
**Vulnérabilité et autonomie alimentaire
des espaces insulaires :
une approche par scénarios démographiques pour
évaluer les dynamiques du cheptel bovin allaitant à la
Réunion**

Thèse présentée devant
l'Université de la Réunion

pour obtenir le grade de
Docteur en sciences économiques

par
Maximin Bonnet

soutenue le 12 avril 2021

Composition du jury :

Pr. Jean-Philippe Boussemart, IESEG et Université de Lille, Lille	Rapporteur
Pr. Philippe Lescoat, AgroParisTech, Paris	Rapporteur
Dr. Claire Aubron, Montpellier SupAgro, Montpellier	Examinatrice
Dr. Laurence Puillet, INRAE, Paris	Examinatrice
Pr. Jean-François Hoarau, Université de la Réunion, Saint-Denis	Directeur de thèse
Dr. Matthieu Lesnoff, Cirad, Montpellier	Co-directeur de thèse
Dr. Emmanuel Tillard, Cirad, Saint-Pierre	Invité

École doctorale Sciences Humaines et Sociales – La Réunion
ED 541

« Je ne voudrais pas, pour ce qui me reste à vivre, recommencer les dix-huit mois qui viennent de s'écouler. On n' aura jamais une idée de la violence que je me suis faite ; j'ai été forcé d'abstraire mon esprit, dix, douze et quinze heures par jour, de ce qui se passait autour de moi, pour me livrer puérilement à la composition d'un ouvrage dont personne ne parcourra une ligne. »

Chateaubriand, Études historiques, in Mémoires d'outre-tombe, livre 34, chapitre 4

Résumé

Cette thèse propose une double approche économique et zootechnique de l'élevage allaitant à la Réunion. Malgré de fortes incitations politiques à son développement, ce secteur voit aujourd'hui son rôle dans le développement rural remis en question. Pour répondre à ces controverses, nous avons conduit une étude de la contribution du secteur de la viande bovine à la réduction de la vulnérabilité économique structurelle. Pour ce faire, nous avons montré dans un premier temps que la dépendance alimentaire est un facteur de vulnérabilité important pour les petits espaces insulaires. Nous nous sommes appuyés sur la construction d'un indice composite de vulnérabilité construit grâce à une méthode de pondération endogène pour des questions de robustesse. Dans un second temps, nous avons cherché à identifier les filières agricoles les plus à même de réduire la dépendance alimentaire de la Réunion. La filière bovine allaitante est apparue comme la plus prometteuse du fait de sa forte structuration, de sa capacité à valoriser des ressources locales et de la possibilité de gagner des parts de marché dans une logique de substitution des importations. Nous avons ensuite conduit une étude des déterminants de la dynamique passée du secteur de la viande bovine à la Réunion. Nous avons mis en évidence que cette production répond principalement à des déterminants économiques qui, par l'intermédiaire de décisions des éleveurs, ont entraîné une dégradation des performances zootechniques des animaux. Nous avons également montré comment la réaction de la coopérative face à cette situation a permis de relancer la croissance du cheptel et de la production. Par la suite, nous nous sommes intéressés aux paramètres influençant la productivité du cheptel allaitant réunionnais par la construction et l'analyse d'un modèle démographique. Nos résultats ont montré que les performances de reproduction et de croissance sont les plus importantes pour augmenter la productivité. À partir de ces éléments, nous avons construit des scénarios d'évolution en collaboration étroite avec la coopérative. Ces scénarios ont en particulier intégré des éléments sur l'amélioration des performances des animaux, des changements de pratiques des éleveurs et des changements dans l'organisation de la production au niveau de la coopérative. Nous avons montré que l'amélioration des performances, le rajeunissement du troupeau, l'introduction d'insémination artificielle sexée et l'engraissement à l'herbe sont des moyens de développement de la filière allaitante réunionnaise. Notre thèse donne des arguments pour reconsidérer le rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion et démontre l'intérêt du développement de l'élevage allaitant pour réduire cette vulnérabilité. Elle présente également des pistes de réflexion pour les décideurs et les acteurs du terrain dans l'objectif d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion. Elle constitue une étude approfondie des raisons et des moyens du développement de la filière bovine allaitante à l'échelle d'un territoire insulaire tropical.

Mots clés

Vulnérabilité économique, élevage allaitant, milieux insulaires, île de la Réunion, modélisation démographique.

Abstract

This thesis presents an economic and zootechnical approach on suckling cattle in Réunion Island. In order to respond to the existing controversies about the role of livestock in development, we conducted a study of the contribution of the beef sector to the reduction of structural economic vulnerability. To do so, we first showed that food dependency is an important factor of vulnerability for small island spaces. Our proposal was based on the construction of a composite vulnerability index using an endogenous weighting method for robustness reasons. Secondly, we identified the agricultural sectors that are most likely to reduce Réunion's food dependency. The suckling cattle sector appeared to be the most promising because of its strong structure, its capacity to valorize local resources and the possibility of gaining market shares in a logic of import substitution. We then conducted a study of the determinants of the past dynamics of the beef sector in Réunion. We showed that this production reacts mainly to macroeconomic determinants which, through farmers' decisions, can lead to a degradation of the zootechnical performances of the animals. We also showed how the cooperative's reaction to respond to a crisis situation conducted to revive the growth of the herd and of the production. We then looked at the parameters influencing the productivity of Réunion's suckling herd through the construction and analysis of a demographic model. Our results showed that reproductive and growth performances are the most important to increase productivity. From these elements, we built several scenarios in close collaboration with the cooperative. In particular, these scenarios integrated elements on the improvement of animal performance, changes in farmers' practices and changes in the organization of production at the cooperative level. We showed that performance improvement, herd rejuvenation, the introduction of sexed artificial insemination and fattening on grass are means of increasing Réunion's meat production. Our thesis provides arguments for reconsidering the role of agriculture in the structural economic vulnerability of Réunion Island and demonstrates the interest of developing the suckling sector to reduce this vulnerability. It also presents avenues of reflection for decision-makers and stakeholders in the field with the aim of increasing beef production in Réunion. In this sense, it constitutes an in-depth study of the reasons for and means of developing the suckling cattle industry at the scale of a tropical island territory.

Keywords

Economic vulnerability, meat cattle, small island spaces, Réunion Island, demographic modeling.

Avant-propos

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Centre d'économie et de management de l'Océan Indien (CEMOI) de l'Université de la Réunion et de l'Unité mixte de recherche Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET, UMR Cirad, Inrae, Supagro). Elle a bénéficié du Fonds européen de développement régional (FEDER) par le biais des Allocations Régionales de Recherche de Doctorat (ARR) de la Région Réunion.

Cette thèse a donné lieu à l'écriture de cinq articles scientifiques, à deux communications orales en congrès et à un poster.

Articles scientifiques

Stéphane Blancard, **Maximin Bonnet**, Jean-François Hoarau (2021). The influence of agriculture on the structural economic vulnerability of small island spaces: Assessment using DEA based composite indicators. *Applied Economics*, **53** (1): 79-97 (publié le 2 janvier 2021).

Maximin Bonnet (2021). L'agriculture réunionnaise face au défi de l'autonomie alimentaire. *Économie Rurale* (révisions envoyées à l'éditeur le 21 janvier 2021).

Maximin Bonnet, Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Charles-Émile Bigot, Matthieu Lesnoff (2020). Influence of extrinsic factors, herd management and animal performances on the dynamics of the beef sector in a tropical island. *Animal Science Journal* (soumis le 8 décembre 2020).

Maximin Bonnet, Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Jonathan Vayssières, Matthieu Vigne, Xavier Juanès, Matthieu Lesnoff (2021). Un modèle démographique pour identifier les leviers d'amélioration de la productivité de l'élevage bovin allaitant à la Réunion : validation et analyse de sensibilité. (en préparation).

Maximin Bonnet, Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Matthieu Lesnoff (2021). La modélisation démographique comme outil pour accompagner l'évaluation de stratégies de filière : le cas de l'élevage allaitant à la Réunion. *Agricultural Systems* (en préparation).

Communications orales

Maximin Bonnet, Jean-François Hoarau, Stéphane Blancard (2018). Une nouvelle approche de la vulnérabilité économique structurelle et du rôle de l'agriculture par la méthode DEA. 55^e colloque annuel de l'Association de Sciences Régionales de Langue Française, EM Normandie, Caen, 4 – 6 juillet 2018.

Maximin Bonnet, Jean-François Hoarau, Stéphane Blancard (2019). Considering the specific role of agriculture for structural economic vulnerability of SIDS: A new assessment from DEA-based composite indicators. 170^e séminaire de l'European Association of Agricultural Economists, Montpellier, 15 – 17 mai 2019.

Poster

Maximin Bonnet, Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Matthieu Lesnoff (2019). Déterminants de l'évolution de l'élevage allaitant à la Réunion : une approche par la démographie. Comité Scientifique et Technique du dispositif « Service et impacts des activités agricoles en milieu tropical » (SIAAM), La Saline, Réunion, 5 novembre 2019.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mes deux directeurs de thèse, Jean-François et Matthieu, pour leur patience, leur investissement et leur soutien sans faille. Un grand merci également à mes encadrants, Emmanuel et Hugo, pour leur implication dans ce travail de thèse, pour leurs relectures et leurs corrections toujours bienveillantes.

Merci aux membres de mon comité de thèse, Stéphane Blancard, Laurence Puillet et Patrick Veysset, et à ceux du comité de suivi interne au Cirad, Jonathan et Mathieu, pour leurs avis éclairés et leurs encouragements. Tous nos échanges scientifiques et informels m'ont aidé à mûrir cette thèse.

Merci à l'ensemble des équipes au sein desquelles j'ai pu travailler, les doctorants et enseignants-chercheurs du CEMOI, les doctorants, chercheurs, techniciens et assistantes de Selmet et des autres unités à Saint-Pierre et Montpellier. En particulier, merci à Jean-Philippe, Vivien, aux Qualisud et aux Artists pour les débats autour d'un café. Un grand merci également à Corine, Marie-Jo, Gisèle, Karine et Nadine pour la logistique et leur bienveillance.

Merci à la Sicarévia et notamment à Charles-Émile pour son engagement dans ce sujet de thèse. Merci également à l'ARP et à l'Urcoopa pour les discussions que nous avons pu avoir autour de l'élevage réunionnais.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui nous ont accueillis à la Réunion et qui ont fait de ces deux ans et demi une expérience riche et agréable, en particulier les choristes de Bois de Nèfles Cocos et les archers du CRASP.

Merci à ma famille, mes parents, frères, grands-parents, cousins et cousines, oncles et tantes pour leur soutien sans faille et leur accompagnement dans ce long cheminement que fut la thèse.

Merci à Jeanne, pour son soutien moral de tous les instants. Sans elle, cette thèse n'aurait pas pu voir le jour.

Liste des abréviations et acronymes

Abréviation (français)	Signification (français)	Abréviation (anglais)	Signification (anglais)
ARIBEV	Association réunionnaise interprofessionnelle du bétail et de la viande		Réunion Island's interprofessional association for cattle and meat
ARIV	Association réunionnaise interprofessionnelle de la volaille et du lapin		Réunion Island's interprofessional association for poultry and rabbit
BAU	Tendanciel	BAU	Business as usual
BoD	Bénéfice du doute	BoD	Benefit of the Doubt
CI	Indice composite	CI	Composite indicator
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement		French Agricultural Research Center for International Development
CNUCED	Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement	UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
D.E.F.I	Développement de l'élevage et des filières des interprofessions		Development of the livestock and interprofessional sectors
DAAFR	Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt de la Réunion		Office for Food, Agriculture and Forestry of Réunion Island
DEA	Analyse par enveloppement des données	DEA	Data Envelopment Analysis
DEA-FDEVI	FDEVI avec pondération endogène par DEA	DEA-FDEVI	DEA computed FDEVI
EAU	Émirats Arabes Unis	UAE	United Arab Emirates
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture	FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDEVI	IVE augmenté de la dépendance alimentaire	FDEVI	Food dependency augmented EVI
FDR	Ratio de dépendance alimentaire	FDR	Food dependency ratio
FDRE	Ratio de dépendance alimentaire relatif aux céréales et tubercules	FDRE	Food dependency ratio relative to cereals and starchy roots
FDRP	Ratio de dépendance alimentaire relatif aux protéines animales	FDRP	Food dependency ratio relative to animal proteins
FDRT	Ratio de dépendance alimentaire totale	FDRT	Total Food dependency ratio
GMQ	Gain moyen quotidien		Average daily weight gain
GMS	Grandes et moyennes surfaces		Supermarkets
IA	Insémination artificielle		Artificial Insemination
IDELE	Institut de l'élevage		French Institute for Animal Breeding
INRA	Institut national de la recherche agronomique		French National Institute of Agricultural Research

INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement		French National Research Institute for Agriculture, Food and Environment
IVE	Indice de vulnérabilité économique	EVI	Economic Vulnerability Index
IVV	Intervalle vêlage vêlage		Calving to calving interval
kg-ec	kilogramme équivalent carcasse		Carcass-weight equivalent kilograms
MCDM	prise de décision à critères multiples	MCDM	Multi-criteria decision making
ONU	Organisation des Nations unies	UN	United Nation Organization
PAH	Plan d'aménagement des Hauts		Plan for the development of the Highlands in Réunion Island
PEDNI	Pays en développement non insulaires	NIDVP	Non-Island Developing Countries
PEI	Petits espaces insulaires	SIS	Small Island Spaces
PEID	Petits États insulaires en développement	SIDS	Small Island Developing States
PFR	Pays à faible revenu	LIC	Low Income Countries
PIB	Produit intérieur brut	GDP	Gross Domestic Product
PMA	Pays les moins avancés	LDC	Least Developed Countries
SAU	Surface agricole utilisée		Used agricultural area
Sicarévia	Société d'intérêt coopératif agricole Réunion Viande		Réunion Island beef cattle cooperative
SSR	Ratio d'autosuffisance	SSR	Self-sufficiency ratio
tec	tonnes équivalent carcasses		Carcass-weight equivalent tons

Table des matières

Résumé.....IV

Abstract.....VI

Avant-propos.....VIII

Remerciements.....X

Liste des abréviations et acronymes.....XII

Introduction générale.....1

**Première partie : Intérêt économique du développement
de l'élevage allaitant à la Réunion.....9**

Encadré 1 : Résumé de la première partie.....	11
Chapitre 1 : Influence de l’agriculture sur la vulnérabilité économique structurelle des petits espaces insulaires.....	17
I. Introduction.....	18
II. Agriculture and structural vulnerability in developing countries and SIS.....	21
II.1. Liberal theory, food security, and the negative role of agriculture.....	21
II.2. Post-structuralist wisdom, food sovereignty, and the negative impact of food dependency.....	22
II.3. Food self-sufficiency as a continuum.....	23
III. Measuring food self-sufficiency: The food dependency ratio.....	24
III.1. The food dependency ratio: Methodological aspects.....	24
III.2. Simulations and results.....	25
IV. A new structural economic vulnerability indicator integrating food dependency....	29
IV.1. Methodological framework for computing the EVI.....	29
IV.2. Results and discussion.....	32
V. Endogenous weighting system for the FDEVI.....	34
V.1. An efficient weighting method for the construction of composite indicators: Hatefi and Torabi’s DEA-based approach.....	34
V.2. Results and discussion.....	37
VI. Conclusions.....	39
Chapitre 2 : L’agriculture réunionnaise face au défi de l’autonomie alimentaire	43
I. Introduction.....	44
II. Dépendance alimentaire à la Réunion et dans d’autres économies insulaires.....	46
III. L’agriculture à la Réunion, entre visée exportatrice et recherche d’autonomie.....	48
III.1. L’organisation en trois pôles de l’agriculture réunionnaise.....	48
III.2. Les grandes cultures.....	49
III.3. L’élevage.....	50
III.4. Les productions fruitières et légumières.....	52
IV. Quelles évolutions pour accéder à l’autonomie alimentaire ?.....	55
IV.1. Peu de gains possibles sur les grandes cultures.....	55
IV.2. Structurer et redynamiser les filières peu organisées ou en perte de vitesse.....	55
IV.3. Renforcer les filières compétitives.....	56
IV.4. Diversifier les exploitations et améliorer les pratiques.....	56
IV.5. Répondre au défi de la commercialisation.....	57
IV.6. Réfléchir à l’échelle du bassin Sud-Ouest de l’Océan Indien.....	57

Deuxième partie : Identification des leviers d'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion.....59

Encadré 2 : Résumé de la deuxième partie.....61

Chapitre 3 : Influence des déterminants externes, des performances des animaux et des choix de gestion sur la dynamique du cheptel allaitant à la Réunion.....67

I. Introduction.....	68
II. Materials and methods.....	70
II.1. Study area and production systems.....	70
II.2. Data.....	71
II.3. Cattle breeds.....	71
II.4. Herd structure and demographic rates.....	71
II.5. Economic and climatic indicators.....	72
II.6. Consultation of local stakeholders.....	72
III. Results.....	73
III.1. Réunion island cattle population dynamics.....	73
III.2. Slaughtering age of females and female herd structure.....	74
III.3. Evolution of parturition rates.....	75
III.4. Mortality.....	76
III.5. Price fluctuation and local beef production.....	77
IV. Discussion.....	79
IV.1. The four phases of cattle population dynamics.....	79
IV.2. A tropical beef production system with European characteristics.....	81
IV.3. Towards a single breed and specialized beef sector.....	81
IV.4. Livestock management and sector governance.....	82
IV.5. Food self-sufficiency and beef production.....	82
V. Conclusion.....	84

Chapitre 4 : Un modèle démographique pour identifier les leviers d'amélioration de la productivité de l'élevage bovin allaitant à la Réunion : validation et analyse de sensibilité.....87

I. Introduction.....	88
II. Matériels et méthodes.....	90
II.1. Site d'étude et données.....	90
II.2. Modèle démographique.....	90
II.3. Validation interne du modèle.....	93

II.4. Analyse de sensibilité.....	93
III. Résultats.....	97
III.1. Validation de l'utilisation du modèle.....	97
III.2. Taux de productivité moyen à la Réunion vs. d'autres territoires insulaires....	98
III.3. Analyse de sensibilité du modèle.....	99
IV. Discussion.....	102
IV.1. Validation de l'utilisation du modèle.....	102
IV.2. Productivités à la Réunion et dans d'autres territoires.....	102
IV.3. Analyse de sensibilité en croît libre.....	103
IV.4. Effet des modalités d'exploitation des femelles.....	103
IV.5. Leviers zootechniques pour augmenter la production du cheptel allaitant réunionnais.....	103
V. Conclusion.....	105

Troisième partie : Des scénarios démographiques pour envisager l'évolution de l'élevage allaitant à la Réunion

.....**107**

Encadré 3 : Résumé de la troisième partie.....109

Chapitre 5 : La modélisation démographique comme outil pour accompagner l'évaluation de stratégies de filière : le cas de l'élevage allaitant à la Réunion..113

I. Introduction.....	114
II. Matériels et méthodes.....	116
II.1. Site d'étude et données.....	116
II.2. Démarche de construction des scénarios.....	116
II.3. Paramètres utilisés dans les scénarios – performances actuelles.....	118
II.4. Description des scénarios.....	119
II.5. Simulation des scénarios.....	120
II.6. Évaluation des scénarios.....	125
III. Résultats.....	127
III.1. Évolution de la production de viande.....	127
III.2. Productivité du troupeau.....	128
III.3. Chargements.....	128
IV. Discussion.....	130
IV.1. Comparaison des scénarios et implications pour l'augmentation de la production.....	130

IV.2. Intérêt du modèle démographique pour l'approche par scénarios.....	132
V. Conclusion.....	133

Discussion et conclusion générale : Principaux enseignements de la thèse, limites et perspectives.....135

I. Premier enseignement : le développement de l'élevage bovin allaitant est un moyen de réduire la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion.....	137
I.1. Principaux résultats de la première partie.....	137
I.2. Implications pour les décideurs.....	138
I.3. Limites et perspectives de la première partie.....	138
II. Deuxième enseignement : les leviers principaux pour augmenter la production de viande bovine à la Réunion sont le prix de l'aliment et les performances zootechniques des animaux.....	140
II.1. Principaux résultats de la deuxième partie.....	140
II.2. Implications pour les décideurs.....	141
II.3. Limites et perspectives de la deuxième partie.....	141
III. Troisième enseignement : l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion nécessite une amélioration des performances des animaux et d'importants changements organisationnels.....	145
III.1. Principaux résultats de la troisième partie.....	145
III.2. Implications pour les décideurs.....	146
III.3. Limites et perspectives de la troisième partie.....	146
IV. Quatrième enseignement : une approche combinée par l'économie et la zootechnie permet de contextualiser et explorer les pistes de développement de l'élevage à la Réunion.....	149
IV.1. Rappel des principaux résultats.....	149
IV.2. Limites et perspectives.....	149

Annexes.....153

Annexe A.1 : Annexes du chapitre 1.....155

Annexe A.2 : Annexes du chapitre 5.....163

Annexe A.3 : Diagnostic démographique de la production allaitante à la Réunion	173
Annexe A.4 : Photographies.....	195
Annexe A.5 : Engagement de non plagiat.....	206
Références.....	209

Index des figures

Figure 1: Organisation générale de la thèse.....	5
Figure 2: Food dependencies for each group of countries: boxplot analysis.....	28
Figure 3: Structure of the FDEVI.....	30
Figure 4: Répartition de la SAU, du nombre d'exploitations et de la valorisation par production en 2017 à la Réunion.....	48
Figure 5: Surface développée en canne à sucre et production de canne à sucre à la Réunion.....	50
Figure 6: Taux de couverture total, taux de couverture en frais et part des produits congelés dans les importations pour les viandes à la Réunion en 2018.....	52
Figure 7: Taux de couverture pour l'ensemble des légumes et des fruits et quelques productions en 2017.....	53
Figure 8: Average annual number of beef cattle heads on Réunion island and average annual number of each breed of beef cattle on Réunion island.....	73
Figure 9: Evolution of the slaughtering rates of females and relative proportion of reproductive females by age classes.....	75
Figure 10: Parturition rate according to female age and breed and evolution of the mean parturition rate by age class between 2006 and 2017.....	76
Figure 11: Evolution of the mortality rate of beef cattle according to their ages.....	77
Figure 12: Prices of cattle feed, feeder and fat cattle in France between 2006 and 2017 and local production and imports of fresh beef meat on Réunion Island.....	78
Figure 13: Cycle de vie des bovins allaitants à la Réunion.....	92
Figure 14: Comparaison de l'effectif moyen annuel et de la production annuelle de viande pour la projection et les données issues de la base de données.....	97
Figure 15: Pyramides des âges pour les données réelles et la projection après un an, six ans et douze ans de simulation.....	98
Figure 16: Contribution des variables à la variance de R_N et de R_W estimée par ANOVA avec un taux de croît libre.....	100
Figure 17: Contribution des variables à la variance de R_N et de R_W estimée par ANOVA avec un taux de croît fixé à 2,6%.....	101
Figure 18: Contribution des variables à la variance de R_N et de R_W estimée par ANOVA avec un taux de croît nul.....	101
Figure 19: Représentation simplifiée du modèle démographique utilisé pour les simulations des scénarios.....	121
Figure 20: Production totale de viande et production de viande de génisse entre 2015 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	127

Figure 21: Productivité numérique et pondérale du troupeau entre 2015 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	128
Figure 22: Chargement au pâturage et chargement en engraissement à l'auge entre 2015 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	129
Figure 23: Modèle démographique avec prise en compte de l'orientation des animaux.....	143
Figure 24: Taux de mise bas des femelles de 3 à 10 ans et de plus de 10 ans entre 2021 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	164
Figure 25: Sex-ratio à la naissance entre 2021 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	165
Figure 26: Poids carcasses des femelles de un à deux ans, de deux à trois ans, de trois à dix ans et de plus de dix ans entre 2021 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	166
Figure 27: Poids carcasses des mâles de un à deux ans et de deux à trois ans entre 2021 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	167
Figure 28: Taux d'abattage des femelles de un à deux ans, de deux à trois ans, de trois à dix ans et de plus de dix ans entre 2021 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	168
Figure 29: Production de viande de taurillon et production de viande de vache de réforme entre 2015 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	169
Figure 30: Nombre de femelles de un à deux ans, de deux à trois ans, de trois à dix ans et de plus de dix ans abattues par an entre 2015 et 2030 pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage.....	170
Figure 31: Répartition des surfaces par type d'occupation du sol à la Réunion.....	175
Figure 32: Taille des élevages allaitants à la Réunion, années 2015-2017.....	176
Figure 33: Pyramide des âges du troupeau allaitant réunionnais, années 2015-2017.....	178
Figure 34: Taux de mise bas selon l'âge des femelles à la Réunion, années 2015-2017.....	179
Figure 35: Taux de mortalité selon l'âge des femelles et des mâles à la Réunion, années 2015-2017.....	180
Figure 36: Taux de vente selon l'âge des femelles et des mâles à la Réunion, années 2015-2017..	181
Figure 37: Taux d'abattage selon l'âge des femelles et des mâles à la Réunion, années 2015-2017.....	182
Figure 38: Classement des taurillons, génisses et vaches de réforme de race allaitante abattus à la Réunion et en Nouvelle Aquitaine.....	193

Index des tableaux

Table 1: Groups of developing countries.....	26
Table 2: Standard statistics for the FDR_T	27
Table 3: Variable descriptions for the standard EVI and FDEVI.....	31
Table 4: Standard statistics for the standard EVI and FDEVI.....	33
Table 5: Simulated and traditional weighting schemes for FDEVI.....	38
Table 6: Standard statistics for the DEA-FDEVI.....	38
Tableau 7: Dépendance alimentaire des DOM et de trois petits territoires insulaires de l’Océan Indien.....	46
Tableau 8: Vulnérabilité économique des DOM et de trois petits territoires insulaires de l’Océan Indien.....	47
Table 9: Average number of farms per type between 2006 and 2017.....	70
Table 10: Average number of heads per breed between 2006 and 2017.....	71
Table 11: Evolution of the growth rate and of the external, management and internal drivers between 2006 and 2017.....	79
Tableau 12: Décomposition du cheptel bovin allaitant réunionnais en classes de sexe et d’âge.....	91
Tableau 13: Variables d’entrée de l’analyse de sensibilité.....	95
Tableau 14: Productivités numérique R_N et pondérale R_W pour la Réunion et plusieurs régions tropicales.....	99
Tableau 15: Taux de mise bas des bovins allaitants à la Réunion.....	118
Tableau 16: Poids carcasses des bovins allaitants à la Réunion et en France métropolitaine.....	118
Tableau 17: Variation (2020-2030) et valeur finale (2030) des taux de mise bas, des poids carcasse, des taux d’abattage et du sex-ratio à la naissance pour les sept scénarios d’évolution de l’élevage	123
Table 18: Spearman’s rank correlation rho and p-values.....	156
Table 19: Pairwise Wilcoxon rank sum tests with Bonferroni corrections.....	157
Table 20: Global ranking by quarters for standard EVI, FDEVI and DEA-FDEVI.....	158
Tableau 21: Taille des élevages allaitants à la Réunion et en France métropolitaine.....	177
Tableau 22: Taux démographiques des bovins allaitants à la Réunion.....	183
Tableau 23: Taux démographique selon la race et la zone d’élevage à la Réunion.....	184
Tableau 24: Performances historiques et actuelles des bovins allaitants à la Réunion.....	185
Tableau 25: Performances de reproduction des bovins allaitants à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés.....	186

Tableau 26: Mortalité des bovins allaitants à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés.....	187
Tableau 27: Taux d'abattage et éléments de gestion des animaux engraisés à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés.....	188
Tableau 28: Poids âges types des bovins chez les naisseurs à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés.....	189
Tableau 29: Croissance des bovins engraisés à la Réunion et en France métropolitaine.....	190
Tableau 30: Poids des femelles de renouvellement à la Réunion et en France métropolitaine.....	191
Tableau 31: Comparaison des poids carcasses à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés.....	192

Index des photographies

Photographie 1: La Baie de Saint Paul depuis le Cap la Houssaye.....	196
Photographie 2: Le village de Bourg Murat vu depuis le piton Dugain.....	197
Photographie 3: Troupeau allaitant limousin au pâturage dans la région du Nez de Bœuf.....	198
Photographie 4: a : Élevage engraisseur traditionnel en diversification de canne à sucre et élevage engraisseur moderne spécialisée	199
Photographie 5: Culture de pommes de terre et prairie au Piton Mahot.....	200
Photographie 6: Enrubannage d'herbe et paille de canne dans un élevage engraisseur.....	201
Photographie 7: Matériel utilisé dans les élevages engraisseurs traditionnels : pick-up pour l'affouragement en vert et broyeuse péi pour le broyage de la canne à sucre fraîche.....	202
Photographie 8: Jeune bovin croisé et génisses limousines dans deux élevages engraisseurs.....	203
Photographie 9: Cornadis et aire d'alimentation en plein air à Bourg Murat.....	204

Introduction générale

Les petits espaces insulaires (PEI) sont considérés comme des territoires particulièrement vulnérables sur le plan économique (Briguglio, 1995; Atkins, Mazzi & Easter, 2001; Blancard & Hoarau, 2016). Cette vulnérabilité découle notamment de leur isolement, de leur petite taille et de leur exposition aux chocs économiques et environnementaux (Goavec & Hoarau, 2015; Barnett & Waters, 2016; Goavec, 2016). En outre, la question de la sécurité alimentaire y est particulièrement prégnante (Hughes *et al.*, 2012). Celle-ci est définie comme la situation où « tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active » (FAO, 2008). D'une manière générale, les PEI répondent à ce défi selon deux stratégies complémentaires.

La première stratégie considère que l'origine des denrées agricoles importe peu. Elle repose sur l'ouverture économique pour assurer une diversification suffisante des sources d'importations de denrées dans l'optique de sécuriser les approvisionnements (Berg *et al.*, 1981; Hassan, Faki & Byerlee, 2000; Laroche-Dupraz & Postolle, 2010). Dans cette vision, les pays en développement sont encouragés à se spécialiser dans la production de biens et de services pour lesquels ils sont concurrentiels afin d'assurer des exportations à un niveau permettant une entrée de devises suffisante pour acquérir les biens de première nécessité sur le marché mondial. Ces spécialisations ne sont pas exemptes de critiques mais restent globalement encouragées dans une optique de développement (Scheyvens & Momsen, 2008). L'ouverture économique peut passer par une phase d'insécurité alimentaire supposée se résoudre d'elle-même avec le développement économique du territoire (FAO, 2003). Cette vision de la sécurité alimentaire, encouragée par les institutions internationales depuis le milieu du XX^e siècle, a été un relatif succès puisqu'elle a permis la diminution globale des situations de famine par le développement du commerce (Porkka *et al.*, 2013). Dans le cas des PEI, la faible disponibilité du foncier (Briguglio, 1995), les contraintes topographiques compliquant la mécanisation de l'agriculture, l'impact négatif sur l'environnement (van der Velde *et al.*, 2007) et l'exposition de la production agricole aux aléas climatiques et économiques (Desse, 2012; Angeon & Bates, 2015a) limitent fortement le développement de l'agriculture vivrière. Pour sécuriser les importations de denrées alimentaires, les PEI se sont historiquement spécialisés dans l'exportation de produits agricoles à faible (sucre) ou forte (fruits tropicaux, plantes à parfum, épices) valeur ajoutée et de services (tourisme, finance) (Temple, Marie & Bakry, 2008; Pébarthe-Désiré & Mondou, 2014; Pratt, 2015; Lim, 2017). Faire reposer son autonomie alimentaire sur l'ouverture économique s'accompagne d'une très forte dépendance aux marchés mondiaux et nécessite un haut niveau d'exportations pour assurer un haut niveau d'importation. Lors des crises économiques, les revenus des pays importateurs diminuent et peuvent aller jusqu'à limiter leur capacité d'achat sur les marchés mondiaux, causant dans certains cas des crises alimentaires et des émeutes de la faim (Berazneva & Lee, 2013). Cette fragilité touche tout particulièrement les pays à faible revenu (Verma & Hertel, 2009; Kalkuhl, von Braun & Torero, 2016) mais doit également être un point d'attention pour les pays moins pauvres (Luan, Cui & Ferrat, 2013), notamment les PEI dont les revenus viennent d'une petite gamme d'exports et sont

très sensibles aux chocs externes économiques et climatiques (Briguglio *et al.*, 2009; Briguglio, 2014; Genave, Blancard & Garabedian, 2020).

Pour réduire cette insécurité alimentaire, la seconde stratégie repose sur le développement local d'une agriculture vivrière forte (Clapp, 2017). Dans ce cas, l'autonomie alimentaire est vue comme un moyen privilégié d'accéder à la sécurité alimentaire en assurant le développement local de l'agriculture vivrière et en s'affranchissant au moins partiellement des risques liés à la participation aux marchés mondiaux. Cette recherche d'autonomie concerne non seulement les produits agricoles, mais également les intrants nécessaires à leur production (Ciceri & Allanore, 2019). Elle a orienté la politique agricole de nombreux pays à bas revenus depuis les indépendances du milieu du XX^e siècle, se confondant parfois avec la vision plus politique de la souveraineté alimentaire (La Via Campesina, 1996; Faisal & Parveen, 2004; Agarwal, 2014; Erokhin, 2017; Hamilton-Hart, 2019). Cette question concerne notamment les PEI malgré les limites au développement agricole inhérentes à leur situation rappelées plus haut (Denman & Dewey, 1989; Leung & Loke, 2008; Kim, Burnett & Ghimire, 2015; Grima & Singh, 2020). L'intérêt porté à la question de l'autonomie alimentaire a cru suite à la crise de 2007-2008 (Berazneva & Lee, 2013) et a été encore exacerbé par la récente crise liée au Covid-19 (Ahmed *et al.*, 2020; Clapp & Moseley, 2020; Farrell *et al.*, 2020; Hickey & Unwin, 2020; Savary *et al.*, 2020; Teng, 2020; Adhikari *et al.*, 2021) et la réorganisation des chaînes de valeur mondiales qu'elle a entraînée (Clapp & Moseley, 2020).

Les deux stratégies de dépendance aux importations ou d'autonomie ne constituent pas une dichotomie stricte. Un continuum existe entre l'autarcie totale (autonomie alimentaire totale) et l'ouverture totale (Clapp, 2015). La question est plus d'assurer un niveau d'autonomie suffisant pour limiter la vulnérabilité et l'exposition du territoire (Clapp, 2017) sans pour autant chercher à être complètement isolé des marchés mondiaux. Ainsi, certains territoires initialement tournés vers une stratégie d'ouverture réfléchissent à développer leur agriculture (Teng, 2020). À l'inverse, des États qui s'étaient orientés vers une stratégie de production domestique reviennent à une idée de sécuriser leurs importations alimentaires, en particulier lorsque le développement agricole est trop coûteux (Woertz, 2020).

Au sein des PEI, les Départements français d'Outre-mer (DOM) ont fait l'objet de nombreuses études relatives au développement agricole et à l'autonomie alimentaire (Cabidoche *et al.*, 2002; Laudié-Lecomte, 2003; Fusillier, Piraux & Choisis, 2005; Angeon, Chia & Fusillier, 2007; Poirine, 2007; Galan *et al.*, 2009; Augusseau *et al.*, 2012; Lebouvier, 2016; Marblé, Aubron & Vigne, 2018; Laboureur, 2019). Du fait d'une histoire particulière (Dimier, 2005), les DOM articulent une agriculture destinée à l'exportation et une agriculture vivrière (Photographie 1). Ces tendances sont particulièrement exacerbées à la Réunion, où l'éloignement important de la France métropolitaine et la difficulté de navigation jusqu'à la démocratisation des voyages aériens (Cazes, 1985; Vergé-Dépré, 2005; Pébarthe-Désiré & Mondou, 2014) ont limité les relations économiques et notamment les échanges de denrées alimentaires.

La départementalisation de la Réunion en 1946 a entraîné une politique de rattrapage sur la métropole largement financée par les pouvoirs publics et qui, couplée aux crises qui ont frappé la culture du géranium, ont entraîné un fort exode rural. Dans ce cadre, des politiques publiques ambitieuses s'appuyant sur une réforme foncière, sur le développement des infrastructures et sur la structuration des filières de production ont cherché à répondre au triple objectif de l'autonomie alimentaire, du développement rural et de la réduction du chômage (de Cambiaire, 1983). L'ensemble visait à fournir de l'emploi en zone rurale pour limiter l'exode vers les périphéries des villes (Laboureur, 2019). Dans les Hauts de l'île (zones d'altitude de la Réunion éloignées des centres économiques, Photographie 2), ces politiques sont notamment passées par le développement de l'élevage bovin allaitant autour d'une unique coopérative, la Sicarévia (Marblé *et al.*, 2018) dans le cadre d'un Plan d'Aménagement des Hauts (PAH).

Cependant, dans le contexte actuel de tertiarisation de l'économie (IEDOM, 2019), d'amélioration du niveau de vie (Coder, Duploux & Fabre, 2016) et d'augmentation de la consommation de viande (Méjean *et al.*, 2020), la seule approche sociale ne suffit plus à justifier l'intérêt porté à l'élevage bovin. Par ailleurs, les controverses autour de l'élevage (Delanoue, 2018), la compétition entre l'alimentation animale et l'alimentation humaine (Banerjee, 2011; Manceron, Ben-Ari & Dumas, 2014; Davis & D'Odorico, 2015; van Hal & Weijenberg, 2019) dans un contexte de faible disponibilité du foncier et la contribution de l'élevage aux importations (Urcoopa, 2020a) remettent en cause le rôle central donné à l'élevage allaitant dans le développement des zones rurales. Ces limites sont encore exacerbées à la Réunion du fait de l'importance de l'élevage bovin dans la stratégie d'autonomie alimentaire (Galan *et al.*, 2009; DAAFR, 2019a) et de la présence d'un parc national (de Rouffignac, Choisis & Salles, 2011; Marblé *et al.*, 2018).

La question de l'autonomie alimentaire a été remise au goût du jour pour justifier les récentes politiques de développement de l'élevage allaitant (DAAFR, 2019b). En ce sens, le projet D.E.F.I. (Développement de l'Élevage et des Filières des Interprofessions) (ARIBEV & ARIV, 2015; DAAFR, 2019b), ambitieux programme de développement de l'élevage doté de 4,5 M€ par an entre 2011 et 2021, visait à développer les filières animales locales notamment dans un but d'autonomie alimentaire. Pourtant, la stratégie mise en œuvre n'a pour le moment pas permis d'atteindre les objectifs affichés en termes d'autonomie alimentaire, le taux de couverture de la viande bovine locale dans la consommation étant passé de 33 % en 2009 à 26 % en 2018 (DAAFR, 2019a). L'objectif opérationnel de la Sicarévia est d'envisager une poursuite des objectifs de D.E.F.I au-delà de la date limite du projet en 2021 et donc une augmentation de la production de viande bovine à horizon 2030. Or, l'approche empirique actuelle n'est pas suffisante pour aborder cette problématique multifactorielle.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte de tensions entre les controverses autour de l'élevage allaitant à la Réunion et les fortes incitations politiques à son développement. Elle traduit de manière scientifique les objectifs opérationnels de la coopérative. Elle cherche à répondre à la double interrogation (i) de l'intérêt du développement de l'élevage allaitant et (ii) des moyens

d'accompagner l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion. La question centrale de la thèse est donc double :

Pourquoi et comment augmenter la production de viande bovine à la Réunion ?

