of the worldwide cereal production¹. Using these cereals for meat, milk and egg production is less efficient than their direct consumption by humans, which signifies strong competition between animal feed and human food availability^{2,3}. Second, the dominant model of industrial livestock production has well-established direct and indirect impacts on deforestation, climate change, water pollution, soil acidification and biodiversity^{4,5}. There is therefore increasing pressure from governments and citizens to step away from this currently dominant model and make more efficient and sustainable use of natural resources^{6,7}.

Agroecology is increasingly promoted as a solution to the multiple sustainability issues of world agriculture^{8,9} including in the livestock sector¹⁰. It entails moving towards more diversified farming systems¹¹, i.e. livestock farming systems including multiple breeds of a given livestock species, multiple animal species and even a diversity of crops and pastures. These diversified systems are expected to promote ecosystem services, allowing reductions of input use, to stabilize production levels and income over time^{12,13}, and to strengthen farm resilience¹⁴. While there is increasing evidence of the environmental and economic benefits of diversified systems in the organic cropping sector^{15,16}, this has been much less investigated with organic livestock farming.

Multi-species livestock systems are farms where two or more animal species are raised simultaneously. They have received little attention so far¹⁷. Nevertheless, co-grazing experiments conducted at fine spatial scales (i.e. usually at the level of a field) and over relatively short time horizons (a few weeks) have revealed promising as co-grazing proved to be efficient in natural resource use, while reducing a number of environmental impacts and

providing opportunities for animal health management^{18–20}. More comprehensive assessments considering the various dimensions of farm sustainability are therefore needed to confirm these promises and provide management opportunities at the farm level. Threshold effects may indeed occur when upscaling experimental outcomes obtained at the field level onto commercial farms.

Motivated by the aforementioned, a survey was conducted in seven European countries between October 2018 and July 2019 that recorded data across 128 multi-species livestock farms. The survey was comprehensive and aimed at gathering data regarding farm structure (farm area, herd size, total number of workers, off-farm activity, etc.), land use (crop and pasture types and areas; management i.e. fertilization, etc.; productivity), livestock management (types of livestock; management i.e. reproduction, diet, housing, health, etc.; productivity), input management (types of products purchased, amounts, etc.), by-product management (types of by-products available, transfers of by-products among farm enterprises, etc.), sales management (on-farm processing, types of product sold, direct selling, etc.), economics (income, satisfaction regarding income) and work conditions (work organization, satisfaction regarding the workload, etc.). Qualitative data on strengths and weaknesses, opportunities and threats perceived by farmers were also collected. The overall database consists of the raw data (1574 variables) and 107 indicators calculated using these variables and reflecting farm structure, management and sustainability of 102 farms. After technical validation, we had to withdraw 26 farms that displayed inconsistent data.

The raw data and the indicators can be used to investigate the relations between farm structure, management and various dimensions of farm sustainability (resource use efficiency, resource conservation, productivity, human welfare, animal welfare) on European organic multi-species livestock farms. It can also serve as a basis to understand the levers and barriers to the development of organic multi-species livestock farming.

2. Methods

2.1. Geographic coverage and sampling strategy

The countries in which survey data were collected are represented in Table 1. There are no official statistics available in Europe on multi-species livestock farms, as these are merged with other types of mixed farms in the FADN (2020) database²¹. Thus, it is impossible to know exactly how many multi-species livestock farms exist across Europe. As a result, we did not seek for representativeness of the farm sample but rather tried to explore a diversity of multi-species livestock farms.

Table 1: Livestock combinations surveyed per country. BC = beef cattle, DC = dairy cattle, DG= dairy goat, DS = dairy sheep, H = horse, MS = meat sheep, P = Pigs, Po = poultry.

	Austria	Belgium	France	Germany	Italy	Sweden	Switzerland	Total
BC & DS	0	0	0	0	1	0	0	1
BC & DS & G	0	0	0	0	1	0	0	1
BC & MS	2	1	7	0	0	11	0	21
BC & MS & P	0	2	0	0	0	0	1	3
BC & MS & Po	0	0	0	0	0	0	1	1
BC & P	2	1	7	1	0	0	1	12
BC & P & Po	1	0	0	4	0	0	0	5
BC & Po	2	1	6	5	0	0	1	15
DC & BC	1	0	2	0	1	0	2	6
DC & BC & P	0	1	0	0	0	0	0	1
DC & DS	1	0	0	0	0	0	0	1
DC & G	1	0	1	0	0	0	0	2
DC & MS	0	0	0	0	0	2	0	2
DC & MS & P	0	1	0	0	0	0	0	1
DC & MS & Po	2	0	0	0	0	0	0	2
DC & P	0	1	3	4	0	0	0	8
DC & P & Po	0	1	0	2	0	0	0	3
DC & Po	2	3	0	5	0	0	0	10
DS & G	0	0	0	0	4	0	0	4
MS & G	0	0	2	0	0	0	0	2
MS & P	0	0	1	0	0	0	0	1
Total	14	12	29	21	7	13	6	102

The total number of farms in the final database is 102 (against 128 farms surveyed, more details are provided in the Technical Validation section). The data are all based on individual farm surveys. The farms were chosen from local organic farmer directories, suggestions from local experts or national organic institutions and through snowballing with some farmers suggesting other colleagues. We further applied the following criteria: (i) fully certified organic farms to avoid mixes of free-ranging and confined livestock production activities that do not allow for physical interactions among livestock species; (ii) at least 0.5 worker equivalent unit in the farm to ensure a minimum farm size; (iii) main livestock species limited to cattle, sheep, goat, pig and poultry, with horses and donkeys as possible third species. Additionally, farms with distinct beef cattle and dairy cattle herds were included in the database. This choice was justified in the case of farms conducting those herds as two separate livestock enterprises, thus adding to the diversification of the farm.

2.2. Questionnaire

Through a series of meetings, we developed an ad hoc questionnaire organized into 8 excel sheets addressing farm structure, livestock, pastures, crops, sales, inputs and by-products, economics, and work on the farm. To standardize the survey protocol and the data gathered, most questions called for quantitative, binary or categorical data. Only a few questions and comment boxes were open-ended and allowed farmers to develop their answers. The questionnaire was designed in English and translated into national languages. A pre-test was conducted to test whether the survey guide was understandable for farmers, whether the survey duration was acceptable and whether there were errors that needed to be rectified in the guide before its deployment. Surveys were conducted by researchers and local consultants using this survey guide, in presence of the farm owner(s) or manager. Data covered a full production year and had to be collected for a typical or “average” year, i.e. data smoothed across the years, to clean it from any major climatic, sanitary or economic hazard. Data were first collected in the national languages and then translated in English.

The majority of questions in the survey aimed at allowing the calculation of a series of sustainability indicators. Through these indicators, the following sustainability dimensions were considered:

- Resource use efficiency through output to input ratios enabling verification that farms make efficient use of their inputs to limit environmental impacts;
- Resource conservation through various indicators reflecting the capacity of farms to preserve the natural resources: soils, water, air and biodiversity;
- Self-reliance through technical and economic ratios reflecting the dependence of the farm on its environment;
- Productivity as the production of mega-joules and protein per unit of land, livestock and worker allowing measurement of the contribution of farms to food production;
- Human welfare through farmer satisfaction regarding income, reflecting the capacity of farms to generate decent living conditions for farmers, and farmer satisfaction at work ;
- Animal welfare which was assessed through indicators such as livestock mortality.

Sustainability indicators were analyzed in relation to farm structure and farm management. Farm structure accounted for the types of production present on the farms, the natural and human resources available, the climatic and topographical constraints to farming and the diversification activities beyond farming (agritourism, energy production, etc.). Farm management accounted for the management of cropland, pastures, livestock and their interactions via crop rotations, grazing practices, livestock grain or silage feeding, exchanges of by-products, etc. Indicators are also included to represent on-farm processing and sales management (range of products, amounts sold, prices, sale channels, etc.). Work management on the farm was the last component, with indicators illustrating workers' skills and the distribution of work on the farm.

In accordance with INRAE-Cirad-Ifremer-IRD joint Ethics Committee's recommendations, our study procedure followed the guidelines provided by INRAE's Charter of deontology, scientific integrity and ethics²². All participants provided informed oral consent prior to the beginning of the survey, after being notified of the purpose of the survey. They were also informed that they had the possibility of skipping questions. Participants did not belong to particularly vulnerable groups. In accordance with the European General Data Protection Regulation²³, the data were pseudonymised before processing.

2.3. Data processing and indicator calculation

Data for each farm was filled in the questionnaire and saved as an individual excel file. In total, 128 Excel files were compiled and merged into a single database using an R script extracting the data from each individual Excel file. At this stage, the data was pseudonymised. The initial data cleaning was limited to correcting spelling and translation errors, homogenizing character variables when that did not eliminate additional information (e.g. for purchased feed), deleting extra spaces at the end of character strings, making sure missing values were represented by NAs in the database, identifying and correcting obvious impossible values due to forgotten decimal points, wrong units, etc.. This last cleaning step was done with the help of distribution plots for a large number of raw variables. Scripts created in the R software environment were each dedicated to a specific group of tasks. These tasks included processing the raw data on organic multi-species livestock farms and calculating various farm structure, management and sustainability indicators.

Conversion factors used in indicator calculations, such as protein and energy contents of agricultural outputs and inputs, were extracted from public databases (notably, the FoodData Central of the U.S. Department of Agriculture²⁴ or the INRAE-CIRAD-AFZ feed tables²⁵) or other online literature. They were gathered in correspondence data frames, which linked specific values from our database to the corresponding conversion factor. For instance, a product sold labeled as “cull cows” corresponds to the conversion factor label “cow meat” in the protein and energy tables. This process enabled dealing with a high diversity of labels without losing detailed information in the database itself by creating separate data frames for conversion factors. The final outputs of different indicator calculation scripts were saved in csv-files.

2.4. Data records

The compiled database can be found at: <https://doi.org/10.15454/AKEO5G>, under the file name “mixenable_data_safe.tab”. Sensitive data, i.e. qualitative data which could be used to identify the farms, were not included in the file to protect farmers’ privacy. All 1574 variables of the survey data are described in the file “Survey data codes.tab”. Variables included in the “Indicator_file.tab” are described in the file “Indicator codes.tab”. Across the entire database, missing values were identified with NA. The “empty_survey_guide.pdf” and the “Guideline to

survey Excel file.pdf” are included to provide an understanding of the way the data were gathered. The “empty_survey_guide.pdf” represents the Excel survey file used to record individual farm data and can be read using the zooming in function. R scripts facilitating manipulation of the database and calculation of indicators are also provided (see Code availability).

2.5. Technical validation

Before proceeding to analyses, the data underwent a data quality assessment to ensure its reliability, besides the initial check of impossible values in the raw data. This quality assessment was highly critical for many reasons. First, some variables (technical and economic) were very difficult to collect in a reliable and harmonized way, which required an important phase of consistency checks and adjustments. Second, a minority of farmers provided accounting documents for precisely quantifying inputs and outputs. This was due to the low cultural acceptability of sharing accounting documents in several of the surveyed countries. Consequently, economic variables at farm level were missing for many farms (e.g. gross product, subsidies, debts, etc.) and the economic section of the survey was removed from the final database. Farmer estimation of annual income per associate and farmer satisfaction regarding income were the only variables kept from this section. They were included in human welfare indicators. Lastly, it was also difficult to precisely estimate the stocks of inputs and products at the beginning and end of the production year though these data are essential to calculate reliable technical and economic indicators over a production year²⁶.

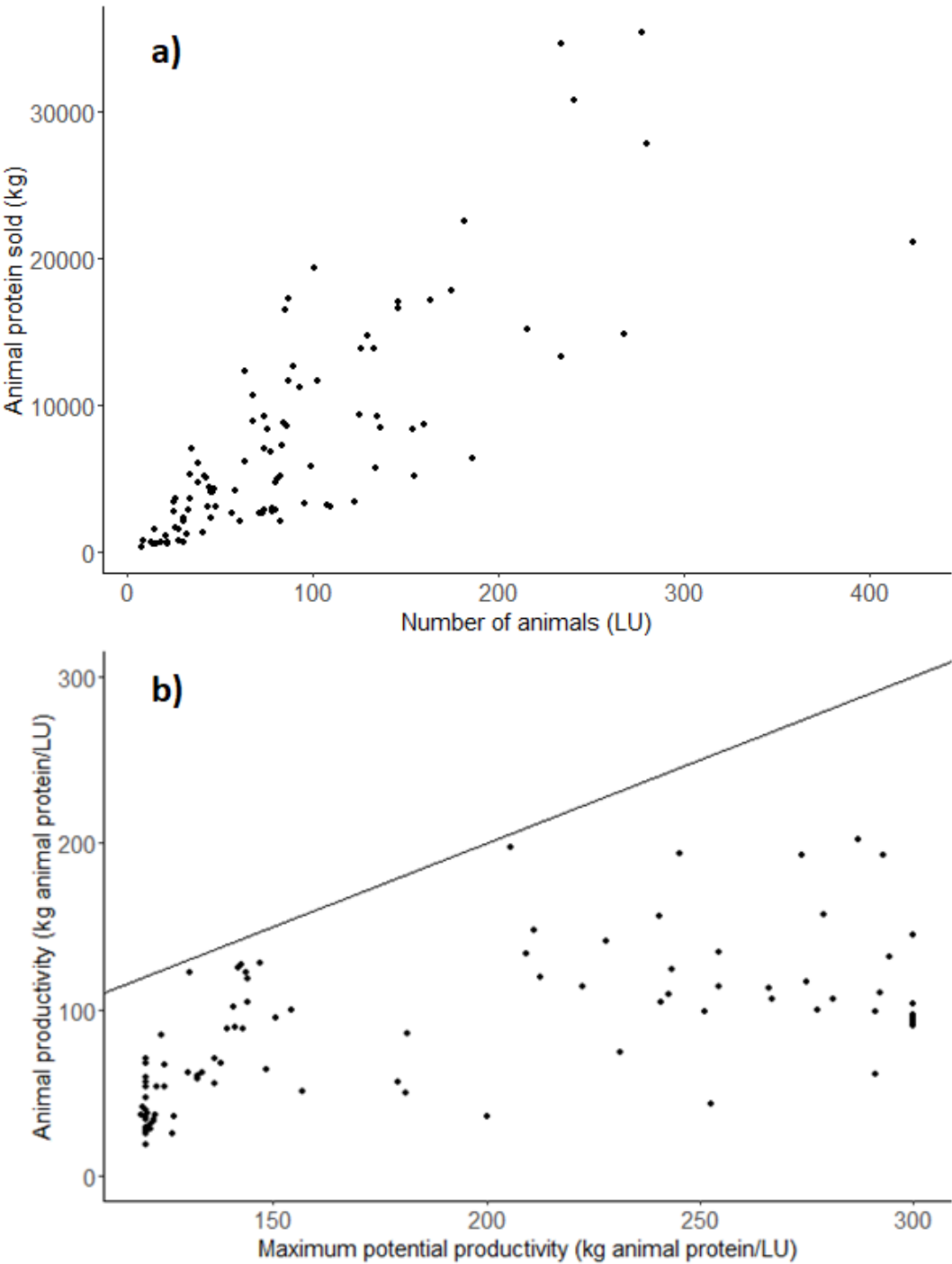
In the first step, product sales were therefore checked against the resources listed on the farm, i.e. the number of animals in each category, particularly breeding animals for ruminants, and the area dedicated to each crop. The coherence of product sales and animal numbers or crop areas was essential as many indicators were calculated based on these data. As surveys were based on a typical or “average” year, i.e. data smoothed across the years, it was particularly difficult to account for the strong variability of stocks and products sold from one year to another. This was especially true for farms with ruminant meat production as well as for farms with grain production. For instance, a farmer with a suckler cattle herd could keep all 50 calves born in year n for fattening and sale in year $n+1$. In case all previously born calves were sold during year $n-1$, there would be no sales during year n . In that case, using data from year n would lead to a dramatic under-estimation of productivity for that farm. As we did not have

access to accounting documents for most farms, we opted for correcting sales by stating that the number of animals sold during a year is close to, or slightly lower than, the number of reproductive animals. In cases where there were large discrepancies between estimated and actual sales due to important stock fluctuations, farmers were phone-called to get more information on stock variations and we removed or added animal sales accordingly. Self-consumption was not specifically asked for in the survey, whereas it could have a significant impact on small farm performances and lead to the underestimation of their productivity. It was not possible for us to add an evaluation of self-consumed products but the previously explained consistency adjustments could have helped in reducing this issue. Similarly, the coherence between grain products sold and the area, yield and amounts allocated to sales or on-farm consumption by animals of said grain crop was also checked.

In a second step, to identify inconsistent values, feed purchases and on-farm feed production were checked by comparing them to the theoretical needs of each animal enterprise, considering a large range of variation (lower and upper levels), with the expertise of researchers involved in the project. In order to identify farms where feed consumption was inconsistent, the amount of meat/milk/eggs produced per LU was plotted against the concentrate consumption (purchased + produced) per LU for that enterprise. When on-farm production could not be allocated to fill the gap in concentrate consumption, a purchase of inputs was added in order to obtain the minimum concentrate consumption needed to achieve observed production levels. This was the case when no consumption of feed concentrates occurred, e.g. in milk production or for monogastric animals. Each proposal of adjustment was validated by the farm surveyor.

In a third step, meaningful intermediate output variables were plotted to identify outliers and validate the corrections made in earlier steps. This included plotting for example the total amount of proteins from animal products against the number of LU on the farm (Fig. 2a) and plotting the farm animal productivity (kg protein per total farm LU) against the maximum possible protein production per LU (Fig. 2b). This maximum value capped production to what experts estimated to be physically achievable and allowed the identification of unrealistic productivity values. Caps, i.e. maximum possible values, were based on high animal productivity levels observed in the European context: 10000 kg milk per year per cow, 1400 g daily weight gain for beef cattle, 2 lambs produced (each 50 kg live weight) per year per ewe, 3.1 kg live weight per broiler, 150 kg live weight per pig and 290 eggs per year per hen. These graphs showed that all productivity values were within a reasonable realm for farms kept in the final database.

Figure 1: Graphs used for data validation: a) Animal protein sold according to the number of LU at farm level; and b) Animal productivity (in kg of animal protein per LU) depending on the maximum potential productivity (in kg of animal protein per LU). The black line represents the calculated maximum productivity which is achievable for that number of LU.



2.6. Usage notes

The overall strategy that guided the development of this database was to collect farm data offering a first overview of organic multi-species livestock farms at the European level. As explained in the Methods section, this farm sample cannot be considered as representative of the population of European organic multi-species livestock farms which remains unknown. Instead, it covers a diversity of farming contexts (regarding climate, soil, market and regulatory conditions), farms (especially in terms of size and livestock species combination raised) and farming practices (especially regarding those practices determining the level of interactions among livestock species e.g. co-grazing, sequential grazing or grazing on separate pastures). This diversity can eventually be simplified using structural and preferably functional farm typologies²⁷.

Against the limited spread of organic multi-species livestock farms, a key issue is to determine the livestock species combinations and management practices (e.g. appropriate stocking rate) especially the level of integration among farm enterprises (e.g. presence/absence of co-grazing, by-product flows among enterprises) required to observe the potential benefits of livestock diversity and avoid undesirable effects (e.g. competition among livestock species at grazing). The database presented in this article is well-suited to such research. It allows identifying farm performance patterns across one to several sustainability dimensions and relating these patterns to explanatory variables including farm structures and farmers' management practices.

Development of this database was very ambitious because it addressed multiple dimensions of structure, management and sustainability in complex farming systems (diversity of crop and livestock enterprises, of livestock species, of sales channels, etc.). This required gathering a large range of very varied and complementary raw data allowing cross-verification and aiming at understanding farming system coherence. As a result, data collection across several countries turned out to be difficult, leading to an important consolidation and validation phase. Thus, it is important that users consider the survey procedures and the potential biases and limitations mentioned in the technical validation part.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support for the MIX-ENABLE project provided by transnational funding bodies, being partners of the H2020 ERA net project, CORE Organic Cofund, and the cofund from the European Commission.

Author contributions

GM and MBe coordinated the overall work. LSt, MMoe, MD, LSc, GM and MBe designed the survey guide. GB, MBl, CB, BD, DP, RP, PV, CW gave inputs during the design of the survey guide. LSt, MMoe, GB, MBl, MD, EL, TM, MMor, BO, RP, LSc conducted the surveys. DU, MMoe, MD, EL, FV compiled the data. DU, LSt, GM and MBe checked the consistency of the data. DU and GM drafted the manuscript. All co-authors contributed to the finalization of the manuscript.

Competing interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Code availability

Scripts and other materials used to calculate indicators can be found at: <https://doi.org/10.15454/AKEO5G>. Scripts were written under R 4.0.2 through RStudio. They are available in R or Rmd formats. Scripts were named after the theme the indicators they calculate are related to. One script can calculate several indicators around the same theme. External data used in indicator calculations (such as protein content of farm products) were stored in CSV files with a title starting with “References”. The “Initial script” runs all scripts and saves the resulting indicator database.

References

Mottet, A. *et al.* Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Glob. Food Secur.* **14**, 1–8 (2017).

- Ertl, P., Klocker, H., Hörtenhuber, S., Knaus, W. & Zollitsch, W. The net contribution of dairy production to human food supply: The case of Austrian dairy farms. *Agric. Syst.* **137**, 119–125 (2015).
- Muscat, A., de Olde, E. M., de Boer, I. J. M. & Ripoll-Bosch, R. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Glob. Food Secur.* **25**, 100330 (2020).
- Herrero, M. *et al.* Livestock and the Environment: What Have We Learned in the Past Decade? *Annu. Rev. Environ. Resour.* **40**, 177–202 (2015).
- Leip, A. *et al.* Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environ. Res. Lett.* **10**, 115004 (2015).
- Bai, Z. *et al.* China’s livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Sci. Adv.* **4**, eaar8534 (2018).
- Bowles, N., Alexander, S. & Hadjikakou, M. The livestock sector and planetary boundaries: A ‘limits to growth’ perspective with dietary implications. *Ecol. Econ.* **160**, 128–136 (2019).
- Tomich, T. P. *et al.* Agroecology: A Review from a Global-Change Perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **36**, 193–222 (2011).
- Holt-Giménez, E. & Altieri, M. A. Agroecology, Food Sovereignty, and the New Green Revolution. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **37**, 90–102 (2013).
- Dumont, B., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M., Thomas, M. & Tichit, M. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *animal* **7**, 1028–1043 (2013).
- Kremen, C., Iles, A. & Bacon, C. Diversified Farming Systems: An Agroecological, Systems-based Alternative to Modern Industrial Agriculture. *Ecol. Soc.* **17**, (2012).
- Di Falco, S. & Chavas, J.-P. On crop biodiversity, risk exposure, and food security in the highlands of Ethiopia. *Am. J. Agric. Econ.* **91**, 599–611 (2009).

Dardonville, M., Urruty, N., Bockstaller, C. & Therond, O. Influence of diversity and intensification level on vulnerability, resilience and robustness of agricultural systems. *Agric. Syst.* **184**, 102913 (2020).

Dumont, B. *et al.* Incorporating Diversity Into Animal Production Systems Can Increase Their Performance and Strengthen Their Resilience. *Front. Sustain. Food Syst.* **4**, 109 (2020).

Wachter, J. M., Painter, K. M., Carpenter-Boggs, L. A., Huggins, D. R. & Reganold, J. P. Productivity, economic performance, and soil quality of conventional, mixed, and organic dryland farming systems in eastern Washington State. *Agric. Ecosyst. Environ.* **286**, 106665 (2019).

Wieme, R. A., Reganold, J. P., Crowder, D. W., Murphy, K. M. & Carpenter-Boggs, L. A. Productivity and soil quality of organic forage, quinoa, and grain cropping systems in the dryland Pacific Northwest, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* **293**, 106838 (2020).

Martin, G. *et al.* Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric. Syst.* **181**, 102821 (2020).

Sehested, J., Søgaard, K., Danielsen, V., Roepstorff, A. & Monrad, J. Grazing with heifers and sows alone or mixed: herbage quality, sward structure and animal weight gain. *Livest. Prod. Sci.* **88**, 223–238 (2004).

Fraser, M. D., Moorby, J. M., Vale, J. E. & Evans, D. M. Mixed Grazing Systems Benefit both Upland Biodiversity and Livestock Production. *PLOS ONE* **9**, e89054 (2014).

Cuchillo-Hilario, M., Wrage-Mönnig, N. & Isselstein, J. Forage selectivity by cattle and sheep co-grazing swards differing in plant species diversity. *Grass Forage Sci.* **73**, 320–329 (2018).

European Commission. Food Accountancy Data Network. (2020). Available at: <https://ec.europa.eu/agriculture/rica/>. (Accessed: 07th January 2020).

INRAE. Charter of deontology, scientific integrity and ethics. (2020). Available at: https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Charte-Deontologie_INRAE%5BFr%5D_Print_0.pdf.

European Commission. Data protection. (2020). Available at:
https://ec.europa.eu/info/law/law-topic/data-protection_en. (Accessed: 07th January 2020).

U.S. Department of Agriculture. FoodData Central. (2020). Available at:
<https://fdc.nal.usda.gov/>. (Accessed: 07th January 2020).

NRAE-CIRAD-AFZ. Tables of composition and nutritional values of feed materials INRAE CIRAD-AFZ. (2020). Available at: <https://www.feedtables.com/>. (Accessed: 07th January 2020).