Nous avons décliné cette problématique principale en trois questions de recherche qui constituent les trois parties de la thèse. Après avoir conduit une étude économique de l'ensemble des PEI, nous nous intéressons plus particulièrement au cas de la production bovine allaitante à la Réunion (Figure 1). La première partie cherche à comprendre **en quoi l'élevage allaitant peut être un vecteur de développement à la Réunion**. Nous répondons à cette question à partir d'une étude de la vulnérabilité économique structurelle dans les PEI et à la Réunion (chapitre 1) et du rôle de l'agriculture dans cette vulnérabilité (chapitre 2). La deuxième partie cherche à approfondir notre compréhension de la filière bovine allaitante à la Réunion en **mettant en évidence les déterminants des dynamiques passées** (chapitre 3) et **les paramètres zootechniques les plus influents** (chapitre 4). Pour cela, nous proposons une méthodologie basée sur l'étude des paramètres démographiques à l'échelle du territoire. La troisième partie cherche à **identifier les trajectoires d'évolution de l'élevage allaitant capables d'assurer une augmentation de la production de viande**. Elle présente des scénarios co-construits avec la Sicarévia (chapitre 5).

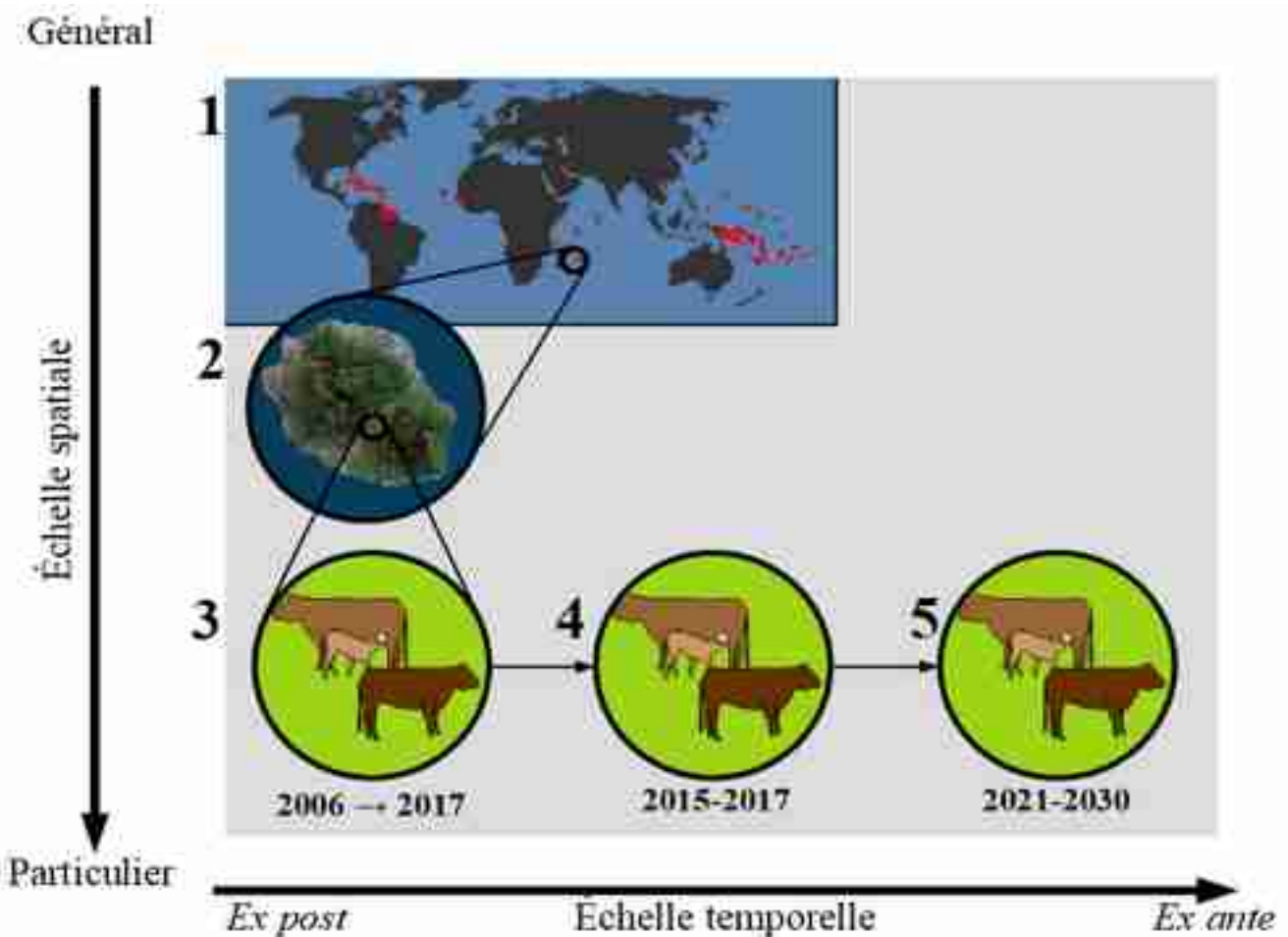


Figure 1: Organisation générale de la thèse

Les numéros indiquent les numéros des chapitres. Les chapitres 1 et 2 composent la première partie, les chapitres 3 et 4 la deuxième partie, le chapitre 5 la troisième partie.

Les régions identifiées en rouge sur la carte correspondent aux PEI.

Le premier chapitre cherche à approfondir **le rôle de l'agriculture et de la dépendance alimentaire dans la vulnérabilité économique structurelle des PEI**. Il s'intéresse à un ensemble de 131 pays et territoires en développement. En utilisant un indice composite de vulnérabilité usuel et une méthode de pondération endogène, nous proposons un nouvel indice de vulnérabilité prenant en compte la dépendance alimentaire. Nos résultats montrent que la dépendance alimentaire est un facteur majeur de vulnérabilité pour les régions en développement et tout particulièrement pour les PEI. Travailler à la réduction de cette dépendance par le développement d'une agriculture locale vivrière productive et efficiente est donc un enjeu de développement majeur pour les PEI.

Le deuxième chapitre propose une étude de cas à la Réunion comme approfondissement des premiers résultats. Il cherche à identifier **les filières agricoles pouvant permettre un gain d'autonomie alimentaire**. Nous nous appuyons sur les nombreuses sources statistiques disponibles, en particulier les données concernant l'autonomie alimentaire actuelle et passée, ainsi que sur notre propre expertise. Nous montrons que les filières maraîchères (fruits et légumes) et la filière bovine allaitante sont les filières présentant le plus fort potentiel de développement dans une optique de conquête de parts de marché et de recherche d'autonomie alimentaire.

Le troisième chapitre cherche à comprendre **quels ont été les déterminants des dynamiques passées de l'élevage allaitant réunionnais**. Il propose une analyse conjointe des taux démographiques et des conditions économiques et climatiques. Les principaux déterminants identifiés sont les prix de l'aliment, les décisions des éleveurs en termes de choix d'abattages et les actions de la coopérative.

Le quatrième chapitre cherche à **mettre en évidence les leviers zootechniques permettant d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion**. Il propose un modèle démographique du troupeau allaitant réunionnais et montre sa capacité à représenter fidèlement la réalité. L'analyse de sensibilité du modèle montre l'importance d'améliorer les taux de mise bas, d'augmenter les poids carcasses et de maintenir la mortalité à un niveau faible pour augmenter la production de viande.

Le cinquième chapitre s'appuie sur les deux précédents et propose d'**identifier les trajectoires d'évolution du secteur bovin allaitant réunionnais permettant d'atteindre les objectifs de développement** fixés par la Sicarévia. Il explore des scénarios d'évolution de l'élevage allaitant à horizon 2030 co-construits avec la coopérative. Nous montrons qu'il est nécessaire d'envisager des améliorations importantes des performances des animaux et des changements radicaux dans l'organisation de la production. Le rajeunissement du troupeau, l'insémination artificielle sexée et l'engraissement de génisses lourdes à l'herbe sont des leviers essentiels à explorer.

Première partie :
Intérêt économique du
développement de l'élevage
allaitant à la Réunion

Encadré 1 :
Résumé de la première partie

La première partie de la thèse cherche à montrer **en quoi le développement de l'élevage allaitant peut être un facteur de réduction de la vulnérabilité du territoire**. La contextualisation économique du rôle de l'élevage allaitant dans le développement de la Réunion est un préalable nécessaire à une étude approfondie du fonctionnement de cette production. En effet, si les objectifs de lutte contre le chômage, de limitation de l'exode rural et d'autonomie alimentaire ont longtemps suffi à justifier l'intérêt porté à l'élevage à la Réunion (de Cambiaire, 1983), les récentes controverses autour du rôle de l'élevage dans le développement (Banerjee, 2011; de Rouffignac *et al.*, 2011; Delanoue, 2018) nous amènent à questionner ces justifications. Pour répondre à ces controverses, cette première partie articule une réflexion autour de la notion de vulnérabilité économique structurelle des petits espaces insulaires (Briguglio *et al.*, 2009; Guillaumont, 2009a) et du rôle que peut jouer le développement de l'élevage dans cette vulnérabilité. Notre réflexion est déclinée en deux chapitres complémentaires qui constituent une approche progressive du cas de la Réunion.

Le premier chapitre est extrait d'un article co-écrit avec Stéphane Blancard et Jean-François Hoarau et publié le 2 janvier 2021 dans la revue *Applied Economics*. Il présente une réflexion sur **le rôle de la dépendance alimentaire dans la vulnérabilité économique structurelle des PEI**. Le deuxième chapitre correspond à un article soumis à la revue *Économie rurale* le 21 janvier 2021. Il cherche à identifier **quelles sont les filières les plus à même de permettre un gain d'autonomie alimentaire à la Réunion à horizon 2030**.

Dans **le premier chapitre de la thèse**, nous abordons la question de la vulnérabilité économique structurelle par le biais d'un indice composite agrégeant plusieurs variables. Parmi les nombreux indices composites de vulnérabilité proposés (Angeon & Bates, 2015b), l'indice de vulnérabilité économique (IVE) (Guillaumont, 2004a, 2009a) a été largement utilisé notamment par l'ONU pour l'évaluation du niveau de développement d'un territoire. Dans la théorie économique orthodoxe et en particulier dans l'IVE, l'agriculture est vue comme un facteur de vulnérabilité (Angeon & Bates, 2015a). Une forte dépendance économique au secteur agricole est considérée comme un handicap majeur pour le développement durable du fait de son exposition aux chocs climatiques et économiques. En bref, plus un pays présente un secteur agricole important en comparaison des autres secteurs économiques, plus il est supposé être structurellement vulnérable.

Or, les récentes crises alimentaires (Berazneva & Lee, 2013; Bush & Martiniello, 2017; Clapp & Moseley, 2020) ont permis l'émergence d'une nouvelle considération du rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité. Elle considère que le problème vient moins de l'importance du secteur agricole dans l'économie que de son efficacité, c'est-à-dire sa capacité à nourrir la population du territoire concerné (Clapp, 2017). Le facteur de vulnérabilité n'est plus alors la part de l'agriculture dans le PIB mais plutôt la part des denrées alimentaires devant être achetées par le territoire sur les marchés mondiaux.

En nous plaçant dans ce courant de pensée, nous proposons de réévaluer le rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité. Pour cela, nous reprenons l'IVE (Guillaumont, 2009a) et y

substituons la variable actuelle de la part de l'agriculture dans le PIB par une mesure de la dépendance alimentaire (FAO, 2012). Notre mesure de dépendance alimentaire prend en compte uniquement les denrées vivrières et exclut les cultures de rente exportées. Pour des raisons de robustesse, nous utilisons une pondération endogène dérivée de la méthode DEA (Charnes, Cooper & Rhodes, 1978; Cherchye *et al.*, 2007; Hatefi & Torabi, 2010). Cette méthode permet de limiter le biais opérateur dans l'assemblage des différentes variables en un indice composite. Nous calculons ainsi un nouvel indice de vulnérabilité prenant en compte la dépendance alimentaire pour un panel de 131 pays dont 35 PEI.

Nos résultats montrent que **la dépendance alimentaire est un facteur important de vulnérabilité** pour les PEI et notamment pour la Réunion. En ce sens, la réduction de cette dépendance apparaît comme un moyen de réduire la vulnérabilité économique structurelle de ce territoire.

La recherche d'autonomie alimentaire figure de longue date dans les objectifs de développement agricole à la Réunion (de Cambiaire, 1983). Cependant, malgré le soutien des pouvoirs publics, cette autonomie reste limitée (DAAFR, 2019a). À partir de ce constat, le **deuxième chapitre de la thèse** cherche à **identifier les filières agricoles réunionnaises les plus à même d'assurer un surcroît d'autonomie alimentaire à moyen terme**. Pour ce faire, nous proposons une étude exhaustive des principales filières agricoles de la Réunion. Nous cherchons à identifier les contributions respectives de ces filières à l'autonomie alimentaire de l'île et les possibilités de développement de chacune d'entre elles. En nous appuyant sur l'analyse des différentes sources de statistiques agricoles disponibles (ARIBEV & ARIV, 2015; DAAFR, 2018; Agreste, 2020; Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021a), nous montrons que la dépendance alimentaire de la Réunion se concentre sur une petite gamme de produits.

La dépendance aux importations de céréales et notamment de riz est la plus élevée puisque la production réunionnaise est inexistante. Cependant, les possibilités de développement de cette production à la Réunion sont faibles du fait des contraintes climatiques et géographiques. Il apparaît donc peu probable que des gains substantiels d'autonomie soient possibles sur ces productions à une échéance 2030.

Notre étude met en évidence que **les productions légumières et fruitières** présentent des gisements d'autonomie alimentaire importants. Pour les fruits et légumes à longue durée de conservation, les productions locales sont concurrencées par des importations en provenance de pays à bas coûts de production. Le défi est donc de **développer et structurer les filières locales** pour parvenir à concurrencer ces importations en réalisant des économies d'échelle et en adaptant les productions aux attentes des consommateurs.

Nous identifions également **la viande bovine** comme une filière où les gains possibles d'autonomie alimentaire sont importants. En effet, la production locale de viande bovine est la seule production animale à être partiellement **concurrencée par des importations de viande**

fraîche et donc à coût relativement élevé en comparaison des importations congelées. En ce sens, une marge de développement existe pour la viande bovine locale. Du fait d'une **forte structuration** (une seule coopérative assure 94 % de la production) et d'une capacité à baser son développement sur les **ressources locales** (fourrages et co-produits), la filière bovine apparaît comme **la plus à même d'assurer un gain d'autonomie alimentaire à l'horizon 2030**.

Partant de ce constat, la suite de la thèse s'intéresse au secteur bovin allaitant à la Réunion et aux moyens d'augmenter la production de viande bovine.

Chapitre 1 :
**Influence de l'agriculture sur la vulnérabilité
économique structurelle des petits espaces insulaires**

I. INTRODUCTION

Although there is no transparent and consensual definition in the literature of what is a small island space (SIS¹ (Hein, 2004)), the international community adopted a common view regarding the specific development problems SIS face, thus highlighting the need for these economies to receive special treatment. Particularly, they are all confronted with significant structural handicaps. Such historical, geographical, ecological, and economic impediments result in strong structural vulnerability, which ultimately questions their ability to sustain growth and development in the long run (see Blancard & Hoarau, 2016 for a survey). Following the definition of the United Nations' Committee Development Policy (UNCDP), structural vulnerability is the risk that a country encounters a significant decrease in its average growth rate in the long run due to unanticipated and exogenous environmental and economic shocks (Guillaumont, 2004a, 2009a). In other words, structural vulnerability consists in both the magnitude and frequency of shocks (natural and trade), and the exposure to these shocks which depends on factors such as smallness, remoteness, distance, and the specialization of local production and exports, amongst others.

Regarding the potential determinants of structural vulnerability, the orthodox economics literature identifies agriculture as the “usual suspect” (Angeon & Bates, 2015a). Considering its exposure to environmental and trade fluctuations, the specialization in primary goods is an important drawback for sustainable development. Further, a widely agricultural region is comparatively expected to be more affected by external conditions. This is the conceptual view adopted by most empirical studies on structural vulnerability in the developing world, including SIS (see (Angeon & Bates, 2015b) for a survey). However, conventional wisdom was recently challenged by the 2007–2008 and 2010–2011 international food crises. These led to demonstrations and food riots in several countries, mainly in the developing world (Bush & Martiniello, 2017). The increases in global commodities prices were a major cause of these events. At the same time, the commodity market attracted renewed interest from investors, which caused prices to become more volatile compared to the stability of the previous decades (FAO, 2009; Mazzeo, 2009; Berazneva & Lee, 2013)^{2,1} Furthermore, the spikes and instability in food prices were associated with a strong

1 Following Encontre (2004), (Blancard & Hoarau, 2013) put forward four main lists of small island developing states (SIDS): (i) a political list of 39 SIDS (32 countries and 7 territories recognized as SIDS by the Alliance of Small Island States [AOSIS]); (ii) an economic list of 48 SIDS (34 countries and 14 territories implicitly recognized as SIDS by the United Nations by the AOSIS); (iii) an institutional list of 46 SIDS (34 genuine island states, 4 continental states, and 8 non-self-governing territories) that together make up the official list according to the United Nations Secretariat; and (iv) a pragmatic list of 29 SIDS, which are self-governing, genuine island states with a population not exceeding 5 million, except for Papua New Guinea, and similar socioeconomic developing country according to the United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) classification. See Blancard and Hoarau (2013) for more details.

2 The recent higher and more volatile international food prices rely on many factors: poor harvests in major producing countries due to extreme weather events, declining food stocks, high oil and energy prices raising the cost of fertilizers, irrigation and transportation, production of bio-fuels substituting food production, speculative transactions, export restrictions leading to hoarding and panic buying, depreciation of the US dollar, a growing change in dietary patterns from starchy foods towards meat and dairy products, and three decades of under-

increase in poverty, especially in the urban areas of food-importing developing countries (Ivanic & Martin, 2008; Ivanic, Martin & Zaman, 2012), that is, the economies largely dependent on the world market to supply their domestic consumption.

This international context reopened the debate on the merits and downsides of food self-sufficiency (Clapp, 2017). Mainstream economists rejected the endogenous and self-reliant development policies implemented by most newly independent developing countries during the 1960s and 1970s, a view that dominated the end of the 20th century. Specifically, they pointed out that the food self-sufficiency approach was inefficient and prone to dramatic market distortions (Naylor & Falcon, 2010). As a result, trade liberalization was presented as the best method to sustain food security. For most of the developing world, including SIS, food security implies a trade strategy based on specializing in goods for which the respective countries have a comparative advantage (*i.e.*, export crops) and relying essentially on imports for their food supplies, which meant that a number of developing economies gradually became net food importers. Nevertheless, since the recent food crises and the high uncertainty on the global food market, food self-sufficiency emerged amongst academics and policymakers as a means to protect domestic economies from higher and more volatile world food prices (Clapp, 2017). The reliance on imports is no longer seen as a way to ensure a secure food supply for developing countries (Clapp, 2009; Verma & Hertel, 2009; Kalkuhl *et al.*, 2016). Conversely, a prominent and productive agricultural sector can be a factor of resilience, thus allowing to reduce the exposure to the effects of a crisis and the related vulnerability (Meijerink & Roza, 2007; Yang *et al.*, 2008; Dimova & Gbakou, 2013; Oluwatayo & Ojo, 2016; Dogru *et al.*, 2019).

In line with this latter literature stream, we claim that a strong agricultural sector is not necessarily a driver of economic vulnerability. Instead, its ability to sustain the food needs of the domestic population is more important. In short, economic vulnerability does not increase with the share of the agriculture in the GDP but with the degree of imported food dependency. As such, food self-sufficiency could reduce economic vulnerability without rejecting the possibility of trade as, for various geographical, historical, and economic reasons, foreign trade remains essential for SIS. Consequently, based on the assumption that the dependency on the global food market is a good way of measuring the role of agriculture and food production in influencing vulnerability, this article proposes a new structural economic vulnerability index (EVI) by introducing into the well-known EVI of the UNCDP (Guillaumont, 2009a) an indicator of the dependency on food imports, called the food dependency augmented EVI (FDEVI).

To identify the weighting system assigned to the indicators that enter the calculation of the FDEVI, two methods exist in the literature: one based on statistical models and one based on public/expert opinion.³ In the first category, the data envelopment analysis (DEA) proposed by (Charnes *et al.*, 1978), also known as the benefit-of-the-doubt (BoD) method in the field of composite indicators, offers a good perspective of robustness (Melyn & Moesen, 1991). Compared to other methods, DEA and related models avoid subjectivity and require few assumptions. Among

investment in agriculture (FAO, 2011; Tadesse *et al.*, 2014)

3 See OECD (2008) for a survey.

DEA models, we follow Hatefi and Torabi's (2010) model to generate a common set of weights for all entities. Therefore, we avoid the potential problem of the original DEA regarding the flexibility in weight selection. Simulations are then performed on a sample of 131 developing countries, including 35 small island territories. To avoid potential lobbying considerations, following Blancard and Hoarau (2016), we only focus on the definition of SIS based on the institutional list of the United Nations Secretariat and the pragmatic list of the UNCTAD. In sum, this work makes two main contributions. The first one is conceptual and is related to the introduction of (in)dependency from food imports into the official composite index in accordance with the so-called "food sovereignty" wisdom. The second one is methodological by replacing the common equal weighting system with a more robust endogenous framework based on DEA.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 reviews the literature, focusing on the debate of food security versus food sovereignty, namely the role of food dependency and agriculture in vulnerability. Section 3 presents our variable of interest for measuring food dependency. Section 4 presents the EVI incorporating the new variable of food dependency. Section 5 describes the methodological design of the FDEVI based on the DEA procedure of Hatefi and Torabi (2010) and discusses the results. Section 6 concludes and provides some interesting economic policy insights.

II. AGRICULTURE AND STRUCTURAL VULNERABILITY IN DEVELOPING COUNTRIES AND SIS

How the literature analyzes the nexus between the agricultural sector and economic vulnerability depends on the role of free trade, namely the merits and drawbacks of liberalization and agricultural specialization.

II.1. Liberal theory, food security, and the negative role of agriculture

One literature strand, in line with the liberal theory or the Heckscher-Ohlin-Samuelson model, states that countries must specialize in activities for which they have a comparative advantage. Concerning the developing world and SIS, liberal economists suggest these economies must consider the development of the agricultural sector as a priority in accordance with factorial endowments, as agriculture is a labor-intensive sector. Then, free trade gives these countries the opportunity to export primary goods in exchange for capital-intensive goods. Mainstream economists applied this idea to food self-sufficiency. Indeed, since the well-known Berg report (Berg *et al.*, 1981), developing countries' agricultural sectors are encouraged to specialize in cash crops (*e.g.*, coffee, bananas, sugar cane, tea, cotton) to make full use of their comparative advantages (Hassan *et al.*, 2000; Laroche-Dupraz & Postolle, 2010) and import staple foods from countries most suited to produce them, that is, from developed countries.

This approach led to a food security concept widely accepted by international institutions. Accordingly, following the Food and Agriculture Organization (FAO, 1996), "food security exists when all people, at all times, have a physical and economic access to sufficient, safe and nutritious food that meets their dietary needs and food preferences for an active and healthy life." However, this definition does not consider the importance of the origin of commodities but focuses on people being able to feed themselves with nutritious, safe, and culturally relevant food. Free trade is even presented as the best way to ensure food security.

The implementation of food security by international organizations (International Monetary Fund and the World Bank) through structural adjustment programs resulted in a progressive shift from the cultivation of domestic food crops to an export-oriented agriculture in developing countries and their growing dependency on imported foods. This is even more valid for SIS, because the promotion of cash crops for export at the expense of other traditional agricultural sectors targeting local markets continued the trend created by colonization (Barlagne *et al.*, 2015).

II.2. Post-structuralist wisdom, food sovereignty, and the negative impact of food dependency

Since the beginning of the 1990s, following structuralist wisdom (Prebisch, 1950; Singer, 1950; Furtado, 1976), strong critics on the positive role of free trade and agricultural specialization emerged. Post-structuralists argue, in particular, that the structure of agricultural exports is a main channel of exposure to price shocks, thus implying strong economic vulnerability. Countries where the supply and export structures are focused on a few raw materials are prone to dramatic price shocks, which ultimately leads to strong instability in export earnings and casts doubt on the possibility to sustain both a process of development and food security in the medium-long run (Easterly & Levine, 2003; Guillaumont & Guillaumont Jeanneney, 2003). Therefore, it is not surprising that the composite indicators measuring economic vulnerability, which are based on the post-structuralist wisdom, consider agriculture as a vulnerability factor (see (Angeon & Bates, 2015b) for a survey). Four main components identify the vulnerability of agriculture (Angeon & Bates, 2015a): (i) export concentration, (ii) dependency on agri-exports, (iii) instability of exports and agricultural production, and (iv) the share of agriculture in the GDP.

However, even if the three first sources of vulnerability are difficult to contest, considering the share of agriculture in GDP as a weakness is misleading. Several studies showed that a productive and efficient agriculture is a means of development but not insecurity (Meijerink & Roza, 2007; Yang *et al.*, 2008; Dimova & Gbakou, 2013; Oluwatayo & Ojo, 2016). Moreover, other works highlighted the strong links between past episodes of price spikes and the worsening of poverty, as well as severe political and social unrest, in particular in the urban areas of food importing countries (Clapp, 2009; Verma & Hertel, 2009; Azzam & Rettab, 2012; Ivanic *et al.*, 2012; Bellemare, 2014; Kalkuhl *et al.*, 2016). Actually, what is crucial is not the share of the agricultural sector but rather its ability to feed the local population. Angeon & Bates, 2015a put forward that promoting the macroeconomic resilience of a country requires improving its production conditions rather than reducing the share of the agriculture. In short, any agricultural policy must foster a reorientation towards diversification and food self-sufficiency. Undoubtedly, food self-sufficiency is a means of insulating a country from the higher and more volatile global food prices, then reducing economic vulnerability.

This proposal is in line with the increasingly popular concept of food sovereignty, defined as “the right of peoples to healthy and culturally appropriate food produced through ecologically sound and sustainable methods, and their right to define their own food and agriculture systems” (Forum for Food Sovereignty, 2007). This definition attributes a higher importance to the origin and the means of production, rather than to food security. Here, the agricultural sector appears as a strength rather than a weakness, given its ability to protect a country from the instability of international food prices while also promoting food security. In other words, the food dependency from imports must be considered as a major vulnerability source.

II.3. Food self-sufficiency as a continuum

Recently, Clapp (2017) drew attention to the fact that the debate on food self-sufficiency must not oppose absolute autarky (*i.e.*, the complete reliance on domestic good production to meet food needs) and absolute open borders (*i.e.*, complete reliance on imports for food supply). A more fruitful approach is defining food self-sufficiency as a continuum, in that most countries fall somewhere between these extremes of the policy continuum depending on their unique circumstances. Then, “food self-sufficiency is more about a country’s domestic capacity for food production than it is about a rejection of food trade. Indeed, most countries engage in at least some food trade, even if they are actively promoting food self-sufficiency” (Clapp, 2017).

Further, some situations could necessitate trade rules that are enough flexible to allow the use of policy tools that would enable countries to maximize food self-sufficiency, while minimizing the risks linked with both trade restrictions and the over-reliance on trade. Clapp (2017) identifies six situations in which economies can benefit from greater self-sufficiency: (i) poor countries with high levels of food insecurity, (ii) countries with volatile export earnings, (iii) countries having the potential to be food self-sufficient based on their natural resource endowments that are paradoxically net food importers, (iv) countries whose main dietary staples are controlled by a small number of suppliers, (v) countries with large populations whose food purchases can disturb world food prices, and (vi) countries at risk of trade disruptions following wars or political tensions. In all these cases, promoting self-sufficiency without eliminating the possibility of trade makes economic sense (Clapp, 2015). Obviously, most SIS belong to one of these six categories.

III. MEASURING FOOD SELF-SUFFICIENCY: THE FOOD DEPENDENCY RATIO

III.1. The food dependency ratio: Methodological aspects

Before introducing food dependency as an indicator of economic vulnerability, we need to identify a proxy for it. Following Clapp (2017), this proxy must consider that self-sufficiency does not exclude the possibility of foreign trade. A convenient way is to select the self-sufficiency ratio (SSR) of FAO (FAO, 2012; Clapp, 2015, 2017). The SSR focuses on the capacity of domestic food production to equal or exceed 100% of a country's food consumption. Therefore, this understanding preserves the interest of a country to trade part of its food production. FAO (2012) provides a simple formula to calculate the SSR:

$$\text{SSR} = \text{production} \times 100 / (\text{production} + \text{imports} - \text{exports}).$$

Nevertheless, this indicator is not directly suitable for economic vulnerability analysis because it measures performance, while we need a measure of deprivation. That is why we retain a complementary version of the SSR, namely the food dependency ratio (FDR), inspired by the import dependency ratio (FAO, 2012) and calculated as:

$$\text{FDR} = (\text{imports} + \text{food aid}) \times 100 / (\text{imports} + \text{food aid} + \text{production} - \text{exports}).$$

Therefore, the closer the FDR is to 100% (0%), the more a country does not produce (produces) food in sufficient quantities to meet its domestic needs. We introduce into the FDR the food aid as well, which takes into account the fact that most poor countries rely on international assistance for their emergency food supplies. Furthermore, considering that the FDR reflects the real dependency of a country on foreign food sources, it is not necessary to include all agricultural production, but only the basic production. Cash crops are not considered because they are mainly export-oriented.

Moreover, a country can face hunger and malnutrition while being food self-sufficient at the global level. Such a country might produce more than enough of some food crops but too little of others for a healthy diet (Clapp, 2017). Therefore, two distinct FDR have been computed, namely for energy (cereals and starchy roots, FDR_E) and on animal protein (meat and milk, FDR_P). The commodities used in the computation of FDR_E are rice, wheat, maize, cassava, potatoes, and sweet

potatoes. The commodities included in the FDR_P are pork, beef, poultry, mutton and goat meat, and milk powder. The total FDR (FDR_T) considers the dependency on both energy and animal protein.

III.2. Simulations and results

We calculated the three FDR for a sample of 131 developing economies, including 35 SIS in the sense of the United Nations Secretariat (hereafter, SIS) and 22 in the sense of the UNCTAD (hereafter, SIDS). Following influential works in the field (Guillaumont, 2010; Blancard & Hoarau, 2013, 2016), other groups, namely low-income countries (LIC) according to the World Bank, least developed countries (LDC) according to the UNCTAD, non-island developing countries (NIDVP), and non-island non-LDC countries (DVP), are considered to assess the specificity of insularity (Table 1). Data concerning imports, exports, and the production of commodities are extracted from the food balance sheet (FBS) of the FAO.⁴ The FBS gathers data for each country of interest that are based on national data, information from trade partners, and estimations. Data on the food aid are extracted from FAO's Food aid sheet, whose source is the World Food Program (WFP).⁵ Data are averaged over a 10-year (2003–2012) period to smooth out the effect of exceptional events.

First, a significant correlation exists between FDR_T , FDR_E , and FDR_P , with an especially strong coefficient between FDR_T and FDR_E : Spearman's rho is higher than 0.96 and the p-value of this test is zero, meaning the null hypothesis is rejected at $\alpha = 0.01$. This correlation is not surprising as commodities relative to energy account for about $\frac{3}{4}$ of all commodities considered here. Second, Table 2 and Figure 2 put forward that, on average, the developing world is not particularly food dependent with a median and mean of 31.594 and 40.385, respectively. In general, the dependency on energy is relatively more pronounced than the one on animal protein due to their perishable nature of the latter, which does not facilitate foreign trade (Table 2). However, standard errors and the boxplot analysis show that this outcome hides a large heterogeneity. Indeed, our sample covers a large spectrum, from the least food dependent country, India (0.33%), to the most food dependent one, Oman (140%). Third, when considering the two features of insularity and development level, several interesting but not surprising findings emerge.

On one hand, insularity is a clear constraint for food self-sufficiency. The two island groups, SIDS and SIS, have scores (median and mean) significantly higher than the average of the developing world, as well as the mean scores of the other groups, that is, the LDC, LIC, NIDVP, and DVP (Table 2). Moreover, a ranking analysis by quarters shows that no SIS is ranked in the first quarter (*i.e.*, the quarter of the least food dependent economies). Conversely, 20 SIS out of 35 are located into the fourth quarter of the most food dependent countries. We can add 11 others if we consider the third quarter. Following the global trend, this relative food dependency is more intense in terms of energy than of animal protein, even if both items display strong scores. By contrast, the

4 <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.

5 www.fao.org/faostat/en/#data/FA. In the special case of French Overseas Regions (FOR), data are obtained from the French customs and the French Ministry of Agriculture (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar-web/disaron/%21searchurl/searchUiid/search.disar>).

non-island developing economies, namely the NIDVP and DVP, appear weakly food dependent, with averages of 30.442 and 35.044, respectively, which support the fact that being an island is a serious impediment to reaching food independence. Their traditional features explain this finding as follows. First, their small sizes do not allow them to have important agricultural sectors. Second, the residual agriculture often concerns cash crops or fruits and vegetables, which are not accounted for in the food dependency ratios. Finally, some of their economies are driven by tourism, which can deteriorate food dependency even more because of the increasing population in some periods of the year. In short, for SIS, food dependency is clearly a structural phenomenon.

Table 1: Groups of developing countries

Groups	Countries
Developing World (ALL)	All 127 developing countries + Guadeloupe, French Guyana, Martinique, Réunion.
Small island developing states according to the United Nations Conference on Trade and Development (SIDS)	Antigua and Barbuda, Bahamas, Barbados, Cabo Verde, Comoros, Dominica, Fiji, Grenada, Jamaica, Kiribati, Maldives, Mauritius, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent and the Grenadines, Samoa, Sao Tome and Principe, Seychelles, Solomon Islands, Timor-Leste, Trinidad and Tobago, Vanuatu.
Small island spaces according to the United Nations Secretariat (SIS)	SIDS + Belize, Cuba, Cyprus, Dominican Republic, French Guyana, Guadeloupe, Guinea-Bissau, Guyana, Haiti, Martinique, Réunion, Singapore, Suriname.
Low-income countries according to the World Bank (LIC)	Afghanistan, Benin, Burkina Faso, Central African Republic, Chad, Comoros, Democratic People's Republic of Korea, Ethiopia, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Haiti, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mozambique, Nepal, Niger, Rwanda, Senegal, Sierra Leone, Tajikistan, Togo, Uganda, United Republic of Tanzania, Yemen, Zimbabwe.
Least developed countries according to the United Nations Conference on Trade and Development (LDC)	Afghanistan, Angola, Bangladesh, Benin, Burkina Faso, Cambodia, Central African Republic, Chad, Comoros, Djibouti, Ethiopia, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Haiti, Kiribati, Lao People's Democratic Republic, Lesotho, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mauritania, Mozambique, Myanmar, Nepal, Niger, Rwanda, Sao Tome and Principe, Senegal, Sierra Leone, Solomon Islands, Sudan, Timor-Leste, Togo, Uganda, United Republic of Tanzania, Vanuatu, Yemen, Zambia.
Non-island developing countries (NIDVP)	ALL – SIS
Non-island, non-LDC countries (DVP)	ALL – SIS – LDC

Note: Micronesia, Marshall Islands, Palau, and Tuvalu also belong to the list of SIS by the United Nations. However, we do not include them due to the lack of data.

On the other hand, the development level does not appear as a discriminating factor for food independence. Therefore, two sets of countries, both poor and emerging economies, display rather low global scores in Table 2: averages of 21.223 and 26.675 for LDC and LIC and of 35.044 for DVP. However, despite the similar performances, their underlying factors are very different.

Emerging economies (here, DVP) seem to have succeeded in producing enough food for their own populations. Even if they sometimes remain importers of commodities, they are also some of the most productive food producers worldwide. Unsurprisingly, they are rather independent.

Table 2: Standard statistics for the FDR_t , all developing groups.

Groups	Min	1st qu.	Med	Mean	3rd qu.	Max	Standard error
ALL	0.329	10.748	31.594	40.385	64.608	140.239	33.191
SIDS	10.961	65.872	80.029	75.137	91.649	130.989	28.120
SIS	10.961	45.077	75.347	68.753	90.487	130.989	28.792
LIC	2.165	6.591	13.645	21.223	28.968	79.949	20.580
LDC	1.174	6.033	14.466	26.675	34.827	94.866	28.049
NIDVP	0.329	8.919	21.913	30.442	47.913	140.239	28.669
DVP	0.329	12.087	26.200	35.044	49.289	140.239	29.149

Note: ALL: all countries, SIDS: small island developing states according to the UNCTAD, SIS: small island spaces according to the UN Secretariat, LIC: low-income countries according to the World Bank, LDC: least developed countries according to the UNCTAD, NIDVP: non-island developing countries, DVP: non-island, non-LDC developing countries. The countries in each category are listed in Table 1.

Source: Authors' calculations.

The conclusions are more complex for LDC and LIC. Agriculture is an important part of their production. We have previously shown that rural regions suffer less than urban ones from economic shocks, especially when these latter one affect the global food market. As such, countries with an important subsistence farming sector are more likely to be food independent, since the population produces its own food. However, the low dependency on imported foods could also be explained by their low-income status. These countries do not have the opportunity to participate in foreign trade, that is, they do not have the currency required to buy food on the global market. Moreover, most of these economies benefit from aids by the WFP.⁶ The distinction between these two potential sources of low food dependency is not as evident, but different combinations of both factors for each country can likely explain their relative food independence.

⁶ Over the considered period (2003–2012), 95 countries in our dataset have benefit at least once from the World Food Programme (see FAOSTAT, Food Aid Shipment Sheet, data from the WFP, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FA>).

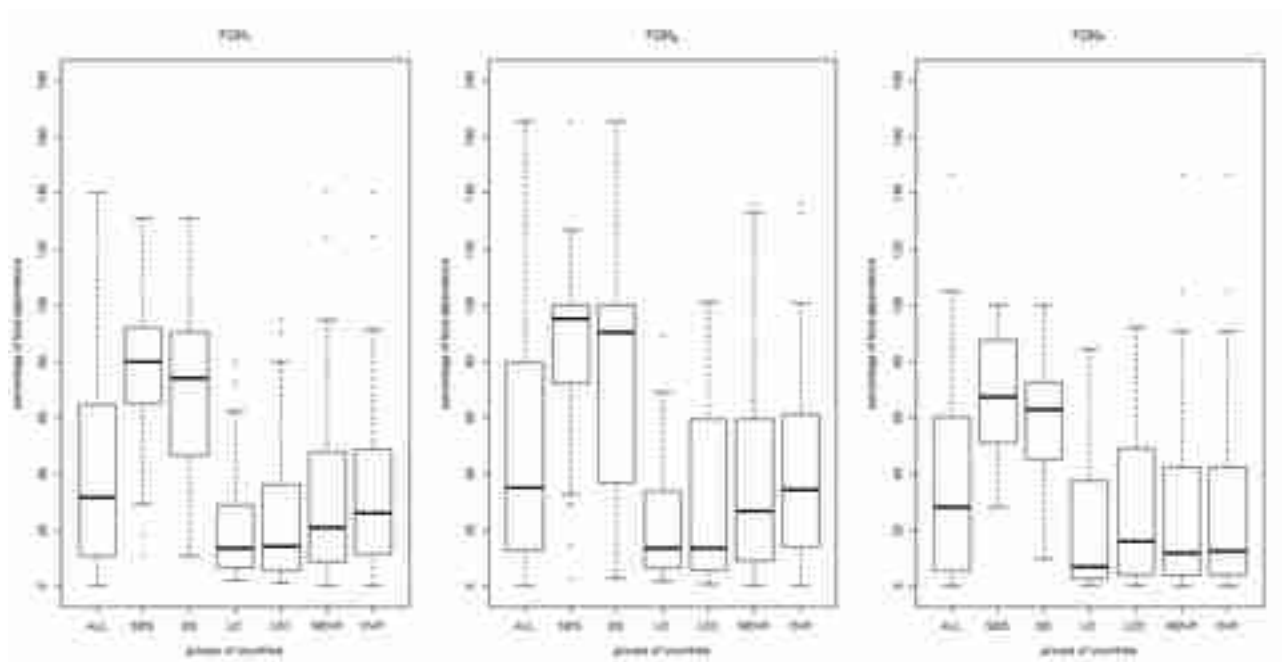


Figure 2: Food dependencies for each group of countries: boxplot analysis

Note: ALL: all countries, SIDS: small island developing states according to the UNCTAD, SIS: small island spaces according to the UN Secretariat, LIC: low-income countries according to the World Bank, LDC: least developed countries according to the UNCTAD, NIDVP: non-island developing countries, DVP: non-island, non-LDC developing countries. The countries in each category are listed in Table 1.

Source: Authors' calculations.

IV. A NEW STRUCTURAL ECONOMIC VULNERABILITY INDICATOR INTEGRATING FOOD DEPENDENCY

Since the 1994 United Nations conference in Barbados, many studies have tried to build economic vulnerability indicators that focus on integrating the features of SIS (see Blancard and Hoarau 2016 for a literature review). Among all formulations, that of the UNCDP appears the most suitable for analyzing the special cases of SIDS and SIS, particularly the least developed ones (United Nations, 1999; Guillaumont, 2004b, 2009b). Indeed, this indicator focuses directly on structural vulnerability, which makes it convenient to identify economies that need to retain the attention of the international community.⁷

IV.1. Methodological framework for computing the EVI

In the latest version, released in 2011, UNCDP's EVI has two main components:⁸ (i) the size and frequency of exogenous shocks (observed or anticipated) and (ii) exposure to shocks. The first component, which measures growth volatility due to exogenous shocks, has three sub-indices: (i) victims of natural disasters (VND), (ii) an agricultural production instability index (API), and (iii) an indicator of the instability of exports of goods and services (EI). The second component, which measures the importance of structural exposure to external shocks, consists of five elements: (i) population size (POP); (ii) an export concentration coefficient (ECC); (iii) remoteness from major world markets (REM); (iv) the share of agriculture, including fisheries and forestry in GDP (SA); and (v) the share of the population in low elevated coastal areas (POPLCA). Here, following the literature on food self-sufficiency, we remove variable (iv) and introduce a new variable, the food dependency ratio. Using the FDR_T in our vulnerability analysis gives a more positive role to agriculture.

Figure 3 represents the new EVI (dimensions, variables, and associated weights), the FDEVI.

7 As such, UNCDP's EVI is one of the three criteria used for identifying the LDC. The two other criteria are gross national income per capita and the human assets index. Therefore, to be considered a LDC, a country must be a low-income country with a low level of human capital and high vulnerability (Guillaumont, 2010).

8 All relevant information on the raw data (rationale, methodology of construction, time span, and data sources) are shown in Table 3.

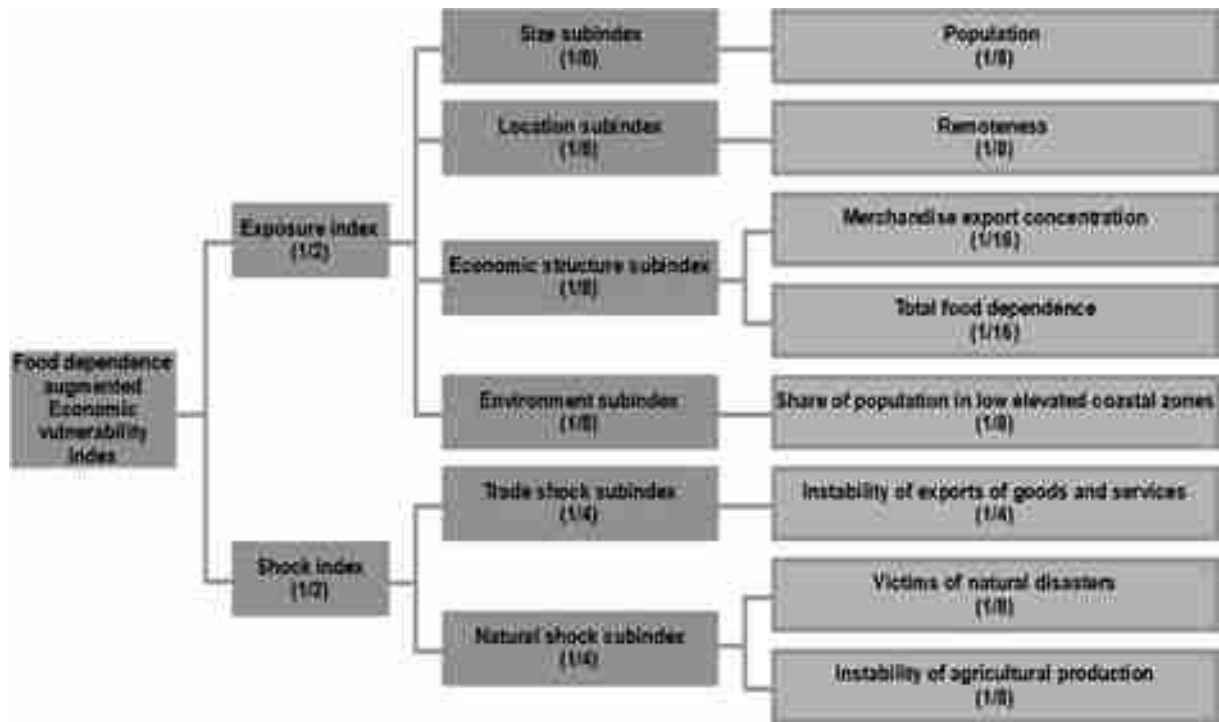


Figure 3: Structure of the FDEVI
Source: Elaborated by the authors.

Not all raw data (sub-components) are denominated in the same unit. Therefore, before aggregating, the min-max standardization procedure is implemented as follows:

For the variables positively related to economic vulnerability:

$$I = 100 \times \frac{\text{observed value} - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}};$$

For the variables negatively related to economic vulnerability:

$$I' = 100 \times \frac{\text{Max} - \text{observed value}}{\text{Max} - \text{Min}}.$$

The description of the variables, their units, and range and bounds for the min-max method are shown in Table 3.⁹

Second, we aggregate the normalized sub-components into an overall index to obtain the FDEVI. Conventionally, the average approach consists of combining arithmetically a set of three sub-components with equal weights reflecting the intensity of exogenous shocks and a set of five sub-components with equal weights reflecting the exposure to these shocks, so that:

$$FDEVI = \frac{1}{2} \times \text{Shock index} + \frac{1}{2} \times \text{Exposure index}$$

⁹ For all conventional dimensions, the official min and max values have been retained. In the absence of studies that define the categories of states for food dependency, it was not easy to determine the thresholds used for the min-max method. The two bounds used here (10% and 100%) are arbitrary and can be discussed.

$$\text{Schock index} = \frac{1}{4} \times \text{API} + \frac{1}{4} \times \text{VND} + \frac{1}{4} \times \text{EI}$$

$$\text{Exposure index} = \frac{1}{4} \times \text{POP} + \frac{1}{4} \times \text{REM} + \frac{1}{4} \times \text{POPLECA} + \frac{1}{8} \times \text{ECC} + \frac{1}{8} \times \text{FDR}$$

Table 3: Variable descriptions for the standard EVI and FDEVI (unit, thresholds, sources, and time coverage)

Variable	Unit	Bounds for min-max Transformation	Sources	Time coverage
Population	logarithm of inhabitants	$\ln(150,000)$ – $\ln(100,000,000)$	UN World Population Prospects 2017	2017
Remoteness	logarithm of km adjusted by landlockness	10–90	Centre d'Études Prospectives et d'Informations Internationales, UN National Accounts Main Aggregates Database	2014–2016 average
Merchandise export Concentration	Herfindahl-Hirschman index	0.5–0.95	UN Conference on Trade and Development	2014–2016 average
Share of agriculture, fisheries and forestry in GDP	%	1%–60%	UN National Accounts Main Aggregates Database	2014–2016 average
Food dependency	%	10%–100%	FAOSTAT, World Food Program, French Ministry of Agriculture, French Customs	2003–2012 Average
Share of population in low elevated coastal zones	%	0%–35%	Center for International Earth Science Information Network at Columbia University	2010
Instability of exports of goods and services	adjusted deviation to a 20-years trend	5–35	UN National Accounts Main Aggregates Database	1996–2016 trend
Victims of natural disasters	‰ inhabitants	0.005‰–10‰	Emergency Disasters Database (EM-DAT), UN World Population Prospects	1997–2016 average
Instability of agricultural production	adjusted deviation to a 20-years trend	1.5–20	FAOSTAT	1994–2014 trend

Source: UN Committee for Development Policy, <https://www.un.org/development/desa/dpad/least-developed-country-category/evi-indicators.html> (consulted November 13, 2018).

In short, relative to the normalization procedure, the range for the FDEVI is 0–100 and the closer the score is to 100 the more a country is economically vulnerable. Its structure is similar to the EVI, with only the share of the agriculture in the GDP being replaced by the total food dependency in the exposure index.¹⁰ The food dependency dimension thus only accounts for 6.25% of the total FDEVI.

IV.2. Results and discussion

As previously discussed, our simulations cover a sample of 131 countries for year 2015. Due to its weak weight in the global index (6.25% of the total score of the FDEVI), substituting the share of agriculture in GDP by the food dependency ratio does not influence that much the world ranking in the field of global economic vulnerability. However, this strong correlation should not obscure the presence of large rank variations. Indeed, Table 20 (Appendix A.1) shows that many countries are associated with important gains or losses. The largest changes are in Ethiopia (-28), Oman (+28), and the United Arab Emirates (+28).

The FDEVI and EVI are highly correlated (Table 18). Moreover, no major difference exists in the correlations between the two composite indices and the eight sub-indicators. Both indices are structurally balanced. The correlation coefficient between FDEVI and “total food dependency” is surprisingly weak and insignificant. This outcome emphasizes that many LDC countries highly vulnerable in most dimensions are at the same time food self-sufficient.

Otherwise, our new assessment of structural economic vulnerability provides strong support to earlier works in the field. Despite of some heterogeneity, Table 4 shows high FDEVI scores for the insular groups (SIDS: 45.453 and SIS: 44.340), both relative to the sample mean (33.989) and to non-insular groups (NIDVP: 34.699 and DVP: 27.325).¹¹ However, small islands appear more economically vulnerable than the groups usually considered as the most fragile, that is, LDC (39.402) and LIC (37.735). The main reason is the introduction of the new component, FDR_T . As previously shown, islands are largely more prone to food dependency than most LDC, that is, the performance of the FDEVI is significantly above the EVI one for SIDS and SIS. Table 20 (Appendix A.1) shows the same conclusion by an over-representation of SIS in the third and fourth quarters characterizing the most economically vulnerable economies: 8 and 20 out of 35 small islands are in the third and the fourth quarters, respectively. Moreover, most countries downgraded under the new index are SIS.

10 Due to space considerations, we do not report the results concerning the index introducing both FDR_E and FDR_P . However, the findings are similar.

11 To consider the strong heterogeneity within each group, we test for the significance of the differences between groups by the Wilcoxon procedure. The results are shown in Table 19 (Appendix A.1).

Table 4: Standard statistics for the standard EVI and FDEVI, all developing groups, 2015.

EVI								
Groups	Min	1st qu.	Med	Mean	3rd qu.	Max	SD	NB
ALL	11.783	25.341	31.811	33.641	39.892	71.526	11.432	131
SIDS	25.575	33.610	40.468	41.817	47.238	71.526	11.246	26
SIS	16.762	31.965	40.430	40.716	48.821	71.526	11.797	35
LIC	24.859	32.865	36.067	39.212	42.276	70.663	10.583	28
LDC	24.859	33.460	38.162	40.424	45.873	71.526	10.761	40
NIDVP	11.783	24.242	30.263	31.062	36.903	70.663	10.191	96
DVP	11.783	20.671	26.418	27.377	31.551	58.950	8.699	65

FDEVI								
Groups	Min	1st qu.	Med	Mean	3rd qu.	Max	SD	NB
ALL	10.964	25.410	32.832	34.225	41.955	74.448	11.635	131
SIDS	29.869	39.053	44.054	45.338	50.108	74.448	10.645	26
SIS	20.120	35.092	42.891	43.695	49.891	74.448	11.158	35
LIC	22.583	29.135	34.694	36.754	39.777	72.632	11.181	28
LDC	22.583	30.105	35.870	38.672	43.804	74.448	11.644	40
NIDVP	10.964	23.603	29.187	30.773	35.700	72.632	9.778	96
DVP	10.964	21.590	27.409	28.077	32.768	59.124	8.662	65

Note: ALL: all countries, SIDS: small island developing states according to the UNCTAD, SIS: small island spaces according to the UN Secretariat, LIC: low-income countries according to the World Bank, LDC: least developed countries according to the UNCTAD, NIDVP: non-island developing countries, DVP: non-island, non-LDC developing countries. The countries in each category are listed in Table 1.

Source: Authors' calculations.

V. ENDOGENOUS WEIGHTING SYSTEM FOR THE FDEVI

The “official” exogenous weighting system method raises important concerns. It largely depends on the state-of-the-art and the choices of the operator. The decision to allocate the same weight to exposure and intensity is purely arbitrary. Moreover, the hierarchy between the groups of variables is questionable, since every variable carries several aspects of vulnerability. It is also impossible to precisely know the real weight of the variables in the constructed index. In the literature, there are more convenient ways to determine weights (see OECD, European Union & Joint Research Centre - European Commission, 2008 for a survey). We can separate them into two categories: one based on statistical models (*e.g.*, principal component/factor analysis, unobserved components model, and regression analysis) and a one based on public/expert opinion (*e.g.*, budget allocation process, conjoint analysis, and analytic hierarchy process). In the first category, we find the DEA approach proposed by Charnes et al., 1978. Compared to other methods, DEA avoids subjectivity, as it does not rely on expert judgment and public opinion polls, being solely based on the data and requiring few assumptions.¹² The output-oriented standard DEA model with multiple outputs (*i.e.*, indicators) and a single dummy input equal to unity is used to determine the weighting scheme (see Cherchye et al., 2007; Van Puyenbroeck & Rogge, 2017). As previously mentioned, this DEA model has been also called the BoD method (Melyn & Moesen, 1991), as it seeks the best weighting scheme in the absence of information on the true weights for each entity.

However, the DEA methodology is not without drawbacks due to the great flexibility in the selection of the original DEA weights. Concretely, sub-indicators having good performance may receive high weights and, inversely, the sub-indicators having bad performance may receive small weights. The first are overestimated, while the second are neglected. Models generating a common set of weights for all entities, like the one proposed by Hatefi and Torabi (2010), allow us to largely overcome this problem.

V.1. An efficient weighting method for the construction of composite indicators: Hatefi and Torabi’s DEA-based approach

First, we assume we have information for m countries about n sub-indicators, which allows the calculation of a composite indicator (CI). Let I_{ij} denote the value of country i with respect to sub-indicator j . Let also w_{ij} be the weight associated to sub-indicator j for country i . We seek to aggregate I_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$) into a CI for each country, as follows:

¹² For instance, the following assumptions are not required: (i) specific functional form of production frontier contrary to the conjoint analysis method for the utility function or (ii) absence of correlation between sub-indicators contrary to the principal component or regression analyses.

$$CI_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} I_{ij}, i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

At this level, the issue is the determination of the weights (w_{ij}) required to construct the composite indicator based on DEA. DEA is a method to evaluate the relative efficiency of units with multiple inputs and outputs using mathematical programming and focuses on each unit to select the weights assigned to the inputs and outputs. These weights are the most favorable and specific to each unit (Zhou, Ang & Poh, 2007).

In DEA literature, we find several adaptations of this methodology being used to generate common sets of weights (*e.g.*, Karsak & Ahiska, 2005, 2007; Hatefi & Torabi, 2010). Beyond the main advantage of DEA, which is to avoid the arbitrary attribution of weights, the common weight method also allows a fair assessment, since all entities share the same set of weights. In sum, all entities are compared on one scale only. Moreover, this type of model presents a high discriminating power, in particular among efficient units, compared to DEA-like models with best weights. In this paper, we exploit the approach of Hatefi and Torabi (2010), which is derived from Karsak and Ahiska (2005, 2007).

To understand this model, we start with the following DEA formulation, which computes the efficiency (or CI value) for entity (*e.g.*, country) o :

$$\begin{aligned} \max_o E_o &= \sum_{j=1}^n w_{oj} I_{oj} \\ \text{subject to:} \\ \sum_{j=1}^n w_{oj} I_{ij} &\leq 1 \quad i=1, 2, \dots, m \\ w_{oj} &\geq \varepsilon, \quad i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

where E_o is the efficiency of the evaluated entity, o . w_{oj} is the weight assigned to sub-indicator j for evaluated entity o . I_{ij} is the value of sub-indicator j of entity i . To ensure that none of the weights will take a zero value, we introduce constraint $w_j \geq \varepsilon$, where ε is a non-Archimedean small number (here, 0.001) and $E_o \in [0, 1]$. If $E_o = 1$, then the entity is deemed efficient.

For each entity o , model (2) seeks the best set of weights, which are then used to aggregate the sub-indicators into a performance score. Essentially, model (2) is an output maximizing multiplier DEA model with multiple outputs and constant inputs (Charnes *et al.*, 1978), in which the sub-indicators represent the different outputs and a single dummy input with value unity is assigned to each country.

Next, we consider d_o as the deviation of the efficiency of entity o (E_o) from the ideal efficiency equal to unity (i.e., $d_o = 1 - E_o$). Maximizing E_o is equivalent to minimizing d_o . Consequently, from model (2), we can deduce maximization model (3), which can be solved m times to provide the set of best weights for each entity:

$$\begin{aligned}
 & \min_{d,w} d_i \\
 & \text{subject to:} \\
 & \sum_{j=1}^n w_j I_{ij} + d_i = 1 \quad i=1,2,\dots,m \\
 & w_j \geq 0, d_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n
 \end{aligned} \tag{3}$$

Model (3) is estimated for each entity, which is why different weights are obtained. Thus, this model does not deal with the different systems of weights and the weak discrimination power of DEA, in which each entity is evaluated using different weight systems. Therefore, Hatefi and Torabi (2010) proposed to reformulate it as a new multi-criteria decision making (MCDM) model using a set of common weights, which simultaneously maximizes the efficiency scores of all entities. Specifically, they used *minimax* approach consisting on minimizing the maximum deviation among all entities (M):

$$\begin{aligned}
 & \min_{M,d,w} M \\
 & \text{subject to:} \\
 & M - d_i \geq 0 \quad i=1,2,\dots,m \\
 & \sum_{j=1}^n w_j I_{ij} + d_i = 1 \quad i=1,2,\dots,m \\
 & w_j \geq \varepsilon, d_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n
 \end{aligned} \tag{4}$$

where w_j are the weights of each sub-indicator j shared by all countries and ε is a small positive scalar considered as a lower bound of the weights. Constraint $M - d_i \geq 0, \forall i$ ensures that $M = \max\{d_i = 1, 2, \dots, m\}$. By using model (4), we can compute the composite indicator of country i , that is, $CI = 1 - d_i$. In this model, all entities are evaluated using the same set of weights. As noted by Karsak and Ahiska (2005), the minimax efficiency measure has a higher discriminating power than the classical efficiency measure, since it simultaneously considers the favor of all entities. Therefore, this method restricts the freedom of a particular entity to choose factor weights in its favor.

To remain in the range of benefit-of-the-doubt indices, the objective function in Model (4) should maximize a non-vulnerability value. To do so, we transformed the vulnerability variables (Figure 3) into “non-vulnerability” variables by computing the

V.2. Results and discussion

To cope with the arbitrary determination of the weighting scheme, we compare the standard FDEVI (m-score) with the one calculated from the multi-criteria DEA models in the spirit of Hatefi and Torabi (2010).¹³ Several interesting findings are discussed below.

First, we observe that the new method shows good discrimination performance. Only one best performer is revealed according to model (4), namely Turkey.

Second, from Table 18 (Appendix A.1), Spearman’s rank correlation coefficient relative to the standard FDEVI resulting from the DEA model is 0.9246, giving some robustness to the standard analysis based on equal weighting. Moreover, the p-value of this test is 0, so the null hypothesis is rejected at $\alpha = 0.01$. However, Table 20 (Appendix A.1) shows the presence of large rank variations, that is, for Uzbekistan (-25), Vietnam (-32), Uganda (-26), Madagascar (-28), Saudi Arabia (+39), Algeria (+42), Tunisia (+44), Jordan (+25), Sudan (-29), Kazakhstan (+38), Oman (+27), Kuwait (+27), Senegal (+28), Brunei Darussalam (+31), Singapore (+38), and the UAE (+41). One potential explanation is the structural effect of the relative importance of each dimension. Indeed, Table 5 points out that, contrary to the standard FDEVI, the correlation between DEA-FDEVI and the eight sub-indicators is not balanced. The dimensions of population, export concentration, and agricultural production instability drive the global index. Note that this structural effect should be detrimental (benefit) to small (large) entities.

Third, according to Table 5, the multi-criteria DEA simulations lead to an endogenous weighting scheme, which is highly different from that given by the standard FDEVI.¹⁴ The new weighting structure (DEAm) is less homogenous than the one resulting from the *ad hoc* system. Indeed, five dimensions (*i.e.*, population, remoteness, population in low coastal zone, numbers of victims of natural disasters, and export instability) now have lower weights what benefits to the three others (*i.e.*, export concentration, total food dependency, and mainly agricultural instability). This last finding gives support to the previously displayed structural effect.

13 The standard FDEVI (m-score) has been normalized to ensure its comparability with the FDEVI resulting from DEA-like models. Therefore, according to a scale factor, a value of 0 is assigned to the least vulnerable country and one between 0 and 100 to all relatively more vulnerable countries.

14 For comparison with the conventional approach, the values of the endogenous weighting schemes have been reduced to unity.

Table 5: Simulated and traditional weighting schemes for FDEVI

Dimensions	FDEVI		
	DEA	DEAm	Standard
Population	0.0010	0.0900	0.1250
Remoteness	0.0010	0.0900	0.1250
Population in low coastal zone	0.0010	0.0900	0.1250
Export concentration	0.0017	0.1499	0.0625
Total food dependency	0.0010	0.0900	0.0625
Numbers of victims of natural disasters	0.0010	0.0900	0.1250
Agricultural instability	0.0032	0.2856	0.1250
Export instability	0.0013	0.1146	0.2500

Source: Authors' calculations.

Finally, the analysis conducting by developing groupings supports the traditional wisdom of the standard EVI and FDEVI. Table 6 indicates that insular economies (SIS and SIDS) and the LDC groups remain more vulnerable than the other groups (ALL, LIC, NIDVP, and DVP) despite certain heterogeneity. Note that structural vulnerability is especially high for insular groupings. Substituting the *ad hoc* weighting system by a DEA simulated one widens the gap between average scores to the detriment of small islands, confirming that insularity increases economic vulnerability. Moreover, the third and fourth quarters, which include the most economically vulnerable countries, are largely dominated by SIS (Table 20, Appendix A.1).

Table 6: Standard statistics for the DEA-FDEVI, all developing groups, 2015.

Groups	Min	1st qu.	Med	Mean	3rd qu.	Max	SD	NB
ALL	0.000	14.658	24.653	25.734	34.942	64.323	13.225	131
SIDS	17.441	30.275	37.003	38.749	45.451	64.323	11.604	26
SIS	13.286	28.174	36.709	36.930	45.398	64.323	12.095	35
LIC	8.754	16.936	25.764	26.340	33.403	64.323	11.678	28
LDC	8.754	17.828	27.758	28.452	36.053	64.323	12.517	40
NIDVP	0.000	13.131	20.105	21.653	28.699	64.323	11.134	96
DVP	0.000	12.397	17.835	19.531	26.145	46.859	10.566	65

Note: ALL: all countries, SIDS: small island developing states according to the UNCTAD, SIS: small island spaces according to the UN Secretariat, LIC: low-income countries according to the World Bank, LDC: least developed countries according to the UNCTAD, NIDVP: non-island developing countries, DVP: non-island, non-LDC developing countries.

Source: Authors' calculations.

VI. CONCLUSIONS

In this paper, we revisited the literature on the structural economic vulnerability of the insular developing world by suggesting an innovative measurement approach based on both conceptual and methodological viewpoints. Our simulations showed that small islands, as a group, are the most structurally economic vulnerable entities in the developing world, even more than LDC. Their proneness to food dependency from outside due to both their smallness and colonial pasts, highly contributes to this state of vulnerability. In short, food dependency can be considered as a constraint for the growth and development of small islands. The main transmission channels are higher and more volatile food prices in international markets, and we have good reason to anticipate that this situation will persist for a long time.¹⁵ An increasing number of studies argue that the soaring prices of staple foods during the 2000s and the 2010s are signals of persistent shortages in the agricultural markets (Brown, 2011; International Monetary Fund, 2011). Our current agricultural model, based on the massive consumption of natural resources (*e.g.*, oil, water, biodiversity, land, phosphate), led to an unprecedented production growth but is coming to an end (Mbow *et al.*, 2019). Specifically, the prodigious growth is threatened by the depletion of these resources and by the pollution of both local and global “commons” (*e.g.*, rivers, groundwater, atmosphere) due to industrial production. At the same time, in the new context of climate change and considering the need for a carbon-free development model, the demand of agricultural crops for non-food uses strongly increased and will continue to increase in the medium/long run. Consequently, it is important for small islands to be aware of the potential worsening of their structural economic vulnerability in the future.

Accordingly, a clear structural strategy and bold political reforms must be adopted urgently. Considering the main drivers and triggers of international food price spikes mentioned above (see footnote 2), the more efficient solutions against permanent rises in foodstuff prices are clearly international, thus exogenous to SIS. Governments worldwide must reach agreement on all available options (Tadesse *et al.*, 2014). For instance, introducing caps on trading under extreme market situations or the taxation of food commodity futures trading in the spirit of the Tobin tax could prevent excessive speculative behaviors in commodity markets. Further, stopping the direct and indirect subsidies for biofuels and designing more flexible biofuel mandates in times of food crises should significantly reduce the pressure on the supply side. In the same vein, international storage would be an interesting option but only if conducted in full regional or global cooperation. Otherwise, the national storage policies with trade restrictions usually implemented by several agricultural powers (*e.g.*, China, India, Russia, Thailand) during crises result in grain scarcity and higher prices. Further, an increasing number of observers want to fix the food system by regulating the market to reduce the oligopolistic power of the agri-foods corporations (United Nations, 2011). Generally, in the context of a growing world population, concerted public and private investment is

¹⁵ Animal-sourced foods, which are indirectly affected by the cost and availability of feed, are also expected to see price increases, but their range is around half those of cereals (IPCC 2019).

crucial for boosting agricultural production and spurring sustainable development (Stewart *et al.*, 2008).

However, some possibilities exist locally as well. We claim that the most promising challenge is to significantly reduce the dependency on imported foods by increasing the internal agricultural capacity, that is promoting self-sufficiency without removing the possibility of foreign trade. In contrast with the contemporaneous dominant position extolling the unbridled liberalization of trade in foodstuffs, we call for the intervention of political authorities in favor of domestic farmers for giving them facilities to sustain local produce and improve local cereal yields. This will require a mix of agricultural research and development, irrigation, infrastructures and markets, as well as inward-looking protectionist policies (United Nations, 2011). We thus call for the comeback of the supportive role of the state in local agriculture. Note that the poorest SIS will not be able to reach this goal on their own but need the assistance of the international community for developing their agricultural sectors.

Moreover, as global warming is likely to push up energy and food prices sustainably, reducing dependency on imported foods is an option for SIS to face the consequences of climate change (Dogru *et al.*, 2019) and create locally opportunities for additional revenue (Golay, 2010). This is in line with the observation of the last “alarming” IPCC report (2019): “Given the likelihood that extreme weather will increase, in both frequency and magnitude, and the current state of global and cross-sectorial interconnectedness, the food system is at increasing risk of disruption (medium evidence, medium agreement), with large uncertainty about how this could manifest. There is therefore a need to build resilience into international trade as well as local supplies” (Mbow *et al.*, 2019). However, this will be a major challenge for SIS because they are also the first concerned with the persistent physical consequences of climate change, such as the rise in the sea level or violent storms (Closset *et al.*, 2017).

Although our model provides good insights, some improvements remain possible. Comparing our vulnerability index with indices computed using other endogenous weighting methods can help better determine the role of the computing method in creating composite indicators. The inclusion of fertilizers into the FDR could also help consider the dependency of crop systems on imported means of production. Moreover, we excluded seafood and fish from our food dependency ratio because of the very complex nomenclature of FAO tables. However, future studies could consider them because of their relative importance in some diets in developing countries.

Chapitre 2 :
L'agriculture réunionnaise face au défi de
l'autonomie alimentaire

I. INTRODUCTION

Les petites économies insulaires sont considérées comme des territoires particulièrement vulnérables sur le plan économique (Blancard & Hoarau, 2016). En particulier, la question de la dépendance alimentaire, c'est-à-dire le recours aux importations pour nourrir la population, est considérée comme un aspect majeur de leur vulnérabilité (Angeon & Bates, 2015a; Clapp, 2017; Blancard, Bonnet & Hoarau, 2021). La mise en place de politiques d'autonomie alimentaire devrait être un des moyens privilégiés de réduction de cette vulnérabilité. Or, rares sont les pays qui ont effectivement privilégié le développement de l'agriculture endogène face à la spécialisation exportatrice, qu'il s'agisse de denrées non vivrières, de produits miniers, de produits manufacturés ou de services (Berg *et al.*, 1981; Encontre, 1999). Nous avons montré dans un précédent article comme la dépendance alimentaire aggravait la vulnérabilité des espaces insulaires (Blancard *et al.*, 2021), et donc démontré la nécessité d'aller vers plus d'autonomie alimentaire pour ces territoires. Le développement de l'agriculture vivrière et la mise en place de politiques de substitution des importations par les produits locaux sont des outils nécessaires pour réduire la vulnérabilité structurelle des petites économies insulaires. Ce développement ne doit cependant pas se faire de manière aveugle et doit tenir compte des contraintes inhérentes à ces régions telles que la petitesse, la diversité du climat, la qualité du sol ou les pentes. Le but n'est pas l'autarcie complète, mais plutôt un équilibre raisonné entre dépendance aux importations, production vivrière et cultures d'exportation (Clapp, 2015).

Cet article propose une étude de cas d'un petit territoire insulaire particulier, l'île de la Réunion. L'agriculture réunionnaise moderne est l'héritière d'une histoire riche qui remonte au XVII^e siècle. Originellement « grenier des Mascareignes » (Bertile, 2013), l'île Bourbon puis île de la Réunion se spécialise dès le XVIII^e siècle dans les cultures d'exportation, en particulier la canne à sucre (Sueur, Cointat & Desplan, 2012). La seconde guerre mondiale et la départementalisation de 1946 entraînent une politique de rattrapage sur la métropole largement financée par les pouvoirs publics. En s'appuyant sur une réforme foncière, sur le développement des infrastructures et sur la structuration des filières de production, elles cherchent à répondre au triple objectif de l'autonomie alimentaire, du développement rural et de la réduction du chômage (de Cambiaire, 1983). Dans les années 1970, le Plan d'Aménagement des Hauts (PAH, les Hauts étant les zones d'altitude de la Réunion, éloignées des centres économiques) complète ce dispositif en accompagnant le développement des zones les plus reculées de l'île (Benoit, 2015; Marblé *et al.*, 2018).

Les politiques de réduction du chômage et de développement rural ont fait l'objet d'évaluations diverses (de Cambiaire, 1983; Coder *et al.*, 2016). L'objectif de l'autonomie alimentaire a en revanche été peu étudié. Malgré des gains de productivité importants depuis les années 1950, celle-ci ne s'est pas améliorée du fait de l'augmentation de la population et du niveau de vie. Cet article propose d'étudier la dépendance alimentaire à la Réunion par l'étude des données

disponibles à différents niveaux (FAO, Douanes, Statistiques agricoles, observatoire des importations). Il propose en particulier (i) de resituer la Réunion dans un ensemble de territoires insulaires quant à la vulnérabilité et à la dépendance alimentaire, (ii) de réaliser un état des lieux de l'agriculture réunionnaise et de la contribution des différentes filières à l'autonomie alimentaire et (iii) de proposer des pistes d'amélioration de l'autonomie alimentaire à l'échelle de l'île.

II. DÉPENDANCE ALIMENTAIRE À LA RÉUNION ET DANS D'AUTRES ÉCONOMIES INSULAIRES

Chiffrer la dépendance alimentaire est un exercice difficile car il nécessite de prendre en compte de nombreux produits et leurs présentations. Nous utilisons le ratio de dépendance alimentaire, défini comme le rapport entre les importations et la consommation apparente (production + importations – exportations), l'ensemble étant exprimé en tonnages (FAO, 2012). En utilisant une méthodologie définie dans un précédent article (Blancard *et al.*, 2021), nous présentons différents indicateurs de dépendance alimentaire pour la Réunion, les autres DOM et des petits territoires insulaires du Sud-Ouest de l'Océan Indien (Tableau 1). En reprenant les données détaillées issues du même article, nous présentons également la vulnérabilité économique sans (EVI) et avec (DEA-FDEVI) prise en compte de la dépendance alimentaire et pondération endogène.

Tableau 7: Dépendance alimentaire des DOM et de trois petits territoires insulaires de l'Océan Indien.

Territoire	totale	Dépendance alimentaire (%)	
		Énergie (céréales et tubercules)	Protéines animales
Réunion	51,6	91,8	28,2
Guadeloupe	74,2	87,6	60,5
Guyane	11	3	61,8
Martinique	57,9	29,5	66,9
Comores	29,1	28,9	30,5
Maldives	100	100	100
Maurice	94,5	105,4 ¹⁶	78,7

Source : Blancard *et al.*, 2021.

Au niveau des DOM, la Réunion est relativement peu dépendante du point de vue alimentaire. Cela tient notamment à la force de ses filières d'élevage qui permettent de limiter la dépendance sur les protéines animales (Tableau 7). Seule la Guyane, du fait d'un fort développement de la culture de riz (IEDOM, 2007), présente une dépendance alimentaire plus faible. À l'échelle du Sud-Ouest de l'Océan Indien, les Comores sont le territoire le moins dépendant du fait de la forte présence d'agriculture vivrière. À l'inverse, les îles à spécialisation touristique (Maldives) ou dont l'agriculture est tournée vers l'exportation (Maurice) présentent une dépendance alimentaire très forte. Là encore, la Réunion apparaît comme relativement autonome notamment grâce au développement de l'élevage.

Pour les îles très dépendantes (Maldives, Maurice), la dégradation du score et du classement de vulnérabilité est nette lorsque la dépendance alimentaire est prise en compte (Tableau 8). Les

16 Une dépendance alimentaire supérieure à 100 signifie qu'une partie des produits importés sont destinés à la réexportation.

territoires relativement autonomes au niveau alimentaire, dont la Réunion, voient leur vulnérabilité diminuer lorsque la dépendance alimentaire est prise en compte dans l'évaluation (Tableau 8). Cependant, cette diminution de la vulnérabilité ne s'accompagne pas toujours d'un gain de rang. Il est donc intéressant de travailler à réduire la dépendance alimentaire y compris lorsque celle-ci est déjà faible.

Tableau 8: Vulnérabilité économique des DOM et de trois petits territoires insulaires de l'Océan Indien.

Territoire	EVI		DEA-FDEVI	
	score	rang	score	rang
Réunion	27	40	17,4	44
Guadeloupe	26,3	37	27,1	74
Guyane	62,6	129	50	127
Martinique	29	48	28,5	80
Comores	45,8	115	29,6	86
Maldives	49,9	121	54,1	128
Maurice	25,6	34	26,6	73

EVI : indice de vulnérabilité économique de l'ONU . DEA-FDEVI : indice de vulnérabilité (Guillaumont, 2009a) économique avec prise en compte de la dépendance alimentaire et pondération endogène. Le classement est effectué sur 131 territoires en développement et DOM, le territoire noté 1 étant le moins vulnérable. Source : Blancard et al., 2021.

III. L'AGRICULTURE À LA RÉUNION, ENTRE VISÉE EXPORTATRICE ET RECHERCHE D'AUTONOMIE

Après avoir montré l'intérêt de développer l'autonomie alimentaire à la Réunion, nous nous attacherons à présent à identifier les gisements potentiels d'autonomie. Dans un premier temps, nous présenterons l'agriculture réunionnaise et les filières qui la composent. Nous étudierons ensuite le potentiel de chaque filière pour l'amélioration de l'autonomie.