Benoit, M. & Laignel, G. Methods for processing technical and economic data on suckling sheep. The case of plain and mountain areas in France. *Options Méditerranéennes. Serie A, Séminaires Méditerranéens* **70**, 57-65 (2006). Available at:
<https://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=800006>.

Tittonell, P., Bruzzone, O., Solano-Hernández, A., López-Ridaura, S. & Easdale, M. H. Functional farm household typologies through archetypal responses to disturbances. *Agric. Syst.* **178**, 102714 (2020).

CHAPITRE 5:
L'UTILISATION DES CONCENTRÉS
AU CŒUR DE L'EFFICIENCE PRODUCTIVE
DES SYSTÈMES MIXTES D'ÉLEVAGE
EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

L'utilisation des concentrés au cœur de l'efficacité productive des systèmes mixtes d'élevage en agriculture biologique

Lucille Steinmetz¹, Patrick Veysset¹, Bertrand Dumont¹, Guillaume Martin², Anne De la Foye¹, David Parsons³, Leonardo Monteiro³, Defne Ulukan², Marc Benoit¹

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

² AGIR, Université de Toulouse, INRAE, F-31320 Castanet-Tolosan, France

³ Swedish University of Agricultural Sciences, 90183 Umea, Sweden

A soumettre à *Animal*

Résumé

En agriculture biologique, la gestion des systèmes d'élevage repose fortement sur la recherche d'autonomie pour l'alimentation des troupeaux, c'est-à-dire sur l'utilisation par les animaux de ressources produites sur l'exploitation avec un minimum d'achat. L'objectif de cette étude était d'identifier les principaux déterminants structurels et de pratiques de l'efficacité productive des systèmes d'élevage mixtes. L'efficacité productive de ces systèmes d'élevage est évaluée relativement à l'utilisation de trois types de ressources : les intrants nécessaires à la production d'aliments et à l'alimentation des animaux, les aliments concentrés consommés par les animaux, et la part des aliments consommés par les animaux en compétition avec l'alimentation humaine. L'analyse a été réalisée sur 96 fermes d'élevage mixtes conduites en agriculture biologique dans six pays européens et couvrant une large gamme de combinaisons de productions animales (bovins, petits ruminants, lait ou viande, porcs, volailles). Pour nous affranchir des différences de performances moyennes entre chaque espèce animale, nous avons calculé des indicateurs d'efficacité relatifs à chacun des ateliers de production animale et pondérés à l'échelle de la ferme. Nous avons utilisé la méthode des régressions des moindres carrés partiels, afin d'identifier des relations entre 45 variables explicatives (regroupées en variables de structure, d'intensification des facteurs de production, d'intégration entre

composantes du système), et les trois variables caractérisant l'efficacité d'utilisation des ressources. Les résultats ont montré que la quantité d'aliments concentrés consommés par les animaux est le déterminant majeur de l'efficacité d'utilisation de ces aliments et d'utilisation des aliments en compétition avec l'alimentation humaine. La consommation de concentrés pénalise l'efficacité productive des ateliers de production animale. Les interactions biotechniques entre ateliers, telle que l'utilisation par les animaux des grains produits sur la ferme, pénalisent également l'efficacité productive. Toutefois, en systèmes mixtes ruminants, une meilleure valorisation de l'herbe via le pâturage mixte entre bovins et ovins et la consommation de ressources fourragères provenant des surfaces en grandes cultures (résidus et intercultures) sont des leviers de gain d'efficacité d'utilisation des aliments concentrés. Les compétences des éleveurs (polyvalence) et des salariés peuvent être garantes d'une gestion fine des interactions entre ateliers et ainsi permettre une meilleure efficacité productive, particulièrement pour les systèmes associant bovins et monogastriques avec des cultures. Les interactions cultures-élevage se résument principalement à l'utilisation des céréales pour l'alimentation animale, ce qui renforce la compétition entre alimentation animale et humaine.

Mots clés : régression PLS, intégration, organisation du travail, gestion de la commercialisation, polyculture-polyélevage

Implications

La performance productive des systèmes d'élevage est facilement mesurable (et mesurée) pour les systèmes de productions spécialisés, ce qui permet de comparer des fermes de même orientation de production entre elles. Pour évaluer, analyser, comparer les performances de fermes diversifiées polyculture-polyélevage, nous proposons de nous intéresser à leur efficacité d'utilisation des ressources internes ou achetées. Cette efficacité est au cœur de l'agroécologie qui promeut la diversification des ressources et des productions. Les indicateurs que nous définissons et notre analyse permettront de mettre en évidence les structures et stratégies productives les plus efficaces, mais pointeront également des synergies ou antagonismes entre différents objectifs d'utilisation de ces ressources.

1. Introduction

L'agriculture biologique (AB) se caractérise par une interdiction d'utiliser des intrants de synthèse (pesticides et engrais) et issus d'OGM et par un fort lien au sol, d'après le Règlement Européen No 834/2007 (EU 2007). Pour pallier ces interdictions et le prix élevé des intrants autorisés en AB, les exploitants en agriculture biologique ont développé des stratégies pour maintenir une productivité de leur système de production suffisante à partir d'un minimum d'intrants, en particulier en adoptant différentes voies de diversification : polyculture-élevage, mixité d'espèces animales dans les systèmes herbagers, modes de commercialisation, etc. En effet, les systèmes diversifiés, incluant intentionnellement de la diversité fonctionnelle, c'est-à-dire une diversité de cultures, de prairies et d'animaux d'élevage (Kremen et al. 2012), sont considérés comme vertueux et sont particulièrement prisés en agroécologie et en agriculture biologique (Kremen et al. 2012; Ponisio et al. 2015; Dumont et al. 2020b). La mise en interaction des différentes composantes (ou ateliers) du système dans le temps et dans l'espace permet aux exploitants de bénéficier de synergies et de tirer avantage des services écosystémiques limitant le recours aux intrants d'origine pétrochimique (Hendrickson et al. 2008). Au sein des exploitations agricoles diversifiées, les relations entre le niveau d'interactions entre ateliers et la multi-performance de l'exploitation a été étudiée en polyculture-élevage (Bell and Moore 2012; Ryschawy et al. 2014; Veysset et al. 2014), mais que très rarement dans les systèmes d'élevage mixte (Mugnier et al. 2020; Steinmetz et al. 2021), c'est-à-dire ceux où au moins deux espèces animales sont présentes simultanément sur l'exploitation (Martin et al. 2020). Un objectif du projet CORE Organic MIX-ENABLE est d'améliorer la connaissance de ces systèmes et de leurs atouts. Cette étude porte plus spécifiquement sur l'efficacité d'utilisation des ressources. L'efficacité reflète la capacité de production de ces systèmes à partir d'une quantité de ressources donnée (Veysset et al. 2015). Trois types de ressources sont à considérer pour calculer l'efficacité des systèmes : (i) les biens et services acquis auprès d'un tiers (dénommés par la suite intrants), pour évaluer la capacité du système à optimiser l'utilisation des ressources externes, (ii) les aliments concentrés pour évaluer la capacité du système à optimiser l'utilisation de ces aliments coûteux en AB, et (iii) les aliments distribués aux animaux et consommables par l'Homme pour évaluer la compétition entre alimentation animale et alimentation humaine, et la contribution nette des systèmes mixtes à la production d'aliments pour l'Homme (Wilkinson 2011; Mottet et al. 2017). Même s'ils sont moins productifs que les systèmes conventionnels, les systèmes en AB peuvent en effet être plus efficaces comme l'ont montré Gaudaré et al. (2021) pour les systèmes laitiers en AB

où la part de l'herbe dans la ration est élevée; nous cherchons ici à identifier un bénéfice supplémentaire lié à la combinaison d'espèces.

La gestion des systèmes de production agroécologique repose fortement sur la recherche d'autonomie alimentaire pour l'alimentation des troupeaux et sur le bouclage des cycles des nutriments (Dumont et al. 2013; Soussana and Lemaire 2014; Moraine et al. 2014). Ceci nous conduit ici à concentrer nos efforts sur les intrants touchant à l'alimentation des troupeaux et à la fertilisation des surfaces. Nos objectifs spécifiques sont 1) d'évaluer l'efficacité des systèmes d'élevage mixtes en agriculture biologiques, et 2) d'identifier les caractéristiques structurelles et de pratiques qui expliquent le mieux les différences d'efficacité d'utilisation des ressources dans ces systèmes. Notre échantillon d'étude est constitué d'exploitations en AB enquêtées dans six pays européens, qui couvrent une large gamme de combinaisons d'espèces parmi lesquelles des bovins, laitiers ou allaitants, des petits ruminants, laitiers ou allaitants, des porcs, des poulets de chair et des poules pondeuses. Nous faisons l'hypothèse que les interactions entre ateliers de production permettent d'améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources dans les systèmes mixtes d'élevage en agriculture biologique.

Après avoir présenté l'échantillon d'étude, nous détaillons le calcul des trois variables d'efficacité et calculons l'efficacité de chacune des productions. Nous proposons ensuite une méthode de calcul de l'efficacité de l'ensemble des ateliers de productions animales d'une exploitation qui s'affranchit des différences intrinsèques à chaque production. Enfin, nous utilisons la méthode de régression des moindres carrés partiels (Partial Least Squares, PLS) pour identifier les déterminants de l'efficacité des ateliers de production animale d'une exploitation parmi les variables de structure, les pratiques d'intensification et d'intégration, et les stratégies d'organisation du travail mises en œuvre selon les compétences et l'expérience des agriculteurs.

2. Matériels et méthodes

2.1. L'échantillon

Notre étude porte sur des fermes d'élevage mixtes conduites en agriculture biologique et enquêtées dans le cadre du projet MixEnable. 102 fermes y ont participé dans sept pays (Allemagne, Autriche, Belgique, France, Italie, Suède et Suisse) entre 2018 et 2019. Les

fermes ont été sélectionnées selon trois critères : (i) avoir deux ateliers animaux à visée commerciale dont un atelier ruminant, (ii) être certifiées en agriculture biologique et avoir terminé la période de conversion, et (iii) être gérées par au moins un demi équivalent temps plein pour donner l'assurance d'analyser des fermes d'élevage professionnelles potentiellement viables. L'échantillon cherche à couvrir une large gamme de diversité dans la limite de ces critères. En l'absence de statistiques auxquelles on puisse se référer, on ne peut toutefois pas affirmer que ces fermes soient représentatives de la diversité des systèmes d'élevage mixtes européens en agriculture biologique.

Les données ont été obtenues à partir d'entretiens semi-directifs comptant une majorité de questions appelant des réponses quantitatives ou binaires, et quelques questions ouvertes sur la gestion des productions. Ces entretiens ont été réalisées lors de visites en ferme. Les données enquêtées permettent de caractériser la structure des exploitations (surface, travailleurs, troupeau, ...), la conduite des troupeaux, des prairies, et des cultures, l'organisation du travail et les circuits de commercialisation mis en œuvre. Elles permettent de calculer des indicateurs d'intégration (Steinmetz et al., under review, cf. chapitre 3) et de performances qui couvrent ces différentes dimensions. Un data paper (Ulukan et al., under review, cf. chapitre 4) présente avec plus de détails les données utilisées, leur mode de collecte et les vérifications et corrections qui ont été réalisées. Dans cette base de données de 102 fermes, nous en avons retenues 96 dans six pays (Allemagne, Autriche, Belgique, France, Italie et Suède) pour lesquelles nous disposons de données complètes (quantité et type) pour les achats et les ventes. Des données manquantes, par exemple sur la polyvalence des travailleurs, ont été complétées à l'aide de l'algorithme NIPALS (Tenenhaus Michel 1998). L'échantillon de 96 fermes regroupe à la fois des systèmes en polyculture - polyélevage (PCPE) et des systèmes de polyélevage herbagers, et couvre une large gamme de productions animales. Nous avons considéré que deux troupeaux d'une même espèce, allaitants et laitiers, conduits en deux troupeaux distincts représentaient deux ateliers au sein d'une exploitation. Par contre les poulets de chair n'ont pas été distingués des poules pondeuses et sont répertoriés sous le terme « production de volailles » ; nous faisons l'hypothèse que les variables relatives à la conduite de ces ateliers sont relativement proches.

Les analyses ont été réalisées sur l'échantillon des 96 fermes et sur quatre sous-échantillons : les systèmes de PCPE (71 fermes), et trois combinaisons d'espèces en PCPE : les systèmes bovins viande – ovins viande (BV-OV, 16 fermes), les systèmes bovins viande – monogastriques (BV-Mono, 26 fermes) et les systèmes bovins lait – monogastriques (BL-Mono, 16 fermes ; Tableau 1). Les monogastriques regroupent les porcs et les volailles. Ce

sous-échantillonnage permet de limiter la variabilité structurelle qui existe au sein des échantillons afin de mettre en évidence des déterminants de l'efficacité (liés aux structures d'exploitation ou aux stratégies mises en œuvre par les éleveurs) dont certains pourraient être spécifiques à certaines combinaisons d'espèces.

Tableau 1 : présentation des caractéristiques structurelles de l'échantillon global, polyculture-polyélevage (PCPE), bovins viande – ovins viande (BV-OV) en PCPE, bovins viande – monogastrique (BV-Mono) en PCPE et bovins lait – monogastrique (BL-Mono) en PCPE. L'écart-type est représenté entre crochets « [] ». L'équi-répartition des animaux est appréhendée par l'indice d'équitabilité de Pielou calculé à partir de la répartition des UGB totales entre chaque atelier. PP : prairies permanentes, FCrop : cultures fourragères annuelles.

	Global	PCPE	BV-OV PCPE	BV-Mono PCPE	BL-Mono PCPE
Nb de fermes	96	71	16	26	16
Surface totale en ha	99 [82]	109 [86]	106 [66]	121 [109]	112 [91]
%PP	38 [33]	31 [25]	30 [25]	35 [24]	21 [20]
%FCrop	3.4 [6.1]	4.7 [6.6]	4.9 [5.7]	4.5 [7.8]	4.7 [13]
% parcours	14 [26]	7.4 [14]	2.4 [6.6]	5.6 [9.4]	11
Nb de travailleurs en UTH	5.6 [7.9]	6.3 [9]	1.5 [0.7]	3.3 [1.9]	9.6 [11]
% salariés	25 [28]	27 [30]	11 [21]	32 [29]	45 [33]
UGB	89 [72]	97 [73]	65 [34]	111 [79]	123 [96]
% UGB de l'atelier dominant	74 [15]	75 [15]	79 [13]	74 [17]	76 [15]
Equi-répartition des animaux	0.69 [0.25]	0.68 [0.25]	0.69 [0.24]	0.67 [0.29]	0.67 [0.23]

2.2. Les variables

2.2.1. Les variables d'efficacité

L'efficacité productive d'un système illustre sa capacité à produire un bien (output) à partir d'une quantité donnée de facteurs de production (input) (Veysset et al. 2015) et est communément définie par le ratio « output/input ». Le rapport inverse « input/output » est également utilisé, notamment en alimentation animale avec le « feed conversion ratio », qui met en avant la notion de conversion alimentaire (Wilkinson 2011; Mottet et al. 2017). Pour éviter la présence d'un dénominateur nul pour les systèmes autonomes (sans input), nous calculons le rapport inverse de l'efficacité, c'est-à-dire les « facteurs de production » rapportés aux « biens produits ».

On peut calculer différents types d'efficacité selon les outputs et les inputs considérés. Dans notre étude, nous en avons défini trois (Fig.1) :

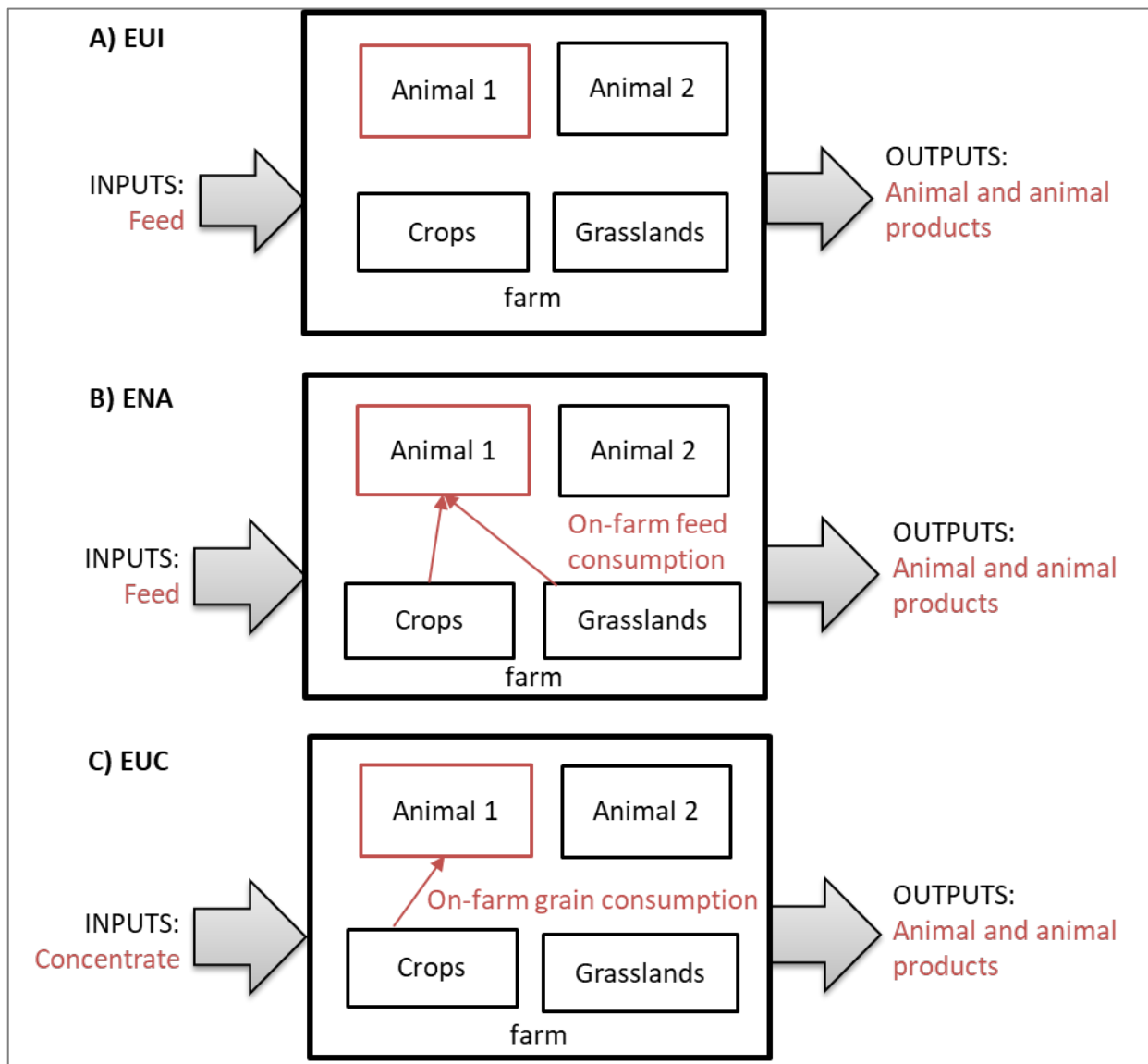
- L'efficacité d'utilisation des intrants (EUI) correspond aux aliments, engrais organiques et semences qui entrent dans le système, qu'ils soient achetés, reçus ou échangés, rapportés à la production du système qu'elle soit vendue ou stockée (ex. le gain de poids sur l'année des animaux engraisés mais non vendus).
- L'efficacité nette alimentaire (ENA) correspond à l'ensemble des protéines consommées par les animaux rapporté à la production de protéines des ateliers d'élevage, en ne tenant compte que de la proportion des protéines consommable par l'Homme (Laisse et al. 2018).
- L'efficacité d'utilisation des aliments concentrés (EUC) correspond aux grains, aliments composés, tourteaux, drèches, lait en poudre et luzerne déshydratée consommés par les animaux, qu'ils soient achetés ou produits sur la ferme, rapportés à la production des ateliers d'élevage.

Afin de pouvoir cumuler différentes productions telles que le grain, la viande, les œufs, le lait, nous avons choisi comme unité commune le kg d'azote (N) pour calculer l'efficacité. C'est en effet un nutriment essentiel et souvent limitant en agriculture (Rufino et al. 2009). De plus l'azote a deux facettes, c'est à la fois une ressource pour la production et un excédent pouvant avoir un impact environnemental négatif. Les coefficients de conversion en N des aliments du

bétail et des produits animaux et les proportions de protéines consommables par l'Homme (PCH) dans ces aliments et produits sont disponibles en annexe 1.

L'efficacité d'utilisation des intrants est calculée à l'échelle de la ferme et des ateliers de production animale de la ferme, alors que l'efficacité d'utilisation des concentrés et l'efficacité nette alimentaire ne sont calculées qu'à l'échelle des ateliers de production animale.

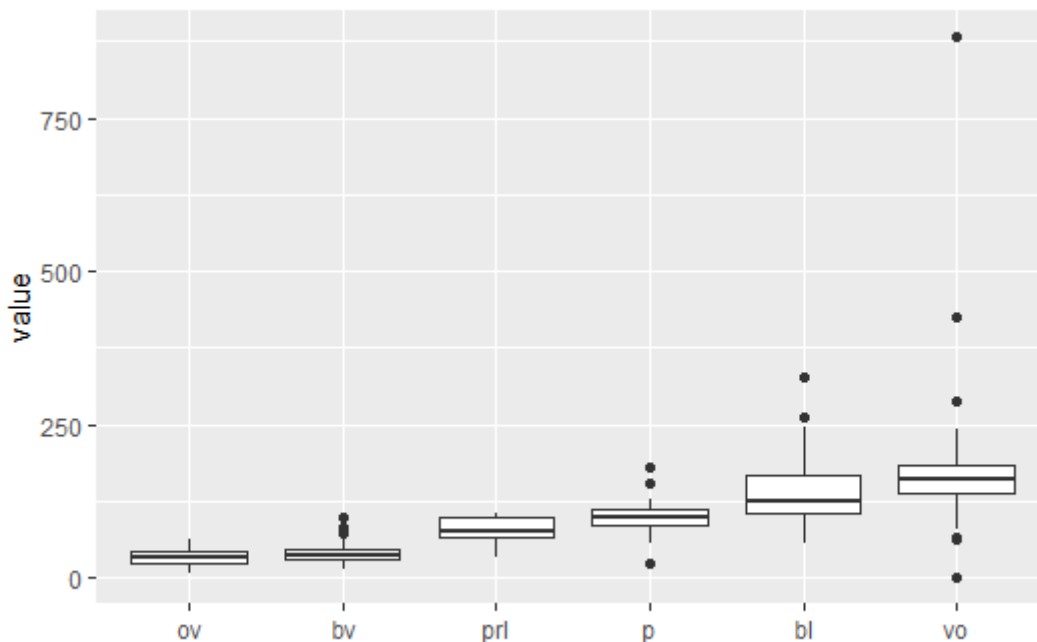
Figure 1 : Schématisation du calcul des trois indicateurs d'efficacité à l'échelle de l'atelier de production animale. A) efficacité d'utilisation des intrants (EUI), B) efficacité nette alimentaire (ENA), et C) efficacité d'utilisation des concentrés (EUC).



2.2.2. L'efficacité relative aux ateliers de production animale

Pour pouvoir étudier conjointement des fermes avec des ateliers de production animale différents, nous proposons une méthode permettant de s'affranchir des écarts de productivité associées aux caractéristiques des diverses espèces et productions étudiées (Fig.2). Par exemple, une vache laitière produit grâce au lait bien plus de protéines par UGB qu'une vache allaitante (Mosnier et al. 2021).

Figure 2 : Distribution du niveau de production animale exprimé en kg N par UGB pour les six ateliers de production animale présents dans l'échantillon. Nous avons fait le choix de regrouper les ovins laitiers et les caprins laitiers au sein d'une catégorie de petits ruminants laitiers (prl), bv : bovin viande, ov = ovin viande, bl : bovin laitier, p : porc, vo : volaille.