III.1. L'organisation en trois pôles de l'agriculture réunionnaise

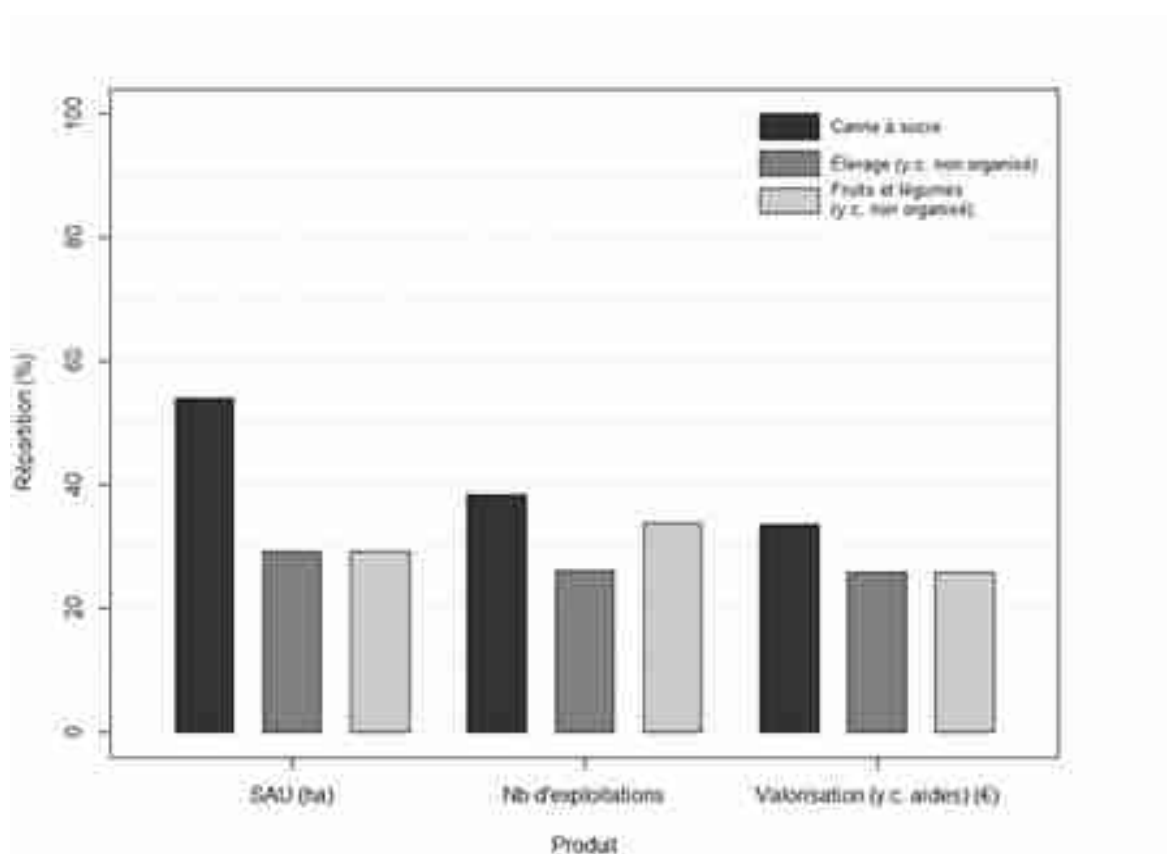


Figure 4: Répartition de la SAU, du nombre d'exploitations et de la valorisation par production en 2017 à la Réunion.

Source : Mémento la Réunion 2018.

L'agriculture réunionnaise repose sur trois piliers (Figure 4). La canne à sucre, culture à visée exportatrice, occupait 22 664 hectares en 2017 (54% de la SAU) et constituait en 2013 l'unique activité pour 3107 exploitations (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021b). Le second pilier est constitué de l'élevage, qui concerne environ 12 000 ha (29% de la SAU) et près de 900 exploitations spécialisées (DAAFR, 2018). Il se partage entre l'élevage de bovins, alimentés avec

des fourrages locaux et des concentrés importés et l'élevage en bâtiment de monogastriques, nourris uniquement avec des aliments importés. L'élevage de petits ruminants est peu structuré et principalement conduit par de petites unités familiales (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021c). Le troisième pilier est constitué des autres cultures végétales, parmi lesquelles les fruits et légumes destinés en majorité au marché local. Ces cultures occupent environ 10 000 ha dont près de la moitié chez des particuliers sous forme de jardins créoles (DAAFR, 2018).

III.2. Les grandes cultures

Les grandes cultures à la Réunion concernent presque exclusivement la canne à sucre (DAAFR, 2018). La production de sucre est assurée par deux usines sucrières qui drainent les deux bassins de plantation de canne à la Réunion, le Sud et l'Ouest d'un côté et le Nord et l'Est de l'autre. Pour l'année 2018, considérée comme particulièrement mauvaise par les professionnels (CTICS, 2018), la production était de 145 750 tonnes (Agreste, 2020) dont 110 500 tonnes exportées majoritairement vers la France métropolitaine pour une valeur de 39 millions d'euro (Douanes françaises, 2020). La force de l'interprofession permet d'avoir des prix garantis pour les planteurs malgré une certaine dépendance aux marchés mondiaux du sucre. Par ailleurs, sa résistance relative aux cyclones en fait une culture sûre pour les planteurs. La canne à sucre est fortement pourvoyeuse d'emplois, avec une surface moyenne par planteur de 7,3 ha (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021b). Malgré une diminution continue des surfaces, l'amélioration des rendements a permis un maintien de la production totale à la Réunion (Figure 5). La culture présente également un intérêt patrimonial et écologique important. Elle contribue au maintien des paysages et limite l'érosion par son caractère pérenne. Enfin, la valorisation des coproduits (mélasse transformée en rhum et bagasse énergie) assure une certaine indépendance de la Réunion au niveau énergétique (DAAFR, 2020a).

L'autonomie alimentaire sur les produits des grandes cultures est très faible. 104 ha étaient déclarés en céréales et oléo-protéagineux en 2017. Le riz est aujourd'hui la principale céréale consommée à la Réunion. Le volume des importations, en majorité du Sud-Est asiatique, s'élève à plus de 40 000 tonnes. Entre 2010 et 2018, les importations de riz ont diminué de 15 000 tonnes environ (DAAFR, 2019a); dans le même temps, les importations totales de céréales ont augmenté de 25 000 tonnes (Douanes françaises, 2020). La diminution des importations de riz est donc davantage due à sa substitution par d'autres produits amylacés dans l'alimentation qu'à une hypothétique production locale, aujourd'hui confidentielle.

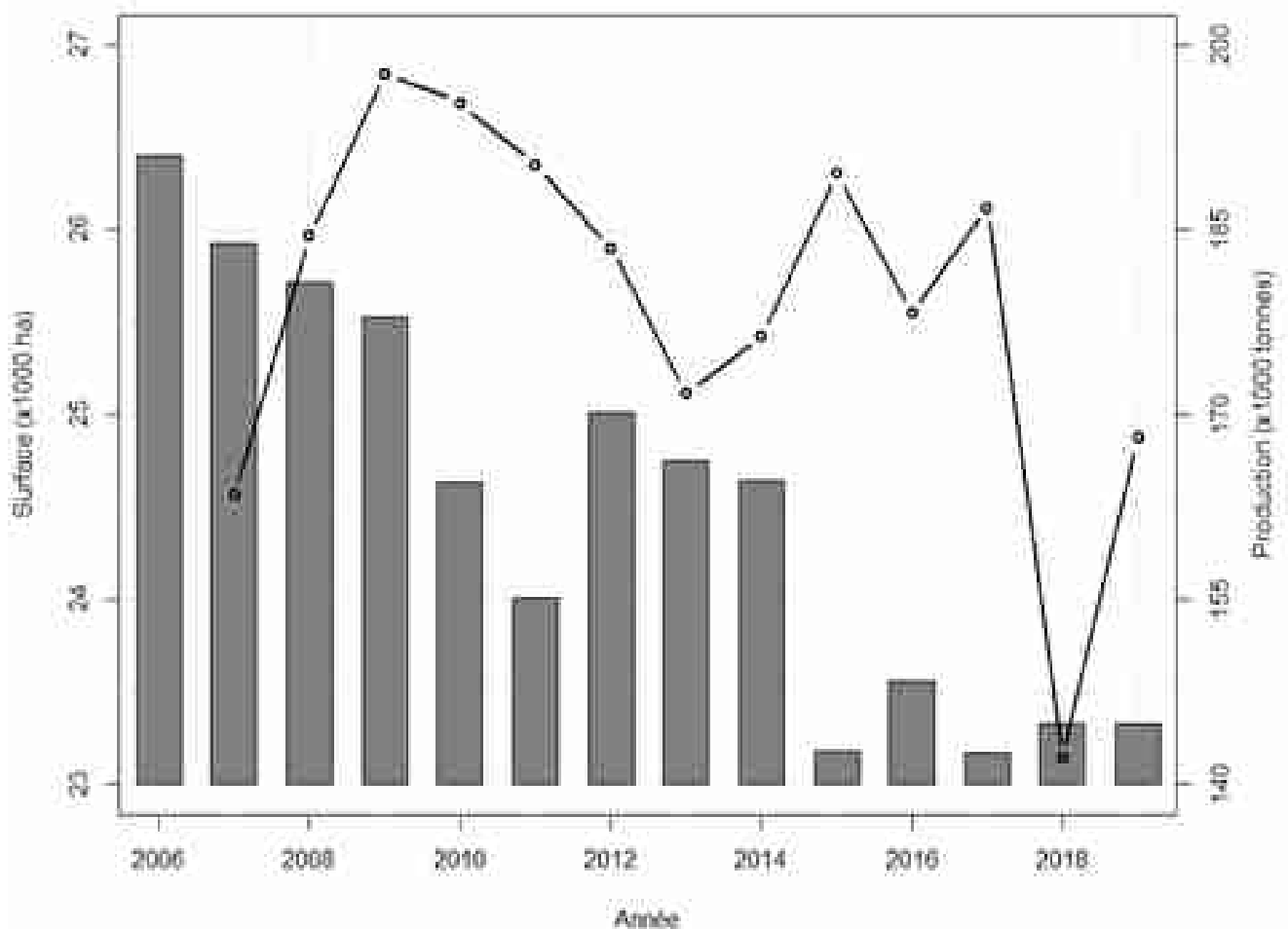


Figure 5: Surface développée en canne à sucre (histogramme, gauche) et production de canne à sucre (ligne, droite) à la Réunion.

Source : Agreste.

III.3. L'élevage

L'élevage à la Réunion repose sur un petit nombre de groupements assurant 80% à 100% de la production (DAAFR, 2018), le reste étant assuré par de petites unités. Les filières monogastriques (porc et volaille) reposent sur une intégration verticale forte des élevages et un recours presque exclusif aux aliments concentrés issus de matières premières importées. Elles assurent 93% du tonnage de viande produite à la Réunion (DAAFR, 2018). La filière bovine allaitante est organisée selon une complémentarité entre les Hauts (>800 m d'altitude) où se situe l'activité de production de broutards (éleveurs naisseurs) et les Bas où les broutards sont engraisés à l'auge (Mandret *et al.*, 2000; Choisis, Grimaud & Lassalle, 2009). Une seule coopérative assure 94% de la production de viande bovine. La production de broutard se fait exclusivement à l'herbe, avec une faible complémentarité en concentrés (Photographie 3). Les élevages naisseurs sont

extensifs, avec parfois une diversification en pommes de terre (Marblé *et al.*, 2018; Réseaux d'élevage DOM *et al.*, 2018). (Photographie 5). À l'inverse, la phase d'engraissement repose sur de l'affouragement en vert ou des fourrages conservés et sur une forte complémentation en concentrés (Photographie 4). La filière laitière regroupait en 2020 58 exploitations au sein d'une coopérative qui assure la totalité de la production laitière de l'île (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021c). Les systèmes de production sont semi-intensifs à intensifs (chargements 1,5 – 3,1 UGB/ha) avec un fort recours aux concentrés (10 – 16 kg/VL/jour) (Marblé *et al.*, 2018). La production de lait locale couvre 40% de la consommation (Agreste La Réunion, 2019a). À l'inverse des autres, les filières de petits ruminants (ovins et caprins) sont peu organisées (93 éleveurs adhérents à la coopérative sur 1524 et environ 50% de la production) avec un grand nombre d'éleveurs indépendants tournés notamment vers le marché de l'abattage religieux (Fontaine *et al.*, 2008).

L'autonomie sur les protéines animales est d'environ 71,8% (Tableau 7). Elle est de 40 à 50 % pour les filières monogastriques (Figure 6). Pour ces viandes, la date limite de consommation est relativement courte après abattage. Les importations de viande fraîche ne peuvent donc se faire qu'en avion, le délai de mer pour des importations en conteneur maritime réfrigéré étant trop élevé. Or, le coût d'importation en avion est prohibitif. La consommation de viande fraîche de monogastrique est donc couverte intégralement par la production locale. En revanche, les importations peuvent exister sous forme congelée. Celles-ci peuvent être destinées à la vente au consommateur en découpe ou sous forme de volaille entière, ou destinées à la transformation.

La production de viande bovine a diminué de 1800 tonnes équivalent carcasse (tec) en 2009 à 1580 tec en 2018 (DAAFR, 2019a), le taux de couverture passant de 33 % à 25 %. La viande bovine est concurrencée par les importations y compris sur le segment de la viande fraîche, d'où un taux de couverture sur le frais inférieur à 50% (Figure 3). En effet, les muscles sous vide (prêt à découper) ont une date limite de consommation plus longue couvrant les délais de mer et la commercialisation. Cela concerne notamment la viande de vache laitière de réforme de France métropolitaine (DAAFR, 2019c). La filière laitière de la Réunion est aujourd'hui également loin de l'autonomie. De 24 millions de litres en 2007, la production a diminué à 18,2 millions de litres en 2018. L'érosion du nombre d'éleveurs est continu, celui-ci étant passé de 120 à 58 entre 2007 et 2020 (Agreste La Réunion, 2019a; Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021c). La production locale couvrirait 40 % de la consommation en 2018 et a donc une marge de progression importante en termes d'autonomie.

L'alimentation des animaux d'élevage est par ailleurs un contributeur important de la dépendance alimentaire de la Réunion. En 2015, l'Urcoopa, coopérative de fabrication d'aliment du bétail, a commercialisé 224 500 tonnes d'aliments, dont 16 % pour les ruminants (Urcoopa, 2020b). La majorité des matières premières (hors son de blé, brisures de riz, mélasse et huiles végétales, issus des coproduits de transformation alimentaire réalisée sur l'île) sont issues de l'importation (Urcoopa, 2020a). Parmi les quatre citées précédemment, toutes sauf la mélasse sont des coproduits d'industries alimentaires utilisant des matières premières importées.

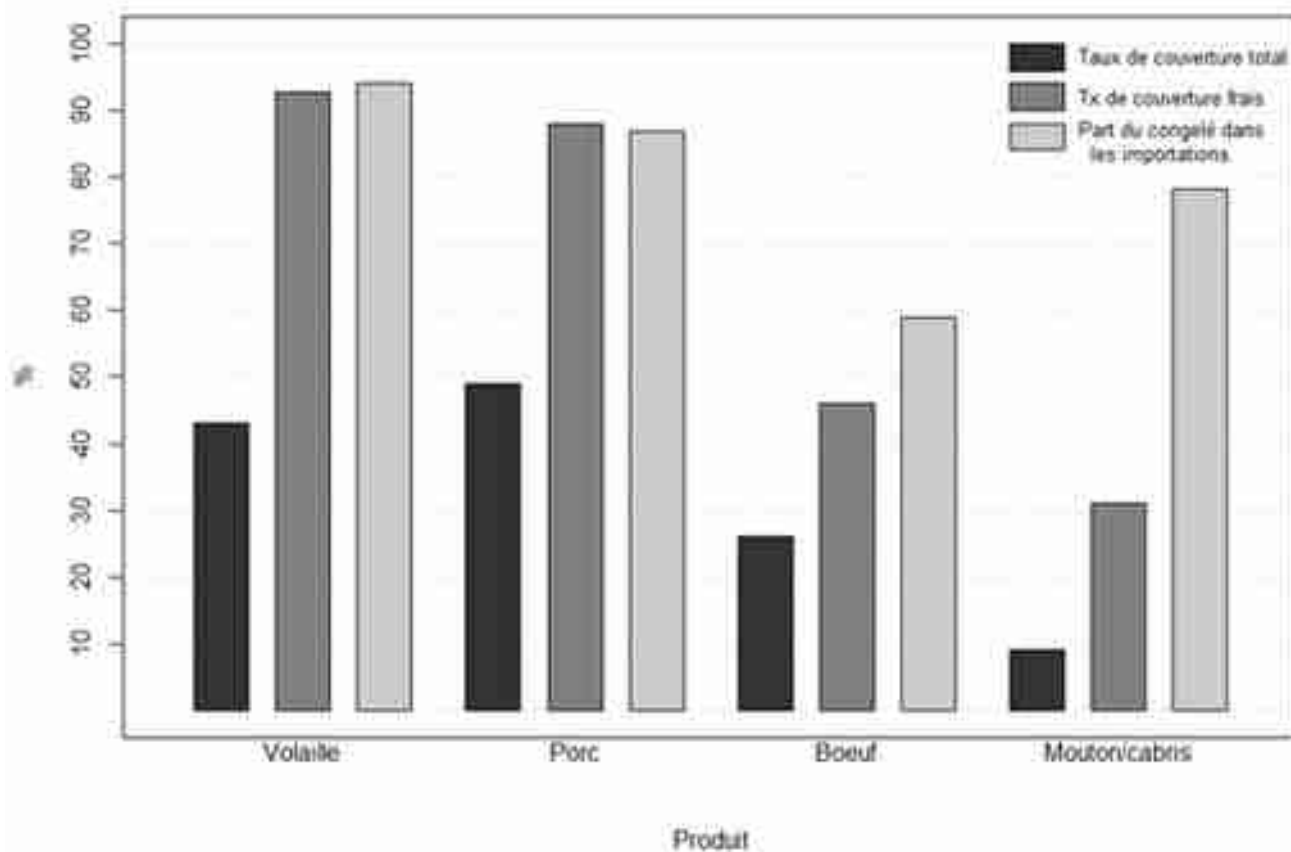


Figure 6: Taux de couverture total (gauche), taux de couverture en frais (centre) et part des produits congelés dans les importations (droite) pour les viandes à la Réunion en 2018.
 Source : Observatoire des importations 2019

III.4. Les productions fruitières et légumières

La filière fruits et légumes est relativement peu organisée (DAAFR, 2020b) : les neuf groupements existants ne regroupent qu'environ 30% des producteurs. Les productions sont très variables selon les années du fait des accidents climatiques (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021b). Par ailleurs, la récente apparition de la mouche orientale des fruits *Bactrocera dorsalis* est la cause de pertes importantes et menace un grand nombre de productions légumières et fruitières (FDGDON de la Réunion, 2017).

L'autonomie sur les légumes est stable sur la période 2009-2018 et reste autour de 75 % (Figure 7). Le taux de couverture pour les produits les plus fragiles, en premier lieu desquels les tomates, est proche de 100 % (DAAFR, 2013, 2019a). Dans ces cas, l'éloignement des principaux producteurs mondiaux et la périssabilité des produits contraignent les éventuelles importations à être faites par avion, ce qui les rend peu concurrentielles par rapport aux produits locaux. À l'inverse, les importations de légumes concernent à 94 % des produits de longue conservation (oignons, aulx, carottes et pommes de terre) pour lesquels les délais de mer ne dégradent pas la qualité des produits.

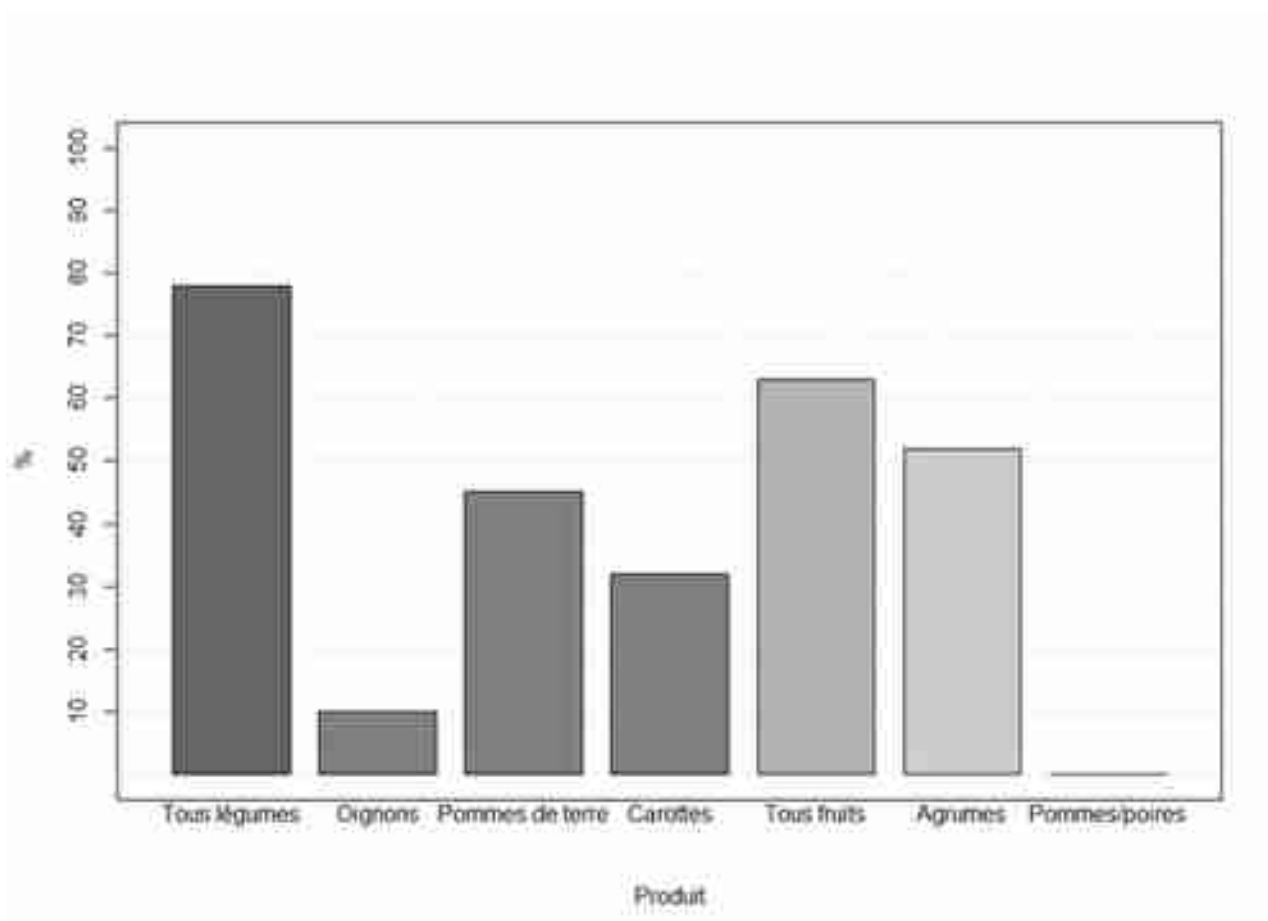


Figure 7: Taux de couverture pour l'ensemble des légumes et des fruits et quelques productions en 2017.

Source : Observatoire des importations, Mémento la Réunion.

Le taux de couverture pour les fruits est de 65 %. Les importations concernent principalement les pommes, poires et raisins (42 % des importations de fruits) qui ne peuvent être cultivés à la Réunion du fait du climat tropical (absence de vernalisation). Le second groupe de fruits faisant l'objet d'une importation élevée est les agrumes (Figure 7), au premier lieu desquels les oranges et les citrons. Il s'agit de productions présentes à la Réunion mais aux caractéristiques différentes du fait des variétés et du climat (couleur moins marquée du fait de l'absence de vernalisation, peau plus épaisse, etc.). Les importations d'agrumes ont nettement augmenté au cours des dix dernières années (DAAFR, 2019a), ce qui semble marquer une préférence des consommateurs pour les fruits importés.

Au-delà des fruits et légumes frais, les importations de produits congelés couvrent une part non négligeable des besoins alimentaires de la Réunion. La prise en compte du congelé amène le taux de couverture global (légumes et fruits) à 59 % (DAAFR, 2020b). Les produits importés congelés concernent notamment des produits de régions tempérées difficilement cultivables à la Réunion, aussi semble-t-il illusoire de vouloir gagner des parts de marché sur ce secteur.

IV. QUELLES ÉVOLUTIONS POUR ACCÉDER À L'AUTONOMIE ALIMENTAIRE ?

IV.1. Peu de gains possibles sur les grandes cultures

Il semble peu probable que l'île parvienne à améliorer son autonomie alimentaire au niveau des céréales. La culture du riz aurait été importante à la Réunion au début du XIX^e siècle. Cependant, les essais plus récents se sont soldés par des échecs (de Cambiaire, 1983). L'Association Riz Réunion essaie aujourd'hui de réintroduire le riz à la Réunion, mais les contraintes de production (protection des cultures par des filets anti-oiseaux, terres peu mécanisables, etc.) rendent son développement à grande échelle peu probable (Association Riz Réunion, 2020). De la même manière, les céréales anciennement cultivées dans les Bas pour l'autoconsommation, en premier lieu desquelles le maïs, et dans les Hauts (céréales à paille) ne présentent pas aujourd'hui une alternative crédible aux importations. Leur production actuelle est nulle ou très faible et leur éventuel développement entrerait en concurrence avec des importations issues de régions climatiquement plus adaptées (céréales à paille) ou aux coûts de production plus faibles du fait d'une main d'œuvre moins chère ou de la mécanisation de la production.

IV.2. Structurer et redynamiser les filières peu organisées ou en perte de vitesse

Le développement local des productions légumières, en particulier de celles concernées par les importations (carottes, pommes de terre, oignons et aulx), fait face à des défis particuliers en termes de prix et de contraintes de production (climat et mécanisation). La dynamique ascendante actuelle (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021b) est encourageante mais reste lente et a peu d'influence sur le taux de couverture total (DAAFR, 2019a). Elle doit cependant être encouragée et amplifiée notamment par le soutien à la mécanisation et à la diversification.

La filière laitière est actuellement en perte de vitesse (-21% de collecte, -43% d'éleveurs entre 2007 et 2017). Cela tient notamment à un système mal adapté au contexte tropical d'altitude, tant en termes de race (Prim'Holstein essentiellement) qu'en terme de conduite d'élevage. L'utilisation massive de concentrés (50% de la ration) pour un résultat médiocre en production (6 200L/lactation en moyenne) conduit à une dégradation du revenu pour les éleveurs malgré un prix du lait élevé (600€/1000 L) (Agreste La Réunion, 2019a). La redynamisation de la filière passera nécessairement par des pratiques plus herbagères et moins intensives en concentrés, ce qui nécessitera un réel gain de technicité quant à la gestion de l'herbe.

IV.3. Renforcer les filières compétitives

Les gains d'autonomie potentiels sur les filières monogastriques sont faibles. D'une part, concurrencer les produits congelés importés semble compliqué *a fortiori* dans un contexte de marché de dégagement (Dindar, 2018). Des gains pourraient être envisagés sur la charcuterie, notamment les segments qualitatifs où la viande de porc congelée pourrait être remplacée par de la viande locale. La problématique du coût reste cependant entière, la viande locale étant plus chère que la viande importée. Enfin, le développement des productions monogastriques pose la question des matières premières. En effet, augmenter la production de viande de porc et de poulet pourrait conduire à un plus fort recours aux céréales importées pour l'alimentation animale et *in fine* à une dégradation de l'autonomie alimentaire totale. Réfléchir à de nouveaux systèmes d'élevage (pâturage des porcs, utilisation de tubercules locaux dans l'alimentation animale, etc.) est à ce titre nécessaire.

La filière viande bovine présente de nombreux atouts qui en font une production solide. L'articulation entre des naisseurs extensifs et des engraisseurs plus intensifs permet d'exploiter tout le potentiel altitudinal de l'île. Le changement générationnel entraîne un agrandissement relatif des exploitations, ce qui améliore la rentabilité et les performances des animaux. Il s'agit de la seule production animale où un gain de parts de marché se ferait à la place de viande importée fraîche. Le développement de la production de viande bovine devra se faire par un recours accru aux ressources locales. Cela nécessitera des changements de pratiques quant à la gestion des fourrages.

IV.4. Diversifier les exploitations et améliorer les pratiques

La fragilité actuelle de la filière canne repose sur la concentration des usines (deux sites seulement) ainsi que sur la spécialisation de nombreuses exploitations. La diversification peut être envisagée comme une manière d'assurer un complément de revenu (Choisit, Fusillier & Lemoine, 2011; Agreste La Réunion, 2019b). En particulier, la diversification vers les cultures légumières et fruitières et vers l'engraissement de bovins à partir de coproduits de canne à sucre semblent prometteuses pour améliorer l'autonomie alimentaire.

Des changements de pratiques sont également nécessaires dans les filières d'élevage. Outre le développement d'aliments locaux pour les monogastriques évoqués plus haut, il est nécessaire de mieux utiliser les fourrages dans l'alimentation des ruminants. Plusieurs points sont notamment nécessaires. Les prairies sont aujourd'hui sous-pâturées (1 UGB/ha en moyenne, contre 1,5 à 3 UGB/ha estimés possibles par Cambiaire dans les années 1980), ce qui entraîne leur dégradation (Sicarévia, communication personnelle). L'amélioration de la gestion du report fourrager entre l'été et l'hiver est nécessaire pour augmenter les chargements ; en particulier, l'amélioration de l'équipement mécanique des éleveurs et des groupements est nécessaire pour la bonne conduite des chantiers d'enrubannage. L'amélioration des fourrages qui en résulterait par une récolte au meilleur stade permettrait de réduire le recours aux concentrés. Le développement de nouveaux types de

fourrages, notamment pour les animaux en bâtiments, permettrait également de s'affranchir d'une partie des importations de concentrés. Sont notamment concernés les fourrages irrigués dans les Bas et le maïs ensilage aujourd'hui anecdotique. Enfin, le développement de l'engraissement à l'herbe permettrait de mieux valoriser cette ressource tout en augmentant la production de viande par une meilleure conformation des animaux et en limitant le recours aux concentrés importés.

IV.5. Répondre au défi de la commercialisation

La commercialisation des productions locales est parfois rendue difficile par les attentes des consommateurs. D'une manière générale, il est nécessaire de promouvoir les produits locaux en particulier lorsque ceux-ci ne correspondent pas aux attentes des marchés. L'amélioration de la production et la mise au point de nouvelles techniques devraient être encouragées pour substituer les productions locales aux produits importés. Cette pratique concerne notamment les agrumes dont la production locale est moins standardisée (couleur, taille, etc.) que les produits importés. Elle est également importante dans le cas de la viande bovine. En effet, la viande importée est majoritairement de la viande de vache de réforme aux caractéristiques visuelles et organoleptiques différentes de la viande de jeunes bovins, qui représente 60 % de la viande produite à la Réunion ; par ailleurs, la maturation effectuée pendant le voyage en bateau contribue à sa tendreté. Une meilleure segmentation de l'offre ainsi que le développement d'autres types d'élevage devraient permettre de rapprocher la production locale des caractéristiques constatés dans les importations.

La commercialisation de la viande bovine fait pour sa part face à un défi de taille. Des scandales médiatiques émergent de manière récurrente autour de la leucose bovine enzootique, maladie des bovins éradiquée en Europe mais encore présente à la Réunion. La mise en place d'un plan d'éradication sous l'égide de la Préfecture devra permettre de s'affranchir à court terme de cette problématique.

IV.6. Réfléchir à l'échelle du bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien

La question de l'autonomie alimentaire peut également se réfléchir à une échelle plus vaste. Les circuits d'importation de céréales pour l'alimentation humaine (riz) et pour l'alimentation animale (maïs, orge) pourraient gagner à être relocalisés dans le bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien, et notamment vers Madagascar. Une telle perspective nécessiterait d'importants efforts en termes d'infrastructures, d'amélioration des rendements agricoles et d'ajustement aux normes de qualité européennes. Pourtant, elle permettrait d'accompagner efficacement le développement rural malgache en assurant un débouché sûr et constant pour les productions végétales.

Deuxième partie :
Identification des leviers
d'augmentation de la production de
viande bovine à la Réunion

Encadré 2 :
Résumé de la deuxième partie

Dans la première partie de la thèse, nous nous sommes attachés à décrire les raisons pour lesquelles l'élevage bovin allaitant pouvait être considéré comme un facteur de réduction de la vulnérabilité économique structurelle à la Réunion à horizon 2030.

Cette deuxième partie porte sur **les facteurs influençant la production de viande bovine à la Réunion**. Elle est composée des troisième et quatrième chapitres de la thèse. Le troisième chapitre est extrait d'un article co-écrit avec Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Charles-Émile Bigot et Matthieu Lesnoff et soumis le 8 décembre 2020 à la revue *Animal Science Journal* dans lequel nous analysons **les déterminants de l'évolution de l'élevage allaitant à la Réunion entre 2006 et 2017**. Le quatrième chapitre correspond à un article écrit avec Hugo Valls-Fox, Emmanuel Tillard, Xavier Juanès, Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne et Matthieu Lesnoff qui sera traduit pour soumission à une revue anglo-saxonne, portant sur **l'identification des leviers d'amélioration de la production allaitante à la Réunion par l'étude d'un modèle démographique**.

Dans le troisième chapitre, nous proposons une analyse des dynamiques passées de la production de viande bovine à la Réunion à partir de trois niveaux de déterminants (externes, internes et de gestion). Les déterminants externes sont définis comme les conditions extérieures ayant un impact sur l'évolution du secteur allaitant réunionnais. Ces déterminants concernent les conditions macroéconomiques (prix des bovins et de l'aliment du bétail) et climatiques (cyclones, sécheresses). Les déterminants internes correspondent aux performances des animaux. Dans notre cas, nous approchons ces performances par des paramètres démographiques naturels (taux de mise bas et de mortalité) (Lesnoff *et al.*, 2011). Les déterminants de gestion correspondent aux décisions des éleveurs et des organisations visant à assurer un certain niveau de production en équilibrant les influences des déterminants externes et internes. Ces déterminants peuvent être résumés dans une première approche à un arbitrage sur l'abattage ou non de certaines catégories d'animaux (par exemple les génisses ou les vaches âgées). Nous les avons mesurés à partir des paramètres démographiques de gestion (taux d'abattage) (Lesnoff *et al.*, 2011). Nous proposons une mise en perspective de ces différents déterminants pour les années 2006 à 2017 à la Réunion pour identifier leur influence relative sur l'évolution de la production bovine allaitante. Les hypothèses formulées à partir de nos observations pour expliquer les mécanismes à l'œuvre ont été validées par des experts du Cirad et de la Sicarévia.

Nos résultats montrent que **le secteur bovin allaitant à la Réunion réagit principalement à des déterminants économiques**, ce qui le rapproche des systèmes d'élevage des pays développés (Rosen, Murphy & Scheinkman, 1994). Plus en détail, nous montrons qu'en 2010, la **hausse des prix de l'aliment du bétail** (déterminant externe) a entraîné une **réorientation des abattages des vaches âgées vers les génisses** (déterminant de gestion). La conséquence a été un **déficit de génisses mises à la reproduction**. À plus long terme, cela a entraîné le **vieillissement du troupeau** et la **dégradation de performances de reproduction** (déterminant interne). Nous montrons également comment la **réaction de la**

coopérative (déterminant de gestion) pour rajeunir le troupeau a permis de **relancer la dynamique de croissance** à partir de 2015. Ces résultats montrent qu'il est **nécessaire de veiller à la stabilité des prix de l'aliment du bétail à la Réunion** pour permettre le développement de la production de viande bovine. Par ailleurs, **l'intégration verticale de la production**, c'est-à-dire le regroupement de l'ensemble des éleveurs en une seule coopérative, est un gage d'efficacité pour les politiques mises en place (Coronado *et al.*, 2010).

Le troisième chapitre a permis d'identifier les déterminants économiques et de gestion ayant influencé la dynamique d'évolution du secteur allaitant réunionnais. Cependant, il ne s'est pas intéressé aux mécanismes zootechniques qui sous-tendent cette dynamique. Pour cela, le **quatrième chapitre de la thèse** s'intéresse aux **leviers zootechniques mobilisables pour améliorer la productivité de la filière**. Il cherche à quantifier l'influence des paramètres démographiques identifiés dans le troisième chapitre (taux de mise bas, taux de mortalité, taux d'abattage) et des performances de croissance pondérale (poids carcasses) sur la productivité du troupeau allaitant réunionnais. Pour cela, nous construisons un **modèle démographique** (Leslie, 1945; Caswell, 1989; Lesnoff, 2015a) à partir des données exhaustives de la BDNI sur l'ensemble des élevages allaitants. Ce modèle décompose le cheptel allaitant réunionnais en **classes de sexe et d'âge** définies d'après un diagnostic démographique du cheptel (Annexe A.3).

Dans un premier temps, nous validons l'utilisation du modèle en comparant les simulations avec des données empiriques pour les années 2006 à 2017. Nos résultats montrent que **ce modèle démographique permet de représenter fidèlement la réalité**. Les écarts moyens absolus entre le modèle et les données empiriques sont de 0,8 % pour l'effectif et de 4,9 % pour la production de viande. Ce modèle est donc utilisable pour représenter le troupeau allaitant réunionnais.

Dans un second temps, nous utilisons ce modèle pour évaluer les **productivités numérique et pondérale** du cheptel (Upton, 1989; Lesnoff, 2015b). Nos résultats montrent que la Réunion présente des productivités proches de celles observées dans d'autres territoires insulaires développés comme l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Nous conduisons ensuite une **analyse de sensibilité globale** de ces productivités (Saltelli, Chan & Scott, 2008a; Faivre *et al.*, 2013). Les variables d'entrée considérées sont les **paramètres démographiques naturels** (taux de mise bas et de mortalité) et les **poids carcasses** des animaux. Pour éviter les fluctuations artificielles observées lors du régime transitoire des modèles démographiques (Caswell, 1989, 2001), nous nous sommes placés **en régime permanent**. Par ailleurs, pour tenir compte de l'effet des modalités d'exploitation du cheptel, nous avons défini **sept modalités d'abattage** selon les types d'animaux abattus et les taux de croît du troupeau définis comme objectifs. Contrairement à d'autres territoires tropicaux où les bovins servent de capital sur pieds (Bennison, Barton & Jaitner, 1997; Tillard *et al.*, 1997; Lesnoff, 2011), le cheptel allaitant réunionnais est avant tout destiné à produire de la viande pour le marché

local. La limitation du taux de croît du troupeau est en outre nécessaire du fait du contexte insulaire. Nous nous sommes donc tout particulièrement intéressés à l'analyse de sensibilité de la productivité pondérale avec limitation du taux de croît. Nos résultats montrent que les performances de reproduction et de croissance, en particulier les **taux de mise bas des femelles âgées de trois à dix ans** et les **poids carcasses des mâles âgés d'un à trois ans** ont une forte influence sur la productivité pondérale. Nous montrons également qu'il est nécessaire de veiller à maîtriser la **mortalité des adultes** pour maintenir une forte productivité du troupeau.

Une fois identifiés les leviers mobilisables pour développer la production de viande bovine à la Réunion, la troisième partie de la thèse valorise ces résultats en explorant les voies d'évolution envisageables pour le secteur.

Chapitre 3 :
Influence des déterminants externes,
des performances des animaux
et des choix de gestion
sur la dynamique du cheptel allaitant à la Réunion

I. INTRODUCTION

Islands have long been considered as living laboratories for which system drivers are more readily identifiable than in continental systems. Insularity strongly constrains value chains, particularly in the agricultural sector because markets are small, high competition for space and historical specialization in cash crops (Barlagne *et al.*, 2015). The beef sector of Réunion Island faces major challenges due to its insularity and tropical climate. In 2017, imports represented 71% of the beef consumption (DAAFR, 2019a). They consisted of fresh and frozen meat, mostly from mainland France. Contrarily to other animal products, vacuum-packed fresh beef (not frozen) can be imported by sea, which allows for a longer time to market. This results in a high competition between imported fresh meat and the local production.