La méthode consiste en trois étapes (Fig.3) :

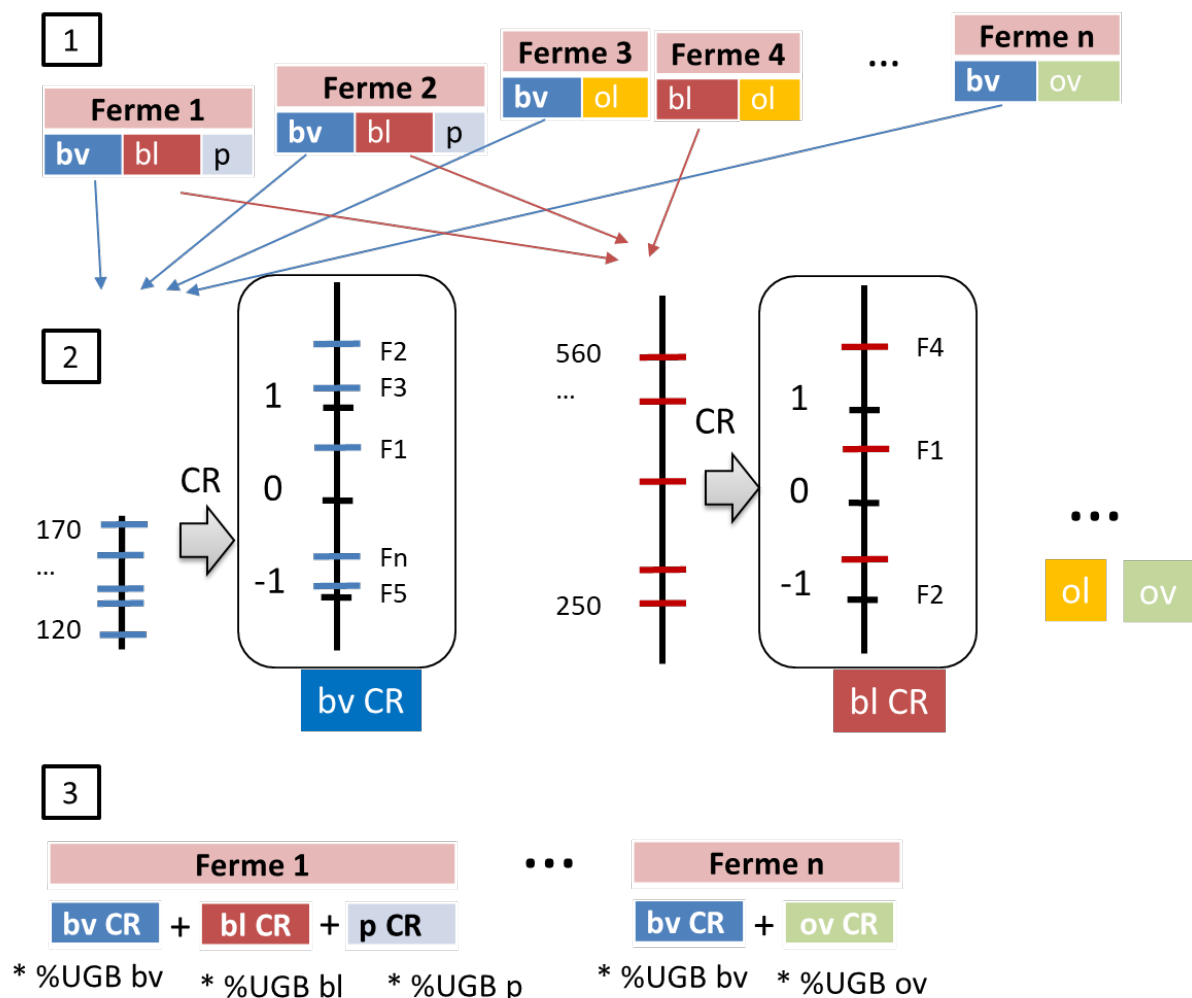
1. Calculer l'efficacité de chaque atelier animal pour chaque ferme de l'échantillon
2. Centrer et réduire l'efficacité de chaque atelier parmi les exploitations de l'échantillon ayant cette même production animale
3. Sommer les efficacités centrées-réduites des ateliers animaux de chaque ferme en pondérant les valeurs d'efficacité centrées-réduites au prorata des UGB représentées par chaque atelier dans les UGB totaux de la ferme (équation 1).

$$\text{Efficience relative} = \sum_{i=1}^n \text{efficience}_{i,CR} * \%UGB_i \quad (1)$$

où i est l'atelier animal, n correspond au nombre d'ateliers animaux sur la ferme, et CR signifie centré-réduit.

Ainsi, les déterminants de l'efficience sont identifiés sur la base de l'efficience relative aux ateliers de production animale de la ferme. L'efficience relative est calculée relativement à chaque échantillon considéré.

Figure 3 : Représentation schématique des trois étapes pour construire un indicateur relatif aux productions animales de la ferme. 1) Calcul de l'indicateur à l'échelle de chaque atelier animal de la ferme, 2) Centrage et réduction de l'indicateur de chaque atelier, 3) Construction d'un indicateur relatif aux productions animales de la ferme. UBG = unité gros bovin, ov = ovin viande, ol = ovin lait, bv= bovin viande, bl= bovin lait, p = porc, CR= centré réduit.



2.2.3. Les variables explicatives

Les variables explicatives regroupent des variables de structure (la surface agricole et l'assolement, les travailleurs, la taille de troupeau et sa composition, ...), des variables d'intensification des facteurs de production telles que la surface agricole (UGB/ha) et le travail (UGB/UTH), des variables d'intégration entre composantes du système selon les trois dimensions (les pratiques agricoles, l'organisation du travail et la gestion de la commercialisation) définies par Steinmetz et al. (under review, chapitre 3), des variables technico-économiques telles que la consommation de concentrés, la valorisation économique par UGB et des variables sur l'expérience agricole des agriculteurs avant l'installation. Ces variables explicatives sont présentées dans le tableau 2. Parmi les variables technico-économiques, la consommation d'aliments concentrés, la productivité animale, la valorisation économique et la commercialisation en circuit court des animaux et produits animaux ont été calculées à l'échelle des productions animales en appliquant la même méthode que pour les variables d'efficacité (voir §2.2.2) et sont associées à une variable d'hétérogénéité inter-ateliers de la ferme. La variable relative aux productions animales est notée L_{nom} « nom de la variable » et la variable d'hétérogénéité associée est notée H_{nom} « nom de la variable » (voir les abréviations dans le tableau 2). La variable d'hétérogénéité permet de tenir compte des différences de gestion entre les ateliers animaux de la ferme. Elle correspond à la moyenne en valeur absolue des écarts deux à deux des valeurs centrées-réduites des ateliers animaux de la ferme pour l'indicateur étudié (équations 2 et 3).

$$\text{si } n = 2 \text{ ateliers, } H_v = \frac{|v_{CR,1} - v_{CR,2}|}{2 (= n)} \quad (2)$$

$$\text{si } n = 3 \text{ ateliers, } H_v = \frac{(|v_{CR,1} - v_{CR,2}|) + (|v_{CR,1} - v_{CR,3}|) + (|v_{CR,2} - v_{CR,3}|)}{3} \quad (3)$$

où $|v_{CR,1} - v_{CR,2}|$ correspond à l'écart absolu entre de la variable centrée-réduite pour l'atelier 1 et la variable centrée-réduite pour l'atelier 2.

Lorsque la variable d'hétérogénéité tend vers 0, on observe des stratégies de gestion des ateliers convergentes en termes de performance (tous très bons, tous moyens ou tous moins performants). Plus la variable d'hétérogénéité prend une valeur élevée, plus la différence de stratégie et/ou de performance entre les ateliers est importante, avec ainsi un contraste important entre ateliers pour la variable considérée.

Les variables explicatives relatives et les variables d'hétérogénéité sont calculées relativement à chaque échantillon considéré. Ainsi pour le sous-échantillon de fermes bovins viande – ovins viande par exemple, le centrage – réduction de l'EUI calculé sur l'atelier bovin viande est réalisé sur l'ensemble des ateliers bovins de cet échantillon bovin viande – ovin viande.

Tableau 2 : Variables retenues pour identifier les déterminants de l'efficience productive des fermes mixtes d'élevage en agriculture biologique.

Catégorie	Variable	Détails	Abréviation	Unité
Structure	Surface totale	Surface agricole utile + surface en parcours	land	ha
	Grandes cultures	Surface de cultures annuelles non fourragères	CashCrop	ha
	Pourcentage de cultures	Pourcentage de cultures annuelles non fourragères dans le surface totale	CCrop/land	% de la surface totale
	Pourcentage de cultures fourragères	Pourcentage de cultures annuelles fourragères dans le surface totale	FCrop/land	% de la surface totale
	Pourcentage de prairies permanentes	Pourcentage de prairies permanentes dans la surface totale	PG/land	% de la surface totale
	Pourcentage de parcours	Pourcentage de parcours dans la surface totale	rangeland/land	% de la surface totale
	UGB totaux	Le calcul des ugb tient compte de la variabilité intra spécifique de la taille des animaux et de leurs besoins alimentaires. Pour les herbivores les coefficients UGB sont ajustés en fonction du poids métaboliques de la mère. Les coefficients UGB des monogastriques ont été adaptés sur la base de leur consommation de concentrés en AB à l'aide d'avis d'experts. Pour plus de détails, consulter le chapitre 2	LUt	UGB
	Bovins viande	Pourcentage d'ugb bovins viande dans les ugb totaux	bc_lu_percent	% des UGB totaux
	Bovins lait	Pourcentage d'ugb bovins lait dans les ugb totaux	dc_lu_percent	% des UGB totaux
	Ovins viande	Pourcentage d'ugb ovins viande dans les ugb totaux	ms_lu_percent	% des UGB totaux
	Porcs	Pourcentage d'ugb porcs dans les ugb totaux	p_lu_percent	% des UGB totaux
	Volailles	Pourcentage d'ugb volailles dans les ugb totaux	po_lu_percent	% des UGB totaux
	Nombre d'ateliers animaux	Nombre d'ateliers animaux sur la ferme	HmaxAnx	
Indice d'équi-répartition des ateliers animaux	Indice d'équitabilité de Piélou calculé à partir de la proportion de chaque atelier dans les UGB totaux	Janx		

	Collectif de travail	Nombre de travailleurs en équivalent temps-plein sur la ferme	WUt	UTH
	Pourcentage d'exploitants	Pourcentage d'exploitants dans le collectif de travail	WUf_share	% d'UTH
	Pourcentage de salariés	Pourcentage de salariés dans le collectif de travail	WUe_share	% d'UTH
	Nombre de travailleurs	Nombre absolu de travailleurs sur la ferme	WU_abs	
Intensification	Productivité physique du travail sur les surfaces	Nombre d'ha à gérer pour un travailleur à temps plein	UAA/WUt	ha / UTH
	Productivité physique du travail sur les animaux	Nombre d'ugb à gérer pour un travailleur à temps plein	LUt/WUt	UGB / UTH
	Chargement fourrager	Nombre d'ugb ruminants par ha de surface fourragère (prairies permanentes, prairies temporaires, cultures annuelles fourragères, parcours)	SRfodder	UGB / ha
	Chargement global	Nombre d'ugb totaux par ha de surface totale	SRland	UGB / ha
Intégration	Surface de cultures dédiée à l'alimentation animale	Pourcentage de la surface en cultures annuelles destinées à l'alimentation animale	CropAFL	% de la surface en culture annuelle
	Pourcentage de grandes cultures dédiées à l'alimentation animale	Pourcentage de surface en grandes cultures dans la surface de cultures dédiée à l'alimentation animale	CCropAFL	% de CropAFL
	Pourcentage de résidus, couverts et intercultures dans la part de grandes cultures dédiées à l'alimentation animale	Pourcentage de surface de résidus, couverts, intercultures pâturés ou récoltés dans le pourcentage de grandes cultures dédiées à l'alimentation animale	NoGrainCCropAFL	% de CCropAFL
	Besoins des monogastriques couverts par les grandes cultures de la ferme	Pourcentage des besoins alimentaires des monogastriques couverts par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme	CCropMonoFR	% des besoins en énergie
	Besoins des ruminants couverts par les grandes cultures de la ferme	Pourcentage des besoins alimentaires des ruminants couverts par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme	CCropRumFR	% des besoins en énergie
	Pourcentage de résidus, couverts et intercultures dans la couverture des besoins des ruminants.	Pourcentage de résidus, couverts, intercultures dans la couverture des besoins alimentaires des ruminants par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme	NoGrainCCropRumFR	% de CCropRumFR

	Durée du pâturage	Pourcentage de l'année où les ruminants pâturent	Grazing	% de l'année
	Surface en pâturage mixte	Pourcentage des surfaces en prairies pâturées simultanément ou successivement par plusieurs espèces animales	MixGrazing	% des surface en prairie
	Echange de co-produits	Quantité de co-produits échangés (petit lait, son, ...) entre les ateliers de la ferme par UGB	Byproducts	Tonnes de MS/ UGB
	Densité de flux de co-produits	Nombre de flux de co-produits par atelier	ByProdFlow	
	Commercialisation en circuit court	Pourcentage des produits de la ferme vendus en circuit court dans le produit total vendu	SCSales	% du produit total vendu en euros
	Ateliers commercialisant en circuit court	Ateliers de production vendant tout ou partie de leur production en circuit court en proportion du nombre d'ateliers commercialisant des produits	SCEnterp	% des ateliers de la ferme
	Polyvalence des travailleurs	Nombre de travailleurs en capacité de gérer tous les ateliers de production de la ferme en proportion du nombre total de travailleurs	Versat	% nombre de travailleurs
Technico-économique	Productivité animale	Quantité relative de protéines produites par UGB par les ateliers animaux de la ferme	L_Prod	kg / UGB
	Hétérogénéité dans la productivité animale	Indicateur d'hétérogénéité des niveaux de productivité des ateliers animaux de la ferme	H_Prod	
	Consommation de concentrés	Quantité relative de concentrés (aliments composés, céréales, oléa-protéagineux, drèches, tourteaux, lait en poudre, luzerne déshydratée) consommée par les animaux de la ferme (UGB)	L_Conc	kg / UGB
	Hétérogénéité dans la consommation de concentrés	Indicateur d'hétérogénéité des niveaux de consommation de concentrés des ateliers animaux de la ferme	H_Conc	
	Valorisation économique animale	Produit net (produit vendu + variation de stock - achats d'animaux) par UGB relatif réalisé par les ateliers animaux de la ferme	L_NetSales	euros / UGB
	Hétérogénéité dans la valorisation économique	Indicateur d'hétérogénéité des niveaux de valorisation économique des ateliers animaux de la ferme	H_NetSales	

	Commercialisation en circuit court des animaux et produits animaux	Pourcentage relatif des animaux et produits animaux commercialisés en circuit court	L_SCSales	% des euros vendus par atelier animal
	Hétérogénéité dans la commercialisation en circuit court	Indicateur d'hétérogénéité des niveaux de commercialisation en circuit court des ateliers animaux de la ferme	H_SCSales	
	Vente de grains	Pourcentage de la production d'azote issues des grandes cultures dans l'azote total vendu	CropSales	% du produit total vendu en azote
	Vente de fourrages	Pourcentage de la production d'azote issue des fourrages dans l'azote total vendu	PlantSales	% du produit total vendu en azote
Social	Expérience agricole	Nombre d'années d'expérience en agriculture avant l'installation	experience	0 à 5, 5 à 10, 10 à 15 et > à 15

2.3. Analyse des données

2.3.1. Test non paramétriques

Afin de déterminer si l'EUI à l'échelle de la ferme est dépendante de la présence de produits végétaux dans la production de la ferme, nous avons réalisé un test non-paramétrique de comparaison de deux échantillons indépendants (Wilcoxon - Mann - Whitney). Le test statistique a été réalisé avec package *PMCMR Plus* (Pohlert 2014) du logiciel R.

Pour comparer les performances de chaque atelier de production, nous ne pouvons avoir qu'une approche descriptive, car l'étude de systèmes d'élevage mixtes nous amène à avoir ateliers appariés (provenant d'une même ferme) et d'autres non appariés. Or à notre connaissance il n'existe pas de test statistique bivarié permettant de traiter à la fois des échantillons appariés et non-appariés, de ce fait notre approche à l'échelle de l'atelier de production animale sera seulement descriptive.

2.3.2. Régression PLS

La régression Partial Least Squares (PLS) (Wold et al. 1983) permet d'identifier les relations linéaires entre deux matrices de variables intra corrélées X et Y . H variables latentes orthogonales entre elles $t_{h, h = 1 \dots H}$, les composantes PLS, sont ainsi itérativement construites comme des combinaisons linéaires des variables de X permettant de représenter au mieux l'information contenue dans Y . La robustesse des coefficients de régression PLS obtenus est le résultat d'un choix parcimonieux du nombre H de composantes PLS retenues. La qualité d'un modèle de régression est évaluée sur des individus tests à partir de critères tels que la Root Mean Squared Error of Prediction (RMSEP) et d'une estimation de la capacité à expliquer Y (exprimée par le critère du R^2).

Dans notre étude, nous souhaitons étudier comment les variables explicatives (X) sont reliées aux variables d'efficience (Y). Les variables explicatives correspondent à 18 variables de structure, 4 variables d'intensification, 13 variables d'intégration, 10 variables technico-économiques et une variable sociale. Les Y sont les trois variables d'efficience relative : EUI, ENA et EUC. Toutes les variables X et Y sont centrées et réduites avant la régression, et les trois variables d'efficience sont transformées pour qu'elles aient une distribution à peu près

symétrique. Les variables d'efficacité transformées logarithmiquement seront notées EUI_t , ENA_t et EUC_t . Chaque ferme représente un individu statistique. Les modèles de régression sont réalisés à l'aide du package *pls* (Mevik and Wehrens 2007) du logiciel R. Le choix du nombre H de composantes retenues dans chaque modèle est obtenu après « Leave-One-Out » (LOO) à partir du critère RMSEP en appliquant la stratégie appelée « onesigma » de la fonction *SelectComp* du package *pls*. Cette stratégie consiste à choisir le modèle avec le moins de composantes qui est toujours à moins d'une erreur standard du meilleur modèle global en termes de RMSEP (Hastie et al. 2009).

L'analyse est réalisée sur l'échantillon global des 96 fermes et sur quatre sous-échantillons présentés dans §2.1. Pour chaque échantillon, quatre modèles de régression PLS sont réalisés (Fig.4) :

- Un modèle PLS2 qui cherche à expliquer les trois variables d'efficacité relative conjointement (EUI_t , EUC_t , ENA_t)
- Un modèle PLS1 expliquant chaque variable d'efficacité relative isolément.

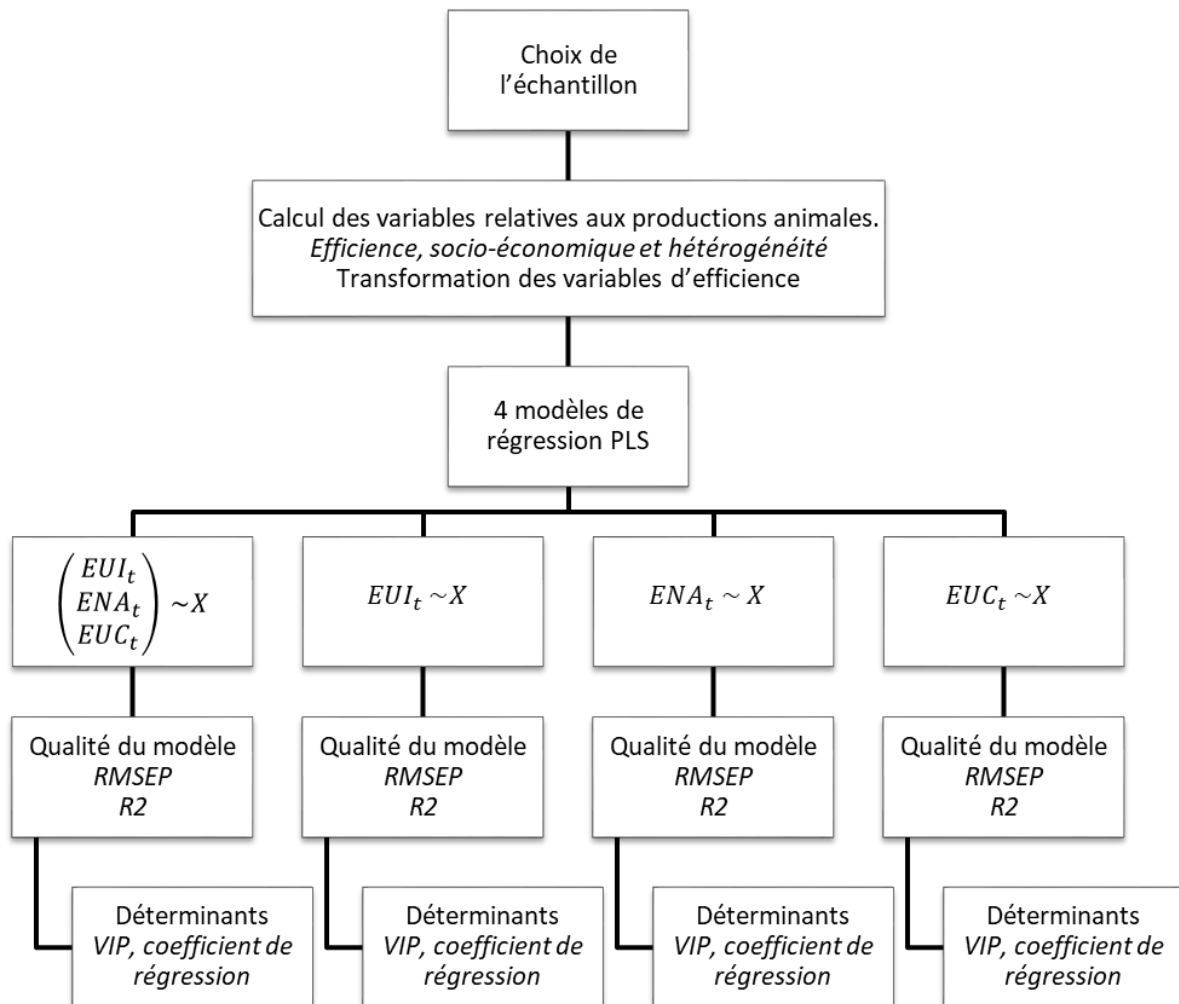
2.4. Identification des déterminants

Un filtre basé sur l'importance de la variable dans la projection (VIP) a été utilisé pour sélectionner les variables les plus importantes du modèle comme dans Mehmood et al. (2012). Le critère VIP (Tenenhaus Michel 1998) est calculé à l'aide du package *mixOmics* (Lê Cao et al. 2011). Pour chaque modèle de l'efficacité, seules les variables du modèle ayant un VIP supérieur ou égal à 1 sont retenues pour identifier les déterminants de l'efficacité. Le coefficient de régression associé à chaque variable et son signe illustrent le lien entre la variable d'efficacité transformée et la variable explicative conditionnellement aux valeurs des autres variables du modèle. Or la variable d'efficacité est calculée comme le rapport « input/output », ce qui signifie que les fermes les plus efficaces prennent les valeurs les plus faibles (tendent vers 0). Ainsi, un coefficient de régression positif signifie que lorsque la valeur de la variable explicative augmente, le rapport « input / output » augmente également, toutes choses égales par ailleurs, donc on est moins efficace.

Les variables retenues illustrant une même notion sont rassemblées et interprétées comme un déterminant latent.

Nous avons récapitulé les effets des déterminants au sein des tableaux (6 et 7) en prenant le signe inverse du coefficient de régression pour qu'un signe positif illustre une amélioration de l'efficacité (au sens output/input) et un signe négatif une détérioration de l'efficacité.

Figure 4 : Les différentes étapes de la mise en place de la régression PLS. EUI_t : efficacité d'utilisation des intrants transformée, EUC_t : efficacité d'utilisation des concentrés transformée, ENA_t : efficacité nette alimentaire transformée. RMSEP : Root Mean Squared Error of Prediction, VIP : variable importante dans la projection.



2.5. Identification des déterminants

Un filtre basé sur l'importance de la variable dans la projection (VIP) a été utilisé pour sélectionner les variables les plus importantes du modèle comme dans Mehmood et al. (2012). Le critère VIP (Tenenhaus Michel 1998) est calculé à l'aide du package *mixOmics* (Lê Cao et al. 2011). Pour chaque modèle de l'efficiencia, seules les variables du modèle ayant un VIP supérieur ou égal à 1 sont retenues pour identifier les déterminants de l'efficiencia. Le coefficient de régression associé à chaque variable et son signe illustrent le lien entre la variable d'efficiencia transformée et la variable explicative conditionnellement aux valeurs des autres variables du modèle. Or la variable d'efficiencia est calculée comme le rapport « input/output », ce qui signifie que les fermes les plus efficients prennent les valeurs les plus faibles (tendent vers 0). Ainsi, un coefficient de régression positif signifie que lorsque la valeur de la variable explicative augmente, le rapport « input / output » augmente également, toutes choses égales par ailleurs, donc on est moins effcient.

Les variables retenues illustrant une même notion sont rassemblées et interprétées comme un déterminant latent.

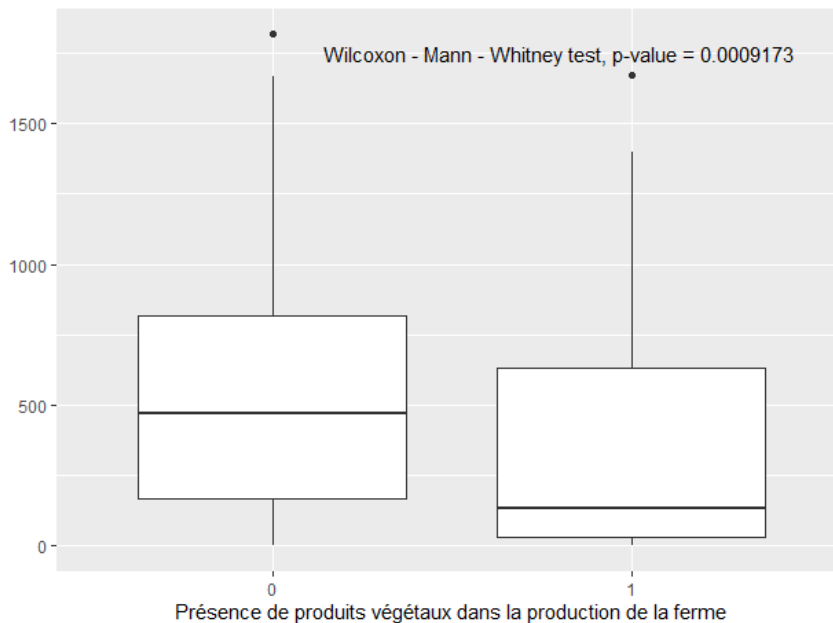
Nous avons récapitulé les effets des déterminants au sein des tableaux (6 et 7) en prenant le signe inverse du coefficient de régression pour qu'un signe positif illustre une amélioration de l'efficiencia (au sens output/input) et un signe négatif une détérioration de l'efficiencia.