In order to reduce food dependency, the French Ministry of Agriculture established an ambitious plan that aimed at increasing local beef production by 57% between 2011 and 2021 (DAAFR, 2019b). Since the importation of live animal is prohibited on Réunion island, this ambition solely relied on the internal growth of the island's herd. In spite of this financial support (4.5 M€/year) under the form of marketing aid and support for young farmers to set up their activities, the sector did not reach its objectives. In coordination with Sicarévia, the unique beef cattle cooperative of the island, a diagnostic study of the drivers that influence the evolution of the beef sector was undertaken. We defined these drivers as the main forces or constraints that determine the dynamics of the beef cattle sector. We define three types of drivers:

(i) External drivers are factors on which local stakeholders have no influence. They consist of environmental, economic and political conditions at a broad scale. Cyclones are the main environmental driver, destroying local infrastructures and leading to an increase in cattle mortality (Sen & Chander, 2003). Economic drivers directly or indirectly affect production costs or farm income. For example, the increase of feed and fertilizer prices, and the decrease in animal product prices (*e.g.* meat) can jeopardize a breeder's ability to make a living from meat production.

(ii) Internal drivers are the actual performances of animals under prevailing conditions, such as growth, reproductive abilities or mortality.

(iii) Management drivers are the decisions made by stakeholders that influence the evolution of the herd. For instance, the purchase, sale or slaughter of certain categories of animals (by sex, age or breed) will change herd composition and performance. These decisions can result from policies implemented by the Sicarévia cooperative. For instance, the preference for a certain type of animals for different value chains such as selling young bulls to supermarkets and heifers to traditional butchers. Management decisions can also be made by each farmer independently and may influence the evolution of herd composition and productivity.

In this article, we use demographic rates as indicators to identify the relative roles of external, internal and management drivers. Demographic rates are robust and biologically meaningful parameters (*e.g.* birth rate or culling rate) whose contribution to overall herd dynamics can be quantified using a demographic model (Lesnoff *et al.*, 2011). We assume that the influence of these drivers can be measured by the evolution through time of natural and management demographic rates (Lesnoff *et al.*, 2011; Lesnoff, 2015a) combined with economic and climatic variables.

Réunion Island's beef production system is atypical because of its small size. The Sicarévia cooperative includes 94% of Réunion Island's beef production. As a result the relationship between farmers and buyers are not freely determined. For instance, the prices of cattle are set by the cooperative. Discussions on the meat prices with retailers are conducted by the cooperative. This article, focuses on farmers' decisions and the cooperative's policies that are representative of the beef sector in Réunion island. Decisions of stakeholders upstream (*e.g.* feed importers), downstream (*e.g.* groceries and supermarkets), at a wider scale (*e.g.* inter-professional association) and policy makers (*e.g.* regional government) are then considered as external factors. We analyze the trends of production for 12 years between 2006 and 2017. We describe the demographic structure of the herd and its evolution in terms of type of farms, breeds, sex and age of the animals. Recommendations for the development of the production are proposed in the last part of the paper.

II. MATERIALS AND METHODS

II.1. Study area and production systems

Réunion Island is a French volcanic island located in the Southeast of the Indian Ocean (21°07' S; 55°31' E). The climate is tropical with a wet period from December to April and a dry period from June to October. High contrasts in annual rainfall (447.7 – 5190.2 mm), temperature (min 6.6°C – 21.8°C, max 15.9°C – 29.1°C) and soil exist due to the rugged topography (0 – 3070 m a.s.l.) and geology of the island (Météo France, 2019a). Human activities and particularly agriculture are organized accordingly along an altitudinal gradient. Cyclones are the main climatic hazard in Réunion Island. The only major cyclone that struck the island during the study period was Gamede in 2007 (Météo France, 2019b)

The beef sector adopts a unique bio-geographic structure inherited from its history and influenced by the topography and insularity (Choisis *et al.*, 2009). It covers about 10,000 ha for about 12000 livestock units (Sicarévia, personal communication). The mean stocking rate is 1.2 livestock unit/ha (incl. feeders). Breeders represent 56% of the farmers (Table 9) own 17 – 70 heads (1st – 3rd quantiles). They keep reproductive cows and produce heifers and young bulls that are sold to feeders between the ages of eight and eleven months. They are located above 800 m a.s.l.. Breeders mainly rely on natural pastures to feed their animals and usually give concentrated feed at a level of 0-3 kg/animal/day, mostly for renewal heifers and calves. Feeders have fewer animals (12-32 heads). They buy young bulls or heifers and feed them until slaughter that occurs at 19-22 months. They sometimes also conduct other agricultural activities. For feeding, they rely on imported concentrated feed (4-8 kg/animal/day) and silage (Photograph 6) or green forage. Breeders-feeders have the largest herds of 39-98 heads and conduct both activities, generally in several sites.

Table 9: Average number of farms per type between 2006 and 2017

Farm type	Breeders	Feeders	Breeders-feeders
Number	264	90	117
Percentage (%)	56	19	25
Mean size (heads)	44	27	82

The Sicarévia cooperative plays a central role in Réunion Island beef production. Among its activities, it raises reproductive heifers within a genetic improvement program and sells them to breeders. It organizes the transfer of young bulls from breeding farms to feeding farms and from

feeding farms to the slaughterhouse. Farmers, as members of the cooperative, are not allowed to set the price at which they sell or buy cattle freely. Feed prices are also defined by the cooperative accordingly with global markets prices.

II.2. Data

We used a herd-monitoring database extracted from the French National Identification Data Base (BDNI) for the years 2006 to 2017. BDNI records concern birth, sale, purchase, parturition, slaughter and death. BDNI data were imported into a dedicated data management system developed by Cirad, LASER2 (Juanès *et al.*, 2014), facilitating the calculation of demographic parameters. The final database contained the individual longitudinal records of 83 067 animals in 406 farms, which represents 97% of the meat animals bred on Réunion Island. On the basis of this comprehensive dataset we assume parameter uncertainty is negligible and do not report confidence intervals.

II.3. Cattle breeds

Breeds are defined as racial types according to the French Livestock-breeder Institute (Interbev & Institut de l'élevage, 2008). The misidentification of a breed is negligible, since errors, *i.e.* a calf declared as pure breed that differs from its mother's breed only concern 1.5% of cases.

We focused on animals belonging to the three major breeds: crossbreed (animal whose parents belong to two different breeds, 84% of which are limousin bull × crossbreed cow), limousin and blonde d'Aquitaine (Photograph 8). These three breeds represent 98 % of the total number of cattle heads in our database (Table 10). Nine other breeds constitute the remaining 2 %. An animal is defined as pure bred when it has at least 15/16th of it's ancestry from the same breed. Absorption crossings are then possible.

Table 10: Average number of heads per breed between 2006 and 2017

Breeds	Crossbreed	Limousin	Blonde d'Aquitaine	Other breeds	total
Number of heads	42 682	34 759	5 626	1 972	85 039
Percentage	50	41	7	2	100

II.4. Herd structure and demographic rates

Based on preliminary exploration of demographic parameters, we defined different age classes. In this article ages are given as “exact ages”, for instance two years old means 730 days old. Parturition rates were calculated independently for three female age classes: young cows (2 to 3

years old), fully reproductive cows (3 to 10 years old) and senescent cows (>10 years old). Age classes for mortality are defined for both sexes as: calves (≤ 6 month old), productive animals (6 months to 10 years old) and older animals (>10 years old). Age classes for slaughtering are feeder bullocks (1 to 2 years) and culled bulls (2 years old) for males, and feeder heifers (1 to 2 years old), young cows (2 to 3 years old), culled cows (3 to 10 years old) and culled older cows (>10 years old).

Demographic parameters were defined as annual hazard rates (Lesnoff et al., 2011) and were estimated by age class, sex and breed. For example, for a given parameter (*e.g.* parturition), category of animals (*e.g.* adult females) and time period (*e.g.* 1 year), the rate was estimated by dividing the number of events (*e.g.* births) by the cumulated time the animals spent in the concerned age class, also known as the time at risk and expressed in animal-year (Lesnoff et al., 2011). An animal that survived the entire year accounts for 1 animal-year, and an animal present during half of the year for 0.5 animal-year. If there is one parturition over the year among these two animals, the parturition rate is $1/(1 + 0.5) = 0.67$ /animal-year.

We use parturition rates, mortality rates and slaughtering rates. The parturition rate is calculated as the number of live offspring per female.year, excluding stillborn, abortions and calves dead before the farmer declares the parturition. The mortality rate is calculated as the number of deaths per animal-year. In particular, the mortality rate of calves only concerns calves born alive and excludes abortions, stillborn and calves dead before the farmer declared their birth. Slaughtering rates are calculated as a number of animals slaughtered per animal-year in the concerned age class.

Demographic parameters were calculated using the R-package *laser2demog* v1.3.0 (Lesnoff et al., 2011) and implemented on R v3.5.1 (R Core Team, 2019).

II.5. Economic and climatic indicators

The only major cyclone that struck the island during the period was Gamede in 2007 (Météo France, 2019a). Indicators for the evaluation of the economic drivers are the prices for feed, feeder and fed cattle and beef obtained from the French national statistics (<http://agreste.agriculture.gouv.fr> and <https://www.douane.gouv.fr/la-douane/opendata>).

II.6. Consultation of local stakeholders

All the hypotheses we made on the effect of the drivers and the management decisions of farmers and the cooperative were discussed and validated by local stakeholders, especially the director of the Sicarévia cooperative.

III. RESULTS

III.1. Réunion island cattle population dynamics

Over the 2006 – 2017 period, the annual (average) herd growth rate was 1.2% (Figure 8a). Over the same period, the total number of farms increased by 0.8% per year (332 farms to 362 farms). The number of breeder-feeder farms decreased by 1% per year while specialized farms rose by 0.9% for breeders and 1.3% for feeders. The average number of animals by farm increased for all farms between 2006 and 2017, from 90 heads to 101 heads for breeders-feeders, 45 heads to 49 heads for breeders and 29 heads to 33 heads for feeders.

The herd dynamics between 2006 and 2017 can be split into four phases (Figure 8a). Between 2006 and 2010, the annual herd growth rate was 2.5% (phase 1 – pre-crisis). In 2010, the number of animals fell by 3.9% (phase 2 – crisis). Between 2011 and 2014, the number of heads was stable (phase 3 – depression). Finally, between 2015 and 2017, the annual growth rate returned close to its initial value, with an annual growth rate of 2.2% (phase 4 – remission).

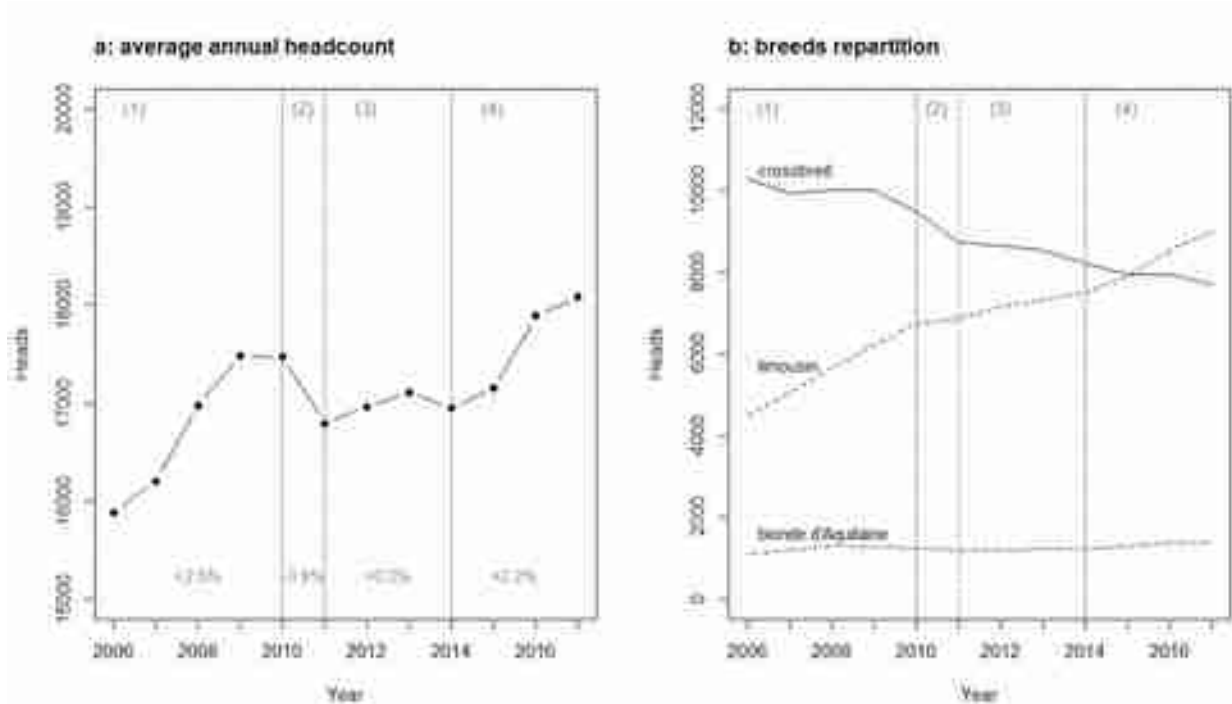


Figure 8: Average annual number of beef cattle heads on Réunion island (breeders and feeders) (a) and average annual number of each breed of beef cattle on Réunion island (b).
 The four phases can be distinguished by their average annual growth rate given as percentages of growth.

The number of crossbred animals decreased by 25% between 2006 and 2017 while the number of limousin doubled (Figure 8b). Since the population is closed, this largely resulted from absorption breeding of crossbred animals by pure breed limousin at the scale of the island. Indeed, the number of births of limousin calves increased by 38% over the entire period whereas crossbred births decreased by 40%. The proportion of limousin calves among the calves born from crossbred mothers increased. On the contrary, the proportion of crossbred calves among the calves born from limousin mothers decreased. The population of Blonde d'Aquitaine is constant because farmers that choose this breed have their own development plan and already work with a meat-oriented breed.

The slaughtering of females and males differed in structure. Nearly all young bulls (98%) were slaughtered between one and two years of age. This proportion and the age structure of the male herd remained constant throughout the period. Conversely, females were slaughtered at different stages of their lives: 1 to 2 years by feeders as feeder heifers, 1 to 3 years by breeders as culled heifers, 3 to 10 years and >10 years old as culled cows. The proportion of females slaughtered at each stage varied during the study period. In the next section, we analyze how this influences the structure of the female herd.

III.2. Slaughtering age of females and female herd structure

Between 2006 and 2010, the slaughtering rate of females aged 1 to 3 years slaughtered by breeders has tripled (Figure 9a). It returned to its 2006 level between 2011 and 2014. From 2007 to 2010, the slaughtering rate of females aged 1 to 3 years slaughtered by feeders increased to 125% of the 2006 value. It reached 175% of the 2006 value in 2011 and slowly decreased until reaching 125% in 2016. These two classes of females are intended for renewal as well as for meat production (fed heifers). Consequently, a change in the slaughtering pattern, deriving from different allocation choices between renewal and slaughtering, led to changes in the structure of the reproductive herd. In addition, the slaughtering rate of adults females (over 3 years old) remained low between 2006 and 2016 (Figure 9a).

The consequence was a global ageing of the female herd between 2006 and 2014. In 2006, fully reproductive cows represented 66% of the female herd; in 2014, they only represented 56% of the herd (Figure 9b). This ageing was linked with a deficit of females entering the reproduction and a surplus of females over 10 years, that increased by 15% during the same period. During phase 4, the decrease of the slaughtering rate of young females (Figure 9a) led to an increase in the proportion of fully reproductive females and a rejuvenation of the female herd (Figure 9b).

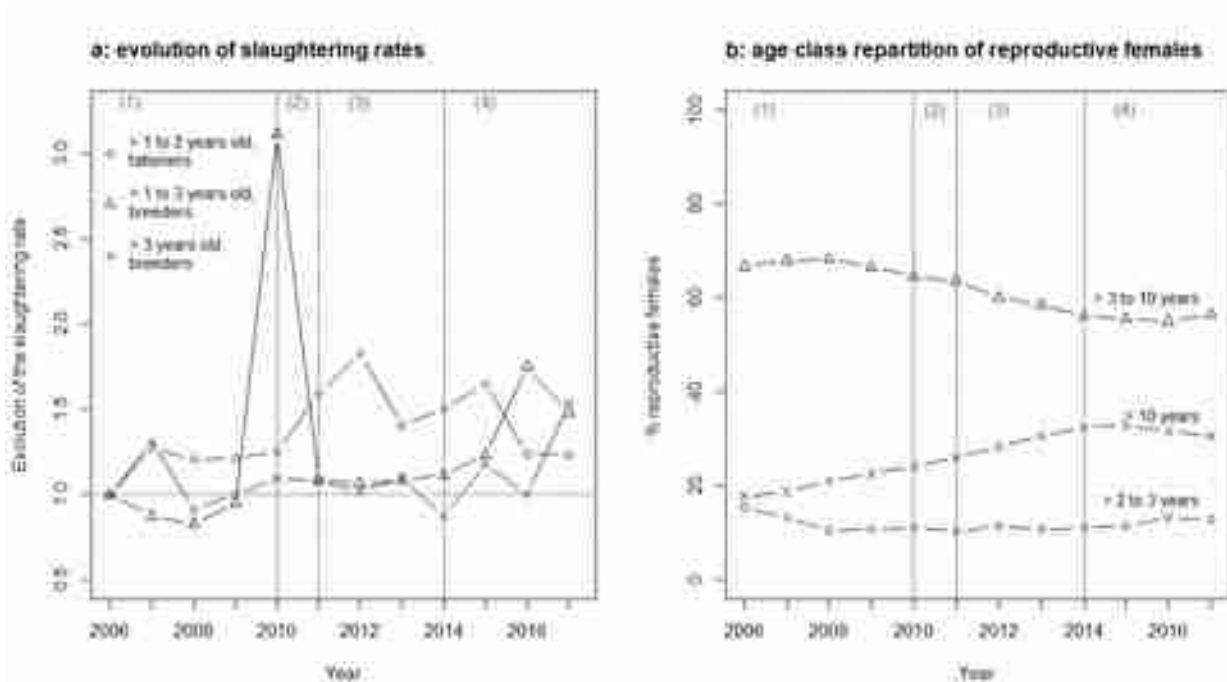


Figure 9: Evolution of the slaughtering rates of females (a) and relative proportion of reproductive females by age classes (b).

a: The slaughtering rate for each age classes is expressed as a ratio of their own 2006 value so the evolution of rates that are initially different can be compared. The distinction between breeders and feeders is given in the legend.

b: Females aged of one to two years are not depicted since this age class also contains fed heifers.

III.3. Evolution of parturition rates

Between 2009 and 2017, the average parturition rate decreased from 0.67 to 0.55 (Fig 10b). In addition, the proportion of females over 10 years old increased during the period (Fig 9b) while the parturition rates for these older females decreased (Figure 10a). Moreover, parturition rates decreased for each class (Figure 10b). Concerning breeds, limousin had a significantly higher mean parturition rate than crossbreed ($p = 0.03$) and blonde d'Aquitaine ($p < 10^{-4}$). However, the parturition rate of limousin cows decreased earlier with age than for crossbred cows (Figure 10a): the decline started at 9 years old whereas it started at 11 years old for crossbred.

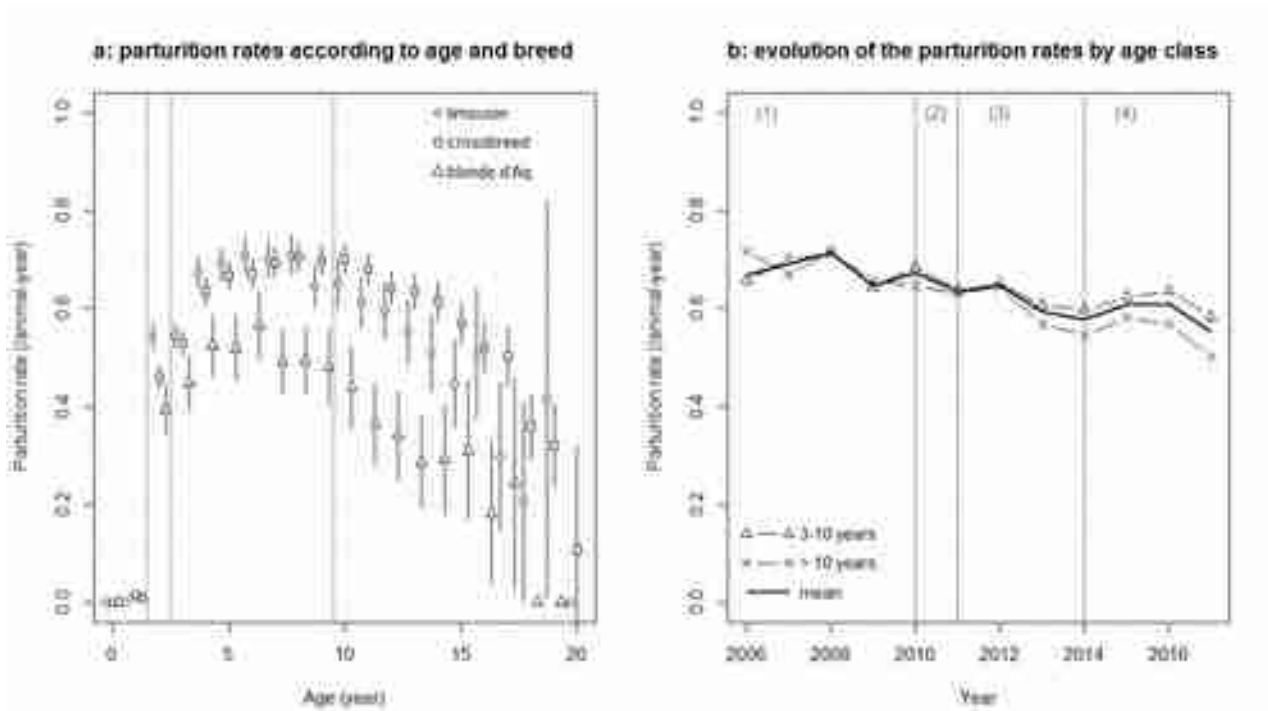


Figure 10: Parturition rate according to female age and breed (a) and evolution of the mean parturition rate by age class between 2006 and 2017 (b).

a: Error bars give the 95% confidence interval of the value. Vertical lines give the limit for each age class (<2 years, 2-3 years, 3-10 years and >10 years).

b: Females under three 3 years are not plotted since this age class may contain heifers intended to be slaughtered.

III.4. Mortality

Natural mortality of adults was low (0.02/animal-year). Calves and animals over 10 years old had a higher mortality rates: 0.20/animal-year for calves less than 6 months old and 0.06/animal-year for animals over 10 years old. The evolution of mortality through time was similar for every age classes (Figure 11). This suggests that the origin of the variations of mortality was environmental. For instance, in 2007, cyclone Gamede struck the island, causing a 10% to 40% spike to mortality rate for every age classes(Figure 11).

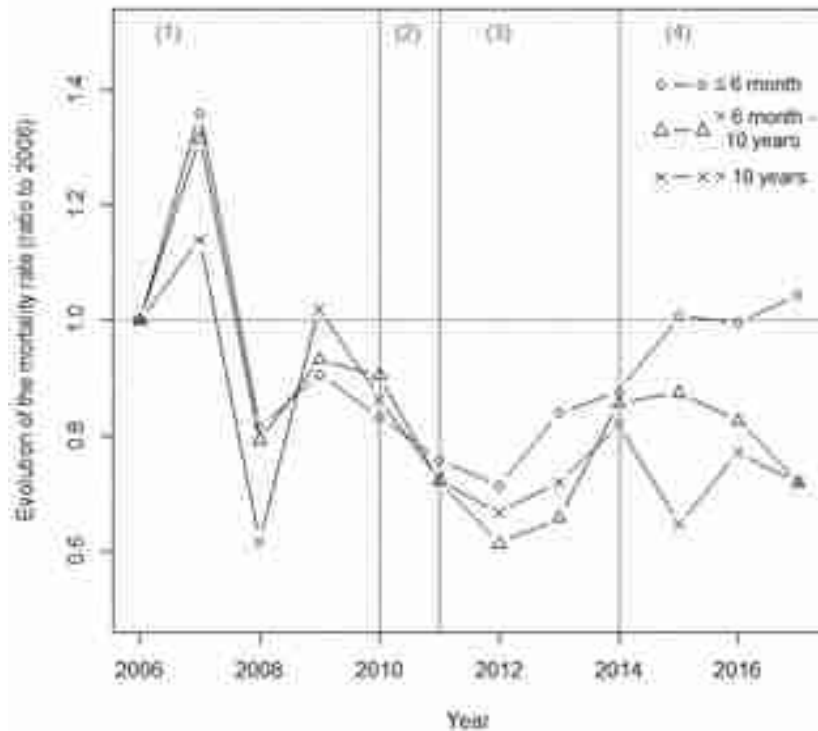


Figure 11: Evolution of the mortality rate of beef cattle according to their ages.

III.5. Price fluctuation and local beef production

Prices of feed increased while prices of feeder and fat cattle decreased between 2006 and 2011 (Figure 12a), causing a deterioration of economic conditions for farmers. Since 2011, prices of cattle increased.

Between 2006 and 2011 local production fluctuated around 1770 tons per year. It crashed to 1620 tons from 2011 to 2013 and slowly started recovering in 2015. On the contrary, imports of fresh meat were stable up to 2014, when they increased by 40% and returned to 1500 tons in 2016 (Figure 12b). Between 2006 and 2017, the imports of frozen meat nearly doubled so that frozen meat became the main product of the beef meat market in Réunion Island in 2015.

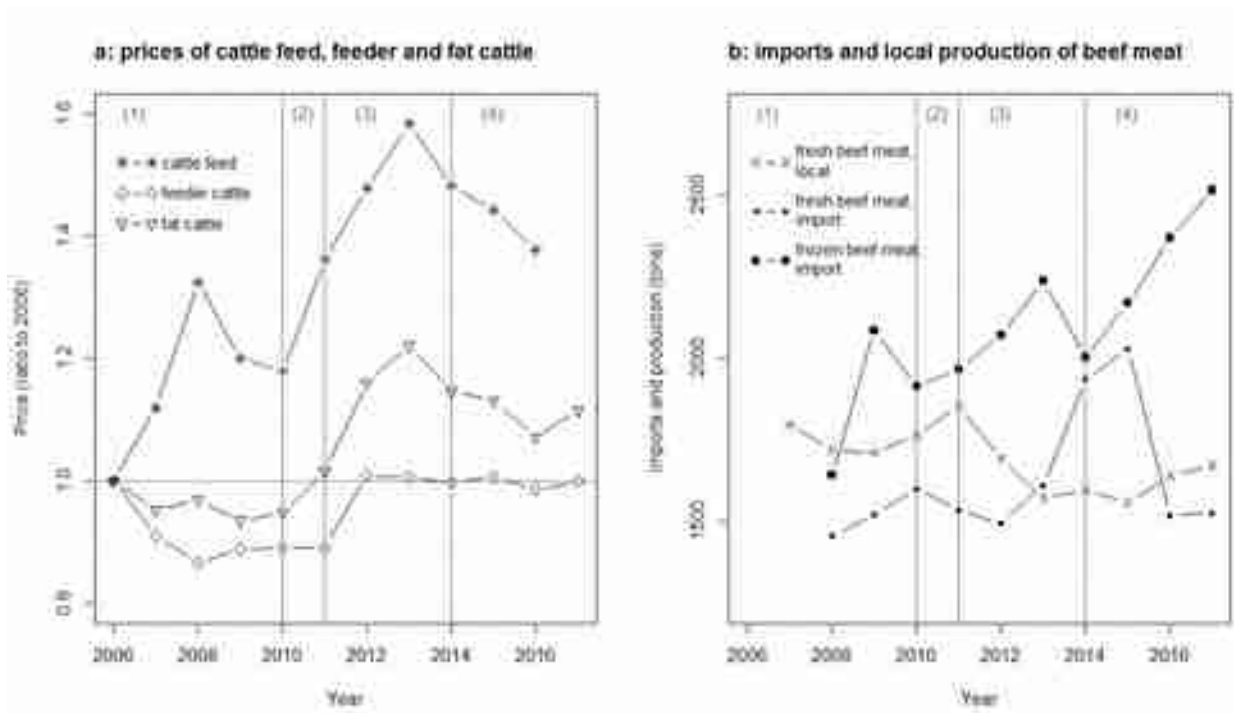


Figure 12: Prices of cattle feed, feeder and fat cattle in France between 2006 and 2017 (a) and local production and imports of fresh beef meat on Réunion Island (b).
 Source: French Ministry of Agriculture.

IV. DISCUSSION

IV.1. The four phases of cattle population dynamics

Despite the objective of increasing beef production by 57% between 2011 and 2021, production decreased by 10% from 2011 to 2017. The analysis of the four phases of cattle population dynamics during the study period revealed the interactions between internal, management and external drivers and their influence on cattle population growth. The drivers and the trends for each phase are given in Table 11.

Between 2006 and 2008 (phase 1 – pre-crisis), the first signs of the crisis appeared. In spite of high parturition rates and population growth (Figure 8a), the increasing prices of feed and the decreasing prices of cattle led to a contraction of farmers' income (Figure 12a). In response, the slaughter of heifers increased slightly to ensure farm income: breeders decided to sell heifers for slaughtering instead of keeping them for renewal, which caused an ageing of the herd. The first consequence is a slight increase of the parturition rate (Figure 10b) since cows less than 4 years old have a lower parturition rate (Figure 10a). As of 2009, the reproductive cohort got older and the parturition rates decreased (Figure 10b). Breeders lacked sufficient female births to ensure the renewal of their reproductive herd and relied ever more heavily on old cows for reproduction causing an additional increase in age and a decrease of parturition rates.

Table 11: Evolution of the growth rate and of the external, management and internal drivers between 2006 and 2017.

period	Pre-crisis	crisis	depression	remission
years	2006-2009	2010	2011-2014	2015-2017
Growth rate	+2.5%	-3.9%	+0.3%	+2.2%
External driver	+ feed prices (+20%) - cattle prices (-11%)	+ feed prices (+16%)	+ feed prices (+9%)	- feed prices (-8%)
Management drivers	+ heifer slaughter (21%)	+ heifer slaughter by breeders (300%)	+ heifer slaughter by feeders (+20%)	- heifer slaughter (-25%) + old cows slaughter (+30%)
Internal Drivers	+ average adult female age (+7%) - parturition rate (-3%)	+ average adult female age (+3%) - parturition rate (-2%)	+ average adult female age (+6%) - parturition rate (-9 %)	- average adult female age (-1%) - parturition rate (-4%)

The crisis occurred in 2010 (phase 2) due to external factors. Global prices of feed increased while prices of cattle remained low (Figure 12a). Breeders could no longer cope with raising costs of renewal heifers and decided to reduce the number of their heifers by two ways. First, they slaughtered more heifers initially intended for renewal (Figure 9a). Second, they oriented their young females to feeding instead of keeping them for renewal. These females have been slaughtered in 2011 by feeders (Figure 9a). This caused a diminution of the size of the herd and a negative growth rate between 2010 and 2011 (Figure 8a) and exacerbated the ageing trend of the reproductive herd (Figure 9b).

Between 2011 and 2014 (phase 3 – depression), the economic conditions of farmers remained poor. Breeders sold heifers to feeders instead of keeping them for renewal because it is more profitable at an individual scale (shorter unproductive period and higher subsidies on cows than on heifers). They kept a higher share of old cows for reproduction instead of keeping heifers for renewal. In addition, the decrease in parturition rates (Figure 10b) might partly result from a decrease in supplementation due to high prices of concentrates (Figure 12a) (Sicarévia, personal communication). In the meantime, the local beef sector as a whole maintained its production by slaughtering heifers (Figure 12b). However, the imports of meat increased by 25% in 2014 (Figure 12b), which resulted in a loss of market shares for local production.

The remission (phase 4) started in 2015 with an action plan by the Sicarévia cooperative. This plan promoted the renewal of the reproductive herd by keeping heifers and slaughtering old cows by subsidizing breeders for each heifer they kept (350€ and 450€ per heifer, if the percentage of heifers is higher than 15% and 20% of the adult female herd, respectively). The decrease in feed prices on international markets allowed farmers to maintain their income during the implementation of the plan (Figure 12a). The conjunction of management and external drivers led to a rejuvenation of the reproductive herd and the same annual growth rate as between 2006 and 2009 (Figure 8a).

Over the entire period, the orientation of heifers towards the renewal of the reproductive herd or towards meat production largely explained the herd dynamics over the following years. When breeders decided to sell heifers for slaughtering (either directly or through feeders) for economic reasons, there was a deficit of newly reproductive females the following year. To compensate this deficit, breeders kept more old cows instead of slaughtering them. This amplified the ageing of the reproductive herd (Figure 9b) that started in 2006. Many factors influenced parturition rates, among which breed and age of the females (Figure 10). The parturition rates start to decrease at 9 years for limousins and at 11 years for crossbreed cows (Figure 10a). Thus, the shift from crossbred to limousins, initiated in the 1990's, rendered Réunion Island's cattle more sensitive to the effects of ageing on parturition. The decrease of parturition rate also was a serious handicap in the post-crisis period and slowed down the remission, which occurred when the cooperative took measures to rejuvenate the herd.

IV.2. A tropical beef production system with European characteristics

The Réunion Island beef sector can be considered as a European model implanted on a remote tropical island. Its organization is similar to beef meat production in temperate regions both in terms of farm size and the separation of breeding and feeding activities (Poizat *et al.*, 2019). The mortality rates are similar to mainland France (Blachon *et al.*, 2016). Réunion Island is atypical amongst tropical islands where livestock production systems are mostly based on small herds (<30 heads including calves) and are seldom specialized in terms of breeding or feeding (Olafadehan & Adewumi, 2010). This specificity is due to French and European policies that have shaped the island's agricultural sector since the 1960's (de Cambiaire, 1983; Marblé *et al.*, 2018).

The tropical climate implies major differences with European livestock systems. High rainfall and temperatures ensure nearly yearlong productivity of grasslands that feed breeding cattle that allows a low complementation of breeder cattle.

Tropical storms and cyclones could cause livestock death and considerable damage to infrastructures. Surprisingly, we observed no long-term consequences of cyclone Gamede in 2007 as the excess mortality (Figure 11) was rapidly compensated (Figure 8a). This also resulted from the low mortality rate compared with other tropical territories. These findings are usually not observed in other livestock systems in the developing world that are severely affected by extreme climatic events (Sen & Chander, 2003).

Beef value chains in mainland Europe are highly interconnected and largely driven by the final culling of milking cows (Rieutort *et al.*, 2014). In Réunion Island, culled milking cows only represent 5% of the meat production. Moreover, the value chain must start and finish on the island since they can neither export nor import live animals, nor export fresh meat. The main market driver is the importation of meat from France as dumping practices are frequent (Figure 12b). For example, the high import in 2014 are related to the end of milk quota in the European Union that led to high slaughtering of milking cows. In response, the sector has reached a high level of integration to fill the gaps and provide the slaughterhouse and subsequent consumers with local fresh beef when needed.

IV.3. Towards a single breed and specialized beef sector

Over the years, the livestock farming systems of Réunion Island have become more specialized as shown by the shift from breeder-feeder farms towards either breeder or feeder farms and by the replacement of diverse crossbred animals by the limousin breed (Figure 8b).

The increase in the number of limousin breed resulted from individual preference as well as the cooperative's strategy. Limousine breed animals were better adapted to the semi-intensive feeding periods, had higher body weight gains (data not shown) and had more homogeneous performances and carcass conformations. On average, their slaughtering weight was 10kg higher

than crossbreed, which corresponds better to the demand of the slaughterhouse and of supermarkets. Farmers that were already specialized in Blonde d'Aquitaine breed were not involved in the switch to limousin because their breed was already adapted to the breeding system of Réunion Island.

Changes in herd size resulted from individual decisions of growth and followed a well-known trend (García-Martínez, Olaizola & Bernués, 2009; Rapey, 2015). It resulted from the decisions of farmers to allocate their workforce to more profitable activities. To keep their farm profitable, breeders-feeders followed two strategies. They either chose one of the two activities (breeding or feeding) and abandoned the other, or they expanded both activities to reach a critical size that provides enough income for an additional full time farm worker. Feeders that initially started feeding cattle as diversification of sugar cane activity (Choisis *et al.*, 2011) decided to make cattle feeding their main farming activity. They also increased the size of their feedlot by converting sugar cane areas into forage.

IV.4. Livestock management and sector governance

Vertical integration, *i.e.* the fact that the Sicarévia controls the entire value chain, is a strength of the beef sector in Réunion Island since it allows a better response to consumer choices (Coronado *et al.*, 2010). However, this integration did not succeed in achieving the ambitious plan that aimed at increasing local beef production by 57% between 2011 and 2021. In 2017, production had barely recovered (Figure 12b).

Our analyses showed that management of the reproductive herd was paramount. The slaughter of heifers to maintain income in response to external economical drivers rapidly weakened the sector's productive capacities with long-lasting effects on herd composition and productivity. The intervention of the Sicarévia cooperative to rejuvenate the reproductive herd was salutary and stopped the ageing of the herd in 2015 (Figure 9b). It avoided a further collapse of the sector and supported the reconstitution of the reproductive herd. However, the parturition rate remained low, as a result, the plan was not sufficient to increase productivity beyond pre-crisis levels nor did it compensate for losses incurred during the crisis (Figure 10b).

IV.5. Food self-sufficiency and beef production

Food self-sufficiency is a major concern for small islands (Blancard *et al.*, 2021). In Réunion Island, local beef production could gain market shares over imported fresh meat since it only provides 25% of the beef (Figure 12b). Moreover, the beef market in Réunion Island grows of about 2% every year, so the excess supply caused by an increase in local beef production could be absorbed by increasing demand under the condition that consumers effectively buy local beef instead of imported meat.

It has long been shown that the favorable climate in Réunion Island would allow a stocking rate of 2 to 3 livestock unit/ha (de Cambiaire, 1983). The current stocking rate is of 1.2 livestock units/ha and a number of meadows in Réunion island are under-grazed (Sicarévia, personal communication). An increase in the number of animal is not a problem in the near future. Sicarévia currently aims at reaching a load of 1.8 livestock unit/ha. This aim can be reached either through an increase of the size of the reproductive herd or by feeding heifers or culled cows on grass, which means a slower growth for feeding animals and a later age at slaughter but also a smaller use of imported concentrate feed. Retailers will also have to adapt to new carcass conformations in line with the production of older animals and consequently heavier carcasses. The dependency on imported feed that are subjected to international market fluctuations is one of the main frailties of the sector, so further development should rely more on local forage than on imported feed.

V. CONCLUSION

We described the contributions and interactions of three sets of drivers of Réunion Island's beef sector. An increase in feed prices in France combined with a decrease of feeder cattle prices led to a diminution of the income of breeders (external driver). In response, breeders decided to slaughter heifers instead of keeping them for renewal and kept old cows in their stead (management driver at the scale of the farm). This led to an ageing of the herd and finally to a diminution of parturition rates (internal driver) that was accentuated by the policy of replacing crossbreed animals by limousins (management driver at the scale of the cooperative). After a latency period, the cooperative implemented a plan to rejuvenate the herd and increase the parturition rates. Global conditions also improved (conjunction of external and management driver). Our analysis shows that management strategies need to balance internal and external drivers in order to ensure production. In Réunion Island, the high level of integration and the ability to react quickly within a powerful inter-professional association can allow the sector to respond effectively to crises and to propose new development strategies. We can then consider three ways for a sustainable development of the beef production: (i) increase parturition rates through a better herd management and a rejuvenation of the reproductive herd, (ii) increase the number of reproductive cows to ensure the increase of herd size and (iii) increase local forage production to limit the use of imported feed and (iv) develop a grass-based feeding system to maximize the use of the existing grasslands.

Chapitre 4 :
**Un modèle démographique pour identifier
les leviers d'amélioration de la productivité
de l'élevage bovin allaitant à la Réunion :**
validation et analyse de sensibilité

I. INTRODUCTION

À l'île de la Réunion, le développement de l'élevage bovin allaitant est permis de gagner en autonomie alimentaire par l'accroissement de la production locale dans une logique de substitution des importations (Bonnet, 2021). Pour y parvenir, un ambitieux projet de développement des filières animales a été lancé en 2011 par les interprofessions avec le soutien de l'Union Européenne et de l'État (DAAFR, 2019b). Parmi les objectifs figurait l'augmentation de la production de viande bovine de 58% entre 2011 et 2021 (ARIBEV & ARIV, 2015). Or, celle-ci a diminué de 9% entre 2011 et 2017 (Bonnet *et al.*, 2020). Par ailleurs, du fait du moratoire existant sur les importations de bovins vivants (Préfecture de la Réunion, 2008), l'augmentation de la production de viande ne peut passer que par un développement du cheptel actuel et une amélioration de ses performances.

Une première étude rétrospective des performances démographiques (Bonnet *et al.*, 2020) a permis d'établir un diagnostic des déterminants de l'évolution de l'élevage ayant conduit à la situation actuelle. Elle a montré comment les conditions externes et les décisions de la coopérative influencent les paramètres démographiques du troupeau, en particulier les taux d'abattage des différentes catégories d'animaux et, indirectement, les taux de mise bas. Cette étude rétrospective, restée descriptive et non basée sur un modèle prédictif, n'a cependant pas permis de déterminer l'importance relative des différents paramètres démographiques ni d'explorer l'effet de variations plausibles de ces paramètres sur la production du cheptel. Des hypothèses existent quant aux paramètres influents mais aucune évaluation quantitative n'a été effectuée jusqu'à présent. Les modèles de projection démographiques sont utiles pour répondre à ces deux problématiques et apportent des éléments d'aide à la définition d'objectifs d'amélioration pour les décideurs. À la Réunion, les décideurs se limitent à la coopérative Sicarévia, seule coopérative d'éleveurs allaitant de l'île.

Dans cet article, nous présentons un modèle de projection simulant la démographie du cheptel bovin allaitant réunionnais. L'objectif est de valider l'utilisation de ce modèle sur des données rétrospectives et de quantifier l'influence relative des performances des animaux. Nous calculons pour cela les productivités numérique et pondérale du cheptel allaitant réunionnais à partir du modèle. Nous conduisons ensuite une analyse de la sensibilité de ces productivités aux paramètres démographiques et de croissance. À notre connaissance, cette présente étude est la première application d'un modèle démographique basé sur des données exhaustives concernant un territoire tropical. Dans le cas de la Réunion, la construction d'un tel modèle a également permis de valoriser un partenariat de longue date entre le Cirad et la Sicarévia pour la collecte de données démographiques.

Le modèle démographique que nous proposons utilise des matrices de projection (Leslie, 1945; Caswell, 1989). Le cheptel est décomposé par sexe et par classe d'âge, et l'évolution des effectifs d'animaux et des productions sont simulés sur une échelle de temps par des équations de

prédictions qui peuvent s'écrire sous forme matricielle. Ce type de modèle a l'avantage d'être simple à construire et à manipuler. De nombreuses études ont montré qu'il permettait de représenter fidèlement la démographie de cheptels domestiques (Kao *et al.*, 2006; O'Connor *et al.*, 2009; Lesnoff, 2011; Puillet *et al.*, 2014; Schärrier *et al.*, 2014).

Après avoir explicité le modèle démographique, cet article présente sa capacité à représenter les dynamiques d'évolution du troupeau allaitant réunionnais entre 2006 et 2017. Il présente ensuite l'importance respective des paramètres démographiques et pondéraux dans les variations de la productivité du cheptel. Enfin, nous proposons quelques recommandations pour la coopérative dans le but d'augmenter la production de viande.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. Site d'étude et données

La Réunion est un département français d'Outre-Mer situé dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien. L'élevage allaitant y est organisé selon un modèle biogéographique original (Choisis *et al.*, 2008). En altitude (les Hauts, >800m d'altitude) se trouve l'élevage naisseur extensif reposant presque exclusivement sur l'herbe pâturée (Marblé *et al.*, 2018). Les brouards sont engraisés dans les Bas (<800m d'altitude), souvent dans des exploitations de canne à sucre en diversification (Choisis *et al.*, 2011). Nous avons considéré l'ensemble du cheptel allaitant réunionnais comme un seul troupeau. Notre étude se place donc à l'échelle de l'ensemble de l'île.

Les données utilisées pour l'estimation des paramètres démographiques ont été construites d'après la base de données nationale d'identification (BDNI) pour les années 2006 à 2017. Cette base est alimentée d'après la déclaration des événements faites par les éleveurs. Un travail de nettoyage préliminaire a permis d'éliminer les animaux de race laitière et ceux dont le suivi était incomplet. Au total, 97% des animaux de race allaitante de l'île ont été inclus dans notre étude. Ces données ont ensuite été formatées pour permettre leur intégration dans le système d'information Laser2 (Juanès *et al.*, 2014). Le format Laser2 permet une estimation des paramètres directement à partir du package laser2demog v.1.3-0 (Lesnoff *et al.*, 2011), utilisé avec le logiciel R (R Core Team, 2019).

II.2. Modèle démographique

II.2.a. Cycle de vie

Le modèle démographique simule la dynamique du cheptel sur une échelle de temps discrète selon un cycle de vie volontairement simplifié. Le cycle de vie défini pour notre modèle du cheptel bovin allaitant de la Réunion est donné en Figure 13. Les classes d'âge ont été définies à partir d'une étude préliminaire (Bonnet *et al.*, 2020) sur la base de la forme des courbes de variations des taux démographiques (mise bas, mortalité, abattage) en fonction de l'âge des animaux (Tableau 12). Le cheptel a ainsi été divisé en six classes d'âges pour les femelles {F1, ..., F6} et cinq classes d'âges pour les mâles {M1, ..., M5}. Ce cycle de vie des animaux a été retranscrit en un modèle matriciel (Leslie, 1945; Caswell, 1989). Dans ce type de modèle, les différentes classes de

sexe et d'âge sont supposées homogènes et les paramètres démographiques s'appliquent de façon identique à l'ensemble des animaux de chaque classe.

Tableau 12: Décomposition du cheptel bovin allaitant réunionnais en classes de sexe et d'âge

Classe d'âge	Femelles	Femelles + mâles	Mâles
1 (0 – 6 mois)	Mortalité des veaux, notamment mortalité néonatale		
2 (6 – 12 mois)	Croissance (animaux destinés à l'engraissement)		
	Orientation renouvellement/engraissement		
3 (12 – 24 mois)	Croissance (animaux destinés à l'engraissement)		
	Orientation renouvellement/engraissement		
	Production de viande (abattages tardifs, animaux engraisés)		
4 (24 – 36 mois)	Production de viande (génisses de réforme)		
	Entrée en reproduction (génisses de renouvellement)		
5 (36 – 120 mois)	Reproduction		Reproduction
6 (>120 mois)	Reproduction (baisse des performances)		(effectif très faible)

En résumé, le passage des animaux d'une classe d'âge à une autre est fonction de la survie s et de la probabilité de transition g . La survie s est elle-même fonction de la mortalité et des abattages. Le renouvellement est assuré par la fécondité f^{17} , le sexe des animaux étant déterminé par le sex-ratio à la naissance p_{fbir} . Pour un intervalle de temps donné $(t, t+1)$, les paramètres du modèle sont rassemblés dans une matrice dite matrice de projection. L'effectif des animaux par sexe et classe d'âge au temps $t+1$ a été calculé en multipliant l'effectif des animaux présents au temps t par cette matrice. Pour chaque classe d'âge, la composante d'abattage prise en compte dans la survie a permis de calculer un nombre d'animaux abattus. Cet effectif abattu, multiplié par le poids carcasse moyen de la classe, a permis d'estimer la production de viande.

¹⁷Les taux de mise bas utilisés sont des taux de mise bas apparents. Ils prennent en compte uniquement les naissances de veaux déclarés. Ainsi, un taux de mise bas faible peut avoir pour causes une absence de gestation chez les femelles, un nombre élevé d'avortements ou une mortalité élevée des veaux dans les premiers jours (mortalité périnatale) si la parturition n'a pas été déclarée par l'éleveur.

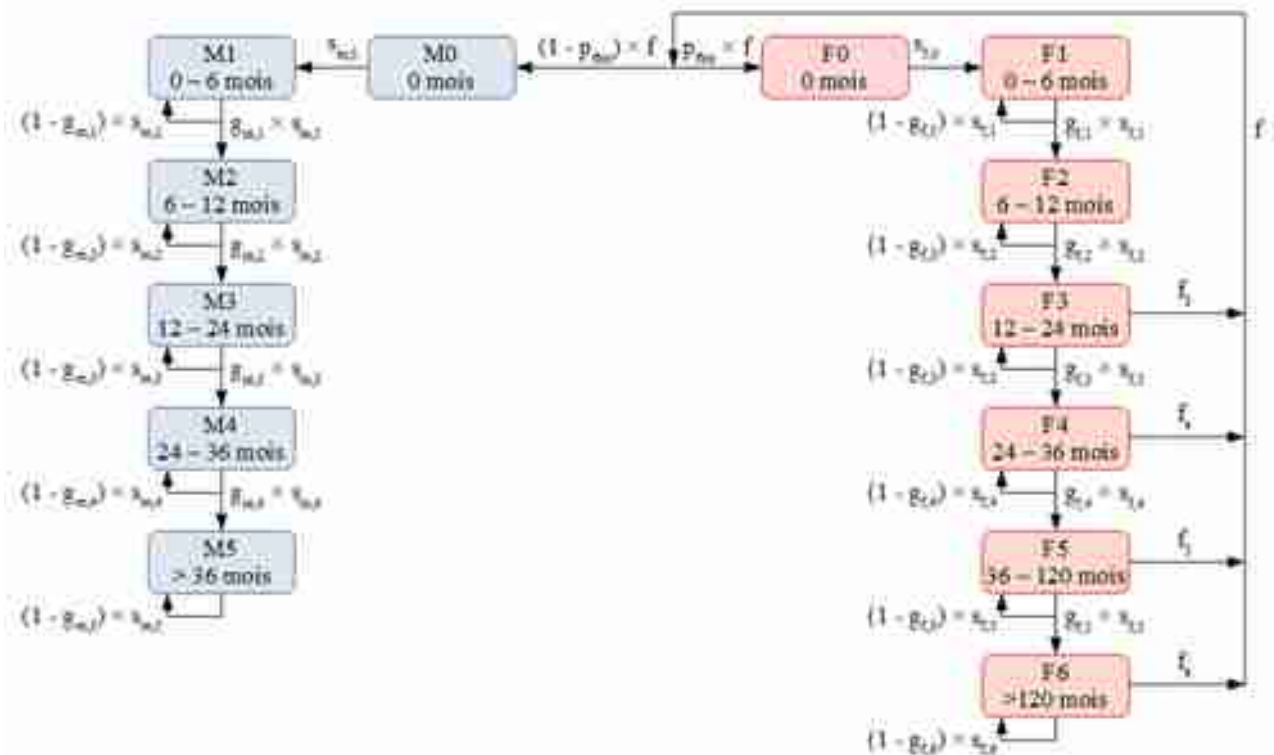


Figure 13: Cycle de vie des bovins allaitants à la Réunion

Gauche : mâles, droite : femelles. f_i : probabilité de mise bas pour la classe d'âge i , $s_{j,i}$: probabilité de survie pour le sexe j et la classe d'âge i , $s_{j,i} = 1 - \text{probabilité d'abattage} - \text{probabilité de mort}$, $g_{j,i}$: probabilité de passer de la classe d'âge i à la classe d'âge $i+1$ pour le sexe j , $g_{j,i} = 1/(\text{longueur de la classe d'âge } i \text{ en mois})$.

II.2.b. Pas de temps du modèle

Pour les populations à reproduction étalée dans l'année comme les cheptels domestiques, il existe des risques compétitifs entre les événements démographiques (mort, abattage et mise bas), dus au fait que l'occurrence d'un type d'événement peut empêcher la survenue de l'autre (Lesnoff *et al.*, 2011). S'il n'est pas pris en compte dans le modèle, ce facteur engendre des biais dans le calcul des productivités lors des projections démographiques. Définir un pas de temps (intervalle t , $t+1$) court pour le modèle est une approche simple pour rendre négligeable les effets néfastes des risques compétitifs. Pour les bovins, en pratique, l'échelle du mois est suffisante (Lesnoff *et al.*, 2011). Cette échelle du mois a donc été utilisée pour notre modèle.

Par souci de simplification et puisqu'elles n'étaient pas l'objectif de notre étude, les variations saisonnières des paramètres démographiques n'ont pas été représentées. Des paramètres mensuels moyens ont été estimés chaque année, injectés dans le modèle à pas de temps mensuel, puis les résultats du modèle (effectifs et productivités) ont été synthétisés pour chacune des années considérées dans les projections.

II.3. Validation interne du modèle

L'étape de validation interne a consisté à comparer les prédictions du modèle avec la dynamique du cheptel observée entre 2006 et 2017. L'état initial de la simulation a été positionné en janvier 2006. Les paramètres démographiques mensuels moyens ont été estimés pour chacune des 12 années puis injectés dans le modèle qui n'a subi aucun autre ajustement. Les effectifs moyens, la structure de sexe et d'âge et la production de viande simulés sur chaque année ont été comparés aux données empiriques issues de la BDNI. L'adéquation de la projection avec les données observées a été évaluée sur la base de coefficients de corrélation de Pearson. Le modèle matriciel a été simulé grâce au package R mmage 2.4-2 (Lesnoff, 2015a).

II.4. Analyse de sensibilité

II.4.a. Productivités numérique et pondérale

L'analyse de sensibilité s'est concentrée sur deux mesures de productivité : numérique et pondérale. D'une manière générale, la productivité d'un cheptel peut être définie comme le rapport entre la production du cheptel et une mesure des moyens utilisés pour atteindre cette production (Upton, 1989; Baptist, 1992; James & Carles, 1996; Hary, 2004; Lesnoff *et al.*, 2011; Lesnoff, 2015b). L'étude de cette productivité est une approche courante pour décrire et comparer des systèmes de production animale, notamment dans une visée d'accompagnement du développement (Upton, 1989; Ezanno, 2005; Onono, Wieland & Rushton, 2013; Lesnoff, 2015b; Domingues *et al.*, 2020) (Upton, 1989; Ezanno, 2005; Onono, Wieland & Rushton, 2013; Lesnoff, 2015b; Domingues *et al.*, 2020). Selon le numérateur et le dénominateur choisis, la productivité peut prendre de nombreuses formes (Lesnoff, 2011). Dans notre étude, nous avons défini l'indicateur de productivité numérique annuelle moyenne par :

$$R_N = \frac{O_{net} + \Delta N}{\bar{N}}$$

où O_{net} sont les sorties nettes (dans notre cas, il n'y a pas d'importation d'animaux vivants, donc $O_{net} = abattages$), ΔN la variation d'effectif entre le début et la fin d'année, et \bar{N} l'effectif moyen du troupeau pour l'année considérée. La somme $O_{net} + \Delta N$ correspond à l'effectif total d'animaux produits (c'est-à-dire nés ou abattus) dans la période étudiée. Cet effectif représente également un niveau maximal d'exploitation durable (Lesnoff, 2015b) pour le cheptel, c'est-à-dire l'effectif maximal d'animaux pouvant être exploité dans l'année sans diminuer la taille du troupeau.

Le taux de productivité R_N est exprimé en unité animal/animal-année car \bar{N} représente un temps total de présence moyen des animaux dans le cheptel sur l'année (Upton, 1989; Hary, 2004; Lesnoff, 2015b). R_N synthétise l'ensemble de la dynamique du cheptel, à savoir la variation de stock (croissance du troupeau) et l'exploitation (abattages). Il a l'avantage de pouvoir être facilement exprimable en d'autres unités que des effectifs. Dans cet article, en complément de R_N , nous avons également étudié la sensibilité de la productivité pondérale, notée R_W . La productivité R_W a été calculée en exprimant le précédent numérateur en poids carcasse, en multipliant l'effectif de chaque classe de sexe et d'âge par le poids carcasse moyen des animaux concernés. Les grandeurs o_{net} et ΔN sont dans ce cas exprimées en kg et R_W est en kg/animal-an.

Nous avons utilisé des poids carcasses moyens par classe d'âge estimés d'après des données fournies par la Sicarévia et concernant la période 2011-2017. Les données antérieures n'étant pas disponibles, nous avons fait l'hypothèse que les poids carcasses sont restés constants de 2006 à 2017.

Pour comparaison, nous avons également calculé les productivités R_N et R_W pour huit autres territoires tropicaux à partir des données d'effectif et de production de viande de la FAO (FAO, 2020). Les territoires étudiés sont des îles tropicales développées (Nouvelle Zélande, Australie), des îles tropicales en développement (Madagascar, Comores, Seychelles) et des États africains bordant l'Océan Indien (Kenya, Afrique du Sud, Mozambique).

II.4.b. Variables d'entrée et gammes de variation

Douze variables d'entrées ont été sélectionnées pour l'analyse de sensibilité. Elles concernent les taux démographiques naturels (taux de mise bas et taux de mortalité) et les poids carcasses des animaux. Le sex-ratio à la naissance dépendant des pratiques des éleveurs (insémination artificielle sexée) et pas directement des performances des animaux, nous ne les avons pas incluses dans l'analyse de sensibilité. Les bornes de variation de chaque variable d'entrée sont présentées dans le Tableau 13. Des valeurs ont tout d'abord été proposées en s'appuyant sur deux sources d'information : une méta-analyse effectuée au Sahel (Lesnoff, 2015b), et des référentiels technico-économiques en France métropolitaine (Valance *et al.*, 2014; Blachon *et al.*, 2016). Ensuite, une étude sur les performances des cheptels à la Réunion (Berger, 2017; Réseaux d'élevage DOM *et al.*, 2018; Bonnet *et al.*, 2020) et différents échanges avec les acteurs de terrain nous ont permis de fixer les gammes de variation définitives (Tableau 13).

Tableau 13: Variables d'entrée de l'analyse de sensibilité.

Description de la variable	Nom de la variable	Réunion 2015-2017	Valeur basse	Valeur haute
Mortalité des femelles <6 mois	mortal.F01	0,067	0,036	0,36
Mortalité des mâles <6 mois	mortal.M01	0,094	0,036	0,36
Mortalité des femelles et mâles >6 mois	mortal.A	0,033	0,012	0,072
Taux de mise bas des femelles 2-3 ans	partur.F4	0,483	0,12	0,72
Taux de mise bas des femelles 3-10 ans	partur.F5	0,625	0,36	0,9
Taux de mise bas des femelles >10 ans	partur.F6	0,578	0,36	0,9
Poids carcasse des femelles et mâles <1 an	pdscar.12	158	100	300
Poids carcasse des femelles 1-2 ans	pdscar.F3	250	200	350
Poids carcasse des femelles 2-3 ans	pdscar.F4	246	200	400
Poids carcasse des femelles >3 ans	pdscar.F56	298	250	450
Poids carcasse des mâles 1-3 ans	pdscar.M34	350	250	450
Poids carcasse des mâles >3 an	pdscar.M5	464	300	650

Les taux démographiques sont donnés en /animal-an, les poids carcasse en kg. Les valeurs moyennes pour la Réunion entre 2015 et 2017 (Bonnet et al., 2020) sont données à titre indicatif et ne sont pas utilisées dans l'analyse de sensibilité.

II.4.c. Modalités d'exploitation des femelles

La prise en compte des paramètres d'abattage dans ce type d'analyse de sensibilité pose des difficultés (Lesnoff, 2015b). Les taux d'abattage influencent le nombre de femelles présentes dans le cheptel et donc indirectement le nombre de naissances. Ils peuvent donc avoir un impact sur la productivité indépendamment des performances naturelles des animaux, qu'il convient de contrôler. Pour cette raison, nous avons fixé sept modalités d'exploitations des femelles, et l'analyse de sensibilité a été réalisée pour chacune de ses modalités.

- La modalité M1 correspond à un taux de croît libre du cheptel sans modification des taux d'abattages. Elle constitue la référence pour notre étude.
- La modalité M2 correspond à un taux de croît fixé au niveau observé entre 2015 et 2017 ($2,2\% \pm 0,5\%$) en appliquant une augmentation ou diminution des abattages de toutes les femelles (M2a), des génisses (M2b) ou des vaches adultes (M2c).
- La modalité M3 correspond à une modification des taux d'abattages pour toutes les femelles (M3a), pour les génisses (M3b) ou pour les vaches adultes (M3c) de manière à maintenir un taux de croît nul ($0\% \pm 0,5\%$), soit un troupeau restant à sa taille actuelle ($\Delta N = 0$, l'exploitation des animaux étant à son niveau maximal).

Pour les modalités M2 et M3, le coefficient multiplicateur des taux d'abattage a été calculé itérativement au cours de chaque simulation effectuée par le modèle démographique. La procédure itérative a été la suivante. Le coefficient du taux d'abattage était initialisé à 1. Après une première simulation, le taux de croît était calculé. Tant que le taux de croît était supérieur (vs inférieur) à l'objectif, le coefficient multiplicateur des taux d'abattages augmentait (vs diminuait) d'un pas de plus en plus réduit à mesure que le taux de croît s'approchait du taux de croît objectif. La procédure était itérée jusqu'à atteindre le taux de croît objectif ($\pm 0,5\%$). Cette procédure a permis d'obtenir un taux de croît proche de la valeur objectif en une trentaine de simulations.

II.4.d. Méthode d'analyse de sensibilité

Notre étude a mis en œuvre une analyse de sensibilité globale (Saltelli *et al.*, 2008b, 2008a; Iooss & Lemaître, 2015). Cette méthode fait varier toutes les variables d'entrée conjointement. D'autres méthodes, dites locales, ont été utilisées sur des modèles démographiques (de Kroon *et al.*, 1986; Lesnoff, Ezanno & Caswell, 2003; Bacaër, 2009) mais en général elles apportent moins d'information que l'approche globale, qui permet par exemple de mettre en évidence d'éventuelles interactions entre variables d'entrée.

Dans l'analyse de sensibilité globale, l'espace des variables d'entrée doit être échantillonné si sa dimension est trop élevée. Le choix de la méthode d'échantillonnage peut avoir un effet sur les résultats et pose des difficultés supplémentaires pour l'analyse des données. Dans notre étude, deux niveaux de valeur (min, max ; Tableau 13) ont été considérés pour chacune des 12 variables d'entrée, représentant un nombre total de $N = 2^{12} = 4096$ combinaisons possibles. Du fait d'un temps de calcul raisonnable (moins d'une seconde par simulation), nous n'avons pas effectué d'échantillonnage. Les N combinaisons ont été simulées pour chacune des 7 modalités d'exploitation des femelles. Pour les modalités M2 et M3, la procédure d'optimisation décrite ci-avant a été effectuée pour chacune des 4096 simulations. Au total, 838 144 simulations ont été réalisées.

Pour éviter les fluctuations artificielles observées lors du régime transitoire des modèles démographiques (Caswell, 1989, 2001), chaque projection a été réalisée sur une période de 15 années avec les mêmes valeurs de paramètres. L'analyse de sensibilité a porté sur les productivités numériques et pondérales calculées en 15^e année, lorsque le modèle était en état stationnaire.

Après avoir effectué les simulations, les sensibilités des productivités calculées ont été analysées par ANOVA additive (Faivre *et al.*, 2013), le terme d'erreur résiduelle englobant alors toutes les interactions entre les variables d'entrée. La sensibilité associée à une variable d'entrée a été quantifiée par la part de variance expliquée par la variable d'entrée dans l'ANOVA.

III. RÉSULTATS

III.1. Validation de l'utilisation du modèle

La dynamique temporelle observée pour le cheptel entre 2006 et 2017 en effectif d'animaux (Figure 14a) et en production de viande (Figure 14b) a été globalement très bien prédite par le modèle. L'écart relatif moyen en valeur absolue entre la simulation et les données observées est de 0,8% pour l'effectif et 4,9% pour la production de viande. Les coefficients de corrélation de Pearson entre valeurs observées et prédites ont été de 0,98 pour l'effectif et de 0,91 pour la production de viande.

La structure du cheptel par sexe et âge a été également bien prédite par le modèle, ceci tout au long de la période de simulation (Figure 15). Les effectifs dans les classes d'âges à faible taux d'abattage (femelles 2-3 ans, mâles 2-3 ans et >3 ans) ont été légèrement surestimés par le modèle, alors que ceux des classes d'âges présentant un fort taux d'abattage (femelles et mâles 1-2 ans) ont été légèrement sous-estimés.

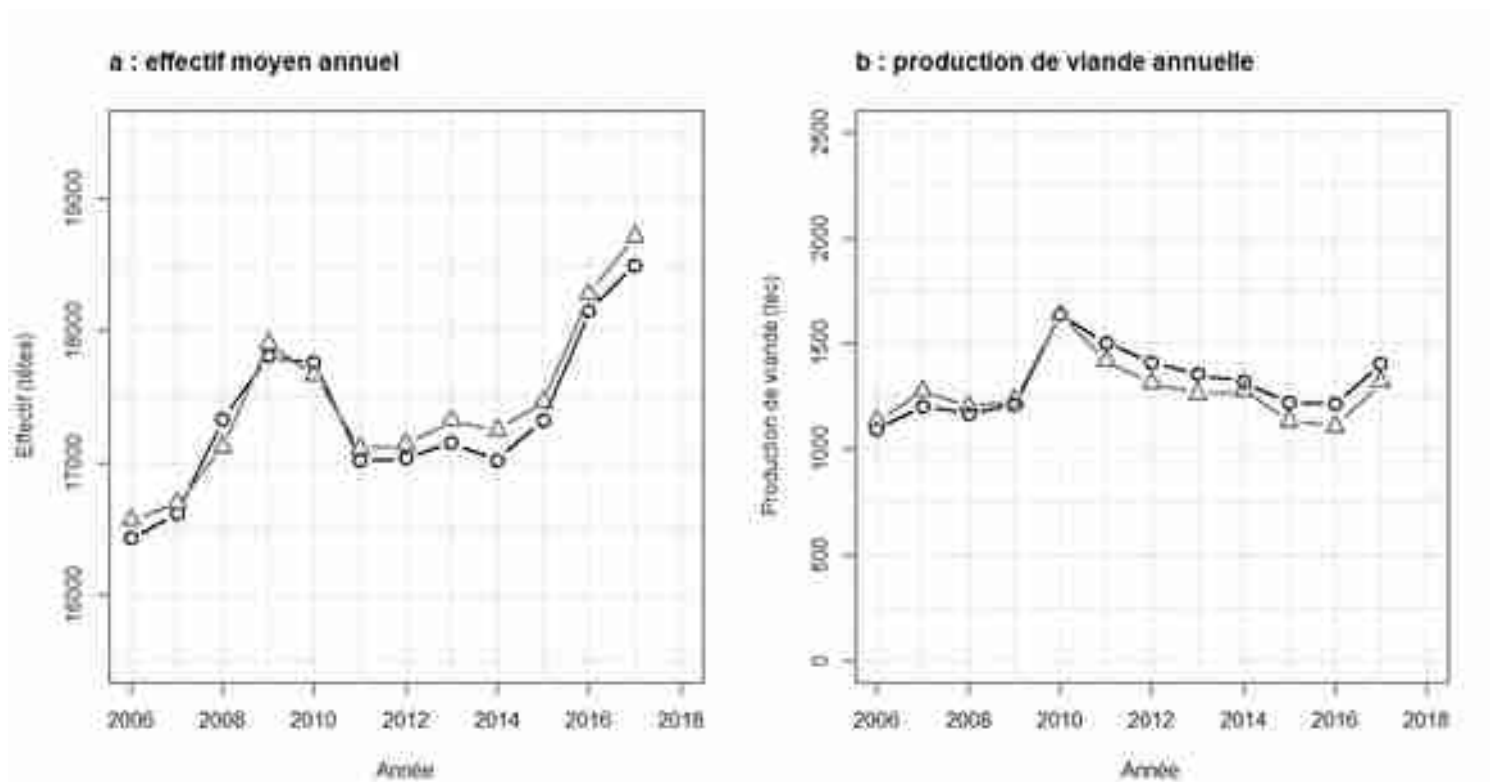


Figure 14: Comparaison de l'effectif moyen annuel (a) et de la production annuelle de viande (b) pour la projection (triangles gris) et les données issues de la base de données (ronds noirs).

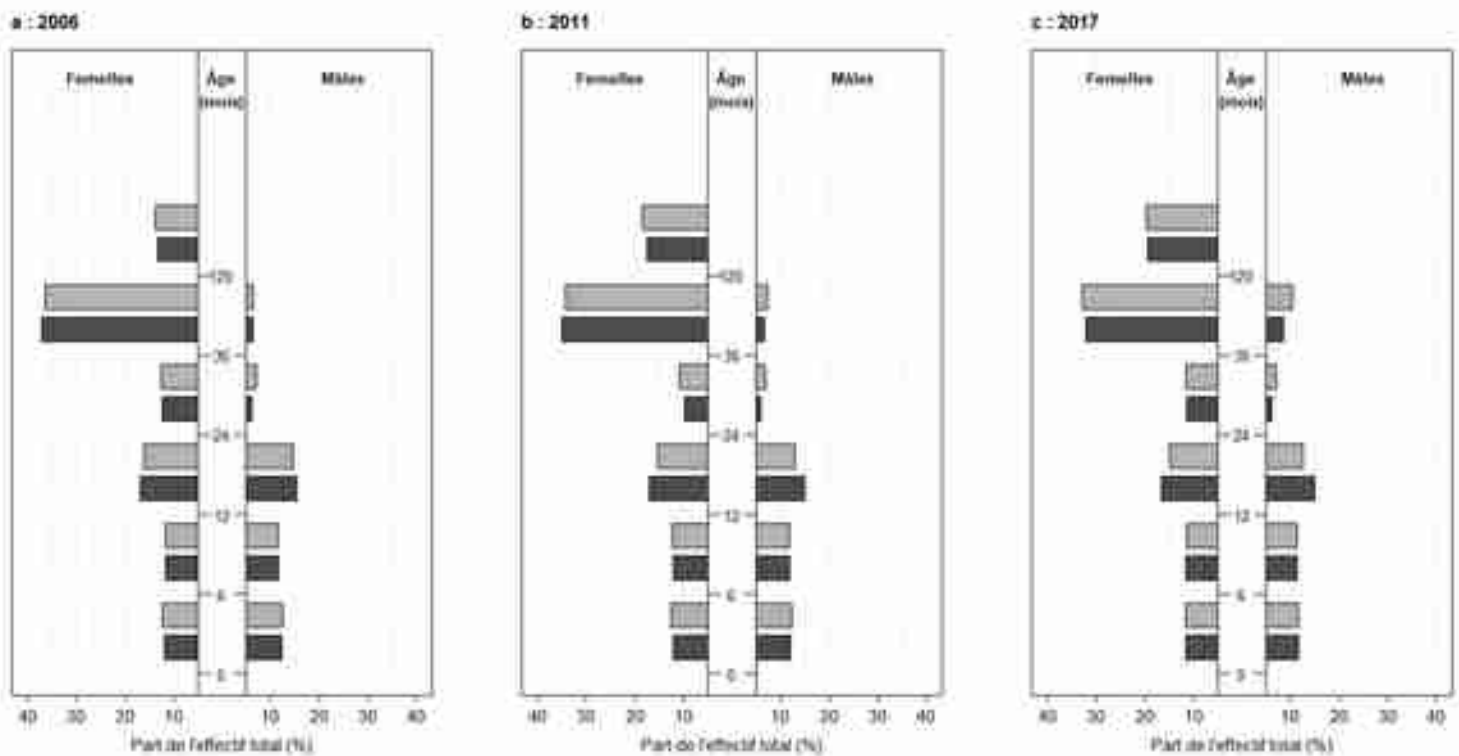


Figure 15: Pyramides des âges pour les données réelles (gris foncé) et la projection (gris clair) après (a) un an de simulation (2006), (b) six ans de simulation (2011) et (c) douze ans de simulation (2017)

Description des classes d'âge : M1/F1 : 0 – 6 mois, M2/F2 : 6 mois – 1 an, M3/F3 : 1 – 2 ans, M4/F4 : 2 – 3 ans, M5 : mâles : >3 ans, F5 : 3 – 10 ans, F6 : femelles : >10 ans

III.2. Taux de productivité moyen à la Réunion vs. d'autres territoires insulaires

Les productivités numérique et pondérale moyennes estimées d'après le modèle démographique ont été respectivement de 0,22 animal/animal-an et de 68 kg/animal-an pour les années 2015 - 2017. Elles ont ainsi été d'un niveau comparable à ce qui est observé dans d'autres îles tropicales développées (Australie et Nouvelle-Zélande ; Tableau 14). Elles ont cependant été nettement supérieures aux productivités des cheptels des autres îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien et à la plupart des régions étudiées dans le Sud-Est Africain (Tableau 14) ainsi que, pour comparaison, aux productivités des cheptels du Sahel (0,13 animal/animal-an) (Lesnoff, 2015b).

Tableau 14: Productivités numérique R_N et pondérale R_W pour la Réunion et plusieurs régions tropicales, années 2015-2017.

Région	Pays	R_N (animal/animal-an)	R_W (kg/animal-an)
	Réunion	0,22 (IC 95% : 0,12 – 0,32)	68 (IC 95% : 33 – 103)
Îles tropicales développées	Australie	0,28	92
	Nouvelle-Zélande	0,21	72
Îles tropicales en développement (Sud-Ouest de l’Océan Indien)	Comores	0,11	27
	Madagascar	0,07	18
	Seychelles	0,16	40
Pays tropicaux en développement (Sud-Est de l’Afrique)	Kenya	0,12	34
	Mozambique	0,05	24
	Afrique du Sud	0,31	74

Source: FAOSTAT, calcul des auteurs.

Note : pour la Réunion, seul le cheptel allaitant est concerné. Pour les autres territoires, tous les bovins (lait, viande et mixte) sont pris en compte.

III.3. Analyse de sensibilité du modèle

III.3.a. Modalité en croît libre (M1)

Sous la modalité M1, les taux de mise bas ont expliqué 72% de la variance totale de R_N , en particulier les taux de mise bas des femelles âgées de 3 à 10 ans (52%) (Figure 16). De manière surprenante, la mortalité des veaux a eu peu d’effet sur R_N (4%) en comparaison de celle des adultes (23%) (Figure 16a). Pour R_W , les poids carcasses ont représenté la plus grande partie de la variance totale (83%), en particulier ceux des mâles de 1 à 3 ans (66%) (Figure 16b). À l’inverse, les taux démographiques ont eu globalement peu d’effet (ensemble des taux de mise bas : 12% et ensemble des taux de mortalité : 3%). Les interactions entre variables d’entrée n’ont représenté que 2% de la variance de R_N et 1% de celle de R_W (Figure 16).

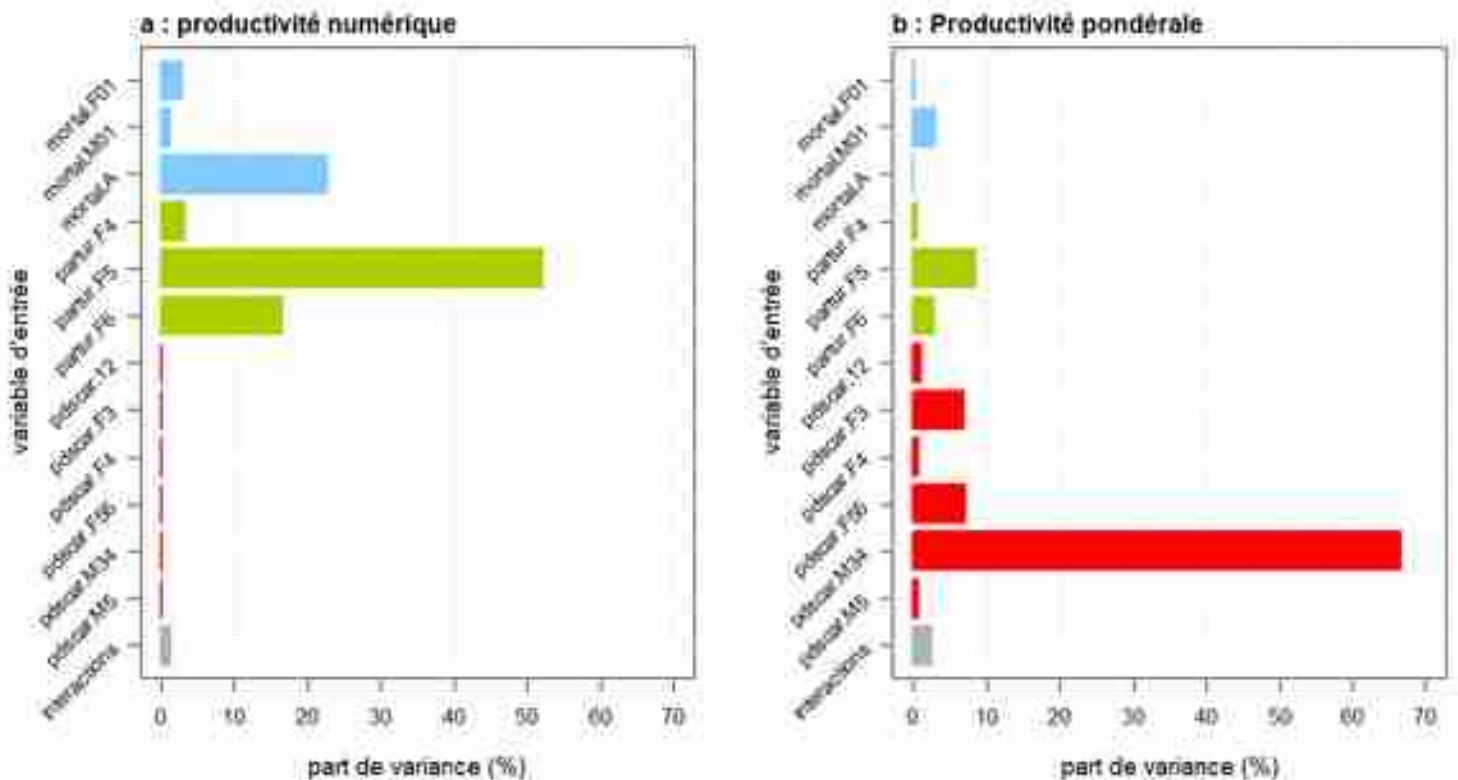


Figure 16: Contribution des variables à la variance de R_N (a) et de R_W (b) estimée par ANOVA avec un taux de croît libre (modalité M1).