3. Résultats

3.1. A l'échelle de la ferme

A l'échelle de la ferme, l'EUI varie de 0 à 1816. Les fermes commercialisant des produits végétaux (grains, fourrages) en plus de leurs productions animales ont une valeur d'EUI significativement plus faible que les fermes strictement d'élevage (Wilcoxon - Mann - Whitney test) (Fig.5), c'est-à-dire qu'elles utilisent moins d'intrants relativement à leur production. Elles ont donc une meilleure efficiencia d'utilisation des intrants.

Figure 5 : Distribution de l'efficacité d'utilisation des intrants à l'échelle des fermes suivant la présence (=1) ou l'absence (=0) de produits végétaux dans la production vendue de la ferme. Wilcoxon - Mann - Whitney test représente un test non-paramétrique de comparaison de deux échantillons indépendants.



3.2. Échelle des ateliers animaux

Les résultats de l'analyse des performances productives et d'efficacité à l'échelle des ateliers animaux sont présentés dans le tableau 3. Nous observons que le niveau de ces performances diffère entre espèces animales, notamment entre ruminants et monogastriques, ainsi qu'entre ruminants lait et ruminants viande.

Dans les fermes étudiées, la productivité moyenne des ateliers animaux varie de 33 (ovins viande) à 185 (volailles) kg N produits par UGB soit du simple au quintuple. Les ateliers bovins viande et ovins viande ont des productivités équivalentes et sont les moins productifs. Les ateliers de bovins lait, de volailles et de porcs sont les ateliers avec la meilleure productivité animale (143, 185 et 101 kg N/UGB respectivement).

L'utilisation moyenne d'intrants par unité produite varie de 0.82 (kg N achetés / Kg N produits) pour les bovins lait à 4.04 pour les petits ruminants lait. Les ateliers bovins (lait ou viande) sont les ateliers animaux utilisant le moins d'intrants par unité produite, ils sont donc les plus efficaces de notre échantillon. Avec leur ratio inférieur à un, ils sont les seuls à produire plus

d'azote qu'ils n'en achètent. Par exemple, les ateliers bovins lait produisent en moyenne 1.2 kg N par kg N acheté.

Pour produire un kg de protéines consommables par l'Homme (PCH), les plus efficaces sont les bovins lait qui en utilisent 0.40, les moins efficaces, les volailles, en utilisent 3.39. Les ateliers ruminants laitiers sont les seuls qui, en moyenne, sont producteurs nettes de PCH. L'atelier bovins laitier a une efficacité de conversion de 2.5, soit 2.5 kg de PCH produites par kg de protéines végétales valorisables par l'Homme consommé. Les ateliers monogastriques sont les moins efficaces, ils consomment en moyenne trois fois plus de PCH qu'ils n'en produisent.

L'utilisation moyenne des concentrés par unité produite varie de 0.72 (kg N concentrés utilisés / kg N produits) pour les ateliers bovins lait à 4.80 pour les ateliers porcins. Parmi les monogastriques alimentés à 100% par des concentrés, l'atelier porcin utilise plus de concentrés par unité produite que l'atelier volaille.

Tableau 3 : Performances moyennes des six ateliers animaux recensés dans l'échantillon des 96 fermes d'élevage mixte. EUI : efficacité d'utilisation des intrants, EUC : efficacité d'utilisation des concentrés, ENA : efficacité nette alimentaire. PCH : protéines consommables par l'Homme. N : azote. Petit ruminant lait regroupe les caprins lait et les ovins lait. La productivité correspond à la production animale produite nette (produite – achats d'animaux) par UGB.

	Bovin viande	Bovin lait	Petit ruminant lait	Ovin viande	Porc	Volaille
Nb de fermes	61	33	16	31	31	34
Productivité (kg N / UGB)	42	143	79	33	101	185
EUI (N achat / N produit)	0.86	0.82	4.04	1.46	2.66	2.93
ENA (PCH consommées/ PCH produites)	1.40	0.40	0.85	2.12	3.16	3.39
EUC (N concentré / N produit)	0.92	0.72	1.59	1.61	4.80	3.34

3.3. Échelle des productions animales de la ferme

3.3.1. Analyse des modèles

Dans les modèles cherchant à expliquer conjointement les trois efficacités, la variable EUI_t est mal expliquée : l'erreur de prédiction (RMSEP) est proche ou supérieure à un pour chaque modèle PLS2 et l'estimation du coefficient de détermination (R^2) après LOO est négative ou proche de 0, ce qui signifie que le modèle n'a pas de valeur prédictive et que les variables explicatives que nous avons considérées ne sont pas liées linéairement avec EUI_t . Ceci est illustré par le tableau S4 (annexes) qui montre que les trois variables d'efficience ne sont jamais bien expliquées en même temps et notamment que EUI_t est faiblement expliquée sur les composantes sélectionnées. Pour les modèles PLS1 expliquant uniquement EUI_t , une composante n'a été retenue que pour l'échantillon de bovins lait – monogastriques associés à des cultures. Or cette composante n'explique que 6% de la variance totale de EUI_t . Pour les autres échantillons aucune composante n'a été retenue comme apportant une plus-value par rapport à un modèle constant. Nous pouvons en conclure que de manière générale, les variables explicatives retenues dans notre modèle ne sont donc pas liées linéairement à EUI_t quel que soit l'échantillon de fermes considéré.

Les variables ENA_t et ECU_t sont globalement mieux expliquées dans des modèles PLS1 que dans le modèle PLS2. ENA_t a pu être expliquée par les variables explicatives considérées pour deux échantillons : l'échantillon global et le sous-échantillon des bovins viande - monogastriques associés à des cultures (BV-Mono PCPE). EUC_t est quant à elle expliquée dans quatre échantillons : l'échantillon global, les exploitations de polyculture-polyélevage et les sous-échantillons de bovins viande – ovins viande et bovins viande – monogastriques associés à des cultures. Le R^2 estimé après LOO varie de 0.10 à 0.53 pour ENA_t selon l'échantillon étudié (tableau 4). ENA_t est la mieux expliquée pour l'échantillon de bovins viande – monogastriques associés à des cultures. Pour EUC_t , le R^2 des quatre modèles retenus est moins variable (entre 0.49 et 0.66, tableau 4). Les modèles pour EUC_t permettraient d'expliquer entre 49% et 66% de la variance totale.

Les modèles PLS2 n'ont pas été analysés dans l'étude car ils ne permettent pas de représenter correctement les trois variables d'efficience. Nous avons analysé six modèles PLS1 pour lesquels au moins une composante avait été sélectionnée (tableau 4).

Tableau 4 : R^2 estimé après LOO des modèles PLS analysés au cours de l'étude. PCPE : polyculture-polyélevage, BV : bovin viande, OV : ovin viande, Mono : monogastrique, BL : bovin lait, EUI_t : efficacité d'utilisation des intrants transformée, ENA_t : efficacité nette alimentaire transformée, EUC_t : efficacité d'utilisation des aliments concentrés transformée. « ns » signifie qu'aucune composante n'a été retenue pour le modèle. Les valeurs sur fond vert correspondent aux modèles analysés dans l'étude.

Échantillon	PLS2	PLS1 EUI_t	PLS1 ENA_t	PLS1 EUC_t
Global	ns	ns	0.10	0.52
PCPE	ns	ns	ns	0.49
BV-OV en PCPE	ns	ns	ns	0.56
BV-Mono en PCPE	ns	ns	0.53	0.66
BL-Mono en PCPE	ns	0.06	ns	ns

3.3.2. Identification des déterminants de l'efficacité

Sur l'ensemble des six modèles analysés, 30 variables explicatives ont un VIP supérieur ou égal à un pour au moins un modèle, dont 17 sont partagées entre les modèles de l' EUC_t et de l' ENA_t . Les coefficients de régression entre les variables d'efficacité et les variables explicatives retenues dans les modèles sont donnés dans les tableaux S5 et S6 (annexes). Les 30 variables retenues ont été regroupées en 16 déterminants (tableau 5). Par exemple, le déterminant intégration culture-élevage est caractérisé par cinq variables explicatives : la surface de cultures annuelles dédiée à l'alimentation des animaux (CropAFL), la part des surfaces en grandes cultures dans les cultures annuelles dédiée à l'alimentation des animaux (CCropAFL), le pourcentage de résidus, couverts et intercultures dans la part de grandes cultures dédiées à l'alimentation animale (NoGrainCCropAFL), les besoins des ruminants couverts par des ressources végétales issues des surfaces en grandes cultures (CCropRumFR) et les besoins des monogastriques couverts par des ressources végétales issues des surfaces en grandes cultures (NoGrainCCropRumFR).

Tableau 5 : Variables explicatives importantes dans les modèles de l'efficience relative transformée et leur regroupement au sein de déterminants.

Variables avec VIP >1	Déterminants	Variables avec VIP >1	Déterminants
WUp share WUf share	Collectif de travail	ByProducts ByProdFlow	Echanges de coproduits
FCrop/land	Culture annuelles fourragères	Versat	Polyvalence des travailleurs
PP/land rangeland/land herbager	Surface toujours en herbe	L_Prod	Productivité animale
bc_lu_percent Janx g_lu_percent po_lu_percent	Équilibre entre ateliers animaux	L_Conc	Consommation d'aliments concentrés
lu/WUt SRland SRfodder	Intensification	H_Conc	Hétérogénéité dans la consommation d'aliments concentrés
CropAFL CCropAFL NoGrainCCropAFL CCropRumFR NoGrainCCropRumFR	Intégration culture-élevage	L_SCSales	Vente en circuit court
Grazing	Intégration prairie-élevage	L_NetSales	Valorisation économique
MixGrazing	Intégration entre élevages	experience_5to10 experience_10to15	Expérience avant installation

La consommation d'aliments concentrés par UGB est le déterminant majeur de l'efficience d'un système d'élevage mixte en AB. La quantité relative de concentrés consommée par les animaux de la ferme est la variable explicative avec le coefficient de régression le plus élevé pour les six modèles de l'efficience analysés. Que ce soit pour des ruminants ou des monogastriques, plus les animaux consomment de concentrés, moins les ateliers de productions animales sont efficaces. De manière générale, pour qu'un système d'élevage mixte soit efficace, il faut que tous les ateliers animaux aient une consommation d'aliments concentrés parcimonieuse (la variable hétérogénéité de consommation de concentrés pénalise EUC_t et ENA_t , tableau 6), ce qui signifie qu'on ne peut compter sur un effet de compensation entre les ateliers de productions animales.

Nous avons identifié 14 déterminants majeurs pour expliquer l'EUC_t (tableau 6) et également 14 déterminants (tableau 6) pour expliquer l'ENA_t dans notre étude, dont 12 sont en commun entre les deux variables d'efficacité. A l'échelle globale ce sont des déterminants d'intégration et techniques qui prédominent. Les variables de structure n'expliquent que l'efficacité dans les sous-échantillons.

La consommation par les animaux de ressources végétales issues des surfaces en grandes cultures de la ferme fait diminuer l'efficacité productive (ENA_t et EUC_t) pour l'échantillon global et les systèmes de polyculture-polyélevage. Plus précisément la consommation de grains issus de la ferme fait diminuer l'efficacité productive. Lorsque les besoins des ruminants sont couverts par des ressources végétales issues des surfaces en grandes cultures de la ferme autres que des grains, soit des résidus de culture, des intercultures ou des couverts, les systèmes de polyculture-polyélevage sont moins efficaces, alors que les systèmes mixtes ruminants gagnent en efficacité d'utilisation des aliments concentrés dans ce cas-là. Le coefficient de régression est faible (0.03), donc la variable est peu explicative mais ce résultat laisse supposer un potentiel gain d'efficacité si cette pratique se déploie. Le pâturage mixte des bovins et des ovins permet également aux systèmes mixtes ruminants d'être plus efficaces dans l'utilisation des aliments concentrés.

Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, la valorisation des coproduits au sein de la ferme (le coproduit d'un atelier devient ressource d'un autre atelier) n'est pas identifiée comme permettant d'augmenter l'efficacité d'utilisation des concentrés, ni l'efficacité nette alimentaire, au contraire. Cette pratique n'est présente que dans 19% des fermes dans notre échantillon, couvre une vaste diversité de coproduits allant du petit lait à la paille de fougère et répond à de multiples objectifs (autonomie en concentré, autonomie en litière, etc.). Nous pouvons dès lors nous questionner sur la solidité toute relative de cette relation négative entre la valorisation des coproduits et l'efficacité productive (ENA_t et EUC_t).

Intensifier la production du système en augmentant le nombre total d'animaux à l'hectare permet aux systèmes de bovins viande - monogastriques associés à des cultures d'avoir une meilleure efficacité productive. Par contre pour les systèmes mixtes ruminants associés à des cultures, l'intensification du système, que ce soit à la surface ou par travailleur, fait diminuer l'efficacité d'utilisation des aliments concentrés. Une répartition inégale des UGBs du troupeau

entre les bovins et les ovins avec une prédominance de bovins permet aux systèmes mixtes ruminants d'augmenter leur efficience d'utilisation des aliments concentrés.

Le facteur humain peut permettre d'améliorer l'efficience biotechnique des systèmes d'élevage mixtes. D'une part, lorsque le collectif de travail d'un système mixte associant des bovins, des monogastriques et des cultures est polyvalent, c'est-à-dire que les travailleurs sont en capacité de gérer tous les ateliers de la ferme, alors son efficience globale (ENA_t et EUC_t) s'en trouve améliorée. D'autre part, la composition du collectif de travail entre salariés et exploitants influe également sur l'efficience productive du système. Les systèmes mixtes d'élevages associant des bovins viande et monogastriques sont plus efficaces (EUI_t et ENA_t) lorsque que le collectif de travail comprend des salariés, alors que les systèmes mixtes ruminants sont plus efficaces dans l'utilisation des concentrés lorsqu'il comprend surtout un ou des exploitants.

Pour les systèmes de polyculture-polyélevage et pour les sous-échantillons de bovins viande - monogastriques et bovins viande - ovins viande, les cultures annuelles fourragères dans la surface totale permettent une meilleure efficience d'utilisation des aliments concentrés des systèmes.

Pour l'échantillon global et pour les systèmes de bovins viande – monogastriques associés à des cultures en particulier, une part croissante de surface toujours en herbe dans la surface totale permet une meilleure efficience nette alimentaire.

Tableau 6 : déterminants de l'efficience utilisation des concentrés relative transformée pour l'échantillon global, de polyculture-polyélevage (PCPE), de bovin viande – ovin viande (BV – OV) en PCPE, de bovin viande – monogastrique (BV-Mono) en PCPE, et de l'efficience nette alimentaire relative et transformée pour l'échantillon global et bovin viande – monogastrique en polyculture-polyélevage (BV-Mono PCPE). Chaque déterminant est illustré par une ou plusieurs variables illustratives (voir tableaux S5 et S6 en annexe). Le signe « + » signifie que le déterminant améliore l'efficience (c'est-à-dire diminue la valeur de l'indicateur d'efficience input / output), et le signe « - » la pénalise (c'est-à-dire augmente la valeur de l'indicateur d'efficience input / output). Le signe « +/- » signifie que toutes les variables composant le déterminant n'ont pas le même signe. « Salariat » correspond au pourcentage d'employés dans le collectif de travail et « exploitant » au pourcentage d'exploitants.

Catégorie	Déterminants	EUC _t				ENA _t	
		Global	PCPE	BV – OV PCPE	BV – Mono PCPE	Global	BV – Mono PCPE
Technico-économique	Consommation de concentrés	-	-	-	-	-	-
	Hétérogénéité de consommation de concentré	-	-		-	-	-
	Productivité animale	+	+		+	+	
	Vente en circuit court					-	
	Valorisation économique						+
intégration	Intégration culture-élevage	-	-	+/-	-	-	-
	Intégration prairie-élevage	-	-	-			
	Intégration entre élevages			+			
	Echanges de coproduits	-	-	-	-		-
	Polyvalence des travailleurs	+	+		+	+	+
Structure	Collectif de travail			+	+ salariat - exploitant		+ salariat
	Surface toujours en herbe			-		+	+
	Cultures annuelles fourragères dans la surface totale		+	+	+		
	Equilibre entre ateliers animaux			-			
Intensification	Intensification		+	-	+		+
Social	Expérience				- < à 10 ans	+ > à 10 ans	+ > à 10 ans
					+ > à 10 ans	- < à 10 ans	- < à 10 ans

4. Discussion

A l'échelle de la ferme, les exploitations d'élevage mixte qui commercialisent des produits végétaux (fourrages et/ou grains) en plus de produits animaux ont une efficacité d'utilisation des intrants significativement plus élevée que celles qui n'en commercialisent pas. Ceci résulte de deux phénomènes. D'une part, les animaux consomment de l'azote organique pour se développer alors que les plantes transforment l'azote minéral en azote organique. De ce fait, les

plantes sont par nature plus efficaces que les animaux. D'autre part, du fait des besoins d'entretien des animaux, des coefficients de digestibilité et des rendements d'utilisation métabolique des nutriments nécessairement inférieurs à un, une grande partie de l'énergie brute et des protéines ingérées par les animaux ne se retrouve pas dans leurs produits (Laisse et al. 2018). Par ailleurs, les produits végétaux, grâce à leur teneur en azote supérieure à celle des produits animaux, en particulier en AB avec une forte présence de légumineuses, et à leur meilleur rendement à l'hectare, permettent d'augmenter la production de l'exploitation sans augmenter les intrants dans les mêmes proportions. De manière générale, la principale charge opérationnelle pour les cultures de vente en AB est l'achat de semences représentant une minime partie des intrants totaux de la ferme en terme d'azote, et seul l'achat d'effluents organiques pourrait contrebalancer la vente de produits végétaux. Selon Schröder et al. (2003), l'efficience d'utilisation de l'azote d'un système agricole dépend des différences de conversion de l'azote entre les productions mais également de l'achat des aliments et de la vente de grains. Pour ces différentes raisons, nous avons choisi d'étudier l'efficience des systèmes mixtes d'élevage en AB à l'échelle plus fine des ateliers de productions animales afin de nous focaliser sur l'activité d'élevage et l'intérêt de la mixité.

4.1. L'aliment concentré, élément central de l'efficience productive du système

Nous avons montré que la consommation d'aliments concentrés, qui regroupent le grain, l'aliment complet, les drèches, les tourteaux, etc., était le premier déterminant de l'efficience productive d'un système d'élevage mixte en AB, et ce quelle que soit la façon de la calculer et les combinaisons d'espèces. Que ce soit pour des ruminants ou des monogastriques, plus les ateliers de production animale utilisent des aliments concentrés, moins ils seraient efficaces. De manière générale, pour qu'un système d'élevage mixte soit efficace, il faut que tous les ateliers animaux aient une consommation d'aliments concentrés parcimonieuse, c'est-à-dire qu'on ne peut compter sur un effet de compensation entre les espèces animales. On peut ensuite se questionner si l'origine et la nature de l'aliment concentré (acheté ou produit sur la ferme) modulent ce résultat. Dans notre échantillon, les interactions culture-élevage (C-E) des systèmes d'élevage mixtes reposent sur une intra-consommation importante des grains. Ainsi plus l'interaction C-E est forte, plus les animaux intra-consomment des céréales produites sur l'exploitation et moins le système est efficace. Notre première hypothèse est que la production

de grain à la ferme inciterait fortement à sa distribution aux animaux, par la facilité et la souplesse d'utilisation, sa valeur économique étant également peu visible lorsque le grain est produit sur la ferme. Les éleveurs pourraient dans ce cas être moins parcimonieux lors de sa distribution. Cette hypothèse n'est pas validée puisque nous n'avons pas observé que le niveau de consommation de concentrés par animal (kg N/UGB) soit corrélé à sa provenance, acheté ou produit sur l'exploitation. Notre seconde hypothèse est que l'aliment formulé à partir des produits de l'exploitation n'aurait pas la composition et donc la valeur alimentaire la mieux adaptée aux besoins des animaux, contrairement aux aliments concentrés achetés qui ont une formulation spécifique pour chaque type d'animal. Ainsi, une ration comportant un excès d'énergie (céréales) en rapport à l'azote (peu de protéagineux, en général moins disponible sur la ferme) est sous optimale vis-à-vis des besoins des animaux (INRA 2018). Enfin, notre troisième hypothèse est que la présence importante de cultures sur la ferme pourrait conduire à un moindre souci d'optimisation de la production fourragère (qualité et adéquation aux besoins). Une moins bonne gestion des fourrages pourrait amener à consommer davantage de grains et/ou pénaliserait la productivité des animaux, ce qui peut expliquer la dégradation d'efficacité apparente.

La consommation d'aliments concentrés peut être limitée par différentes pratiques, notamment en jouant sur les interactions entre ateliers, au-delà de celles concernant l'intra-consommation de grains. Ainsi, les ruminants valorisent également des résidus de culture ou des cultures intermédiaires et ce d'autant plus en AB où les rotations de cultures sont en général plus longues et plus complexes qu'en système conventionnel (Barbieri et al. 2017). Cette pratique est mise en place dans un quart des exploitations de notre échantillon, où 24 des 96 exploitants valorisent les résidus de culture ou des intercultures pour alimenter leurs animaux. Elle pourrait être étendue car elle présente un réel potentiel pour limiter la consommation d'aliments concentrés par les ruminants. On peut par exemple observer que les grains restant au sol après moisson ou le pâturage de méteil apportent un aliment de qualité permettant de limiter l'utilisation d'aliments concentrés. Par ailleurs, il a été récemment montré que la valeur nutritive de différentes espèces de cultures dérobées (phacélie, sarrasin, sainfoin, trèfle d'Alexandrie, etc.) était semblable à celle de la luzerne (Maxin et al. 2020). Ces espèces pourraient donc être utilisées comme fourrages pour les ruminants, avec pour certaines d'entre elles des bénéfices supplémentaires liés à leur teneur en composés secondaires et à leur attractivité pour les insectes pollinisateurs. Nos propres résultats indiquent que la valorisation en alimentation animale des ressources fourragères (hors grains) provenant des surfaces en grandes cultures de la ferme

permet d'améliorer l'efficience d'utilisation des aliments concentrés dans les systèmes mixtes ruminants. Or des contraintes techniques et structurelles peuvent limiter la mise en œuvre de ces pratiques. Par exemple pour faire pâturer les résidus de culture, il faut que la parcelle soit clôturée, accessible par le troupeau et que les animaux soient à proximité lorsque ces ressources sont disponibles. Cette pratique est donc demandeuse en temps et de nombreuses conditions sont nécessaires à sa mise en œuvre. La réussite d'une interculture est également tributaire des conditions climatiques estivales, surtout de la pluviométrie (Sagot 2017), qui peut rendre incertaine cette pratique, d'une année à l'autre et représente un verrou supplémentaire pour les éleveurs.

La consommation d'aliments concentrés peut également être limitée par une meilleure valorisation de l'herbe dans les systèmes mixtes, où les différences de prélèvements alimentaires des espèces concernées permettent d'accroître le chargement des prairies sans avoir recours à la fertilisation minérale (Dumont et al. 2020a). Les bovins, moins sélectifs que les ovins du fait de différences de besoins, de capacité d'ingestion et d'efficience digestive (Dumont et al. 1995), peuvent exploiter des zones d'herbe haute et de faible valeur nutritive. Une méta-analyse a révélé que cette utilisation plus complète du couvert qu'on retrouve dans différentes conditions de pâturage (e.g., Cuchillo-Hilario et al. 2018) profitait à la croissance des ovins et augmentait les quantités de viande produites à l'hectare en pâturage mixte (d'Alexis et al. 2014). Ceci est bien connu des éleveurs qui citent la meilleure valorisation de l'herbe parmi les principaux atouts des systèmes mixtes bovins-ovins (Mugnier et al. 2020). Des travaux de simulations réalisés avec le modèle Orfée (Mosnier et al. 2017) ont permis d'estimer que cette meilleure valorisation des prairies permettrait de réduire la consommation d'aliments concentrés de 30% à l'échelle de l'exploitation (Dumont et al. 2020a). Dans notre propre étude, nous avons observé, qu'à chargement équivalent, les systèmes bovins-ovins pratiquant le pâturage mixte avaient une meilleure efficience d'utilisation des aliments concentrés, ce que nous avons expliqué par une utilisation parcimonieuse des concentrés rendue possible par la meilleure valorisation des couverts. La pratique du pâturage mixte permet donc d'augmenter l'efficience productive des ateliers de production animale. Dans une expérimentation système réalisée dans le Massif Central (Expérimentation Salamix, INRAE Herbipôle, non publié) la mixité bovins-ovins a permis d'allouer les pâtures de meilleure valeur nutritive aux animaux ayant les plus forts besoins (agneaux), et ainsi de réduire les quantités de concentrés qui leur étaient distribuées.