III.3.b. Effet des modalités d'exploitation des femelles (M2/M3)

Globalement, les modalités d'exploitation des femelles n'ont pas modifié les résultats de sensibilité concernant la productivité numérique R_N (Figures 17a et 18a). Les différences observées entre M1, M2 et M3 ont été très faibles. Pour M2 et M3, les taux de mise bas (71% – 73%), et notamment les taux de mise bas des femelles de 3 à 10 ans (49% – 57%), sont en effet restés les variables les plus explicatives de la variance, suivies par la mortalité (23% – 26%) avec une part importante liée à la mortalité des adultes (19% – 22%). L'effet des interactions est resté faible (1% – 4% de la variance).

À l'inverse, pour la productivité pondérale R_W , les résultats des modalités M2 et M3 ont été très proches entre eux mais ont montré des différences avec M1 (Figures 17b et 18b). Les variations des niveaux d'abattages ont diminué l'effet des poids carcasses (36% – 41%) et ont augmenté l'importance des taux de mise bas (40% – 45%), notamment ceux des femelles de 3 à 10 ans (27% – 32%). De manière assez surprenante, l'effet de la mortalité a augmenté pour M2/M3 par rapport à M1 (14% – 15%), notamment pour la mortalité des adultes (12% – 13%). Comme pour R_N , l'effet des interactions est resté faible (3% – 5%).

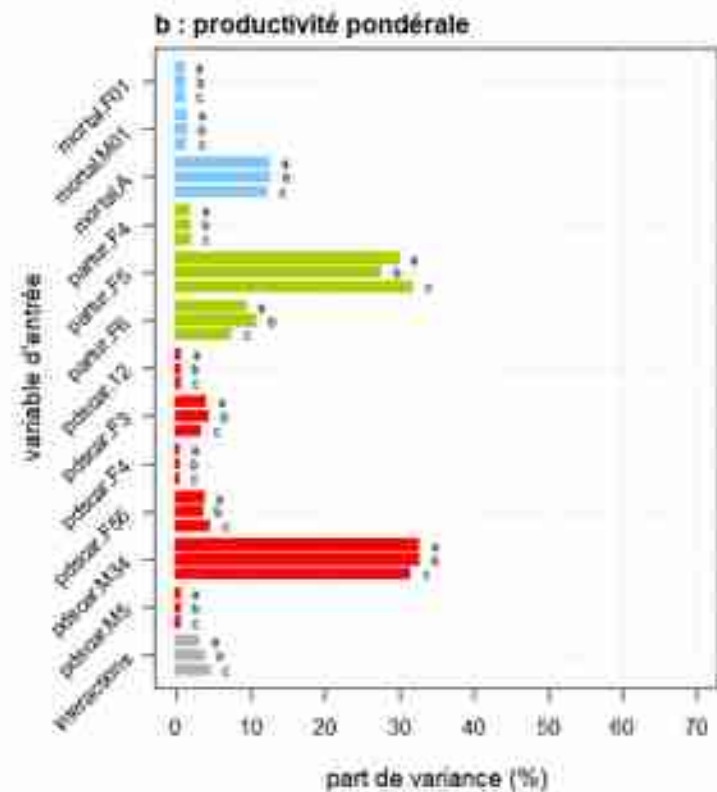
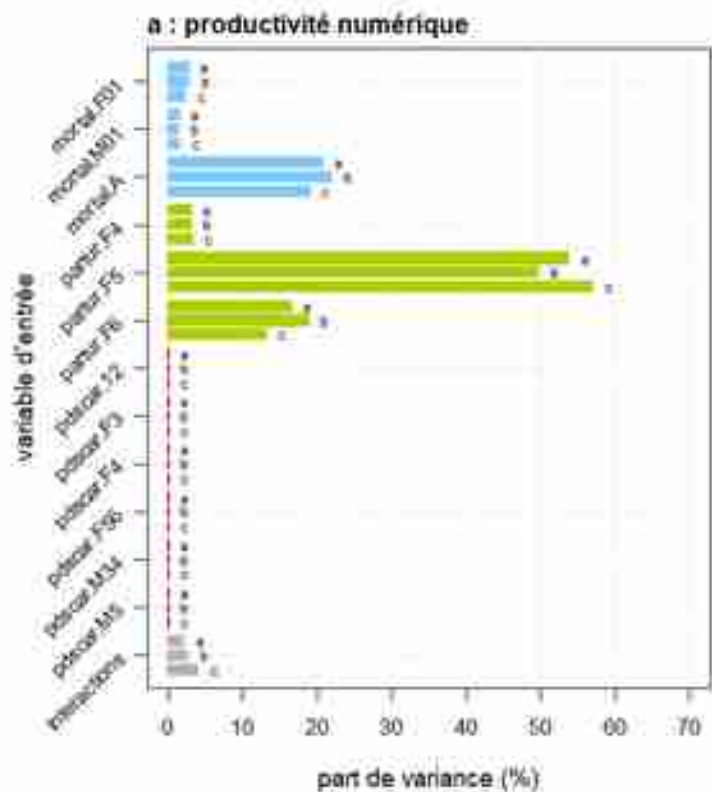


Figure 17: Contribution des variables à la variance de R_N (a) et de R_W (b) estimée par ANOVA avec un taux de croît fixé à 2,6% (modalités M2 a-b-c).

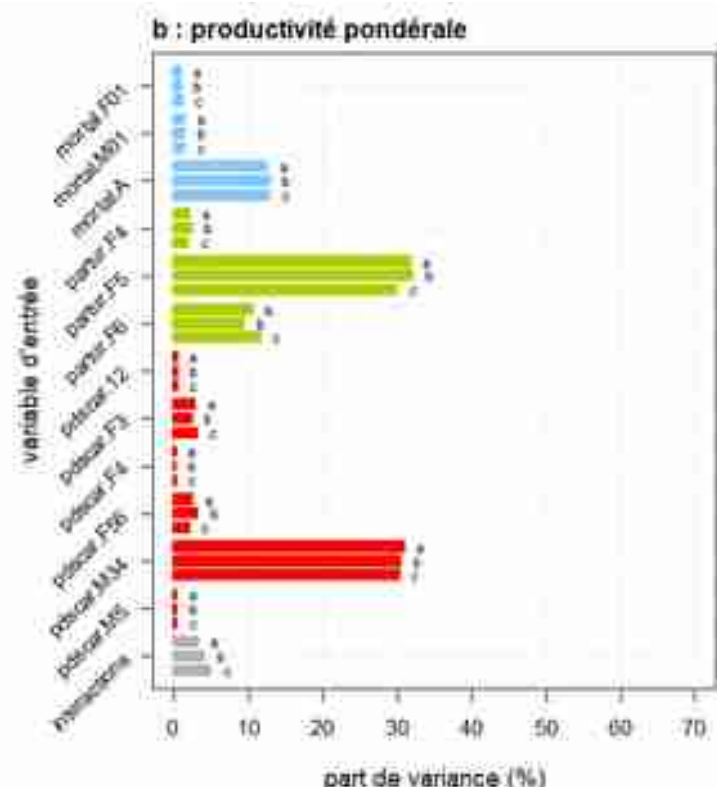
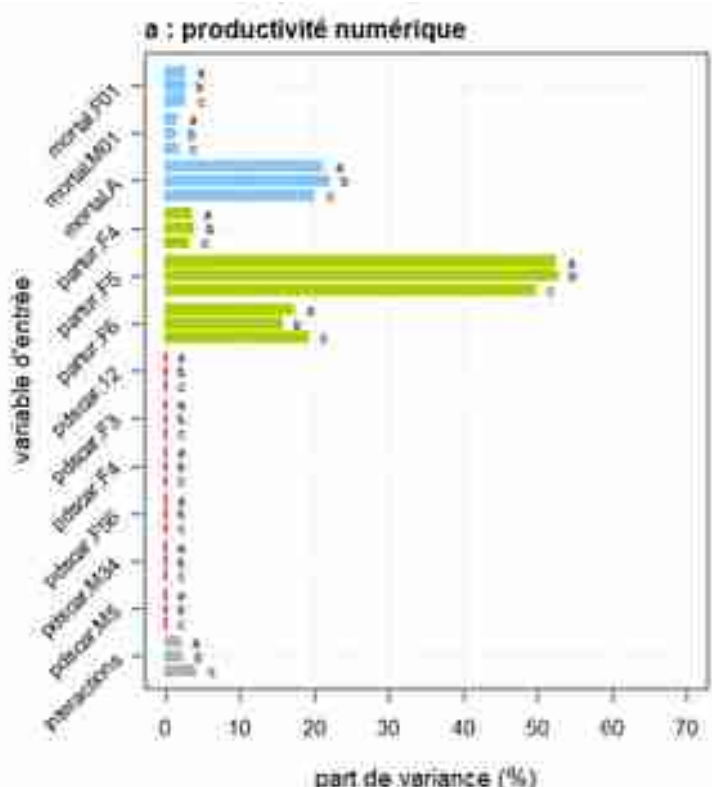


Figure 18: Contribution des variables à la variance de R_N (a) et de R_W (b) estimée par ANOVA avec un taux de croît nul (modalités M3 a-b-c).

IV. DISCUSSION

IV.1. *Validation de l'utilisation du modèle*

Le modèle démographique proposé a été cohérent avec les données observées sur la dynamique du cheptel allaitant réunionnais (Figure 14a). Ce bon résultat est proche de ceux obtenus par d'autres modèles de troupeau (Vernon & Keeling, 2009; Shabb *et al.*, 2013; Puillet *et al.*, 2014; Schärer *et al.*, 2014). La représentation de la production de viande a été un peu moins fidèle aux données empiriques (Figure 14b), ce qui est potentiellement dû à une sous-estimation des abattages par le modèle ainsi qu'à l'utilisation de poids carcasses moyennés sur plusieurs années pour le calcul de la production de viande.

La prédiction de la structure sexe et âge du cheptel a également été très satisfaisante (Figure 15). De manière plus détaillée, les classes d'âges présentant des taux d'exploitation élevés (mâles et femelles de 1 à 2 ans) ont eu des effectifs simulés inférieurs à l'effectif réel (Figure 15). Cet écart est probablement lié à certaines erreurs d'estimation des paramètres démographiques, notamment des taux d'abattages. À l'inverse, les effectifs dans les classes d'âges adultes (femelles 3-10 ans et >10 ans, mâles >3 ans) ont été surestimés par le modèle par rapport aux données empiriques. L'origine de ce biais pourrait être une sous-estimation des sorties (mort et abattages) dans ces classes d'âges et donc un effet de stockage ou de rétention d'animaux normalement abattus ou morts. Dans tous les cas, les biais sont restés faibles (-305 à +207 animaux) par rapport à l'effectif total (16 000 – 18 500 animaux). Ils ont donc eu peu d'influence sur la qualité globale du modèle, notamment pour les estimations de productivité et l'analyse de sensibilité.

IV.2. *Productivités à la Réunion et dans d'autres territoires*

Les productivités numérique et pondérale calculées pour l'élevage allaitant réunionnais à partir de notre modèle l'ont rapproché d'autres territoires insulaires développés (Tableau 14). Pour ces autres territoires, nos calculs à partir des données de la FAO ont porté sur l'ensemble des bovins des territoires concernés y compris les animaux laitiers. À l'inverse, notre estimation pour la Réunion a concerné uniquement le cheptel allaitant. Cette approximation n'est pas importante pour la productivité numérique, l'objectif à la fois dans les filières lait et viande étant de l'avoir la plus élevée possible pour produire des animaux à abattre ou lancer la lactation. En revanche, la productivité pondérale a potentiellement été sous-estimée pour les autres territoires dans la mesure où les animaux laitiers inclus dans l'analyse globale ont des poids carcasse inférieurs à ceux des animaux viande (Pfuhl *et al.*, 2007). La marge de progression possible pour l'élevage allaitant à la Réunion est donc d'autant plus élevée.

IV.3. Analyse de sensibilité en croît libre

Les facteurs les plus influents pour R_N sont les taux de mise bas des femelles adultes et les taux de mortalité des adultes (Figures 16a). Ces derniers ont un poids relatif supérieur à celui des taux de mortalité des juvéniles. En effet, une forte mortalité chez les juvéniles ne compromet pas le potentiel productif du troupeau dans la mesure où les animaux reproducteurs ne sont pas touchés. À l'inverse, la mortalité des adultes diminue directement le nombre de veaux nés et impacte donc la productivité numérique du troupeau. Ces résultats démontrent l'intérêt de veiller à ce que la mortalité des adultes reste à un niveau bas.

Les poids carcasses des mâles de un à trois ans expliquent la majorité de la variance la productivité en viande R_W (Figures 16b). Cet effet est lié à la structure des abattages à la Réunion : 66 % de la viande produite est issue de jeunes bovins mâles. Il s'agit donc d'un levier potentiel à mobiliser pour augmenter la productivité en viande du troupeau.

IV.4. Effet des modalités d'exploitation des femelles

Nous avons montré que les modalités d'exploitation des femelles ont peu d'influence sur l'analyse de sensibilité de R_N (Figures 16a, 17a et 18a). À l'inverse, ces modalités modifient les résultats de sensibilité de R_W (Figures 16b, 17b et 18b), ce qui démontre bien la nécessité de prendre en compte les modalités d'exploitation lors de la conduite d'analyses de sensibilité de productivités pondérales.

L'objectif du cheptel allaitant réunionnais est de produire de la viande et donc d'avoir la productivité pondérale la plus haute possible. Par ailleurs, du fait des fortes contraintes de production, la croissance du troupeau doit être régulée pour ne pas dépasser les ressources disponibles. L'analyse de sensibilité de la productivité pondérale R_W sous modalité de contrôle du taux de croît (M2/M3) est par conséquent la plus intéressante dans le cadre de la production allaitante réunionnaise. Ainsi, les points d'attention pour le développement de la production de viande bovine à la Réunion devront être prioritairement les taux de mise bas des vaches de 3 à 10 ans, les poids carcasses des mâles de 1 à 3 ans et la mortalité des animaux de plus de six mois (Figures 17b et 18b).

IV.5. Leviers zootechniques pour augmenter la production du cheptel allaitant réunionnais

Toutes modalités d'exploitation des femelles confondues, notre étude a mis en évidence l'importance des taux de mise bas des femelles adultes (3-10 ans et >10 ans), des poids carcasses des animaux engraisés (mâles 1-3 ans) et de la mortalité des non juvéniles (>6 mois) pour les productivités numérique R_N et pondérale R_W .

Les leviers pour augmenter les taux de mise bas concernent les différentes étapes de la reproduction des animaux : (i) la réduction de l'intervalle entre les vêlages (IVV), (ii) la réduction de la durée de l'ancestrus postpartum par l'avancement de l'âge au sevrage, (iii) la diminution du nombre d'avortements et (iv) la diminution de la mortalité périnatale. Ces objectifs pourraient notamment être atteints par de meilleures pratiques d'alimentation des mères (Schoonmaker, 2013) tant au niveau de la qualité des fourrages (Barbet-Massin *et al.*, 2004; Franque, 2016; Fages, 2017) que de la complémentation (Brunning-Fann & Kaneene, 1992; DelCurto *et al.*, 2000; Choisis *et al.*, 2008). La lutte contre le stress thermique est également une piste à envisager (Gwazdauskas, 1985; West, 2003; Dash *et al.*, 2016; Bagath *et al.*, 2019) en lien avec la saison de vêlage (Durunna *et al.*, 2014). La mortalité périnatale liée aux complications au vêlage (Bleul, 2011; Perrin *et al.*, 2011) pourrait être réduite par une surveillance accrue du troupeau (Brunning-Fann & Kaneene, 1992; Mee, 2008; Mee, Berry & Cromie, 2008; Franque, 2016).

Les poids carcasse des animaux engraisés pourraient être augmentés (i) en augmentant le poids des veaux à la naissance, (ii) en augmentant les poids vifs au sevrage, (iii) en améliorant la conformation à l'entrée en engraissement et (iv) en augmentant la croissance lors de la phase d'engraissement. L'alourdissement des veaux à la naissance passe notamment par le choix de la race et par la complémentation des mères (Angel & Poly, 1956). L'augmentation des poids vifs des broutards pourrait passer par une plus forte complémentation des veaux (Serrano *et al.*, 2005; Garcia-Launay *et al.*, 2008). Les performances de croissances pourraient être améliorées par une augmentation de la valeur énergétique de la ration (Micol *et al.*, 2007), une surveillance accrue de la santé des animaux (Bareille *et al.*, 2008) et la lutte contre le stress thermique (Mader, Davis & Brown-Brandl, 2006; Farooq *et al.*, 2010; O'Brien *et al.*, 2010).

La mortalité des bovins allaitant à la Réunion est similaire à celle observée en France métropolitaine (Blachon *et al.*, 2016). En ce sens, il s'agit plus d'un point d'attention pour veiller à limiter son éventuelle augmentation que d'un point de travail essentiel au développement de la filière.

V. CONCLUSION

Cet article a présenté un nouveau modèle démographique pour le troupeau allaitant réunionnais. Notre étude a valorisé des données anciennes collectées sur l'ensemble des éleveurs de l'île. Ce modèle simple a montré sa capacité à représenter fidèlement la dynamique annuelle du troupeau et sa production de viande. À partir de ce modèle, nous avons conduit une analyse de sensibilité de la productivité du troupeau allaitant réunionnais. Nous avons montré que dans le cas de la Réunion, les performances de reproduction et de croissance sont primordiales pour la productivité. Nous avons proposé quelques pistes d'amélioration de ces performances qui passent notamment par de meilleures pratiques d'élevage et une amélioration de l'alimentation des animaux. Ces éléments de réflexion sont à approfondir dans une optique d'accompagnement du développement de l'élevage. En particulier, notre modèle pourrait être utilisé pour simuler les effets des changements de pratiques envisagés à la Réunion.

Troisième partie :
Des scénarios démographiques
pour envisager l'évolution de
l'élevage allaitant à la Réunion

Encadré 3 :
Résumé de la troisième partie

La deuxième partie de la thèse a cherché à comprendre le fonctionnement de la production bovine allaitante. Elle a mis en évidence les déterminants des dynamiques passées et les leviers zootechniques mobilisables pour augmenter la production.

À partir de ces résultats, la **troisième partie de la thèse** cherche à identifier les **stratégies d'évolution de la filière allaitante permettant d'augmenter la production de viande à la Réunion**. Elle est composée du cinquième chapitre et correspond à un article en attente de traduction pour soumission à *Agricultural Systems* co-écrit avec Emmanuel Tillard, Hugo Valls-Fox, Charles-Émile Bigot et Matthieu Lesnoff.

Dans le **cinquième chapitre de la thèse**, nous proposons de construire des scénarios d'évolution de l'élevage allaitant réunionnais. Le diagnostic démographique présenté en Annexe A.3 a été utilisé pour identifier les performances pour lesquelles une amélioration est envisageable. Par ailleurs, les résultats de la deuxième partie ont permis de cibler les paramètres démographiques les plus influents pour augmenter la productivité du cheptel réunionnais.

Les objectifs définis par la Sicarévia sont les suivants : **atteindre une production totale de 2 000 tec/an en 2030** contre environ **1 250 tec en 2017**, maintenir le **tonnage de viande de génisse** au moins à son niveau actuel, et **limiter le chargement au pâturage à 1,5 UGB/ha** sans augmentation des surfaces allouées à l'élevage allaitant. Pour vérifier que les scénarios parviennent à répondre à ces objectifs, nous les avons évalués sur le tonnage de viande, les types de viande produits, la productivité du troupeau et le chargement.

Les scénarios ont été construits en mobilisant l'équipe dirigeante de la Sicarévia au cours de six réunions. Le modèle démographique avait été construit en amont des premiers échanges. La première réunion a permis de définir les scénarios à simuler. Par la suite, chaque réunion a donné lieu à une présentation des résultats des scénarios et à d'éventuels ajustements. Nous avons adopté une **approche par scénarios emboîtés** : en partant d'un constat commun, un premier scénario a été construit et évalué. Les lacunes de ce scénario ont été comblées dans les scénarios suivants. Cette approche nous a permis d'aboutir à quatre scénarios d'évolution de l'élevage. Les scénarios ont été simulés dans le modèle démographique proposé au chapitre 4.

Le **premier scénario** est un **scénario tendanciel** qui sert de référence pour les comparaisons. Il prolonge à horizon 2030 les paramètres moyens observés entre 2015 et 2017. Le **deuxième scénario** propose d'explorer les effets d'une **amélioration des performances de reproduction** (hausse des taux de mise bas) et de **croissance** (hausse des poids carcasses) et d'une **augmentation du renouvellement** (augmentation des taux d'abattage des vaches de plus de trois ans, diminution des taux d'abattage des génisses). Ce scénario permet d'**augmenter la production de viande bovine en limitant le chargement** mais ne réussit pas à maintenir le tonnage de viande de génisse à son niveau actuel. Pour remédier à cette lacune, le **troisième scénario** reprend les éléments du deuxième et ajoute **l'introduction**

d'insémination artificielle sexée. Cet élément permet de changer le sex-ratio à la naissance en faveur des femelles et donc d'**augmenter le nombre de génisses** disponibles pour le renouvellement et pour la production de viande. Ce scénario permet de maintenir le tonnage de viande de génisse à son niveau actuel. Le **quatrième scénario** reprend le troisième et propose d'introduire **l'engraissement à l'herbe** de génisses. Cela permet d'alourdir les carcasses de génisses par rapport à l'engraissement à l'auge et donc d'**augmenter la quantité de viande de génisse** produite. Par ailleurs, dans un contexte de **changement climatique**, ce scénario permet de déplacer une partie des animaux engraisés des zones côtières, où le **stress thermique** est fort en été, vers les prairies d'altitude au climat plus frais.

L'évaluation des scénarios montre que **l'amélioration des performances de reproduction et de croissance** est nécessaire mais non suffisante pour augmenter la production de viande. **Seuls les scénarios les plus ambitieux permettent d'atteindre l'objectif de 2 000 tec/an.** En particulier, le **renouvellement du troupeau** doit être accéléré en **augmentant les abattages de vaches adultes** et en **réformant toutes les vaches de plus de dix ans.** Cette pratique permet de réduire le nombre de vaches improductives afin de libérer des surfaces de pâturage pour l'engraissement de génisses à l'herbe. **L'insémination artificielle sexée** et **l'engraissement à l'herbe** permettent d'augmenter nettement la production de viande de génisse. Leur mise en œuvre à la Réunion nécessite cependant d'importants changements de pratiques de la part des éleveurs. La coopérative a donc un rôle d'accompagnement fort à jouer pour encourager ces évolutions.

Chapitre 5 :
La modélisation démographique comme outil
pour accompagner l'évaluation de stratégies de filière :
le cas de l'élevage allaitant à la Réunion

I. INTRODUCTION

À la Réunion, le développement de l'élevage allaitant est un enjeu majeur du développement rural par sa capacité à valoriser les ressources locales et par la possibilité de gagner des parts de marché sur les importations (Laboureur, 2019; Bonnet, 2021). Pour cette raison, un important plan de développement a été déployé entre 2011 et 2021 pour gagner dix points de part de marché (ARIBEV & ARIV, 2015; DAAFR, 2019b). Or, ce plan n'a pas rempli ses objectifs: le taux de couverture pour la viande bovine est passé de 33% en 2009 à 26% en 2018 (DAAFR, 2019a). Dans ce contexte, la Sicarévia, unique coopérative d'éleveurs allaitants de l'île, a fait appel au Cirad pour comprendre les raisons de cette baisse et identifier les moyens d'augmenter la production. L'objectif actuel de la Sicarévia est d'atteindre une production de 2000 tonnes équivalent carcasse (tec) par an en 2030 alors que la production annuelle moyenne entre 2005 et 2017 était de 1206 tec.

Dans un premier article (Bonnet *et al.*, 2020), nous avons identifié trois niveaux de déterminants de l'évolution passée de la production bovine allaitante à la Réunion : les conditions économiques et climatiques, les performances des animaux, et les choix de gestion des éleveurs et de la coopérative. Nous avons montré comment les conditions économiques, en contraignant le revenu des éleveurs, ont amené à des changements de pratiques. En particulier, l'augmentation des abattages de génisses a entraîné un vieillissement du troupeau et a conduit à la baisse des taux de mise bas et à la stagnation de la production de viande. La réaction de la coopérative a permis de rajeunir le troupeau et de relancer la production de viande bovine.

Dans une seconde étude (Bonnet *et al.*, 2021), nous avons proposé un modèle démographique (Leslie, 1945; Caswell, 1989; Lesnoff, 2011) du troupeau allaitant réunionnais. Ce type de modèle permet de simuler quantitativement les effets de changements de performances sur la production (Ezanno, 2005; Lesnoff, 2015b). Il décompose le troupeau en classes de sexe et d'âge, ce qui permet d'étudier des groupes d'animaux homogènes au niveau des performances. Nous avons montré la capacité de notre modèle à représenter fidèlement les dynamiques passées de l'élevage allaitant réunionnais. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité du modèle a montré que les performances de reproduction, en particulier les taux de mise bas des femelles de trois à dix ans, et les performances de croissance pondérale, notamment les poids carcasse des mâles âgés d'un à trois ans, sont des paramètres essentiels pour l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion.

En nous basant sur nos résultats précédents, nous proposons dans cet article une approche par scénarios pour envisager l'évolution de l'élevage allaitant réunionnais. Nous avons défini plusieurs scénarios sur un horizon de 10 ans (2021-2030). Ces scénarios ont été simulés à l'aide du modèle démographique décrit dans Bonnet *et al.* (2021) et ont correspondu à différentes hypothèses de paramètres démographiques et de croissance pondérale (taux de mise bas, taux de mortalité, taux

d'abattages, poids carcasses) définies avec la Sicarévia. Ces hypothèses ont traduit des évolutions d'organisation de la production envisagées par la coopérative. Elles ont concerné notamment la gamme de variation des paramètres et la rapidité des changements pour éviter des transitions brutales. Par ailleurs, les surfaces actuellement utilisées par l'élevage allaitant ont été considérées par la Sicarévia comme suffisantes pour augmenter la production de viande. Les scénarios sont donc construits à ressources constantes, c'est-à-dire sans augmentation de la surface utilisée par le troupeau allaitant.

Après avoir présenté la méthode de construction des scénarios, cet article propose une évaluation de leur pertinence sur un certain nombre de critères discutés avec la coopérative. Nous donnerons ensuite des pistes d'évolution de la production pour atteindre les objectifs définis.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. Site d'étude et données

L'élevage allaitant à la Réunion est organisé selon un modèle biogéographique original (Choisis *et al.*, 2008). L'organisation actuelle associe le naissage extensif (1 UGB/ha en moyenne) dans les Hauts (> 800 m d'altitude) et l'engraissement en bâtiment dans les Bas. Les naisseurs (Photographie 3) pratiquent le pâturage toute l'année avec une complémentation faible à nulle des animaux (0-3 kg/animal/jour) (Marblé *et al.*, 2018). À l'inverse, la phase d'engraissement (Photographie 4), plus intensive (2,25 UGB/ha en moyenne), est conduite en bâtiment à l'auge et repose largement sur les concentrés importés (5-7 kg/animal/jour) et l'affouragement en vert ou les fourrages conservés (Kurtz, 2019). L'élevage allaitant occupe environ 10 000 ha dont 9 000 ha pour les naisseurs (Lorré, 2019; Magnier, 2019). La reproduction est presque exclusivement basée sur la monte naturelle (Sicarévia, communication personnelle). La filière produit principalement deux types d'animaux, des taurillons (mâles abattus en moyenne à 20 mois) et des génisses légères (femelles abattues en moyenne à 22 mois), engraisés à l'auge. Cette segmentation particulière répond aux besoins particuliers du marché : les grandes et moyennes surfaces (GMS) valorisent principalement de la viande de taurillon, alors que les boucheries traditionnelles demandent des génisses légères. Du fait de la forte demande en viande de génisse et donc d'un niveau élevé d'abattage des jeunes femelles, le renouvellement (remplacement de vaches âgées par des génisses entrant en production) du troupeau reproducteur est faible et le troupeau allaitant réunionnais globalement âgé, ce qui dégrade les performances de reproduction (Bonnet *et al.*, 2020).

À la Réunion, un partenariat entre le Cirad et la Sicarévia a permis d'avoir accès aux données de la Base de Données Nationale d'Identification (BDNI). Ces données, convertie au format Laser2 (Juanès *et al.*, 2014), sont utilisées pour l'estimation des paramètres démographiques. Les estimations sont faites avec le logiciel R v3.5-1 (R Core Team, 2019) et le package laser2demog v.1.3-0 (Lesnoff *et al.*, 2011).

II.2. Démarche de construction des scénarios

II.2.a. Consultation des acteurs locaux

Les scénarios ont été construits dans une démarche pas à pas et participative. Six réunions ont eu lieu avec la Sicarévia entre mai et juin 2020. Le modèle démographique a été construit en amont des discussions et a été présenté lors de la première réunion. Lors de cette réunion, les

premiers scénarios ont été construits. Par la suite, chaque réunion a fait l'objet d'une présentation des résultats des scénarios établis précédemment sur la base de simulations conduites par le Cirad. Si nécessaire, les scénarios étaient discutés à nouveau et ajustés. Les principaux points discutés ont été les évolutions des performances des animaux (rythme d'évolution et ampleur des changements) et l'ajustement des types de viande produits. Les scénarios ont également été présentés dans leur version finale à l'équipe technique de la Sicarévia (techniciens conseil en élevage) ainsi qu'à l'Association Réunionnaise de Pastoralisme (ARP) pour validation.

II.2.b. Objectif et contraintes des scénarios

L'objectif visé dans les scénarios est de permettre d'atteindre une production de viande bovine par la Sicarévia de 2 000 tec/an à horizon 2030. Les contraintes en termes de production et de commercialisation sont (i) de maintenir la production de viande de génisses à son niveau actuel ou de l'augmenter et (ii) de ne pas dépasser un chargement maximal moyen de 1,5 UGB/ha au pâturage, correspondant à la charge actuelle. Cela implique notamment de tendre à terme vers un taux de croît nul pour le cheptel.

II.2.c. Temporalité

Les simulations ont été réalisées sur la période globale de 2015-2030. À la date de réalisation de ce travail, les données démographiques utilisables pour calibrer le modèle n'étaient disponibles que jusqu'en 2017. Les paramètres moyens des années 2018-2020 ont été supposés identiques à ceux des années 2015-2017, ces derniers ayant été utilisés pour simuler la période 2015-2020. Les éléments de scénarisation entrent en jeu à partir de l'année 2021 et jusqu'à l'année 2030.

Le rythme des évolutions des paramètres entre 2021 et 2030 a été définie en collaboration avec la Sicarévia. Il s'agissait d'assurer une temporalité des scénarios qui soit réalisable tant pour les éleveurs (amélioration des performances) que pour la commercialisation (changement des types de viande produits). Le rythme de diminution de la part de viande de génisse dans la production totale a été un critère particulièrement important pour la coopérative.

II.2.d. Niveau d'évolution des paramètres des scénarios

Les discussions avec la Sicarévia ont montré que deux niveaux d'évolution des performances pouvaient être explorés dans les scénarios. Le niveau bas (« *Bas* ») suppose une amélioration *a minima* des performances du cheptel par rapport aux performances actuelles. Il constitue une base de ce que la coopérative envisage à horizon 2030. En complément, et sur proposition du Cirad, le niveau haut (« *Haut* ») suppose une amélioration plus importante des performances. Il permet d'explorer les conséquences de changements plus radicaux.

II.3. Paramètres utilisés dans les scénarios – performances actuelles

II.3.a. Performances de reproduction

Les taux de mise bas des bovins allaitants à la Réunion pour les années 2015-2017 sont présentées dans le tableau 15. Les 3^e quartile (25% des meilleurs éleveurs) et 9^e décile (10% des meilleurs éleveurs) ont été déterminés comme objectifs de gains techniques *Bas* et *Haut*. Les taux de mise bas des femelles de moins de 3 ans (mb_{F2-3}) ne sont pas utilisés dans les scénarios car les gains envisageables et l'importance dans la production sont faibles (Bonnet *et al.*, 2021).

Tableau 15: Taux de mise bas (en /animal-an) des bovins allaitants à la Réunion (moyenne 2015-2017)

Paramètre	Ensemble de la Réunion	3 ^e quartile (objectif <i>Bas</i>)	9 ^e décile (objectif <i>Haut</i>)
mb_{F2-3}	0,48	<i>Pas d'objectif d'amélioration</i>	
mb_{F3-10}	0,62	0,77	0,87
$mb_{F>10}$	0,57	0,78	0,84

mb_{F3-10} : taux de mise bas des femelles de 3 à 10 ans, $mb_{F>10}$: taux de mise bas des femelles de plus de 10 ans.

II.3.b. Croissance des animaux

Les poids carcasse ont été estimés à partir des données d'abattage de la Sicarévia. Les données sont groupées par types d'animaux (Tableau 16). Les 6^e et 9^e déciles (40% et 10% des meilleurs éleveurs) des poids carcasse observé sur 2015 – 2017 (Tableau 16) ont été définis comme objectifs *Bas* et *Haut*. Ces objectifs tiennent compte du contexte spécifique de la Réunion (stress thermique, qualité inégale des brouards, diversité des races). Les poids carcasses des taureaux adultes ne sont pas considérés car ils concernent peu d'animaux et donc une part très faible de la production de viande (Bonnet *et al.*, 2021).

Tableau 16: Poids carcasses (en kg équivalent carcasse, kg-ec) des bovins allaitants à la Réunion (moyenne 2015-2017) et en France métropolitaine (race limousine, chiffres 2015).

Type d'animaux	Paramètres	Réunion	6 ^e décile (objectif <i>Bas</i>)	9 ^e décile (objectif <i>Haut</i>)
Génisses	pcf_{F1-2} , pcf_{F2-3}	253,1	260,4	296,5
Vaches adultes	pcf_{F3-10} , $pcf_{F>10}$	302,5	311,6	387,6
Taurillons	pcf_{M1-2} , pcf_{M2-3}	358,8	371,2	411,2

Les données sont groupées par types d'animaux homogènes. pcf_{F1-2} : poids carcasses pour les génisses de 1 à 2 ans, pcf_{F2-3} : poids carcasses pour les génisses de 2 à 3 ans, pcf_{F3-10} : poids carcasses pour les vaches de réformes de 3 à 10 ans, $pcf_{F>10}$: poids carcasses des vaches de réforme de plus de 10 ans, pcf_{M1-2} : poids carcasses des taurillons de 1 à 2 ans, pcf_{M2-3} : poids carcasse des taurillon de 2 à 3 ans.

II.3.c. Paramètres de gestion – taux d’abattage

Les pratiques liés au renouvellement et aux choix des types d’animaux abattus sont intégrées par le biais des taux d’abattage. Les changements dans les taux d’abattage sont fixés manuellement après discussion avec la coopérative de manière à équilibrer les objectifs de production (tonnage totale et part de la viande de génisse) et le taux de multiplication du troupeau. L’introduction d’IA sexée est intégrée dans les scénarios par le biais du sex-ratio à la naissance.

II.4. Description des scénarios

II.4.a. Scénario business as usual

Le scénario tendanciel (business as usual, *BAU*) prolonge les paramètres moyens des années 2015-2020 jusqu’en 2030. Il correspond donc à une référence pour la comparaison avec les autres scénarios.

II.4.b. Scénario de base

Le scénario de base (*BASE*) correspond aux évolutions envisagées par la Sicarévia. Il présente l’effet (i) d’un rajeunissement du troupeau par l’augmentation du renouvellement, (ii) d’une augmentation des taux de mise bas des femelles de plus de trois ans et (iii) d’une augmentation des poids carcasse. L’augmentation du renouvellement est prise en compte par l’augmentation des abattages de vaches adultes et la diminution des abattages de génisses. Ce scénario est décliné en deux versions. La première version (*BASE.Bas*) correspond à des améliorations de performances et des changements de pratiques limités. Les performances de reproduction moyenne sont amenées au niveau des 25% meilleurs éleveurs (Tableau 1) et les performances de croissance pondérale au niveau des 40% meilleurs éleveurs sur la période 2015-2017 (Tableau 2). La deuxième version (*BASE.Haut*) correspond à des améliorations de performances et des changements de pratiques plus ambitieux. Les performances de croissance pondérale et de reproduction moyenne sont amenées au niveau des 10% meilleurs éleveurs sur la période 2015-2017 (Tableaux 1 et 2). Les changements de taux d’abattage sont fixés manuellement dans des proportions discutées avec la coopérative.

II.4.c. Scénario avec insémination artificielle sexée

Le scénario avec IA sexée (*IAS*) reprend les éléments du scénarios *BASE* et y ajoute (iv) l’utilisation de l’IA sexée (changement du sex-ratio à la naissance). L’introduction de l’IA sexée augmente la proportion de femelles à la naissance et donc le nombre de génisses disponibles pour

l'abattage et la reproduction. De manière similaire au scénario de base, le scénario *IAS* a été décliné en une version prudente (*IAS.Bas*) et une version plus ambitieuse (*IAS.Haut*). Les performances de croissance pondérale et de reproduction sont les mêmes que pour les scénarios *BASE*. Les niveaux d'IA sexée sont de 15% des naissances dans le scénario *IAS.Bas* et de 21% des naissances dans le scénario *IAS.Haut*.

II.4.d. Scénario avec engraissement à l'herbe

Le scénario avec engraissement à l'herbe (*ENGH*) est un scénario de rupture qui modifie largement l'organisation de la production. Il reprend le scénario *IAS* et ajoute (v) le remplacement de 60% des génisses engraisées à l'auge (abattues vers 22 mois, 260-295 kg-ec) par des génisses lourdes engraisées à l'herbe (abattues vers 30-36 mois, 360-410 kg-ec). L'intérêt de ce scénario est d'augmenter la production de viande de génisse et de déplacer une partie des animaux engraisés dans les Bas et soumis à un stress thermique en été vers les prairies d'altitude au climat plus frais. Il est décliné en une version basse (*ENGH.Bas*) et une version haute (*ENGH.Haut*). Les performances de croissance pondérale et de reproduction et les niveaux d'IA sexée sont les mêmes que dans les scénarios *IAS.Bas* et *IAS.Haut*. Dans le cas du scénario prudent *ENGH.Bas*, les poids carcasse des génisses lourdes sont fixés à 360 kg-ec. Dans le cas du scénario ambitieux *ENGH.Haut*, ils sont fixés à 410 kg-ec.

Ce type d'engraissement ne pourra se mettre en place qu'après abattage des vaches âgées improductives afin de disposer de suffisamment de pâtures libres pour les génisses. Pour cette raison, il n'a été introduit dans les scénarios qu'à partir de 2022 pour les scénarios *Haut* et 2025 pour les scénarios *Bas*.

II.5. Simulation des scénarios

II.5.a. Modèle démographique

Le modèle démographique utilisé a été décrit dans un précédent article (Bonnet *et al.*, 2021). Les paramètres sur lesquels jouent les scénarios sont représentés en gras dans le schéma du modèle démographique (Figure 19). Les simulations sont réalisées avec le package *mmage* v2.4-2 (Lesnoff, 2015a) dans R v3.5-1 (R Core Team, 2019).