4.2. Le facteur humain, entre organisation du travail et choix stratégiques

Le facteur humain avec la composition du collectif de travail et la polyvalence des travailleurs fait partie des déterminants de l'efficacité productive des systèmes d'élevage, et ce d'autant plus que les systèmes d'élevage en AB se caractérisent par des besoins en travail par unité de produit supérieurs à ceux des systèmes conventionnels (van Wagenberg et al. 2017). Dans la littérature, le travail en élevage est souvent considéré comme une des composantes des performances économiques des exploitations, et appréhendé via des indicateurs d'efficacité ou de la productivité du travail (Duval et al. 2021). Pourtant, le travail entre en ligne de compte dans le choix d'un système mixte et des formes d'articulation entre espèces, ce qui justifie qu'il soit considéré comme un élément à part entière du système à gérer et ajuster en lien avec ses autres composantes, plutôt que comme une simple contrainte ou une conséquence (Dumont et al. 2020a). C'est la démarche que nous avons adoptée dans le cadre du projet MixEnable (Martin et al. 2020) et qui nous a conduit à proposer des indicateurs d'organisation du travail qui se fondent entre autres sur la polyvalence des exploitants et des salariés agricoles (Steinmetz et al., under review, chapitre 3). La polyvalence illustre la capacité des travailleurs d'une exploitation à gérer tous les ateliers qui la composent. On fait l'hypothèse qu'avoir une compétence vis-à-vis des différentes productions de l'exploitation leur permet d'avoir une gestion plus fine des interactions entre ateliers (car les interactions sont comprises et mobilisées par tous) et donc de générer un gain d'efficacité productive à l'échelle du système. C'est ce que nous avons observé pour les systèmes bovins viande associés à monogastriques. Par contre pour les systèmes mixtes ruminants associés à des cultures de notre échantillon, la totalité des travailleurs sont polyvalents dans 87% des exploitations, ce qui s'explique par le fort recoupement des compétences requises pour gérer les ateliers bovins viande et ovins viande (Mugnier et al. 2020). Dans l'analyse réalisée sur ces 16 exploitations, la variable *Versat* illustrant la polyvalence des travailleurs discrimine peu les fermes et ne peut donc ressortir parmi les déterminants de l'efficacité productive des exploitations mixtes bovins-ovins.

Outre la polyvalence des travailleurs, la composition du collectif de travail explique une part de l'efficacité productive des systèmes d'élevage mixtes. Dans les systèmes associant des bovins viande à des monogastriques, c'est le nombre accru de salariés dans le collectif qui permet d'améliorer l'efficacité productive des ateliers de production animale sur l'exploitation. On peut supposer que la présence d'un atelier monogastrique sur la ferme pérennise l'embauche

d'un salarié ayant des compétences spécifiques car cet atelier génère une activité tout au long de l'année. C'est par exemple le cas dans les systèmes naisseurs porcins associés à des bovins laitiers en zone de montagne (Rapey et al. 2021). La présence de salariés nécessite la formalisation des tâches qui leur sont données et la rationalisation de l'organisation de l'atelier. Ces démarches peuvent permettre à l'exploitant de prendre plus de recul sur le fonctionnement de son système et l'amener à une optimisation technique et de gestion de ses ateliers. En système mixte ovins-bovins le recours au salariat est moindre puisque seuls 37% des exploitants y ont recours contre 75% lorsque les bovins viande sont associés à des monogastriques.

Le facteur humain, qui apparaît déterminant de l'efficience productive, nous rappelle la nécessité de prendre en compte l'organisation du travail et la gestion des ventes en plus des pratiques agricoles pour analyser le fonctionnement d'une ferme dans sa globalité, mais également pour analyser la construction de la performance (Steinmetz et al., under review, chapitre 3).

Au sein d'un système agricole, chaque pratique mise en place est le fruit du choix de l'éleveur. Au centre de chaque ferme se trouve un ou plusieurs acteurs qui gèrent conjointement l'alimentation des animaux (ex. distribution ou non d'aliments concentrés), la conduite des prairies et des surfaces cultivées, la commercialisation des produits en vente directe ou en circuits longs, et l'organisation du travail. Les éleveurs font des choix qui ne répondent pas nécessairement uniquement à une rationalité productive, mais aussi à des objectifs personnels et à des valeurs (Cayre et al. 2018). Par exemple, avoir la volonté de se dégager du temps peut amener à simplifier les pratiques agricoles et il est alors plus facile de distribuer de l'aliment concentré aux animaux que de chercher à optimiser l'usage des pâtures. L'aversion au risque des éleveurs, la qualité des produits en rapport avec une filière de commercialisation particulière font partie des paramètres qui peuvent expliquer les choix des éleveurs. Par exemple, les éleveurs laitiers aveyronnais en AB suivis par Bouttes et al. (2019) considéraient que produire du lait dans un système en AB était moins risqué qu'en conventionnel en raison de la plus grande stabilité du prix du litre de lait, de l'autonomie alimentaire accrue de leurs exploitations, et du soutien des consommateurs. Dans le choix de s'orienter vers un système d'élevage en AB, les valeurs de l'exploitant entrent aussi en jeu (Bouttes et al. 2020; Brock et al. 2021) en cohérence avec les principes de santé, d'écologie, d'équité et de précaution

formulés par l'IFOAM² et à partir desquels l'AB se développe, mais aussi en lien avec le regard de la société (Mzoughi 2014). Cela explique qu'il y ait un fort facteur humain dans le pilotage des exploitations en AB, qui rejaillit ici sur l'efficacité productive et alimentaire des ateliers de productions animales, en complément des pratiques et du contexte socio-économique.

4.3. Méthodologie d'étude des systèmes diversifiés

Afin d'éviter les biais potentiellement induits par les grandes cultures dans le calcul des indicateurs d'efficacité à l'échelle du système de production, nous avons fait le choix de nous centrer sur l'analyse de l'efficacité relative aux productions animales de la ferme, avec un grand éventail de combinaisons observées dont nous avons pu détailler les performances. Cette démarche nous a permis de caractériser les systèmes ayant une bonne efficacité relativement à leurs productions animales et non les systèmes les plus efficaces dans l'absolu. A l'échelle globale, concernant les productions animales, nous avons pu mettre en évidence des déterminants généraux de l'efficacité comme la consommation d'aliments concentrés, l'interaction culture-élevage ou la polyvalence des travailleurs. La grande diversité de notre échantillon en termes de types de productions animales, de pratiques, de contextes socio-économiques, nous a conduit à construire des sous échantillons relativement homogènes concernant les types de combinaisons. Nous n'avons tout d'abord retenu que les systèmes de PCPE, puis parmi eux, certaines associations d'espèces. Travailler sur des sous-échantillons plus homogènes en termes de structures d'exploitation, nous a permis de mettre en évidence des fonctionnements spécifiques à certaines combinaisons d'espèces. Un même déterminant peut en effet expliquer la performance d'une combinaison de productions animales et pas celle d'une autre combinaison, ou peut avoir des effets opposés selon les combinaisons, avec le risque qu'ils disparaissent des résultats d'une analyse globale par régression PLS. Par exemple, notre analyse a mis en évidence qu'intensifier le système en augmentant le nombre d'animaux à l'hectare permettait d'améliorer l'efficacité d'utilisation des concentrés des systèmes de bovins viande associés à des monogastriques, alors qu'elle pénalisait l'efficacité des systèmes mixtes ruminants. Cette variable n'avait pourtant aucun effet identifié dans l'analyse globale. Le sous-échantillonnage nous a également permis d'observer que la valorisation des résidus de cultures

² <https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic>

ou des intercultures permettait d'améliorer l'efficience d'utilisation des concentrés des systèmes mixtes ruminants.

Nous avons fait le choix d'utiliser la régression PLS pour identifier les déterminants de l'efficience. L'absence de modèles prédictifs dans certaines combinaisons d'échantillon – variable d'efficience, notamment pour l'efficience d'utilisation des intrants et pour les régressions PLS lorsque les trois variables d'efficience étaient considérées dans un même modèle (PLS2), nous amène à questionner les raisons de ce résultat. Un premier point concerne le choix des variables explicatives dans le modèle de régression. Notre démarche exploratoire nous a probablement conduit à être trop ambitieux dans le nombre de variables retenues. On pourrait envisager par la suite une analyse avec 10 indicateurs au maximum, préalablement bien choisis. Ceci nécessiterait de disposer d'indicateurs robustes et pertinents sur les systèmes mixtes, ce qui est maintenant rendu possible par le travail méthodologique réalisé au cours de cette thèse (Steinmetz et al., 2021 ; en révision, chapitres 2 et 3). En effet, travailler sur les systèmes mixtes nécessite de fortement consolider le calcul d'indicateurs qui puissent être transverses entre espèces, par exemple, touchant aux besoins des animaux. Parler d'efficience signifie considérer la production, qui est facilement quantifiable dans les différentes unités (N, MJ, €), mais aussi la consommation d'input, notamment les aliments. Or, pour ces derniers, les quantités sont facilement disponibles pour les monogastriques, mais ne le sont pas pour les ruminants, du fait de la difficulté d'estimer les quantités ingérées au pâturage. La seule façon de contourner le problème est d'appréhender les besoins des animaux. Or, à l'échelle d'une ferme commerciale, avec peu de données disponibles, il faut trouver les proxys permettant de traiter la question de la manière la plus juste et simple possible. La notion d'UGB pourrait par exemple nous y aider. D'autres innovations méthodologiques pourraient être attendues ; nous avons par exemple proposé, compte tenu des spécificités de productivité et d'efficience par espèce, de centrer et réduire les indicateurs par type d'atelier. Ceci nous permet de comparer des performances inter-fermes abstraction faite du type de combinaison animale. Une contrepartie est de disposer de suffisamment de fermes par types de production pour que ce traitement statistique soit robuste (moyennes et écarts types) et donc pertinent. Lors de notre analyse, nous avons restreint l'échantillon de PCPE en faisant des focus sur certains types de combinaisons animales. Or au sein d'une combinaison donnée, il peut encore y avoir une très grande hétérogénéité de répartition des UGBs totaux entre les espèces, qui pour pouvoir être analysée doit être bien répartie entre les zones géographiques. Ce n'était hélas pas le cas dans notre échantillon, où pour la combinaison bovins viande - ovins viande nous disposions de neuf

fermes suédoises avec un troupeau composé majoritairement de bovins et de six fermes françaises plus équilibrées entre les deux espèces. Cette dissymétrie a probablement dissimulé des mécanismes plus fins liés aux ratios d'espèces complètement écrasés dans l'analyse par les effets propres au contexte suédois ou français jouant sur l'efficacité du système. Cela pose de façon accrue la question de l'échantillonnage initial des fermes : il serait intéressant de cibler davantage les fermes sur des données structurelles (ex. zone bioclimatique, part des cultures dans la SAU ou la proportion des deux espèces) mais également économiques, comme la présence d'un atelier de transformation qui peut influencer la gestion des activités de production et du collectif de travail. Une autre option serait de travailler sur des bases de données existantes, mais dans ce cas les informations ne concernent souvent que des variables structurelles et ne permettent pas de réellement appréhender le fonctionnement des exploitations.

5. Conclusion

La polyculture-élevage est considéré comme l'un des systèmes les plus prometteur pour répondre aux enjeux de durabilité des systèmes de production (Kirkegaard et al. 2014). Les avantages de la polyculture-élevage, comme le bouclage des cycles des nutriments ou la moindre dépendance aux intrants externes, repose sur les interactions entre prairies, cultures et élevages. Or dans le réseau d'exploitations que nous avons suivies, l'interaction culture-élevage reposait essentiellement sur l'intra-consommation de grains, grains qui pourraient être directement valorisés en alimentation humaine. Ainsi en promouvant les interactions cultures-élevage, l'efficacité alimentaire nette du système est dégradée, et amène à une plus grande compétition entre alimentation humaine et alimentation animale. On souligne ici un antagonisme entre intégration des ateliers et compétition feed food, qui sous-tend la recherche d'un compromis. Faut-il produire, être autonome, être efficace, ou être producteur net de protéines consommables par l'Homme ? Toutes ces interrogations soulèvent la question de la place de l'élevage dans une agriculture durable. La place des ruminants sera liée à leur capacité à valoriser les ressources fourragères et, plus généralement cellulosiques, issues des systèmes de culture, des prairies permanentes et des parcours, et celle des monogastriques à leur capacité à valoriser les coproduits des cultures non directement utilisables par l'homme (Benoit et al. 2020).

Ethics approval

Not applicable

Data and model availability statement

MIX-ENABLE project database compiled at <https://doi.org/10.15454/AKEO5G> (Ulukan et al., 2021).

Authors' contributions

Conceptualization: LS, PV, MB and BD; Data curation: LS, DU; Software: LS; Methodology: LS, AdIF, PV, MB, DP, LM, GM and BD; Formal analysis: LS, AdIF, MB; Visualization: LS; Writing–original draft: LS; and Writing–review and editing: LS, AdIF, GM, PV, MB and BD.

Declaration of interest

None

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support for the MIX-ENABLE project provided by transnational funding bodies, being partners of the H2020 ERA net project, CORE Organic Cofund, and the cofund from the European Commission. L.S. work is supported by the French government IDEX-ISITE initiative 16-IDEX-0001 (CAP 20-25). The authors thank Claire Mosnier for her advice on the analysis and the farmers interviewed.

References

- Barbieri P, Pellerin S, Nesme T (2017) Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Scientific Reports* 7:. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6>
- Bell LW, Moore AD (2012) Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agric Syst* 111:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>

- Benoit M, Dumont B, Barbieri P, Nesme T (2020) Une agriculture durable pour nourrir la planète : l'élevage au coeur du débat. *Innovations Agronomiques* 23–32
- Bouttes M, Bancarel A, Doumayzel S, et al (2020) Conversion to organic farming increases dairy farmers' satisfaction independently of the strategies implemented. *Agron Sustain Dev* 40:12. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00616-5>
- Bouttes M, Darnhofer I, Martin G (2019) Converting to organic farming as a way to enhance adaptive capacity. *Org Agr* 9:235–247. <https://doi.org/10.1007/s13165-018-0225-y>
- Brock CC, Pempek JA, Jackson-Smith D, et al (2021) Organic dairy producer experiences and decisions related to disease prevention and treatment. *Journal of Dairy Science* 104:5867–5880. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19621>
- Cayre P, Michaud A, Theau J-P, Rigolot C (2018) The coexistence of multiple worldviews in livestock farming drives agroecological transition. A case study in french protected designation of origin (PDO) cheese mountain areas. *Sustainability* 10:1097. <https://doi.org/10.3390/su10041097>
- Cuchillo-Hilario M, Wrage-Mönnig N, Isselstein J (2018) Forage selectivity by cattle and sheep co-grazing swards differing in plant species diversity. *Grass and Forage Science* 73:320–329. <https://doi.org/10.1111/gfs.12339>
- d'Alexis S, Sauvant D, Boval M (2014) Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J Agric Sci* 152:655–666. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000622>
- Dumont B, Cournut S, Mosnier C, et al (2020a) Comprendre les atouts de la diversification des systèmes d'élevage herbivores du nord du Massif central. *INRA Prod Anim* 33:173–188. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.3.4557>
- Dumont B, Fortun-Lamothe L, Jouven M, et al (2013) Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7:1028–1043. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002418>

Dumont B, Petit M, D'hour P (1995) Choice of sheep and cattle between vegetative and reproductive cocksfoot patches. *Applied Animal Behaviour Science* 43:1–15.

[https://doi.org/10.1016/0168-1591\(95\)00553-5](https://doi.org/10.1016/0168-1591(95)00553-5)

Dumont B, Puillet L, Martin G, et al (2020b) Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front Sustain Food Syst* 4:109. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>

Duval J, Cournut S, Hostiou N (2021) Livestock farmers' working conditions in agroecological farming systems. A review. *Agron Sustain Dev* 41:22.

<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00679-y>

EU (2007) Règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n° 2092/91

Gaudaré U, Pellerin S, Benoit M, et al (2021) Comparing productivity and feed-use efficiency between organic and conventional livestock animals. *Environ Res Lett* 12.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd65e>

Hastie T, Tibshirani R, Friedman J (2009) *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Second Edition, 2nd edn. Springer-Verlag, New York

Hendrickson JR, Hanson JD, Tanaka DL, Sassenrath G (2008) Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew Agric Food Syst* 23:265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>

INRA (2018) *Alimentation des Ruminants.*, Quae. Paris, France

Kirkegaard JA, Conyers MK, Hunt JR, et al (2014) Sense and nonsense in conservation agriculture: Principles, pragmatism and productivity in Australian mixed farming systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187:133–145.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.011>

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.011>

Kremen C, Iles A, Bacon C (2012) Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol Soc* 17:44. <https://doi.org/10.5751/ES-05103-170444>

Laisse S, Baumont R, Dusart L, et al (2018) L'efficience nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRAE Prod Anim* 31:269–288.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355>

Lê Cao K-A, Rohart F, Gonzalez I, et al (2011) mixOmics: Omics Data Integration Project. Version 6.14.1. Bioconductor version: Release (3.12). URL

<https://bioconductor.org/packages/mixOmics/>

Martin G, Barth K, Benoit M, et al (2020) Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric Syst* 181:102821.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>

Maxin G, Graulet B, Morvan AL, et al (2020) Cover crops as alternative forages for ruminants: nutritive characteristics, in vitro digestibility, methane and ammonia production. *Anim Prod Sci* 60:823–832. <https://doi.org/10.1071/AN19091>

<https://doi.org/10.1071/AN19091>

Mehmood T, Liland KH, Snipen L, Sæbø S (2012) A review of variable selection methods in Partial Least Squares Regression. *Chemom Intell Lab Syst* 118:62–69.

<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.07.010>

Mevik B-H, Wehrens R (2007) The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. *J Stat Soft* 18:. <https://doi.org/10.18637/jss.v018.i02>

Moraine M, Duru M, Nicholas P, et al (2014) Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal* 8:1204–1217.

<https://doi.org/10.1017/S1751731114001189>

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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.005>

Mosnier C, Jarousse A, Madrange P, et al (2021) Evaluation of the contribution of 16 European beef production systems to food security. *Agricultural Systems* 190:103088.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103088>

Mottet A, de Haan C, Falcucci A, et al (2017) Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security* 14:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>

Mugnier S, Husson C, Cournot S (2020) Why and how farmers manage mixed cattle–sheep farming systems and cope with economic, climatic and workforce-related hazards. *Renew Agric Food Syst* 1–9. <https://doi.org/10.1017/S174217052000037X>

Mzoughi N (2014) Do organic farmers feel happier than conventional ones? An exploratory analysis. *Ecological Economics* 103:38–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.04.015>

Pohlert T (2014) The pairwise multiple comparison of mean ranks package (PMCMR)

Ponisio LC, M'Gonigle LK, Mace KC, et al (2015) Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282:20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>

Rapey H, Balouzat J, Roguet C, Dounies B (2021) Des alternatives à la spécialisation des élevages porcins sont-elles encore possibles en zones de montagne ? *Economie rurale* n° 375:81–91

Rufino MC, Hengsdijk H, Verhagen JMF (2009) Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr Cycling Agroecosyst* 84:229–247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>

Ryschawy J, Joannon A, Gibon A (2014) Mixed crop-livestock farm: definitions and research issues. A review. *Cahiers Agricultures* 346–356. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0727>

Sagot L (2017) Cet automne, mes brebis pâturent les couverts végétaux

Schröder JJ, Aarts HFM, ten Berge HFM, et al (2003) An evaluation of whole-farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use. *European Journal of Agronomy* 20:33–44. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00070-4)

Soussana J-F, Lemaire G (2014) Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190:9–17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>

Steinmetz L, Martin G, Dumont B, et al (under review) A new analytical framework to assess on-farm integration in diversified agricultural systems. *Agric Syst*

Steinmetz L, Veysset P, Benoit M, Dumont B (2021) Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agron Sustain Dev*. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00696-x>

Tenenhaus Michel (1998) *La régression PLS: théorie et pratique* / Michel Tenenhaus. Éditions Technip, Paris

van Wagenberg CPA, de Haas Y, Hogeveen H, et al (2017) Animal Board Invited Review: Comparing conventional and organic livestock production systems on different aspects of sustainability. *Animal* 11:1839–1851. <https://doi.org/10.1017/S175173111700115X>

Veysset P, Lherm M, Bébin D, Roulenc M (2014) Mixed crop–livestock farming systems: a sustainable way to produce beef? Commercial farms results, questions and perspectives. *Animal* 8:1218–1228. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000378>

Veysset P, Lherm M, Roulenc M, et al (2015) Productivity and technical efficiency of suckler beef production systems: trends for the period 1990 to 2012. *Animal* 9:2050–2059. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002013>

Wilkinson JM (2011) Re-defining efficiency of feed use by livestock. *animal* 5:1014–1022. <https://doi.org/10.1017/S175173111100005X>

Wold S, Martens H, Wold H (1983) The multivariate calibration problem in chemistry solved by the PLS method. In: Kågström B, Ruhe A (eds) *Matrix Pencils*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 286–293

Annexes

L'utilisation des concentrés au cœur de l'efficience des systèmes mixtes d'élevage en agriculture biologique.

Lucille Steinmetz, Patrick Veysset, Bertrand Dumont, Guillaume Martin, Anne De la Foye, David Parsons, Leonardo Monteiro, Defne Ulukan, Marc Benoit

Tableau S1 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEPV) dans fourrages intra-consommées. N : azote

code product	N factor	N unit	N source	N details	SHEPV factor	SHEPV unit	SHEPV source	SHEPV details
alfalfa hay	0,0256	kg N/kg	Outil de calcul du Bilan apparent Version 2005 (F. Vertes, Inra Quimper)	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	
cereal fodder silage	0,01568	kgN /kg DM	INRA 2018	ensilage blé	59	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	meteil immature
cereal fodder silage	0,01568	kgN /kg DM	INRA 2018	ensilage blé	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	
clover grass bale silage	0,0288	kg N/kg DM	INRA 2018	50% trefle 50% ray gras anglais	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	
clover grass bale silage	0,0288	kg N/kg DM	INRA 2018	50% trefle 50% ray gras anglais	59	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	meteil immature
grass hay	0,02094	kg N/kg DM	INRA 2018	moyenne foin plaine	59	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	meteil immature
legume cereal fodder silage	0,02016	kg N/kg DM	INRA 2018	moyenne ensilage cer entiere et pois	59	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	meteil immature
legume cereal fodder silage	0,02016	kg N/kg DM	INRA 2018	moyenne ensilage cer entiere et pois	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	
sorgho silage	0,01968	kg N/ kg DM	INRA 2018	sorgho fourrage vert	59	% of product proteins	Laisse et al. 2018. INRA Prod. An.	meteil immature

Tableau S2 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEPV) dans les produits de la ferme.

code_product	unit_of_amount	prot_factor	prot_unit	prot_source	prot_details	SHEP V_factor	SHEPV_unit	SHEPV_source	SHEPV_details
alcohol	liters	0	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
apple	tons	0,0027	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
apple juice	liters	0,001	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
asparagus	tons	0,022	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
barley + pea	tons	0,151	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% barley	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
barley grain	tons	0,098	kg protein/kg	feedtables.com		61	% of product proteins	Laisse et al. 2018	
barley/oat/peas	tons	0,1515	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% triticale	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
beans	tons	0,221	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
beet	tons	0,013	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
bread	tons	0,0885	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
broccoli	tons	0,0282	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
buckwheat grain	tons	0,1325	kg protein/kg	FoodData Central		71	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	moy cereals
butter	tons	0,0085	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	moy cereals
carrot	tons	0,01	kg protein/kg	FoodData Central	Carrot	100	% of product proteins		
cereal grain	tons	0,098	kg protein/kg	feedtables.com	Barley	61	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	barley
chestnut	tons	0,0242	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
chestnut	kg for plants	0,0242	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
chicken eggs	number	0,124	kg protein/kg	FoodData Central		90,7	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
chicken manure	tons	0,1375	kg protein/kg	Institut de l'élevage 1999	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		

chicken meat	kg lw	0,2126	kg protein/kg	FoodData Central		64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
cow cheese	tons	0,2981	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
cow manure	tons	0,03125	kg protein/kg	Institut de l Elevage 1999	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
cow meat	kg lw	0,1748	kg protein/kg	FoodData Central		60	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	vache allaitante
cow milk	liters	0,0315	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
cow slurry	tons	0,021875	kg protein/kg	Institut de l Elevage 1999	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
cream	liters	0,0244	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
duck meat	kg cw	0,1149	kg protein/kg	FoodData Central		64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
durum grain	tons	0,144	kg protein/kg	feedtables.com		70	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ble tendre
faba bean	tons	0,267	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
garlic	tons	0,0636	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
goat meat	kg lw	0,206	kg protein/kg	FoodData Central		43	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	agneau
goat milk	liters	0,0356	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
grass bale silage	tons	0,111	kg protein/kg DM	https://www.allaboutfeed.net/PageFiles/10302/007_boerderij-download-AAF10929D01.pdf		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
grass hay	tons	0,146	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
hemp seed	tons	0,3156	kg protein/kg	FoodData Central		78	% of product proteins	calcule à partir de Laisse et al. 2018.	lin
honey	tons	0,003	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
horse meat	kg lw	0,2139	kg protein/kg	FoodData Central		NA	% of product proteins		
legumes	tons	0,203	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
lentil + barley grain	tons	0,1665	kg protein/kg	feedtables.com	50% lentil 50% barley	67,5	% of product proteins	calcule à partir de Laisse et al. 2018.	50% lentil 50% barley
lentil grain	tons	0,234	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois

linseed	tons	0,1829	kg protein/kg	FoodData Central		78	% of product proteins		lin
lupin grain	tons	0,335	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
maize grain	tons	0,076	kg protein/kg	feedtables.com		15	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
mixt grain	tons	0,1515	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% triticale	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	50% faba bean white flowers 50% triticale
oat grain	tons	0,094	kg protein/kg	feedtables.com		84	% of product proteins	Mosnier al. 2021.	
oil	liters	0	kg protein/kg	feedtables.com	Sunflower oil	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
oilseed	tons	0,187	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
onion	tons	0,011	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
other cereals	tons	0,098	kg protein/kg	feedtables.com	Barley	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	
pea + barley grain	tons	0,151	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% barley	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
pea + triticale grain	tons	0,1515	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% triticale	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
peas	tons	0,203	kg protein/kg	feedtables.com		74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
pig meat	kg cw	0,1391	kg protein/kg	FoodData Central		87	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
potato	tons	0,0205	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
pumpkin	tons	0,01	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
pumpkin oil	liters	0	kg protein/kg	FoodData Central		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
rapeseed grain	tons	0,187	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
rapeseed oil	liters	0	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
raspberry	kg for plants	0,012	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
roughage	tons	0	kg protein/kg			0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
rye grain	tons	0,085	kg protein/kg	feedtables.com		71	% of product proteins	Mosnier al. 2021.	
sheep meat	kg lw	0,1632	kg protein/kg	FoodData Central		43	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	agneau
sheep milk	liters	0,0598	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018. An. Et Mosnier et al.	

sheep skin	number	0,375	kg protein/kg	Chambre Agriculture PACA, 2012	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
sheep wool	NA	0,1875	kg protein/kg	Chambre Agriculture PACA, 2012	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
silage maize	tons	0,078125	kg protein/kg DM	Institut de l'Elevage 1999	Conversion from N	10	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	
sorghum	tons	0,092	kg protein/kg	feedtables.com		72	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	
soybean	tons	0,36	kg protein/kg	feedtables.com	soyben whole extruded	60	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
spelt grain	tons	0,1457	kg protein/kg	FoodData Central		66	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
straw	tons	0,035	kg protein/kg	feedtables.com		0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
strawberry	tons	0,0067	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins		
sunflower seed	tons	0,2078	kg protein/kg	FoodData Central		0	% of product proteins	Mosnier al. 2021.	
triticale grain	tons	0,1	kg protein/kg	feedtables.com		66	% of product proteins	Mosnier al. 2021.	
triticale + peas	tons	0,1515	kg protein/kg	feedtables.com	50% pea 50% triticale	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	50% triti 50% pois
turkey meat	kg cw	0,1981	kg protein/kg	FoodData Central		64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
vegetable	tons	0,01	kg protein/kg	FoodData Central	Carrot	100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
walnut	kg for plants	0,1523	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
wheat bran	tons	0,153	kg protein/kg	feedtables.com		90	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
wheat flour	tons	0,1033	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
wheat grain	tons	0,109	kg protein/kg	feedtables.com		66	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
wood	trees	0,0425	kg protein/kg	https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/cjss91-046	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
yoghurt	liters	0,103	kg protein/kg	FoodData Central		100	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	

Tableau S3 : Coefficients de conversion en azote et proportions de protéines consommables par l'Homme (SHEPV) dans l'intrants achetés. N : azote.

de input	N factor	N_unit	N source	N details	SHEP V_factor	SHEPV unit	SHEPV source	SHEPV details
alfalfa hay	0,0256	kg N/kg	IDEA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
alfalfa pellet	0,026	kg N/kg	ADEME dataset	NA	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	luzerne déshydratée
barley + bean grain	0,0292	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, calculated from barley and faba bean white flowers	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
barley + com + triticale + bean grain	0,02116	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 25% barley, 25% maize, 25% triticale and 25% faba bean white flowers	54	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	25% barley, 25% maize, 25% triticale and 25% faba bean white flowers
barley + oat grain	0,01536	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, calculated from barley and oat	72,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and oat
barley + pea grain	0,02416	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, calculated from barley and pea	67,5	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	Calculated from barley and faba bean white flowers
barley grain	0,01568	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	61	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	
beef cattle concentrate feed	0,0314	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	21	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	cow concentrate
beer yeast	0,07072	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
bioforce ovi 23	0,0368	kg N/kg	https://www.progeonet.net/index.html?pg=156	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
Bovimix 16 dairy feed	0,026	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT+40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc

								prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
Bovimix 18 dairy feed	0,029	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
broad bean grain	0,04272	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, faba bean white flowers	74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
broiler complete feed	0,0336	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
calf concentrate feed	0,02752	kg N/kg	Sund Friskus	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	21	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	cow concentrate
cattle protein feed	0,03936	kg N/kg	Edel Johan Eko	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
cereal bran	0,02448	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, wheat bran	90	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
cereal grain	0,01568	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, barley	61	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	
chicken complete feed	0,03	kg N/kg	NA	NA	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
chicken manure	0,022	kg N/kg	Institut de l Elevage 1999	Fumier de poulet	0	% of product proteins		
chicken protein feed	0,058	kg N/kg	NA	NA	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
compost	0,00885	kg N/kg	https://echo- mo.pagesperso- orange.fr/article_ Echo mo 70.pdf	NA	0	% of product proteins		
dairy cattle complete feed	0,0272	kg N/kg	https://www.erre- emme- mangimi.com/pr odotti/prodotti- bio/ruminanti-da- latte/36- v51b.html	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh

dairy cattle concentrate feed	0,024	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
de dobbeleer broiler	0,03	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
dedobbeleer feed for pig	0,026	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
ewe complete feed	0,029	kg N/kg	NA	NA	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3%mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
ewe concentrate feed	0,02752	kg N/kg	Sund Friskus	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3%mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
ewe energy + mineral feed	0,0192	kg N/kg	Crystalyx High Energy	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3%mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
ewe protein feed	0,0456	kg N/kg	Sund Eko (Gullviva or Merax)	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	34	% of product proteins	expert aliment construit fichier valeurs nutritives aliments de commerce par Sarah (Laisse et al., 2018)	
ewe supplement feed	0,022	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3%mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
faba bean grain	0,04272	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, faba bean white flowers	74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois
fattening pig complete feed	0,026	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
fattening pig concentrate feed	0,026	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
fattening poultry complete feed	0,0328	kg N/kg	Faustzahlen Ökolandbau	NA	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
fertilizer	0,0256	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
field bean + triticale grain	0,02936	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	50% faba bean white flowers 50% triticale
field bean grain	0,04272	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	pois

food waste	0,03744 216	kg N/kg	https://www.nationalhogfarmer.com/nutrition/recycled-food-waste-pig-diets-can-reduce-environmental-footprint	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, supermarket food waste with 91.77% DM	0	% of product proteins		
goat complete feed	0,029	kg N/kg	NA	NA	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
grass bale silage	0,00936	kg N/kg	Swedish figures	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
grass hay	0,02336	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, dehydrated grass	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
guano	0,07	kg N/kg	NA	NA	0	% of product proteins		
Gut Rosenkrantz EIDERKRAFT Milchleistungsfutter 20-3 + 20% Mais - Öko	0,032	kg N/kg	https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=19&ved=2ahUKEwjfns-Ol_HmAhWZD2MBHRugDNoQFjASegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fm.lwk-niedersachsen.de%2F%3Ffile%3D32763&usg=AOvVaw3hH7rlF9xEXF9c9uFT-1BG	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
hair flour pellets	0,135	kg N/kg	NA	https://www.researchgate.net/publication/277809076_Human_Hair_as_a_Nutrient_Source_for_Horticultural_Crops	0	% of product proteins		

herbs	0,00889 6	kg N/kg	FoodData Central	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, oat hulls	0	% of product proteins		
hulls	0,008	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, oat hulls	0	% of product proteins		
Kaiser Bio-G- Konz 35	0,0576	kg N/kg	https://www.kaisermuehle.de/BioGefluegelEM.pdf	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
Kaiser Bio-KSK Kükenstarterkorn Geflügelfutter	0,0352	kg N/kg	https://www.kaisermuehle.de/BioGeflügelfutter	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
kerasote	0,0256	kg N/kg	NA	NA	0	% of product proteins		
lacta 18	0,035	kg N/kg	NA	NA	34	% of product proteins	calc à partir de Laisse et al. 2018	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4% ttx tournesol + 5% ttx soja+6% cc prot luzerne
lactating sow complete feed	0,026	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
lamb complete feed	0,0256	kg N/kg	ADEME dataset	Aliment ovin viande (16% MAT)	34	% of product proteins	Laisse et al. 2018. (tableau excel)	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4% ttx tournesol + 5% ttx soja+6% cc prot luzerne
lamb supplement feed	0,023	kg N/kg	NA	NA	34	% of product proteins	Laisse et al. 2018. (tableau excel)	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4% ttx tournesol + 5% ttx soja+6% cc prot luzerne
lime	0	kg N/kg	Institut de l Elevage 1999	NA	0	% of product proteins		
linseed oilcake	0,05152	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	as rapeseed oilcake
lupin dregs	0,01320 592	kg N/kg	https://www.feedipedia.org/node/24366	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, lupin hulls with 90.7% DM	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	dreche
maize grain	0,01216	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	15	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
maize silage	0,00406 25	kg N/kg	https://www.feedipedia.org/node/12871	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	10	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
mineral + potato protein feed	0,0615	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 50% potato protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	

mixed grain	0,02936	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 50% triticale + 50% faba bean white flowers	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	50% faba bean white flowers 50% triticale
oat grain	0,01504	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	84	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	
patentkali	0,0336	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins		
pea grain	0,03264	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	74	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
peat bedding	0,01	kg N/kg	https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/peat	Sphagnum peat	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
pig protein feed	0,0256	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
piglet complete feed	0,03	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
piglet prestarter	0,032	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
potato dregs	0,00752	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	dreche
potato protein concentrate	0,123	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	dreche
powder milk	0,039	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	80	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
pregnant sow complete feed	0,024	kg N/kg	NA	NA	33	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration porc p1
pumpkin oilcake	0,08898 56	kg N/kg	https://www.feedipedia.org/node/12482	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	as rapeseed oilcake
rapeseed oilcake	0,05424	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
red clover hay	0,02620 56	kg N/kg	https://www.feedipedia.org/node/12509	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	

reed canary grass bedding	0,00480 96	kg N/kg	Swedish study	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
rumi 16	0,0288	kg N/kg	ADEME dataset	VA 18	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
SALVANATUR LM Rind	0,0004	kg N/kg	https://www.salvana.com/products/salvanatur.html	NA	0	% of product proteins		
SALVANATUR MAKRO	0,0001	kg N/kg	https://www.salvana.com/products/salvanatur.html	NA	0	% of product proteins		
Scar Acti Poule pondeuse	0,024	kg N/kg	https://www.scar.be/ScarEbu/scar/ebu/ListItemAna.jsp?numeroArticle=438400001&lng=fr&dep=AGR	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
Scar Acti Poulet Croissance	0,0304	kg N/kg	https://www.scar.be/ScarEbu/scar/ebu/ListItemAna.jsp?numeroArticle=438200001&lng=fr&dep=AGR	NA	64	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poulet de chair
Scar Actitop 15	0,024	kg N/kg	https://www.scar.be/ScarEbu/scar/ebu/ListItemAna.jsp?numeroArticle=363000000&lng=fr&dep=AGR	NA	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh
Scar Actitop 17	0,0272	kg N/kg	https://www.scar.be/ScarEbu/scar/ebu/ListItemAna.jsp?numeroArticle=363100000&lng=fr&dep=AGR	NA	33	% of product proteins	calculé à partir de Laisse et al. 2018	aliment VL 18 =12%bléT +40% orge+ 17% triticale + 2%fev.print. + 2%pois +1%cc prot luz +9%ttx colza+9%ttx tournesol decort +7% pulpe bett desh

sheep complete feed	0,029	kg N/kg	NA	NA	34	% of product proteins	Laisse et al. 2018. (tableau excel)	30% mais+ 52% orge+3% mélasse bett+4%ttx tournesol + 5%ttx soja+6% cc prot luzerne
sheep wool pellets	0,09	kg N/kg	https://www.wildvalleyfarms.com/wool-pellets.html	NA	0	% of product proteins		
slurry fertilizer	0,0043	kg N/m3	Institut de l'Elevage 1999	Lisier mixte	0	% of product proteins		
soybean flour	0,060496	kg N/kg	FoodData Central	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	61	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	soja
soybean grain	0,05744	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	61	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
soybean oilcake	0,07408	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	60	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
spelt grain	0,023312	kg N/kg	FoodData Central	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	66	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	blé tendre
straw	0,0056	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, wheat straw	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
straw	0,0072576	kg N/kg	Swedish study	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, barley straw	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
sugarcane dregs (rum)	0,0043264	kg N/kg	https://www.feedipedia.org/node/12653	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
sunflower + soybean oilcake	0,06632	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 50% soybean meal with 48% protein + oil and 50% dehulled sunflower meal	30	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	50% soyban 50% sunflower
sunflower oilcake	0,05856	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	
tradi agneaux uab'	0,0256	kg N/kg	ADEME dataset	Aliment ovin viande (16% MAT)	34	% of product proteins	expert aliment construit fichier valeurs nutritives aliments de commerce par Sarah (Laisse et al., 2018)	
triticale + oat + pea grain	0,0210144	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 1/3 triticale, 1/3 oat and 1/3 pea	73,92	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	1/3 triticale, 1/3 oat and 1/3 pea
triticale grain	0,016	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	66	% of product proteins	Mosnier et al. 2021.	

turkey complete feed	0,0355	kg N/kg	NA	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein	92	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	ppc ration poule pondeuse
UFA 272	0,0272	kg N/kg	http://www.ufa.cah/fr/produit/ufa-272/25/	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein		% of product proteins		
UFA 276	0,0288	kg N/kg	http://www.ufa.cah/fr/produit/ufa-276/25/	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein		% of product proteins		
wheat grain	0,01744	kg N/kg	feedtables.com	Conversion factor: 1g N = 6.25g protein, 50% faba bean white flowers 50% triticale	66	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	blé tendre
winter pea + triticale	0,0276	kg N/kg	NA	NA	70	% of product proteins	Laisse et al. 2018. Et Mosnier et al. 2021.	50% faba bean white flowers 50% triticale
wood shavings	0,0068	kg N/kg	https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/cjss91-046	NA	0	% of product proteins	Laisse et al. 2018.	

Tableau S4 : Indicateurs de performance des modèles. R^2 : Coefficient de détermination, RMSEP (Root Mean Square Error of Production) : erreur quadratique moyenne, VIP (variable important in the prediction). EUI_t : efficience d'utilisation des intrants transformée, EUC_t : efficience d'utilisation des aliments concentrés transformée, ENA_t : efficience nette alimentaire transformée. Var : variable, BL : bovin lait, BV : bovin viande, Mono. : monogastrique, OV : ovin viande, PCPE : polyculture-polyélevage.

Echantillon	Modèle	Nb de fermes	Nb de var. explicatives	Var. à expliquer	nb de composante	RMSEP	R^2	VIP	qualité
global	PLS2	96	48	EUI	1	1.00	-0.05		
				ENA		0.93	0.13		
				EUC		0.84	0.29		
	PLS1			EUI	0				
PLS1	ENA	1	0.94	0.1	12	low			
PLS1	EUC	2	0.69	0.52	9	good			
PCPE	PLS2	71	47	EUI	1	1.03	-0.07		
				ENA		0.96	0.06		
				EUC		0.73	0.36		
	PLS1			EUI	0				
PLS1	ENA	0							
PLS1	EUC	1	0.71	0.49	14	good			
BL Mono PCPE	PLS2	16	42	EUI	1	1.07	-0.23		
				ENA		1.24	-0.63		
				EUC		0.9	0.13		
	PLS1			EUI	1	0.94	0.06	15	low
PLS1	ENA	0							
PLS1	EUC	0							
BV OV PCPE	PLS2	16	38	EUI	1	1.1	-0.29		
				ENA		1.19	-0.51		
				EUC		0.77	0.36		
	PLS1			EUI	0				
PLS1	ENA	0							
PLS1	EUC	2	0.64	0.56	16	good			
BV Mono PCPE	PLS2	26	43	EUI	1	1.08	-0.22		
				ENA		0.67	0.53		
				EUC		0.56	0.67		
	PLS1			EUI	0				
PLS1	ENA	1	0.67	0.53	15	good			
PLS1	EUC	1	0.57	0.66	17	good			

Tableau S5 : Coefficients de régression des variables X sur EUC transformée. Seuls les variables explicatives avec un VIP >1 sont répertoriées dans le tableau. BV : bovin viande, Mono. : monogastrique, OV : ovin viande, PCPE : polyculture-polyélevage. Wut_share : Pourcentage d'exploitants dans le collectif de travail, WUp share : pourcentage d'exploitants dans le collectif de travail, FCrop/land : pourcentage de culture annuelles fourragères dans la surface totale, PP/land : pourcentage de prairies permanentes dans la surface totale, bc_lu_percent : pourcentage d'UGB bovins viande dans les UGB totaux, Janx : indice d'équitabilité de Piélou calculé à partir de la proportion de chaque atelier dans les UGB totaux, lu/WUt : nombre d'UBG à gérer pour un travailleur à plein temps, SRland : nombre d'UGB totaux par ha de surface totale, SRfodder : nombre d'UGB ruminants par ha de surface fourragères (prairies permanentes, prairies temporaires, cultures annuelles fourragères, parcours), CropAFL : pourcentage de la surface en culture annuelles destinées à l'alimentation animale, CCropAFL : pourcentage de surface en grandes culture dans la surface de cultures dédiées à l'alimentation animale, NoGrainCCropAFL : pourcentage de surface de résidus, couverts, intercultures pâturés ou récoltés dans le pourcentage de grandes cultures dédiés à l'alimentation animale, CCropRumFR : pourcentage des besoins alimentaires des ruminants couverts par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme, NoGrainCCropRumFR : pourcentage de résidus, couverts, intercultures dans la couverture des besoins alimentaires des ruminants par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme, Grazing : pourcentage de l'année ou les ruminants pâturent, MixGrazing : pourcentage des surface en prairies pâturées simultanément ou successivement pas plusieurs espèces animales, ByProducts : quantité de co-produits échangés (petit lain, son,...) entre les ateliers de la ferme par UGB, ByProdFlow : nombre de flux de co-produits par atelier, Versat : nombre de travailleurs en capacité de gérer tous les ateliers de production de la ferme en proportion du nombre total de travailleurs, L_Prod : quantité relative de protéines produites par UGB par les ateliers animaux de la ferme, L_Conc : quantité relative de concentrés (aliments composés, céréales, oléa-protéagineux, drèches, tourteaux, lait en poudre, luzerne déshydratée) consommée par les animaux de la ferme (UGB), H_Conc : indicateur d'hétérogénéité des niveaux de consommation de concentrés des ateliers animaux de la ferme, expérience_5to10 : agriculture ayant entre 5 à 10 années d'expérience en agriculture avec l'installation, experience_10to15 : agriculteur ayant entre 10 et 15 année d'expérience en agriculture avec l'installation.

Echantillon	Global	PCPE	BC OV PCPE	BV Mono PCPE	Déterminants
WUf share			-0.109	0.062	Collectif de travail
WUp share				-0.067	
FCrop/land		-0.084	-0.045	-0.070	Cultures annuelles fourragères
PP/land			0.024		Surface toujours en herbe
bc_lu_percent			-0.079		Équilibre entre ateliers animaux
Janx			0.091		
lu/WUt			0.097		Intensification
SRland		-0.070	0.100	-0.064	
SRfodder			0.134	-0.074	
CropAFL		0.060		0.060	Intégration culture-élevage
CCropAFL	0.010	0.128	0.120	0.080	
NoGrainCCropAFL		0.078	0.001		
CCropRumFR		0.129	0.162	0.115	
NoGrainCCropRumFR		0.061	-0.030	0.063	
Grazing	0.101	0.063	0.096		Intégration prairie-élevage
MixGrazing			-0.062		Intégration entre élevages
ByProducts	0.137	0.093		0.075	Échanges de coproduits
ByProdFlow	0.079	0.106	0.116	0.080	
Versat	-0.089	-0.093		-0.070	Polyvalence des travailleurs
L_Prod	-0.105	-0.077		-0.061	Productivité animale
L_Conc	0.419	0.167	0.186	0.134	Consommation de concentrés
H_Conc	0.256	0.117		0.101	Hétérogénéité dans la consommation de concentrés
experience_5to10				0.088	Expérience avant installation
experience_10to15				-0.067	

Tableau S6 : Coefficients de régression des variables X sur ENA transformée. Seuls les variables explicatives avec un VIP >1 sont répertoriées dans le tableau. STH : surface toujours en herbe, WUp share : pourcentage d'exploitants dans le collectif de travail, PP/land : pourcentage de prairies permanentes dans la surface totale, rangeland/land : pourcentage de parcours dans la surface totale, herbager : système herbager, g_lu_percent : pourcentage d'UGB caprines dans les UGB totaux, po_lu_percent : pourcentage d'UGB volailles dans les UGB totaux, lu/WUt : nombre d'UGB à gérer pour un travailleurs à plein temps, SRland : nombre d'UGB totaux par ha de surface totale, SRfodder : nombre d'UGB ruminants par ha de surface fourragères (prairies permanentes, prairies temporaires, cultures annuelles fourragères, parcours), CropAFL : pourcentage de la surface en culture annuelles destinées à l'alimentation animale, CCropAFL : pourcentage de surface en grandes culture dans la surface de cultures dédiées à l'alimentation animale, CCropRumFR : pourcentage des besoins alimentaires des ruminants couverts par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme, NoGrainCCropRumFR : pourcentage de résidus, couverts, intercultures dans la couverture des besoins alimentaires des ruminants par des ressources issues des surfaces en grandes cultures de la ferme, ByProdFlow : nombre de flux de co-produits par atelier, Versat : nombre de travailleurs en capacité de gérer tous les ateliers de production de la ferme en proportion du nombre total de travailleurs, L_Prod : quantité relative de protéines produites par UGB par les ateliers animaux de la ferme, L_Conc : quantité relative de concentrés (aliments composés, céréales, oléa-protéagineux, drèches, tourteaux, lait en poudre, luzerne déshydratée) consommée par les animaux de la ferme (UGB), H_Conc : indicateur d'hétérogénéité des niveaux de consommation de concentrés des ateliers animaux de la ferme, L_SCSales : pourcentage relatif des animaux et produits animaux commercialisés en circuits court, L_NetSales : produit net (produit vendu + variation de stock – achats d'animaux) par UGB relatif réalisé par les ateliers animaux de la ferme, expérience_5to10 : agriculture ayant entre 5 à 10 années d'expérience en agriculture avec l'installation, experience_10to15 : agriculteur ayant entre 10 et 15 année d'expérience en agriculture avec l'installation.

Echantillon	Global	BV Mono PCPE	Déterminants
WUp share		-0.069	Collectif de travail
PP/land rangeland/land herbager	-0.066	-0.063	Surface toujours en herbe
g_lu_percent po_lu_percent	0.054 -0.072		Equilibre entre ateliers animaux
lu/WUt SRland SRfodder		-0.059 -0.075	Intensification
CropAFL CCropAFL CCropRumFR NoGrainCCropRumFR	0.087 0.118	0.088 0.082 0.114 0.074	Intégration culture-élevage
ByProdFlow		0.089	Échanges de coproduits
Versat	-0.085	-0.073	Polyvalence des travailleurs
L_Prod	-0.083		Productivité animale
L_Conc	0.174	0.118	Consommation de concentrés
H_Conc	0.110	0.078	Hétérogénéité dans la consommation de concentrés
L_SCSales	0.055		Vente en circuit court
L_NetSales		-0.057	Valorisation économique
experience_5to10 experience_10to15	0.075 -0.073	0.089 -0.083	Expérience avant installation

CHAPITRE 6:
DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Décrire et caractériser le fonctionnement des systèmes d'élevage mixte

1.1. Deux méthodes complémentaires

Dans ce travail de thèse, nous avons proposé deux méthodes pour décrire le fonctionnement des systèmes d'élevage mixtes, et plus largement des systèmes diversifiés. La première méthode repose sur la représentation des interactions biotechniques entre les ateliers de production du système (article 2) en appliquant la méthode d'analyse des réseaux écologiques (Rufino et al. 2009; Stark et al. 2018). Cette méthode permet de représenter et de quantifier les flux de matière entre les compartiments du système et entre ces compartiments et l'environnement extérieur ; dans notre cas ces flux étaient exprimés en azote. Ceux qui ont développé la méthode des réseaux écologiques ont proposé des indicateurs pour caractériser le réseau de flux. Nous en avons retenu quatre : i) la densité de flux, ii) l'activité interne du système qui illustre l'intensité moyenne des flux au sein du système, iii) l'activité totale du système qui prend également en compte les flux intrants, et iv) l'organisation des flux qui qualifie le réseau de flux à partir du nombre de flux et de leur intensité. Approcher le fonctionnement d'un système de cette manière nous a permis de représenter de façon générique l'ensemble des flux entre les ateliers du système et entre le système et son environnement (flux entrants et sortants) et ce quel que soit le type de système, herbager-polyélevage ou polyculture-polyélevage et le type de combinaison d'espèces associant des ruminants entre eux ou des ruminants et des monogastriques. Cette approche qui quantifie l'ensemble des flux et les exprime dans une même unité permet de prendre en compte d'éventuelles activités non agricoles présentes sur l'exploitation, comme par un exemple un atelier de transformation des produits agricoles.

Néanmoins cette approche, bien qu'elle fasse preuve de généralité, se restreint à l'analyse du fonctionnement biotechnique. Or nous avons conclu de notre revue de la littérature (article 1) l'importance et la nécessité de sortir d'une approche strictement biotechnique et de tenir compte de la composition et de la polyvalence du collectif de travail, et des différents circuits de commercialisation des produits issus de l'exploitation.

Ainsi, nous avons mis en pratique le cadre conceptuel proposé dans l'article 1, et proposé des indicateurs pour illustrer les trois dimensions que sont les pratiques agricoles, l'organisation du

travail et la commercialisation des produits (article 3). Ces deux dernières dimensions ont déjà été considérées conjointement au fonctionnement biotechnique des systèmes. Par exemple, Nozière et al. (2011) et Mugnier et al. (2020) ont analysé conjointement l'organisation du travail et les pratiques d'élevage, alors que Chavas et Kim (2007) et Valenti et al. (2018) mettaient en évidence les atouts d'une diversification des productions et des circuits de commercialisation. A notre connaissance, jamais ces trois dimensions n'avaient jusqu'ici été considérées ensemble du moins pour analyser le fonctionnement de systèmes de productions animales. Dans cet objectif, nous avons proposé un jeu de 54 indicateurs, pensés à partir de l'analyse de la littérature et d'échanges entre experts. Vingt-trois indicateurs caractérisent les interactions biotechniques entre les cultures, les prairies, et les ateliers d'élevage et de transformations présents sur une exploitation. Seize indicateurs permettent d'évaluer la polyvalence des travailleurs et la répartition temporelle des activités agricoles. La gestion des ventes des produits est évaluée par 15 indicateurs traduisant le recours aux circuits courts de distribution, le comportement des clients, la gamme de produits vendus et la temporalité des ventes. Cette seconde méthode qui conduit à réaliser une analyse multivariée de l'intégration des pratiques dans trois dimensions permet (i) de combiner des dimensions biotechniques et organisationnelles du fonctionnement des exploitations d'élevage, (ii) d'apporter une vision holistique des pratiques mises en œuvre sur l'exploitation agricole, sur la base de données quantitatives, et iii) de connecter les trois dimensions étudiées avec une évaluation de la multiperformance et de l'efficacité productive de ces systèmes de production.

1.1.1. Généricité vs précision

Outre le fait indéniable que la méthode d'analyse multivariée des pratiques d'intégration (article 3) prenne en compte plus de dimensions que la méthode des réseaux écologiques (article 2), les deux méthodes ont des apports complémentaires. Le jeu de 54 indicateurs que nous avons proposé nécessite une collecte d'information plus importante que ce qui est nécessaire pour appliquer la méthode des réseaux écologiques, mais ces indicateurs permettent de caractériser plus précisément le fonctionnement du système et d'identifier des pratiques corrélées entre elles (positivement ou négativement). Par exemple, dans l'article 3, l'analyse réalisée dans 10 exploitations a permis de distinguer celles qui cherchent avant tout à valoriser les interactions prairie-élevage, de celles qui optimisaient les interactions culture-élevage via des intercultures et des résidus de cultures. Nous avons également montré la forte interdépendance entre les circuits de distribution et l'organisation du travail. Par exemple, dans les exploitations où la

vente en circuits court domine, les exploitants ont la volonté de proposer toute l'année une gamme de produits qui soit la plus large possible, ce qui entraîne le chevauchement de pics de travail par exemple lors des périodes de vèlage où le conditionnement des produits et leur vente doit se poursuivre. De son côté l'analyse des flux permet d'identifier des pratiques sous-jacentes aux performances du système, (i) en réalisant une analyse de données à partir de la matrice utilisée pour la construction des indicateurs des réseaux écologiques ou (ii) en représentant graphiquement les flux (voir fig 4, article 2). L'avantage d'une telle approche fondée sur les pratiques réside dans son appropriation plus directe par les techniciens et les exploitants eux-mêmes habitués à manipuler des indicateurs de pratiques, comme par exemple la part de la surface agricole dédiée à l'alimentation animale, la part des surfaces en prairies pâturée par des bovins et des ovins, etc. Ce sont ces mêmes indicateurs qui sont généralement utilisés pour qualifier l'intégration culture-élevage (Martel et al. 2017).

1.1.2. Méthode de classification

Pour les deux méthodes, nous avons construit des groupes d'exploitations pour caractériser leur fonctionnement à l'aide d'une classification hiérarchique (ascendante dans l'article 3 et sur composantes principales dans l'article 2). Or ces typologies n'ont pas été construites à partir des mêmes indicateurs. Dans l'article 2, nous avons fait le choix de tenir compte d'indicateurs de structure (SAU, nb d'UTH, UGBs, %BV dans les UGBs, %prairies permanentes dans la SAU, %grandes cultures dans la SAU, chargement fourrager et chargement global) et des indicateurs des réseaux pour la construction groupe, car la gestion du troupeau et l'efficacité technique sont influencées par la taille du système (Veysset et al. 2015). Dans l'article 3, seuls les indicateurs de fonctionnement (pratiques) ont été considérés pour la distinguer les types d'exploitation. Nous proposons d'analyser comment se construisent les groupes suivant les indicateurs considérés et ce pour chaque méthode.

- Comment se regroupent les exploitations lorsqu'on ne considère que les indicateurs des réseaux écologiques ?

Lorsque nous avons réalisé une classification des 17 fermes de l'article 2 en n'utilisant que les indicateurs des réseaux écologiques, nous avons globalement retrouvé les mêmes groupes que dans la typologie qui prenait aussi en compte la structure des exploitations. Seuls deux groupes, les « grandes fermes extensives en surface » et les « petites fermes herbagères » initialement caractérisés par leur surface agricole utile (SAU) ont évolué (tableau 1). Dans cette nouvelle classification, l'ensemble des exploitations herbagères se regroupent indépendamment de leur SAU. Quelle que soit la taille des exploitations, les interactions clé résultent du mode de conduite des deux espèces de ruminants au pâturage. Les exploitations où le chargement ramené à la SAU est faible (moyenne de 0.64 UGB/ha) sont maintenant rassemblées indépendamment de leur SAU car elles présentent une intensité des flux plus faible (liée au faible chargement) et une densité de flux moyenne.

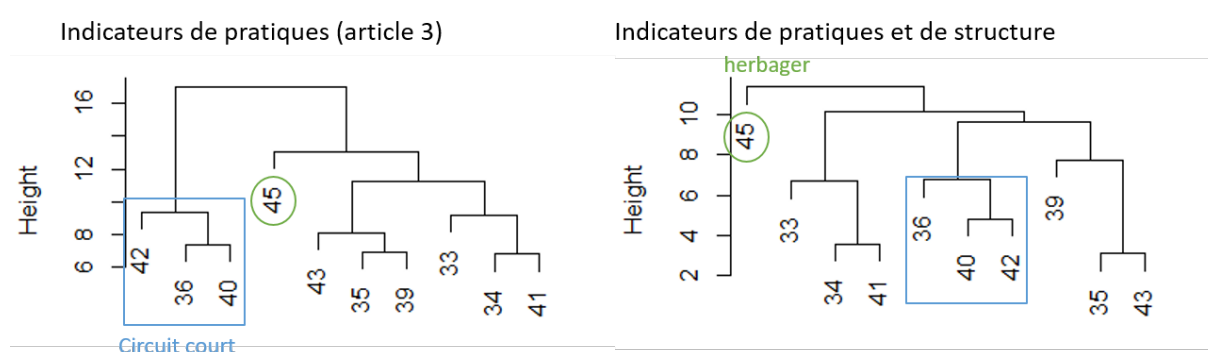
Tableau 1 : Répartition des 17 fermes suivant les variables prises en compte dans classifications. PCPE : polyculture-polyélevage.

Classification sur les indicateurs des réseaux et de structure (article 2)		Classification sur les indicateurs des réseaux	
Intitulé des groupe	N° de Fermes	N° de Fermes	Description des groupes
grandes fermes extensives en surface	37, 39, 45	35,37, 38,39, 40	Réseau de flux moyen, densité de flux moyenne, faible intensité de flux.
PCPE avec des bovins viande et un petit atelier de monogastriques	36,38, 40,42, 32	36, 42, 62	Réseau de flux déséquilibré, flux dominant entre les prairies et les bovins.
PCPE bovin viande - ovin viande	33,35, 43,44	33,43, 44	Réseau de flux équilibré, une densité de flux élevée et une intensité de flux moyenne.
Petites fermes herbagères	46, 66, 72	45, 46, 66, 72	Réseau de flux équilibré, mais une densité de flux faible, du fait de peu de compartiments liés à l'absence de cultures.
Fermes bovin viande - monogastriques intensives en surface	34, 41	34, 41	Forte intensité des flux

- Comment se regroupent les fermes sur les indicateurs de pratique d'intégration et de structure ?

Nous avons réalisé une nouvelle classification ascendante hiérarchique des 10 fermes de l'article 3 à partir des indicateurs de pratiques et de structure. Nous avons utilisé les huit mêmes indicateurs de structure que ceux utilisés dans l'article 2 (SAU, nb d'UTH, UGBs, %BV dans les UGBs, %prairies permanentes dans la SAU, %grandes cultures dans la SAU, chargement fourrager et chargement global). Nous avons obtenu les mêmes groupes de fermes que dans l'article 3, où seules les indicateurs de pratiques avaient été considérés, mais avec une construction de l'arbre de classification différente (Fig.1). Lorsque seuls les indicateurs de pratiques sont pris en compte, le premier nœud de l'arbre distingue les exploitations commercialisant principalement en circuit court de celles commercialisant avant tout en circuit long. Le second nœud distingue les systèmes herbagers (exploitation 45) des systèmes de polyculture-polyélevage. Par contre lorsque que les groupes sont construits à partir d'indicateurs de pratique et de structure, le premier nœud distingue les exploitations herbagères de celles en polyculture-élevage, le second nœud discrimine les exploitations valorisant les résidus et les intercultures des surfaces en grandes cultures (exploitations 33,34,41) de celles ne valorisant que les grains.

Figure 1 : Arbres de classification pour les deux approches mobilisées.



Pour conclure, lorsque le fonctionnement est caractérisé par les interactions biotechniques seulement, (c'est le cas avec les réseaux écologiques), la prise en compte d'indicateurs de structure en plus des indicateurs de fonctionnement dans la classification des exploitations

implique des modifications dans la construction des groupes, car les interactions biotechniques sont influencées par la structure des exploitations. La présence de cultures à elle seule permet la mise en œuvre de nombreuses interactions. Par contre lorsque le fonctionnement d'un système est caractérisé par ses interactions biotechniques mais également par son organisation du travail et sa gestion de la commercialisation, alors la prise en compte des indicateurs de structure n'induit pas de changement dans la construction des groupes. Toutefois, les indicateurs de structure influent sur la construction des groupes d'exploitations, et ainsi un aspect structurel plus prégnant pourrait masquer des spécificités de fonctionnement. Nous proposons donc à l'avenir de caractériser le fonctionnement des systèmes mixtes, et plus particulièrement des 102 fermes européennes, indépendamment de leur structure.

1.2. Interprétation des résultats

La méthode des réseaux écologiques (article 2), nous a appris qu'un réseau de flux équilibré en nombre et en intensité, qui illustre des interactions homogènes entre tous les compartiments du système, n'est pas dépendant du niveau d'intensification animale (chargement UGB /ha de SAU), mais semble limité par la structure du système, plus particulièrement par la SAU et le nombre de travailleurs en équivalents temps-plein.

La classification hiérarchique réalisée à partir d'indicateurs structurels et des réseaux écologiques, nous a permis d'identifier cinq groupes de fermes. Nous avons observé des interactions plus nombreuses et plus homogènes au sein des systèmes d'élevage mixtes bovins-ovins, du fait de l'aptitude des deux espèces à valoriser les surfaces en herbe, les résidus de cultures et les intercultures. Lorsque des bovins allaitants étaient associés à des monogastriques, nous avons identifié deux stratégies de fonctionnement contrastées. Lorsque l'atelier bovin est majoritaire en terme d'UGB et associé à un petit atelier de monogastriques et à une activité de transformation de la viande sur l'exploitation, les bovins valorisent essentiellement les surfaces fourragères de l'exploitation et les monogastriques les grains. Lorsque les deux ateliers ont des importances en termes d'UGB similaires, avec en général un chargement de la SAU élevé, le fonctionnement du système repose sur des achats important d'aliments, conduisant à une modification significative des flux d'azote de la ferme.

Dans l'analyse de l'efficacité productive des systèmes mixtes, nous avons ensuite mobilisé les indicateurs de pratiques d'intégration que nous avons proposé sur un échantillon plus large de 96 exploitations dans six pays européens. Dix-neuf des 54 indicateurs ont été conservés parce qu'ils avaient une capacité explicative dans certaines régressions PLS. Cela nous a permis d'élargir notre analyse à des zones biogéographiques différentes en élargissant les combinaisons d'espèces animales étudiées avec en particulier des vaches laitières. La gamme de variation des équilibres entre productions était également plus large.

L'analyse de l'efficacité des systèmes mixtes de bovins viande – ovins viande associés à des cultures, soit 16 fermes, a permis de mettre en évidence deux stratégies contrastées entre les fermes françaises et suédoises. Dans les fermes suédoises, le système se distingue par une part importante de cultures fourragères annuelles dans la SAU et par une répartition déséquilibrée des effectifs animaux, avec une petite troupe ovine adossée à l'atelier bovins allaitants. Les interactions cultures-élevage se fondent essentiellement sur la valorisation de cultures fourragères annuelles avec un peu de consommation de grains. Ces fermes sont parmi les plus efficaces dans l'utilisation des aliments concentrés. Les fermes françaises n'ont pas de cultures fourragères annuelles dans la SAU, mais ont une plus grande part de grandes cultures. Les interactions culture-élevage se fondent davantage sur la valorisation des résidus de cultures et des intercultures sur les terres arables. La répartition des UGB est plus équilibrée entre bovins et ovins. Ainsi, l'élargissement de l'échantillon d'étude au-delà des exploitations françaises principalement situées dans le Massif Central a permis d'identifier un autre fonctionnement des systèmes bovins-ovins allaitant. Une analyse plus fine sera nécessaire pour identifier les leviers mobilisés en Suède pour atteindre une efficacité d'utilisation des concentrés supérieure. Nous faisons l'hypothèse que cela pourrait être lié à la part relative de chaque atelier, comme l'ont déjà suggéré des modélisations du fonctionnement de l'exploitation réalisés avec le modèle Orfee (Mosnier et al. 2017; Dumont et al. 2020a), ou à des contextes pédoclimatique ou socio-économique plus favorables en Suède.

L'analyse de l'efficacité des systèmes mixtes associant des bovins allaitants à des monogastriques dans une exploitation de polyculture-élevage, soit 26 fermes, a permis de retrouver les deux types d'équilibres déjà observés dans le plus petit échantillon de neuf exploitations françaises analysées par la méthode des réseaux écologiques. Nous distinguons ainsi les exploitations dont le troupeau est équilibré entre les deux espèces de celles où le troupeau de bovins allaitants est majoritaire et où il lui est adossé un petit atelier de

monogastriques. Cette dernière structure a également été décrite dans le Massif Central par Rapey et al. (2021). Malgré ces équilibres d'effectifs différents entre les deux groupes les logiques de fonctionnement restent voisines, si bien que dans ce cas c'est le contraste entre les deux productions qui semble primer au-delà des ajustements liés à la taille de chaque atelier. Ainsi, l'analyse comparée des deux types de combinaisons d'espèces animales laisse présager d'un effet du ratio qui différeraient lorsque des bovins allaitants sont associés à une autre espèce de ruminants ou plutôt à des monogastriques. Ces résultats ont été observés lors de l'analyse de l'efficacité productive. Ils pourront être approfondis lors d'une analyse du fonctionnement des systèmes mixtes indépendamment de l'analyse de l'efficacité. Les monogastriques couvrent plusieurs espèces et productions animales ayant des cycles de production plus ou moins longs pouvant influencer le fonctionnement du système. Ainsi affiner l'échantillon des bovins allaitants associés à des monogastriques en distinguant les porcs des volailles permettrait une description plus fine du fonctionnement des systèmes mixtes. Un effet du ratio entre les deux espèces animales pourrait être observé à ce niveau-là.

1.3. Pour aller plus loin

1.3.1. Analyser le fonctionnement des 102 fermes européennes

Dans l'article 2, nous avons observé des corrélations intéressantes entre la structuration des flux d'azote liés à l'activité des fermes et leur structure. Nous avons observé que la taille du système en surface et surtout en nombre de travailleurs (UTH) pouvait être un frein à l'établissement d'un réseau d'interactions homogène entre les composantes du système. Nous avons émis l'hypothèse, qu'il pouvait exister un effet de seuil à partir duquel la taille du collectif pouvait devenir un facteur limitant. Nous avons également observé que les systèmes mixtes ruminants avaient un réseau d'interactions plus homogènes que les systèmes mixtes associant des bovins et des monogastriques, en supposant que cela été dû à la capacité des deux espèces de ruminants à pâturer les prairies mais également les surfaces en cultures. Ces hypothèses pourraient être testées sur les 96 fermes mixtes européennes. Nous pourrions également réaliser une typologie des fermes sur la base d'indicateurs de pratiques pour tester la validité des groupes observés jusque-là sur de plus petits échantillons.

1.3.2. Développer l'approche par les flux

La généricité et l'approche globale permise par la méthode des réseaux écologiques est un aspect qui pourrait aider à affiner les modèles de fonctionnement des fermes diversifiées afin de mettre en relation les logiques de fonctionnement et la multiperformance des systèmes. Par ailleurs, l'approche utilisant des flux pourrait être élargie aux domaines de l'organisation du travail, de la transformation des produits sur l'exploitation et de leur commercialisation ; cela permettrait de mieux comprendre les complémentarités des produits de l'exploitation en terme de réduction des coûts de production et d'accès au marché sous-jacent au concept d'économies de gamme (Panzar and Willig 1981; de Roest et al. 2018).

L'approche d'analyse proposée autour de l'organisation du travail a mis en évidence l'importance de la saisonnalité de la production qui croise des problématiques agronomiques et organisationnelles (répartition annuelle des périodes de production et de commercialisation, versatilité des travailleurs, pics de travail etc.). Au-delà de la représentation annualisée des flux de différents type (agronomiques, travail, commercialisation), une étude plus fine de la construction de ces flux dans le temps (approche calendaire) pourrait également contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des exploitations.

La combinaison des approches par les flux sur ces trois niveaux (agronomique, travail commercialisation) permettrait de proposer une représentation graphique du fonctionnement global du système, et pourrait être un outil pédagogique pour expliquer l'intérêt d'une approche globale.

2. Caractériser l'efficience et la multi-performances des systèmes d'élevage mixtes en général

2.1. Deux approches différentes

La question de la multi-performance du système a été abordée dans deux articles de la thèse mais sous deux angles différents. Dans un cas (article 2), la multi-performance était déclinée en huit indicateurs qui couvrent les trois piliers de la durabilité (tableau 2). L'objectif de l'analyse était de tester si des groupes de fermes se distinguant par leur fonctionnement et leur structure avaient également des patrons de performances spécifiques. Dans l'autre cas (article

5), nous nous sommes concentrés sur l'efficacité productive des systèmes que nous avons cherché à expliquer par des variables structurelles, et des pratiques d'intégration tant biotechniques qu'organisationnelles. L'efficacité d'utilisation des ressources au sein des systèmes mixtes a été abordée à l'aide de trois indicateurs (tableau 2). L'analyse de l'efficacité productive a été réalisée à l'échelle de l'ensemble des ateliers de production animale de la ferme. Nous avons proposé des indicateurs d'efficacité relative, afin de mettre en évidence des déterminants de l'efficacité des systèmes mixtes qui soient liés à leur fonctionnement et non aux différences de productivité entre ateliers (tableau 2).

Tableau 2 : Récapitulatif des performances mobilisés dans les articles 2 et 5. VA : valeur ajoutée (€), PB : produit brut (€), PCH : protéines consommables par l'humain (%), AC : aliments concentrés (kg N/UGB), N : azote (kg/ha). PCPE : polyculture-élevage, BV : bovin viande, Mono : monogastrique, OV : ovin viande, BL : bovin lait.

Article 2	Article 5
Indicateur absolu : Calculé à l'échelle de la ferme	Indicateur relatif : Calculé à l'échelle des ateliers de productions de la ferme
<p>Efficiences</p> <p>Azotée (N produits / N achetés)</p> <p>Economique (VA /PB)</p> <p>Nette de protéines (PCH produit / PCH achetés)</p> <p>Balance azotée</p> <p>Balance azotée avec fixation symbiotique</p> <p>Auto-évaluation du bien-être au travail selon la difficulté physique, la charge mentale et la satisfaction globale</p>	<p>Efficiences</p> <p>D'utilisation des intrants (N achetés / N produits)</p> <p>D'utilisation des aliments concentrés (AC consommés / produits) nette alimentaire (PCH consommées / PCH produites)</p>
Échantillon : 17 fermes mixtes	<p>Échantillons : 96 fermes mixtes</p> <p>Dont 71 fermes en PCPE</p> <p>Dont 26 avec des BV – Mono.</p> <p>Dont 16 avec des BV – OV</p> <p>Dont 16 avec des BL - Mono</p>

2.2. Interprétation des résultats

Dans l'article 2, nous n'avons pas montré que des fermes aux logiques de fonctionnement différentes pouvaient avoir des performances systématiquement différentes. Par contre nous avons observé que les fermes qui avaient la meilleure efficacité azotée avaient une forte autonomie alimentaire, et que les plus efficaces économiquement avaient un atelier de transformation sur l'exploitation. Enfin, en dehors d'une ferme qui possédait un grand atelier de grandes cultures, seul un système herbager très autonome en intrants était producteur net de protéines pour l'alimentation humaine.

Dans l'article 5, nous avons montré que la consommation d'aliments concentrés est le déterminant majeur de l'efficacité productive, indépendamment du fait que les concentrés soient achetés ou produits sur la ferme, et de l'association d'espèces considérée. Plus la consommation de concentrés par animal augmentait, moins le système était efficace. Dans les systèmes d'élevage mixte, la parcimonie dans l'utilisation des aliments concentrés est nécessaire à l'échelle de chaque atelier, pour atteindre une efficacité globale à l'échelle de l'exploitation. Dans l'échantillon complet des 96 exploitations et au sein des exploitations de polyculture-élevage, intégrer les ateliers de productions, via des interactions culture-élevage ou les échanges de coproduits, n'a pas permis d'accroître l'efficacité productive des systèmes. Au contraire plus il y avait d'interactions moins le système était efficace. Ceci peut s'expliquer par le fait que les interactions cultures-élevage reposent en grande majorité sur l'intra-consommation de grains. Or nous supposons que la présence importante de surfaces en culture pourrait conduire à un moindre souci d'optimisation de la production fourragère et amener à alimenter les animaux avec davantage de grains, ce qui expliquerait la moins bonne efficacité apparente. Par ailleurs les grains sont directement valorisables en l'alimentation humaine, donc alimenter les animaux avec un excès de grain issues de l'exploitations conduit aux dépens d'une bonne valorisation de l'herbe conduit à les animaux à consommer plus de protéines consommables par l'Homme qu'ils n'en produisent. Ce résultat souligne l'antagonisme qui peut apparaître entre l'intégration culture-élevage et la compétition entre alimentation animale et humaine et questionne les stratégies d'alimentation des animaux d'élevage qui soient compatibles avec des systèmes alimentaires durables.

L'analyse spécifique des fermes mixtes associant des bovins, des ovins et des cultures a permis de montrer que la valorisation des résidus de cultures et des intercultures ainsi que le pâturage

mixte permettaient de rendre le système plus efficient dans l'utilisation des aliments concentrés. Bien que nous n'ayons pas réussi à expliquer l'efficience nette alimentaire de ces systèmes mixtes, on peut supposer que ces pratiques de valorisation des fourrages pourraient permettre une moindre compétition entre alimentation humaine et animale. Nous avons également identifié un fort déterminant humain de l'efficience, au travers de la composition et de la polyvalence du collectif de travail, notamment pour les systèmes associant des bovins viande et des monogastriques.

L'identification des déterminants de l'efficience productive n'a pas été possible pour toutes ressources considérées, ni pour l'ensemble des échantillons et sous-échantillons retenus. L'efficience d'utilisation des intrants n'a pu être expliquée par les modèles PLS construits à partir des variables de structure et de pratiques. Travailler sur des échantillons plus restreints nous a permis d'obtenir un modèle PLS à une composante pour les systèmes bovins lait – monogastriques associés à des cultures, mais il était de piètre qualité, seule 6% de la variance de l'efficience étant expliquée. Nous avons donc supposé que l'efficience d'utilisation des intrants n'était pas définie par des variables de structure et de fonctionnement. Pourtant les interactions entre ateliers devraient permettre l'utilisation d'intrants externes (Hendrickson et al. 2008). Ceci questionne nos choix d'indicateurs et leur exhaustivité. En production ovine, l'autonomie alimentaire du troupeau, calculée à partir de la part de l'herbe dans la couverture des besoins, est un déterminant clé de l'efficience du système (Benoit et al. 2019). Or nous n'avons pu calculer cet indicateur avec nos données. L'indicateur d'autonomie est calculé à partir des besoins théoriques, eux même calculés à partir des UGBs. Dans le travail de thèse, le calcul des UGBs tient compte des besoins d'entretien de l'animal via le poids métabolique mais pas des besoins de productions qui sont pourtant majoritaires en production laitière. Ainsi, les besoins peuvent être très largement sous-estimés pour les systèmes laitiers (jusqu'à 50%). Or la production laitière n'a pas été renseignée dans la base de données, seule la production vendue est disponible. Des estimations des quantités de lait intra-consommées et jetées auraient impliqué de trop grosses approximations, c'est pourquoi nous n'avons pu remédier à ce problème et l'évaluation de l'autonomie reste indisponible. Des indicateurs économiques pourraient également expliquer le choix de l'agriculteur concernant la vente ou l'intra-consommation des grains de la ferme. L'achat d'intrants est dépendant du prix unitaire des intrants et également de la valeur des produits vendus. En effet, si les produits sont bien valorisés, l'éleveur acceptera plus facilement de payer son intrant un peu plus cher. Le prix moyen de l'intrant (€/kg N) aurait pu être ajouté come facteur explicatif dans l'analyse de

l'efficacité, or le montant en euros des achats n'a pas été renseignés dans toutes les fermes. La valorisation économique moyenne d'1 kg d'azote produit aurait également pu être prise en compte.

Il serait intéressant de faire de nouvelles analyses avec un modèle plus parcimonieux, en limitant le nombre d'indicateurs explicatifs, afin de valider ou non une absence de lien entre le fonctionnement et la structure des systèmes mixtes pour l'efficacité d'utilisation des intrants. Une même approche pourrait être réalisée pour l'efficacité nette alimentaire des systèmes mixtes de bovins viande – ovins viande et de bovins lait – monogastriques, qui n'ont également pas pu être expliquées.

2.3. Pour aller plus loin

2.3.1. Choix et calcul des indicateurs d'efficacité

Nous avons mobilisé quatre indicateurs d'efficacité différents : l'efficacité économique, l'efficacité d'utilisation des intrants, l'efficacité nette alimentaire et l'efficacité d'utilisation des concentrés. Ils peuvent certes présenter des corrélations entre eux lorsque des stratégies fortes existent dans la ferme (par exemple lorsqu'une partie importante de l'alimentation des animaux est achetée) mais ils permettent aussi de mettre en évidence des aspects plus fins, comme par exemple le type d'aliment utilisé.

Dans l'article 2, nous n'avons pas montré que des fermes aux logiques de fonctionnement différentes pouvaient avoir des performances systématiquement différentes.

Lors de l'analyse de l'efficacité, nous avons proposé d'analyser un indicateur d'efficacité relative aux productions animales de la ferme pour s'affranchir des différences de productivité liées aux différentes productions agricoles. Cette méthode pourrait être mobilisée pour comparer les performances des groupes d'exploitations au fonctionnement similaire (article 2) et appliquée au calcul de l'efficacité azotée, de l'efficacité nette des protéines et de l'efficacité économique. Compte tenu de la diversité potentielle des circuits de valorisation et du niveau de prix potentiellement différent qu'ils génèrent, le calcul de l'efficacité économique relative permettrait de mieux identifier les ateliers animaux mobilisés par l'éleveur pour générer un maximum de valeur économique. Ainsi une valorisation économique importante d'une

production animale pourrait éventuellement expliquer sa moindre efficacité d'utilisation d'aliments concentrés.

2.3.2. Approche système d'exploitation ou système d'élevage

Pour aller au-delà des observations classiques, par exemple le fait que la production de céréales soit plus efficace que les productions animales et qu'au sein des productions animales certaines productions soient plus efficaces que d'autres, nous avons fait le choix i) de restreindre l'étude de l'efficacité à l'échelle des ateliers de productions animales de la ferme et ii) de proposer de calculer, pour les productions animales, une efficacité relative. Ce dernier indicateur, relatif, nous a permis d'une part d'analyser conjointement des productions animales présentant des propriétés productives différentes, et d'autre part d'analyser les fermes les plus efficaces relativement à l'ensemble de leurs ateliers de productions animales. Or recentrer l'étude à ce niveau ne permet plus de tenir compte de la logique globale du système. Dans les systèmes d'élevage mixtes associés à des cultures, si, via une réflexion systémique de la part de l'éleveur, les ateliers de productions (animales-végétales) sont pilotés conjointement en les faisant interagir les uns avec les autres, l'éleveur va certainement viser une performance (productive, économique, sociale) à l'échelle de l'exploitation et non à la seule échelle des productions animales. Ainsi les productions animales d'une ferme pourraient paraître inefficaces en soi mais avoir toute leur place à l'échelle du système « ferme » (Faverdin and Van Milgen 2019). L'indicateur relatif de l'efficacité azotée (Godinot et al. 2015), calculé à l'échelle de la ferme, pourrait être une alternative à la méthode de centrage-réduction-reconstruction proposée dans la thèse, même s'il ne permettrait cependant pas d'analyser plus finement la contribution de chaque atelier à cette performance globale, via les indicateurs d'hétérogénéité entre ateliers que nous avons proposés.

3. La notion d'intégration des différentes composantes d'un système d'élevage mixte

Après avoir proposé des méthodes pour caractériser le fonctionnement, via les interactions, et évaluer l'efficacité des systèmes diversifiés, un des objectifs de ce travail de thèse était

d'identifier et d'évaluer les éventuelles relations entre le fonctionnement et les performances du système.

3.1. Faut-il une intégration biotechnique à tout prix ?

L'intégration biotechnique correspond à la mise en interaction dans le temps et dans l'espace des composantes d'un système (Hendrickson et al. 2008). Le « terme » intégration jouit d'une appréciation positive quand on parle de polyculture élevage ou de système diversifié, car l'intégration devrait permettre de tirer bénéfice des processus écologiques et ainsi limiter les besoins en intrants et les risques de pollution. Or sur le terrain, ces bénéfices n'ont jamais réellement été observés à l'échelle du système. Cela nous questionne sur les conditions de mise en œuvre et de réussite de l'intégration.

Est-ce que l'intégration est forcément nécessaire pour un fonctionnement optimal des systèmes d'élevage mixtes garant de bonnes performances productives ou économiques ? Est-ce qu'il faut beaucoup d'interactions d'intensité similaire entre les composantes du système ou bien peu d'interactions mais de très forte intensité ? Biggs et al. (2012) ont fait l'hypothèse qu'il existerait un niveau optimal de diversité au sein des systèmes qui maximiserait leur multi-performance. En deçà le faible nombre de composantes du système limite ses capacités d'adaptation et cela même si le système est très interconnecté. Au-delà de l'optimum, c'est la complexité de gestion du système qui peut conduire à sa stagnation. Le grand défi auquel nous sommes donc confrontés est de définir le niveau de diversité du système et le niveau d'interactions permettant de bénéficier de tous les potentiels avantages d'un système diversifié. Les systèmes sont en général décrits sur une base annuelle mais l'approche calendaire que nous avons déjà évoquée permettrait de prendre en compte des pratiques ponctuelles permettant de répondre à un aléa particulier. Par exemple, les résidus de culture peuvent être considérés comme une ressource alternative permettant de disposer temporairement de fourrages complémentaires pour les animaux et d'offrir une certaine flexibilité pour faire face aux aléas climatiques. Cela est en cohérence avec les résultats observés dans l'article 5 pour les systèmes ruminants mixtes associés à des cultures, où la valorisation des résidus et des intercultures permettaient d'améliorer leur efficacité d'utilisation des aliments concentrés. Ceci militerait pour une approche plus dynamique de l'étude des interactions. Enfin l'intégration biotechnique ne doit pas être considérée seulement comme une fin en soi, mais comme un moyen permettant

d'aboutir à un système durable. Sa mise en place dépend de multiples facteurs liés à la structure de l'exploitation mais également aux objectifs et aux valeurs de l'éleveur (Cayre et al. 2018), et du contexte socio-économique. C'est l'ensemble de ces dimensions qui conditionne la stratégie de l'éleveur (Bouttes et al. 2019).

3.2. Approche holistique sur trois dimensions

L'originalité de notre approche a été de montrer l'intérêt de se détacher de la vision de l'intégration centrée sur les pratiques agronomiques pour avoir une vision holistique et appréhender la cohérence du système. Ainsi l'analyse conjointe du fonctionnement biotechnique et de la performance des ateliers de production pourrait conclure en premier lieu à des incohérences techniques mais pourrait trouver ensuite des explications au niveau organisationnel et dans la construction de la performance économique associée. Ainsi, le facteur humain apparaît finalement comme un élément incontournable à prendre en compte pour expliciter les performances techniques, tant en termes de choix stratégiques sur la ferme que d'objectifs personnels de l'éleveur et de l'ensemble du collectif de travail. Cette approche multifactorielle d'étude de l'intégration, et plus largement du fonctionnement des systèmes mixtes, renvoie à une approche multidisciplinaire qui peut expliquer sa difficulté de mise en œuvre ou tout au moins sa faible d'occurrence dans la littérature.

3.3. Approcher un système diversifié de façon holistique : un nécessaire compromis

La combinaison de ces trois dimensions du fonctionnement d'un système implique un recueil de données plus conséquent, que nous avons cherché à équilibrer sur les trois dimensions. Une autre approche de l'étude de l'organisation du travail aurait été de mettre en œuvre la méthode du bilan de travail (Cournut et al. 2018), mais cela aurait nécessité un temps d'enquête conséquent, qui n'est pas toujours compatible avec les disponibilités des éleveurs. L'enjeu pour analyser conjointement le fonctionnement et la durabilité des systèmes est de trouver le bon compromis entre les informations nécessaires pour aborder la complexité du système (de Olde et al. 2018) et le temps d'enquête que cela nécessite. Mobiliser des variables semi-quantitatives (ex. score de satisfaction) ou des variables qualitatives permettrait de simplifier le recueil de

l'information. C'est d'ailleurs ce qui nous a amené à proposer des indicateurs synthétiques pour évaluer la performance « sociale » (auto-évaluation du bien-être au travail par l'éleveur) d'un système et qualifier l'organisation du travail. Or la recherche d'un compromis entre exhaustivité et précision est souvent réalisée aux dépens des dimensions socio-économiques (Sumberg 2003; Hendrickson et al. 2008; Bell and Moore 2012). Outre le manque de connaissances et d'indicateurs systémiques sur les dimensions socio-économiques, cette primauté donnée aux pratiques agronomiques découle certainement pour partie de la formation scientifique des chercheurs majoritairement investis dans l'approche système. Ainsi dans l'analyse des systèmes d'élevage, la place et le temps accordés aux trois dimensions de l'intégration pourrait être rééquilibrée. Ce rééquilibrage dans l'approche systémique devrait s'accompagner par davantage d'interdisciplinarité (Duval et al. 2021). L'interdisciplinarité dans l'étude des systèmes d'élevages d'élevage mixtes, et diversifiés plus généralement, permettrait de cibler avec plus de finesse les potentiels « points clés » des différentes dimensions permettant de comprendre le fonctionnement de ces systèmes complexes de façon globale.

4. Perspectives pour étude des systèmes diversifiés

4.1. Le projet MixEnable : des moyens insuffisants vis-à-vis objectifs affichés

Le projet MixEnable sur lequel a été adossé ce travail apparaît, avec du recul, trop ambitieux. La volonté de coupler les approches agronomique-travail-commercialisation était complètement légitime mais a conduit à vouloir creuser tous ces volets, qui plus est sur des systèmes complexes car diversifiés en terme d'activité. Par ailleurs, les partenaires des sept pays engagés avaient certainement des intérêts particuliers dans cette étude et ne disposaient pas des compétences importantes nécessaires pour aborder tous les bilans envisagés, en particulier biotechniques, qui requièrent une connaissance particulière (en terme de comptabilité analytique).

Aussi, au-delà des manques dans les données récoltées, les enquêteurs ont été incapable de porter un jugement de validité sur les données remontées dans la base globale. Un énorme travail de validation et de correction a dû être mené a posteriori, conduit par notre équipe. Cela a demandé un temps important, les partenaires n'étant le plus souvent pas à même de répondre

à nos questionnements. Grâce à beaucoup d'expertise mobilisée, nous avons mené un travail de correction poussé qui nous a cependant conduit à rejeter environ un tiers des fermes de l'échantillon initial et à faire de nombreuses hypothèses.

4.2. Comment aborder de manière pertinente les systèmes complexes

Ce constat, associé à celui d'aborder plusieurs niveaux d'approche pour étudier ce type d'exploitation diversifiée, nous conduit à questionner le type de dispositif opérationnel possible pour prolonger ce type de travail. D'une part, il est nécessaire de bien définir les objectifs de l'étude en amont, d'identifier les compétences et le matériel nécessaires pour y répondre, ainsi que la temporalité de réalisation. Cette étape est primordiale car elle permettra d'identifier le type de données et le degré de précision nécessaires et l'approche à privilégier. Par exemple, si l'objectif de l'étude est de décrire précisément le fonctionnement biotechnique d'un type de système, il pourra être envisagé de ne suivre qu'un nombre limité de fermes représentatives de celui-ci mais sur un temps plus long, voire en immersion. A l'inverse, si l'objectif porte sur l'étude d'une combinaison d'espèces animales donnée, il sera plus intéressant d'étudier un nombre relativement important de fermes, avec des structures variées et une part variable de chacune des deux espèces composant l'activité d'élevage. L'important est d'adapter la stratégie d'échantillonnage des exploitations et donc le niveau de diversité retenu dans l'échantillon, en fonction de l'objectif de recherche.

D'autre part, il paraît impossible de développer une enquête économique complète (de type compte d'exploitation) à l'échelle de plusieurs pays européens, sauf à reprendre des bases de données existantes et coordonnées de type FADN. Enfin, et d'un point de vue plus technique pour valider plus facilement des relations fonctionnelles intra système, il paraît absolument nécessaire de resserrer le périmètre des systèmes étudiés, en particulier en terme de types de combinaison d'ateliers et de type de structure, au risque sinon de mettre en œuvre des traitements statistiques décevants compte tenu du nombre trop important de facteurs à prendre en compte.

4.3. Recommandations scientifiques

La suivie du projet de MixEnable et ce travail de thèse sur les systèmes d'élevage mixte m'amène à formuler des recommandations pour de futures recherches sur ce type de thématique.

Il me semble primordial à l'avenir de toujours appréhender un système selon les dimensions agronomique-travail-commercialisation afin d'assurer au maximum une compréhension holistique du système. Les connaissances sur le fonctionnement des systèmes mixtes méritent d'être approfondies, tout en limitant le niveau de diversité au sein des systèmes étudiés. Associer une diversité de types d'atelier, de combinaisons d'espèces, mais aussi de types de commercialisation pose un réel problème de traitement statistiques car la spécificité de chaque atelier peut couvrir des mécanismes tels que celui étudié, autour de l'intérêt de l'intégration. Cela me conduit à proposer, pour de prochaines études sur le thème, de ne retenir qu'un, deux ou trois types de combinaisons d'espèces animales. Par exemple sur la base du travail actuel, il pourrait être intéressant d'étudier d'une part un pool d'exploitations associant bovins viande et ovins viande, et d'autre part des exploitations associant bovins viande et monogastriques (voire une seule espèce de monogastriques). Cela renforcerait d'une part la puissance statistique des tests réalisés sur la base de donnée constituée, d'autre part cela permettrait d'étudier le facteur « proportion de chaque espèce » dont nous faisons l'hypothèse qu'il peut être déterminant, avec des effets de seuil possible. Limiter le type et le nombre d'espèces animales étudiées conjointement permet également de mobiliser moins de compétences et limite certains problèmes méthodologiques associés à des indicateurs transversaux entre espèces.

Les systèmes mixtes associant ruminants et monogastriques n'ont été que très peu étudiés jusqu'à présent, alors que de potentiels bénéfices peuvent découler de leur intégration en raison de la complémentarité de la composition de leurs régimes alimentaires et des stratégies de mobilisation des ressources (Martin et al. 2020, article 1). Associer des ruminants, au cycle de production long, à des monogastriques, au cycle plus court, permettrait également d'assurer des entrées d'argent plus régulières ou un travail plus régulier sur l'année (Dumont et al. 2020b) permettant la pérennisation d'un salarié par exemple. De plus, dans ce travail, nous n'avons pas fait de distinction entre les différentes espèces de monogastriques. Dans l'article 2 mobilisant la méthode des réseaux écologiques, les volailles ont été distinguées des porcs, or, lors de l'analyse de l'efficacité productive (article 5), tous les monogastriques ont été rassemblés.

Cependant, les fonctionnements des ateliers de porcs ou de volailles ne sont pas similaires, avec, par exemple, la capacité des porcs à l'engraissement à utiliser un co-produit d'un autre atelier animal de la ferme (en l'occurrence le petit lait lors de transformation laitière à la ferme). De plus, au sein des volailles sont regroupés les poules pondeuses présentes en général une année sur la ferme, et des volailles de chair dont la phase d'élevage est de l'ordre de quelques mois. Au sein des porcs, on peut également distinguer les systèmes naisseurs, naisseurs-engraisseurs, des engraisseurs. Il semble donc nécessaire par la suite de tenir compte de toutes ces spécificités animales, en plus des aspects structurels (surface, main d'œuvre, part des cultures, ...) et de type de commercialisation.

4.4. Recommandations quant à l'échantillonnage de fermes et la mise en œuvre d'enquêtes

Nous avons tout d'abord mis en évidence quatre facteurs ayant des effets majeurs sur le fonctionnement des systèmes d'élevage mixtes : la structure de l'exploitation en termes de surface et de type de système (herbager ou non), le chargement animal (global de la ferme et fourrager) et la présence de monogastriques. Ces facteurs pourraient être mobilisés pour (i) échantillonner des fermes avec des structures et des opportunités/contraintes en termes de commercialisation comparables afin de pouvoir étudier les différences de fonctionnement, (ii) échantillonner des fermes représentant une large gamme de structure et de niveau d'intensification pour identifier les éventuels liens entre la structure et le fonctionnement ou (iii) sélectionner des fermes avec la même combinaison d'espèces.

Enfin, avant de fixer le profil des exploitations à étudier, il convient de définir le périmètre d'étude suivant l'objectif et l'approche retenus, par exemple en se limitant à une analyse biotechnique ou la combinant à celle de l'organisation du travail ou de la gestion des ventes.

Etudier les systèmes mixtes dans la globalité de leur fonctionnement et de leurs performances nécessite de récolter un grand nombre de données. Notre recommandation serait de s'appuyer sur les bases de données existantes issues de réseaux d'exploitations agricoles suivies par ailleurs (adhérents à un centre de comptabilité, à un groupe d'étude ou de développement, etc.). Cela permettrait d'une part de sélectionner les fermes en amont selon les critères souhaités, mais également d'alléger la quantité de données à récolter en enquête permettant ainsi de se

concentrer sur des points spécifiques de gestion ou d'organisation et non sur des éléments structurels. Pour faire face à la lourdeur des enquêtes et pour valoriser au mieux le temps que nous accordent les éleveurs, il pourrait être envisagé que les données soient mises en commun afin qu'elles puissent être réutilisées pour d'autres analyses. Or le règlement général sur la protection des données ne permet pas la mise en commun de telles données. Travailler en partenariat avec les centres de gestion agricole pourrait également permettre d'avoir accès à de grandes base de données techniques, structurelles et économiques d'exploitations, avec un suivi dans le temps. Cela permettrait en outre de mettre en œuvre un suivi longitudinal des exploitations qui, non seulement assurerait une consolidation des analyses et des résultats mais donnerait aussi la possibilité d'analyser la résilience des fermes face à divers types d'aléas, thème que nous n'avons pas pu développer mais qui peut apporter des éléments importants à l'analyse menée.

Partant du constat que les données sont quasi inexistantes sur les systèmes diversifiés en général, il pourrait être intéressant de faire un état des lieux de ces systèmes, afin de les replacer dans le contexte agricole français et européen. A l'échelle de la France, nous proposons de bâtir cet état des lieux à partir des données du Réseaux d'Information Comptable Agricole (RICA), qui est un outil statistique représentatif des exploitations agricoles « professionnelles », ou, mieux, car beaucoup plus détaillés, à partir des recensements de l'agriculture, qui cependant n'ont qu'une fréquence décennale (Aigrain et al. 2016). Dans le RICA, chaque ferme est décrite par sa Production Brute Standard (PBS), qui représente sa production théorique. La PBS représente la somme de tous les PBS de ses ateliers de production et est fonction de leur dimension respective. La « taille » de chaque atelier pourrait ainsi être évaluée sur cette base, en vue de construire une typologie des fermes selon le type de combinaison d'atelier. En AB, une première approche exploratoire coordonnée par l'ITAB et l'INRAE pour caractériser les systèmes de production agricole a été menée en 2019 à partir des données de l'Agence Bio (Coiffard 2019). Ce travail a permis d'analyser les intérêts et les limites de plusieurs approches permettant de tenir compte de la diversification des systèmes de production lors de la construction des typologies.

Tant pour la filière biologique que conventionnelle, des bases de données existent et elles pourraient permettre de faire un état des lieux des systèmes diversifiés en France, en terme de nombre d'exploitations agricoles et d'associations de production. En effet, dans le cadre des réflexions actuelles sur une agriculture plus durable, la diversification des productions au sein

de l'exploitation agricole est affichée comme un facteur a priori favorable à la durabilité, mais l'acquisition de connaissances plus fines sur leur type, leurs performances et leurs conditions de réussite est encore nécessaire.

Références

- Aigrain P, Agostini D, Lerbourg J (2016) Les exploitations agricoles comme combinaisons d'ateliers. *Agreste - Les Dossiers* 38
- Bell LW, Moore AD (2012) Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agric Syst* 111:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>
- Benoit M, Sabatier R, Lasseur J, et al (2019) Optimising economic and environmental performances of sheep-meat farms does not fully fit with the meat industry demands. *Agron Sustain Dev* 39:40. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0588-9>
- Biggs R, Schlüter M, Biggs D, et al (2012) Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annu Rev Environ Resour* 37:421–448. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-051211-123836>
- Bouttes M, Bize N, Maréchal G, et al (2019) Conversion to organic farming decreases the vulnerability of dairy farms. *Agron Sustain Dev* 39:19. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0565-3>
- Cayre P, Michaud A, Theau J-P, Rigolot C (2018) The coexistence of multiple worldviews in livestock farming drives agroecological transition. A case study in french protected designation of origin (PDO) cheese mountain areas. *Sustainability* 10:1097. <https://doi.org/10.3390/su10041097>
- Chavas J-P, Kim K (2007) Measurement and Sources of Economies of Scope: A Primal Approach. *J Inst Theor Econ* 163:411–427. <https://doi.org/10.1628/093245607781871354>
- Coiffard A (2019) Caractérisation des Systèmes de Production en Agriculture Biologique et Construction d'une Typologie tenant compte de leur Diversification et de leur Localisation. AgroParisTech, Paris, France

Cournut S, Chauvat S, Correa P, et al (2018) Analyzing work organization on livestock farm by the Work Assessment Method. *Agron Sustain Dev* 38:58. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0534-2>

de Olde EM, Sautier M, Whitehead J (2018) Comprehensiveness or implementation: Challenges in translating farm-level sustainability assessments into action for sustainable development. *Ecol Ind* 85:1107–1112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.058>

de Roest K, Ferrari P, Knickel K (2018) Specialisation and economies of scale or diversification and economies of scope? Assessing different agricultural development pathways. *J Rural Stud* 59:222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.04.013>

Dumont B, Cournut S, Mosnier C, et al (2020a) Comprendre les atouts de la diversification des systèmes d'élevage herbivores du nord du Massif central. *INRA Prod Anim* 33:173–188. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.3.4557>

Dumont B, Puillet L, Martin G, et al (2020b) Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front Sustain Food Syst* 4:109. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>

Duval J, Cournut S, Hostiou N (2021) Livestock farmers' working conditions in agroecological farming systems. A review. *Agron Sustain Dev* 41:22. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00679-y>

Faverdin P, Van Milgen J (2019) Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets. *INRAE Prod Anim* 32:305–322. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2499>

Godinot O, Leterme P, Vertès F, et al (2015) Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. *Agron Sustain Dev* 35:857–868. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0281-6>

Hendrickson JR, Hanson JD, Tanaka DL, Sassenrath G (2008) Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew Agric Food Syst* 23:265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>

Martel G, Guilbert C, Veysset P, et al (2017) Effectively combining crop and livestock systems on conventional and organic farms: a means for increasing system sustainability? *Fourrages* 235–245

Martin G, Barth K, Benoit M, et al (2020) Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric Syst* 181:102821. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>

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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.005>

Mugnier S, Husson C, Cournut S (2020) Why and how farmers manage mixed cattle–sheep farming systems and cope with economic, climatic and workforce-related hazards. *Renew Agric Food Syst* 1–9. <https://doi.org/10.1017/S174217052000037X>

Nozières MO, Moulin CH, Dedieu B (2011) The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal* 5:1442–1457. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000486>

Panzar JC, Willig RD (1981) Economies of Scope. *American Economic Review* 71:268–72

Rapey H, Balouzat J, Roguet C, Dounies B (2021) Des alternatives à la spécialisation des élevages porcins sont-elles encore possibles en zones de montagne ? *Economie rurale* n° 375:81–91

Rufino MC, Hengsdijk H, Verhagen JMF (2009) Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr Cycling Agroecosyst* 84:229–247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>

Stark F, González-García E, Navegantes L, et al (2018) Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agron Sustain Dev* 38:11. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>

Sumberg J (2003) Toward a dis-aggregated view of crop–livestock integration in Western Africa. *Land Use Policy* 20:253–264. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00021-8)

Valenti WC, Kimpara JM, Preto B de L, Moraes-Valenti P (2018) Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecol Ind* 88:402–413.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>

Veysset P, Lherm M, Roulenc M, et al (2015) Productivity and technical efficiency of suckler beef production systems: trends for the period 1990 to 2012. *Animal* 9:2050–2059.

<https://doi.org/10.1017/S1751731115002013>