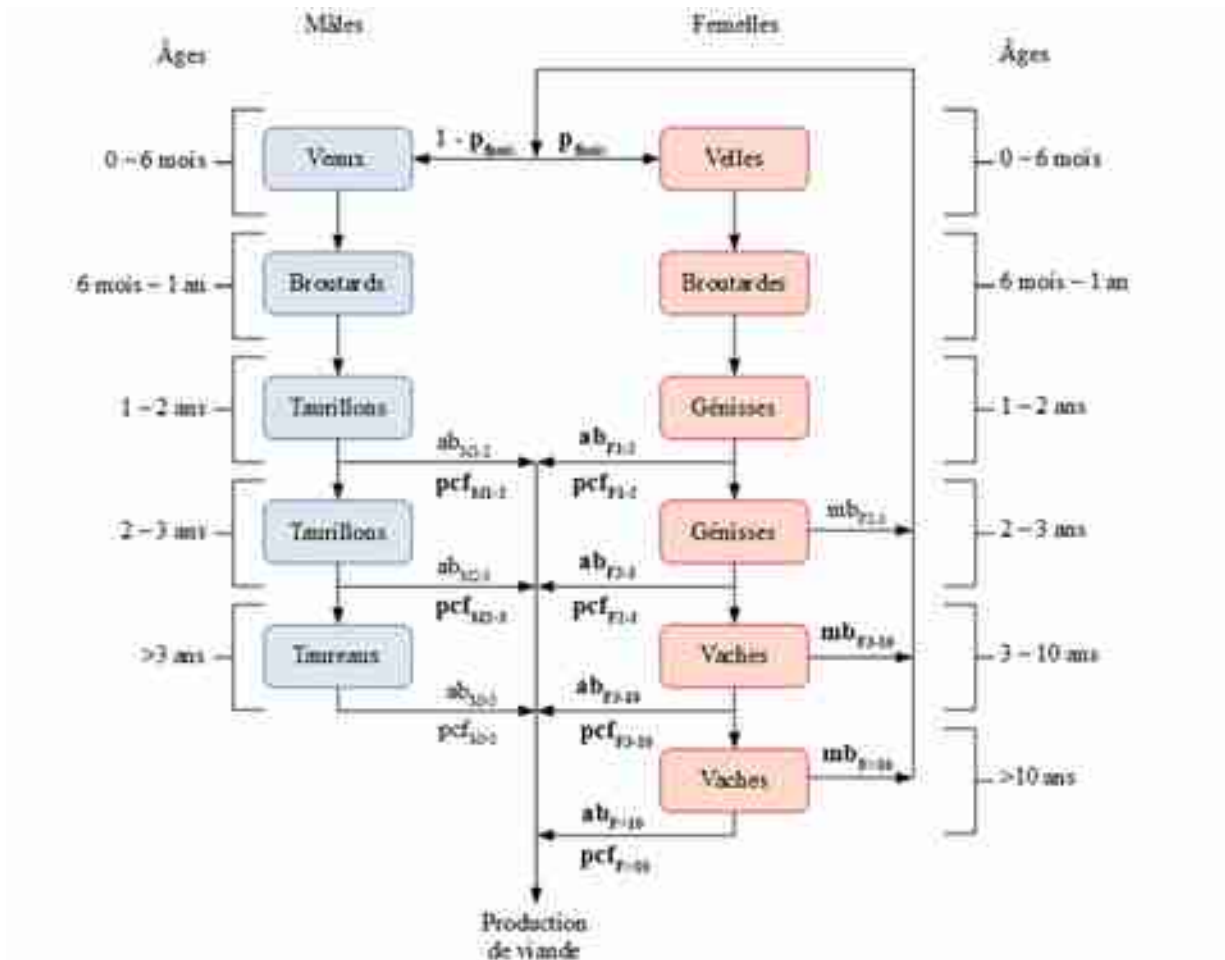


Figure 19: Représentation simplifiée du modèle démographique utilisé pour les simulations des scénarios.

Les paramètres utilisés dans les scénarios sont en gras. Gauche : mâles, droite : femelles. p_{fnaiss} : proportion de femelles à la naissance, mb : taux de mises bas, ab : taux d'abattages, pcf : poids carcasse froide. Les classes de sexe (M/F) et d'âge (en années) sont données en indice.

II.5.b. Traduction des scénarios en paramètres démographiques

Les paramètres démographiques et de croissance pondérale à l'échelle de la Réunion sont les seules entrées acceptées par le modèle (Figure 19). Or, les scénarios *IAS* et *ENGH* concernent l'organisation de la production et ne sont donc pas directement intégrables dans le modèle. Ainsi, il a été nécessaire de les traduire en paramètres démographiques et de croissance pondérale. Cette traduction a été l'étape de notre démarche la plus délicate à mettre en œuvre. Nous avons donc mobilisé l'expertise de la Sicarévia afin d'envisager une traduction plausible de ces scénarios en paramètres admissibles par le modèle.

Les gains nécessaires par rapport à la période 2015-2017 sont donnés dans le Tableau 17. Les taux démographiques et poids carcasse donnés correspondent aux objectifs définis dans les

Tableaux 15 et 16. Les objectifs de poids carcasse utilisés dans les scénarios ont été arrondis à 5 kg-ec. Les pourcentages donnés dans le Tableau 17 correspondent à l'évolution nécessaire des paramètres actuels pour atteindre l'objectif. Les taux d'abattage donnés dans le Tableau 17 correspondent aux taux d'abattage finaux définis manuellement à partir des objectifs de production et de contrôle du taux de multiplication du troupeau. Le détail de l'évolution des paramètres est donné dans l'annexe A.2.

Tableau 17: Variation (2020-2030) et valeur finale (2030) des taux de mise bas, des poids carcasse, des taux d'abattage et du sex-ratio à la naissance pour les sept scénarios d'évolution de l'élevage

Paramètre	Type d'animaux	Nom		BAU	BASE.Bas	BASE.Haut	IASEX.Bas	IASEX.Haut	ENGHERB.Bas	ENGHERB.Haut
Taux de mise bas	Vaches 3 – 10 ans	mb _{F3-10}	Variation	ref	+24%	+40%	+24%	+40%	+24%	+40%
			Valeur	0,62	0,77	0,87	0,77	0,87	0,77	0,87
	Vaches > 10 ans	mb _{F>10}	Variation	ref	+35%	+45%	+35%	+45%	+35%	+45%
			Valeur	0,58	0,78	0,84	0,78	0,84	0,78	0,84
Proportion de femelles à la naissance	Veaux et velles 0 mois	p _{fmais}	Valeur	0,50	0,50	0,50	0,58 ¹⁸	0,61 ¹⁹	0,58 ¹⁸	0,6 ¹⁹
Poids carcasses	Génisses 1 – 2 ans	pcf _{F1-2}	Variation	ref	+4%	+18%	+4%	+18%	+4%	+18%
			Valeur	250	260	295	260	295	260	295
	Génisses 2 – 3 ans	pcf _{F2-3}	Variation	ref	+4%	+18%	+4%	+18%	+28%	+36%
			Valeur	250	260	295	260	295	320 ²⁰	340 ²⁰
	Vaches 3 – 10 ans	pcf _{F3-10}	Variation	ref	+3,3%	+30%	+3,3%	+30%	+3,3%	+30%
			Valeur	300	310	390	310	390	310	390
	Vaches > 10 ans	pcf _{F>10}	Variation	ref	+3,3%	+30%	+3,3%	+30%	+3,3%	+30%
			Valeur	300	310	390	310	390	310	390
Taurillons 1 – 2 ans	pcf _{M1-2}	Variation	ref	+2,8%	+13,9%	+2,8%	+13,9%	+2,8%	+13,9%	
		Valeur	360	370	410	370	410	370	410	
Taurillons	pcf _{M2-3}	Variation	ref	+2,8%	+13,9%	+2,8%	+13,9%	+2,8%	+13,9%	

18 Amener la proportion de femelles à la naissance à 0,575 correspond à 15% d'insémination artificielle sexée (IAS) et 85% de monte naturelle (MN) : $p_{fmais} = 0,5 \times MN + IAS$, soit $p_{fmais} = 0,5 \times 0,85 + 0,15 = 0,575$

19 Amener la proportion de femelles à la naissance à 0,605 correspond à 21% d'insémination artificielle sexée (IAS) et 85% de monte naturelle (MN) : $p_{fmais} = 0,5 \times MN + IAS$, soit $p_{fmais} = 0,5 \times 0,79 + 0,21 = 0,605$

20 Les poids carcasse des femelles de 2 à 3 ans (pcf_{F2-3}) pour les scénarios *ENGH* incluent une augmentation des poids carcasses des génisses légères similaires aux autres scénarios ainsi que l'introduction de génisses lourdes engraisées à l'herbe.

	2 – 3 ans		Valeur	360	370	410	370	410	370	410
Taux d'abattage	Génisses 1 – 2 ans	ab _{F1-2}	Variation	ref	-36%	-38%	-36%	-16%	-50%	-34%
			Valeur	0,48	0,31	0,35	0,31	0,41	0,24	0,32
	Génisses 2 – 3 ans	ab _{F2-3}	Variation	ref	-5%	-7%	-5%	-7%	+50%	+60%
			Valeur	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,24	0,25
	Vaches 3 – 10 ans	ab _{F3-10}	Variation	ref	+175%	+270%	+300%	+360%	+300%	+360%
			Valeur	0,05	0,13	0,18	0,20	0,22	0,20	0,22
	Vaches > 10 ans	ab _{F>10}	Variation	ref	+600%	+650%	+600%	+650%	+600%	+650%
			Valeur	0,13	0,90	0,96	0,90	0,96	0,90	0,96

II.6. Évaluation des scénarios

Les scénarios sont évalués sur la viande produite (tonnage total et type de viande), sur les productivités numérique et pondérale et sur les chargements. Les tonnages, exprimés en tonnes équivalent carcasse (tec), sont calculées comme la somme des produits du nombre d'animaux abattus pour chaque classe de sexe et d'âge par le poids carcasses correspondant. Les tonnages des différents types de viande (viande de génisse, de taurillon et de vache de réforme) ont été distingués pour évaluer la capacité des scénarios à maintenir le tonnage de viande de génisse dans le total.

Les productivités numérique et pondérale correspondent à un nombre d'animaux ou à un tonnage de viande potentiel produit annuellement par animal présent dans le troupeau. Cet indicateur synthétise l'ensemble de la dynamique du troupeau (croissance du troupeau et abattages). Pour une année, elles sont estimées comme suit :

$$R = \frac{O_{net} + \Delta N}{\bar{N}}$$

où O_{net} sont les abattages, ΔN la variation d'effectif entre le début et la fin d'année, et \bar{N} l'effectif moyen du troupeau pour l'année considérée. La productivité numérique R_N correspond au ratio R où la grandeur $O_{net} + \Delta N$ est exprimée en têtes, son unité est animal/animal-an. La productivité pondérale R_W est obtenue en exprimant la grandeur $O_{net} + \Delta N$ en quantité de viande en le multipliant par les poids carcasse de chaque catégorie de sexe et d'âge des animaux.

Les chargements correspondent à un nombre d'unités gros bétail (UGB) rapporté à la surface dédiée à l'élevage et s'exprime en UGB/ha. Le nombre d'UGB est estimé en utilisant les coefficients de l'Institut de l'élevage (DRAAF Rhône-Alpes, 2010) pour chaque classe de sexe et d'âge. Les systèmes d'élevage étant très différents entre les animaux conduits au pâturage (reproducteurs, veaux et génisses engraisées à l'herbe) et ceux engraisés à l'auge, nous avons distingué les chargements au pâturage et en engraissement à l'auge. Cette distinction s'est faite selon le sexe et l'âge des animaux et leur orientation. Nous avons tenu compte de de l'âge à la mise en lot (sortie du pâturage vers l'engraissement à l'auge à 8,5 mois) et pour les femelles, de la proportion de génisses destinées à la production de viande.

Les animaux de moins de six mois (veaux et velles), les mâles de plus de trois ans (taureaux) et les femelles de plus de deux ans (génisses de renouvellement destinées à la reproduction, génisses lourdes engraisées à l'herbe et vaches) ont été considérés comme étant au pâturage. Les mâles âgés d'un à trois ans ont été considérés comme engraisés à l'auge. Les mâles âgés de six mois à un an ont été comptabilisés à la fois au pâturage (de 6 à 8,5 mois, soit 40% du chargement total de la classe d'âge) et en engraissement (de 8,5 à 12 mois, soit 60% du chargement total de la classe d'âge). Pour les femelles de six mois à un an, nous avons évalué la proportion de ces génisses destinées à l'engraissement à l'auge $p_{eng,F}$ à partir des effectifs abattus avant deux ans. Les

chargements de cette classe d'âge ont été affectés à la fois au pâturage (de 6 à 8,5 mois pour toutes les génisses et de 8,5 à 12 mois pour les génisses de renouvellement destinées à la reproduction, soit $40\% + (1 - p_{eng.F}) \times 60\%$ du chargement total de la classe d'âge) et à l'engraissement à l'auge (de 8,5 à 12 mois pour les génisses engraisées, soit $p_{eng.F} \times 60\%$ du chargement total de la classe d'âge).

III. RÉSULTATS

III.1. Évolution de la production de viande

Le niveau d'ambition *Bas* ou *Haut* a été le principal facteur influençant la production de viande des scénarios. Au sein d'un même niveau d'ambition, les scénarios ont été peu contrastés entre eux. Seuls les scénarios *Haut* ont dépassé l'objectif de 2 000 tec annuelles (Figure 20a). Les scénarios intégrant une forte proportion d'IA sexée (*IAS.Haut* et *ENGH.Haut*) ont été les seuls à parvenir à maintenir la part de la viande de génisse dans le total de viande produite au niveau du celui du scénario *BAU* (22 %). Cependant, du fait de l'augmentation de la production totale, tous les scénarios ont connu une augmentation du tonnage de viande de génisse (Figure 20b). Tous les scénarios ont par ailleurs conduit à une augmentation importante du tonnage de viande de vache adulte du fait de l'augmentation des réformes (Figure 30c et 30d, Annexe A.2).

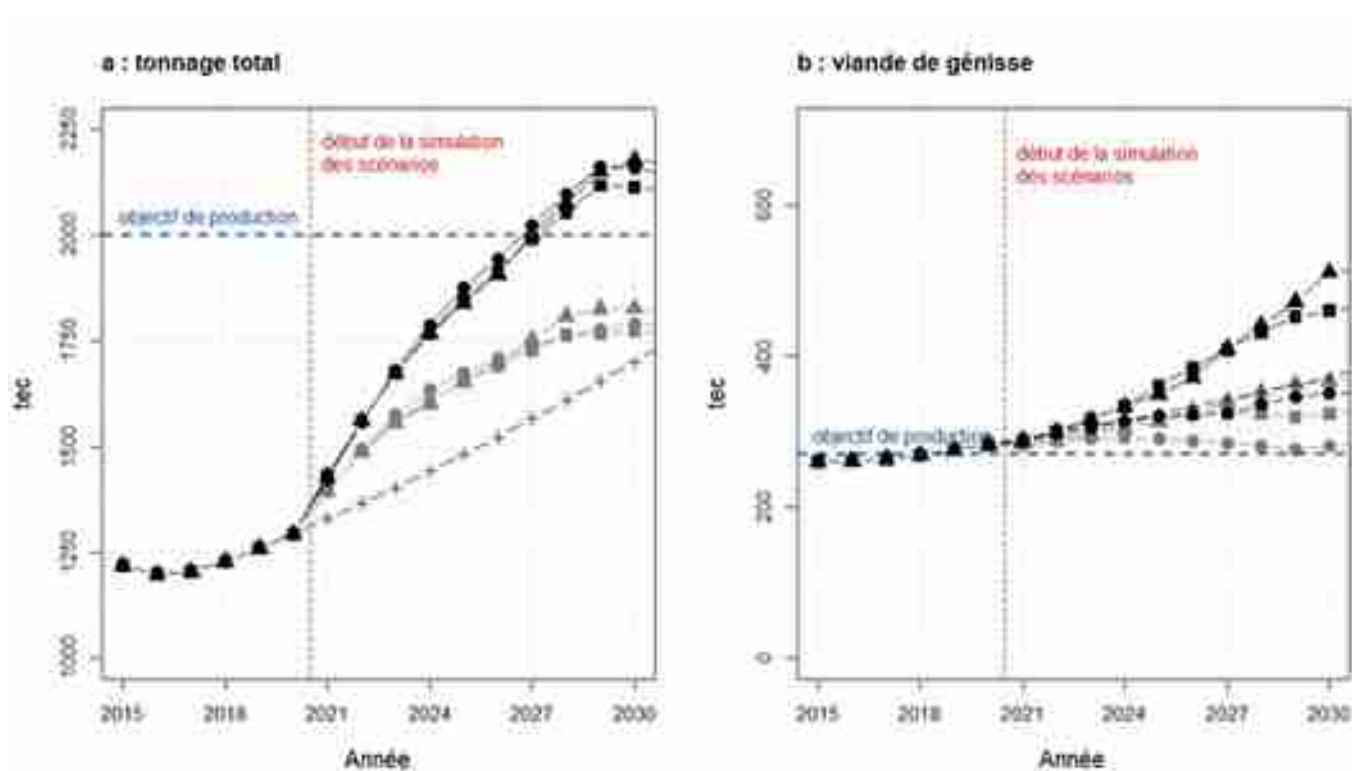


Figure 20: Production totale de viande (a) et production de viande de génisse (b) entre 2015 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

Les tonnages pour la viande de taurillon et la viande de vache de réforme figurent en Figure 29 (Annexe A.2)

III.2. Productivité du troupeau

Tous les scénarios ont permis d'augmenter la productivité numérique (Figure 21a) et pondérale (Figure 21b) par rapport au scénario de référence (+11% à +19% pour la productivité numérique et +16% à +45% pour la productivité pondérale). Les scénarios *Haut* a présenté des productivités supérieures aux scénarios *Bas*. Les scénarios *Haut* d'une part et *Bas* d'autre part ont été peu contrastés entre eux. À partir de 2023, l'augmentation de la productivité numérique a ralenti (Figure 21a) du fait de la diminution du nombre de femelles de plus de 10 ans abattues (Figure 30d, Annexe A.2) lié à l'épuisement du stock de vaches âgées à réformer.

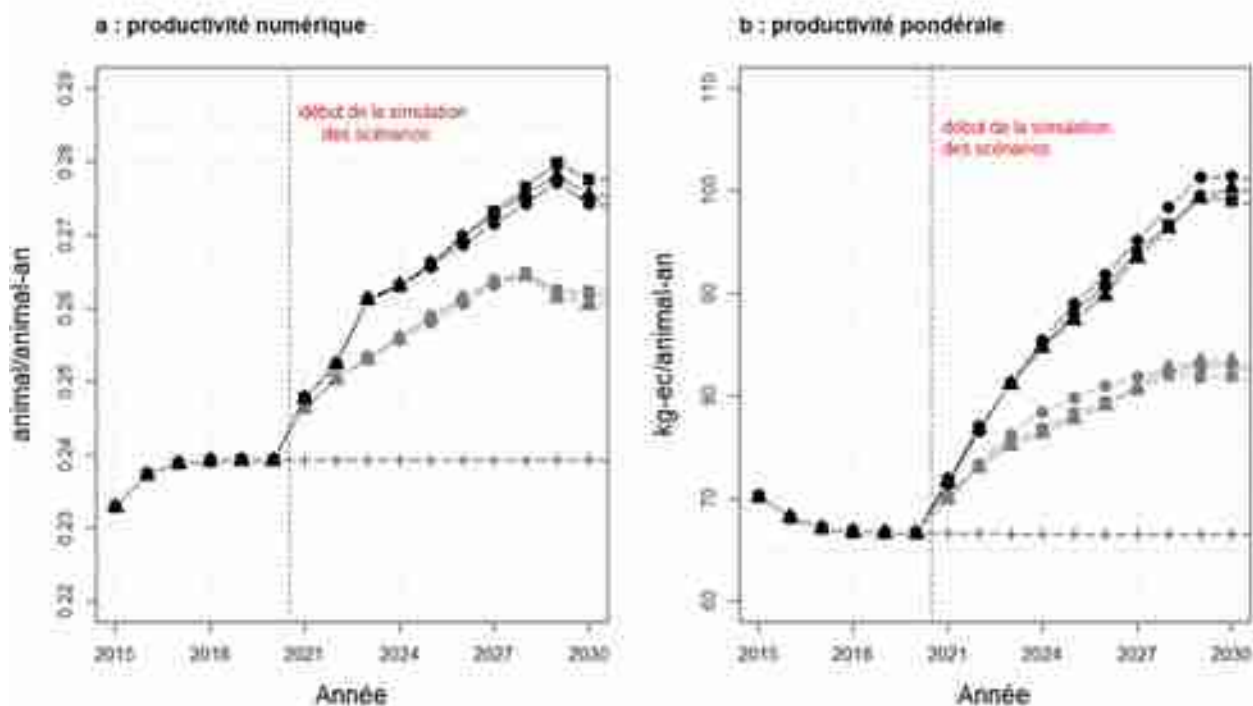


Figure 21: Productivité numérique (a) et pondérale (b) du troupeau entre 2015 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGHERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGHERB.Haut (triangles noirs)

III.3. Chargements

Tous les scénarios autres que le scénario BAU ont maintenu le chargement total à l'échelle de la Réunion en-dessous de 1,5 UGB/ha. Le chargement au pâturage (Figure 22a) a été inférieur dans tous les scénarios à celui constaté pour le scénario BAU. Les scénarios *Bas* ont présenté des chargements légèrement supérieurs aux scénarios *Haut* du fait de taux d'abattage des génisses et vaches adultes plus faible. À l'inverse, leurs chargements en engraissement ont été inférieurs du fait d'un moins grand nombre de broutards et broutardes produits (Figure 22b). Les scénarios *ENGH* ont présenté des chargements au pâturage supérieurs et des chargements en engraissement inférieurs

liés au report de 60% des génisses engraisées à l'auge vers l'engraissement à l'herbe (Figures 22a et b). Les effectifs d'animaux au pâturage et à l'engraissement à l'auge ont suivi la même dynamique.

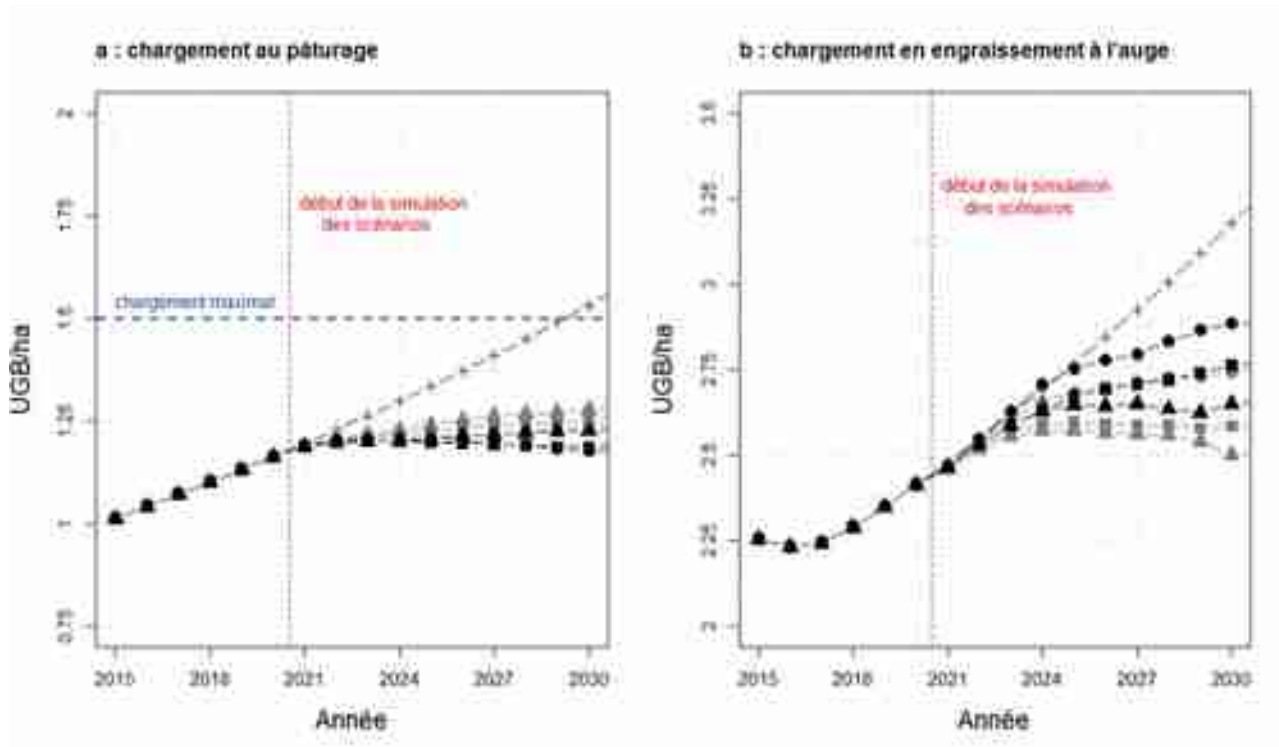


Figure 22: Chargement au pâturage (naissages et engraissement à l'herbe) (a) et chargement en engraissement à l'auge (b) entre 2015 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

IV. DISCUSSION

IV.1. Comparaison des scénarios et implications pour l'augmentation de la production

IV.1.a. Effet de l'amélioration des performances de reproduction et de croissance pondérale et de l'augmentation du renouvellement (scénarios BASE)

L'amélioration des performances de reproduction et de croissance pondérale et le rajeunissement du cheptel (augmentant le renouvellement global du troupeau) ont permis de gagner de 90 tec (*BASE.Bas*) à 460 tec (*BASE.Haut*) par an par rapport au scénario *BAU* (Figure 20a). Ces changements ont également une incidence nette sur la productivité numérique (Figure 21a) et pondérale (Figure 21b).

L'augmentation du renouvellement a été prise en compte par la diminution des abattages de génisses, l'augmentation des abattages des vaches de 3 à 10 ans et l'abattage systématique de toutes les vaches de plus de dix ans (Figures 28, Annexe A.2). Elle a permis de limiter l'augmentation du chargement au pâturage en remplaçant les vaches âgées faiblement productives par des génisses entrant en reproduction (Figure 22a).

Ces résultats montrent que l'augmentation du renouvellement est un levier clé de la performance des élevages naisseurs (Roche, Dedieu & Ingrand, 2001; Blachon *et al.*, 2016). Cette augmentation doit permettre d'éliminer les vaches adultes faiblement productives pour favoriser leur remplacement par des génisses pour permettre le rajeunissement du troupeau (Zsuppán, Lherm & Ingrand, 2015). À la Réunion, l'abattage des vaches âgées faiblement productives pourrait être encouragé en rendant les aides au renouvellement, à la productivité et à l'amélioration des performances de reproduction plus incitatives (Fusillier, Choisis & Lejars, 2007; Réseaux d'élevage DOM *et al.*, 2018).

L'augmentation des poids vifs et l'amélioration de la conformation des brouards et brouards (Sepchat *et al.*, 2011), l'amélioration de la qualité des fourrages, en particulier l'introduction de fourrages énergétiques tels que l'ensilage de maïs (Abdouli, 1994; Kheireddine, 1999), le progrès génétiques et l'introduction de croisements (Bonaïti *et al.*, 1988) sont des leviers mobilisables à la Réunion pour augmenter les poids carcasses des taurillons et génisses engraisés. Le changement générationnel en cours chez les engraisseurs entraîne un agrandissement des structures (Kurtz, 2019) et permet de réalloter les animaux en lots plus homogènes en cours d'engraissement. La finition des vaches de réforme est un moyen d'augmenter fortement les poids

carcasse à l'abattage (Malterre *et al.*, 1989). Elle sera facilitée par l'abaissement de l'âge à la réforme, les animaux moins âgés étant plus faciles à engraisser (Cabaraux *et al.*, 2005).

IV.1.b. Effet de l'insémination artificielle sexée (scénarios IAS)

L'introduction de l'IA sexée permet de changer la structure du troupeau en augmentant le nombre de femelles à la naissance (De Vries *et al.*, 2008). C'est un des leviers majeurs pour augmenter le renouvellement tout en maintenant la production de viande de génisse à son niveau actuel (Tableau 17 et Figure 20b). Dans le scénario IAS, l'IA sexée a été utilisée pour augmenter le nombre de génisses engraisées tout en maintenant un fort niveau de renouvellement. La productivité pondérale a diminué légèrement dans le scénario IAS (Figure 21a) du fait d'un moindre poids carcasse des génisses engraisées en bâtiment (Tableau 16) par rapport aux mâles. Pour la même raison, les chargements en engraissement ont diminué (Figure 22b) dans la mesure où le coefficient UGB des génisses est inférieur à celui des taurillons (DRAAF Rhône-Alpes, 2010).

Notre modèle a négligé les effets de l'introduction d'IA sexée sur la fertilité. En effet, le taux de réussite (pourcentage des vaches ou génisses pleines par rapport au nombre inséminé) est plus faible en IA sexée qu'en monte naturelle et qu'en IA non sexée (Andersson *et al.*, 2006; Healy, House & Thomson, 2013). L'intégration de cet effet dans nos scénarios pourrait être une piste d'approfondissement à explorer.

L'introduction d'IA sexée nécessite une évolution importante des pratiques chez les naisseurs. La détection des chaleurs peut être rendue difficile par la présence des animaux au champ toute l'année et l'éloignement de la ferme (Gérard *et al.*, 2008). La mise en place de contention pourrait être permise par l'utilisation des cornadis en plein air dont dispose une majorité de naisseurs. Une stratégie pourrait être d'identifier quelques troupeaux de grande taille et présentant de bonnes performances de reproduction pour y introduire l'IA sexée à un haut niveau et les amener progressivement à se spécialiser dans la production de génisses de renouvellement, les autres naisseurs assurant dans ce cas la production de génisses pour l'engraissement.

IV.1.c. Effet de l'engraissement de génisses lourdes à l'herbe (ENGH)

L'introduction de génisses lourdes à l'herbe permet d'augmenter la production de viande de génisse (Figure 20b) par l'augmentation des poids carcasse des génisses (Tableau 17). Elle conduit également à une augmentation du chargement au pâturage (+0,03 à +0,04 UGB/ha) et à une diminution le chargement en engraissement (-0,09 à -0,11 UGB/ha) du fait d'un report de génisses légères engraisées à l'auge vers l'engraissement à l'herbe.

La mise en place de l'engraissement à l'herbe présente un intérêt pour augmenter la production de viande (Dumont *et al.*, 2006; del Campo *et al.*, 2008). L'allongement de la durée d'engraissement jusqu'à 30 mois permet de limiter voire rendre inutile le recours aux concentrés (Bastien, Le Pichon & Guillaume, 2014) sans pour autant conduire à une dégradation forte de la

qualité des carcasses et des viandes (Bastien *et al.*, 2017). Pour permettre l'introduction de l'engraissement à l'herbe en 2025, il est nécessaire de travailler dès à présent à l'identification des éleveurs et des surfaces pouvant être mobilisés, à la définition des itinéraires techniques et à la construction de circuits de commercialisation pour ces produits.

IV.2. Intérêt du modèle démographique pour l'approche par scénarios

IV.2.a. Un modèle simple facilitant le dialogue avec la coopérative

Le modèle démographique que nous avons utilisé est un modèle simple présentant peu d'hétérogénéité. Il ne distingue que le sexe et la classe d'âge des animaux à l'exclusion de tout autre paramètre (Figure 19). Ce modèle simple présente l'intérêt de la rapidité puisque la durée d'une simulation est de l'ordre de la seconde (Bonnet *et al.*, 2021). La simplicité conceptuelle du modèle a également facilité la compréhension des mécanismes par les partenaires de la Sicarévia. En ce sens, ce modèle apparaît comme facilement transférable pour une utilisation par la coopérative.

IV.2.b. Un modèle simple permettant de simuler des scénarios plus compliqués

Le modèle simple sexe et âge que nous avons présenté a permis de simuler des scénarios relativement compliqués. Nous avons montré la possibilité d'intégrer de l'hétérogénéité à une échelle inférieure à la classe de sexe et d'âge dans les entrées du modèle (par exemple, le scénario *ENGH* a distingué deux groupes parmi les génisses de deux à trois ans abattues : les génisses de réforme et les génisses lourdes engraisées à l'herbe). Dans les sorties, nous sommes parvenus à un niveau de détail élevé malgré la simplicité du modèle. En effet, nous avons pu différencier les animaux à l'herbe des animaux en bâtiment à partir des effectifs abattus avant l'âge de deux ans. Nous avons également pu évaluer les tonnages de viande pour chaque type d'animaux abattus (génisses, taurillons, vaches adultes). Cette dernière évaluation intéressait particulièrement la coopérative puisqu'un des buts de la simulation était d'identifier les moyens de maintenir à un niveau élevé la production de viande de génisse.

V. CONCLUSION

Pour répondre à la nécessité d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion, nous avons construit plusieurs scénarios d'évolution avec la coopérative allaitante de l'île. Ces scénarios ont eu pour base des hypothèses qualitatives d'évolution de pratiques et d'organisation de la production. Après avoir traduit les effets de ces hypothèses sur les paramètres démographiques et les performances de croissance des animaux, nous avons simulé les scénarios grâce à un modèle démographique simple prenant en compte le sexe et l'âge des animaux. Nous avons par ailleurs mis en évidence la capacité de ce modèle à fournir une évaluation des scénarios sur des variables non prises en compte directement dans le modèle. À partir de l'évaluation de deux scénarios plausibles et de quatre scénarios extrêmes, nous avons montré que l'objectif de 2 000 tec produites par an fixé par la Sicarévia est atteignable si des changements importants ont lieu dans l'organisation de la production. L'introduction d'insémination artificielle sexée est un levier important pour maintenir la production de viande de génisse à son niveau actuel. Dans un contexte de changement climatique, l'engraissement à l'herbe permettrait par ailleurs de déplacer une partie des bovins à l'engrais des zones côtières où existe un stress thermique important vers les prairies d'altitude. Toutes ces recommandations nécessitent des changements importants dans l'organisation actuelle de la production et auront besoin de plans d'action ambitieux de la part de la coopérative et d'un soutien important des pouvoirs publics.

Discussion et conclusion

générale :

**Principaux enseignements de
la thèse, limites et perspectives**

La problématique générale de la thèse était la suivante :

Pourquoi et comment augmenter la production de viande bovine à la Réunion ?

Pour y répondre, nous avons choisi une stratégie en cinq chapitres regroupés en trois parties (Figure 1). La première partie visait à justifier du point de vue économique l'intérêt porté à l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion. La deuxième partie cherchait à identifier les facteurs influençant la production. La troisième partie consistait en une approche par scénarios d'évolution.

Le format sur article de la thèse nous a amenés à discuter nos résultats au sein de chacun des chapitres. Cette discussion générale revient sur certains aspects méthodologiques, techniques ou opérationnels non discutés précédemment. Nous nous attacherons en particulier à tirer les grands enseignements de notre thèse en identifiant les implications opérationnelles pour les décideurs et à proposer des perspectives pour dépasser les limites de notre travail. Enfin, nous discuterons de l'articulation globale de notre étude en montrant en quoi l'approche combinée de l'économie et de la zootechnie a permis de bien cerner la question de l'élevage allaitant à la Réunion.

I. PREMIER ENSEIGNEMENT : LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLEVAGE BOVIN ALLAITANT EST UN MOYEN DE RÉDUIRE LA VULNÉRABILITÉ ÉCONOMIQUE STRUCTURELLE DE LA RÉUNION

I.1. Principaux résultats de la première partie

I.1.a. Rappel de la problématique

La première partie de la thèse visait à contextualiser d'un point de vue économique l'intérêt porté à l'élevage allaitant. Elle cherchait à comprendre en quoi le développement de l'élevage allaitant à la Réunion peut être un facteur de réduction de la vulnérabilité du territoire. Pour y répondre, nous avons adopté une stratégie en deux temps qui correspondent aux premier et deuxième chapitre de la thèse.

I.1.b. Rappel des résultats du premier chapitre : la dépendance alimentaire est un facteur de vulnérabilité pour les PEI

Dans le premier chapitre, nous avons construit un indice composite de vulnérabilité issu de l'IVE (Guillaumont, 2009a) dans lequel nous avons ajouté une mesure de la dépendance alimentaire calculée comme un ratio de dépendance alimentaire (FAO, 2012; Clapp, 2015, 2017). Dans ce ratio, nous avons pris en compte les céréales et les tubercules ainsi que les produits animaux. Pour des raisons de robustesse, notre indice de vulnérabilité a été calculé grâce à une méthode de pondération endogène (Hatefi & Torabi, 2010). Ce premier chapitre a montré que la dépendance alimentaire est un facteur important de vulnérabilité pour les PEI. Dans le cas de la Réunion, la prise en compte de la dépendance alimentaire augmente nettement la mesure de la vulnérabilité du territoire (Tableau 20). Cette dépendance alimentaire est le fait d'un haut niveau d'importation de céréales et tubercules (ratio de dépendance de 92 %) plutôt que des productions animales (ratio de dépendance de 28 %) (Tableau 7).

I.1.c. Rappel des résultats du deuxième chapitre : le développement de la filière bovine allaitante permet de réduire la dépendance alimentaire de la Réunion

Dans le deuxième chapitre, nous avons cherché à identifier les moyens de réduire cette dépendance alimentaire. Pour cela, nous avons analysé les différentes statistiques disponibles sur les filières agricoles réunionnaises et leur contribution à l'autonomie alimentaire de l'île (DAAFR,

2019a; Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021a). À partir de cette analyse, nous avons identifié les productions légumières à longue conservation (oignons, aulx, carottes, pommes de terre), les agrumes et la viande bovine comme les filières présentant les plus forts potentiels de gain d'autonomie alimentaire. Parmi ces productions, la viande bovine est apparue comme la plus prometteuse du fait de sa structuration en une seule coopérative, de la possibilité de gagner des parts de marchés sur les importations de viande fraîche et de sa capacité à se développer en valorisant des matières premières locales.

1.2. Implications pour les décideurs

Les résultats de la première partie montrent que la réduction de la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion passe en partie par la recherche d'autonomie alimentaire. Cette dimension doit nécessairement être prise en compte dans la définition des politiques publiques d'aide à l'agriculture. Parmi les productions à soutenir pour accompagner la recherche d'autonomie, la viande bovine fait figure de bonne candidate. Il est donc nécessaire de soutenir son développement dans une logique de substitution des importations.

Toutefois, marquée structurellement par des désavantages en matière de compétitivité-coût et par l'absence d'économies d'échelle du fait d'un marché domestique étroit, l'autonomie alimentaire par le développement de la filière locale nécessite de poursuivre les efforts pour garantir la protection de la production locale contre les importations « bas prix ». Le maintien du dispositif d'octroi de mer est de ce point de vue une priorité.

1.3. Limites et perspectives de la première partie

Notre étude a consisté en une première approche du rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion. Nous identifions deux limites principales à cette première partie. La première limite concerne la démarche de construction de notre indice composite. L'utilisation d'une méthode de pondération endogène visait à limiter au maximum l'influence de l'opérateur. Or, une part de dire d'expert subsiste dans notre indice à pondération endogène. La seconde limite concerne l'évaluation du rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité économique. Dans notre thèse, nous nous sommes concentrés sur l'impact du développement agricole sur la dépendance alimentaire sans prendre en compte son influence sur d'autres aspects de la vulnérabilité économique structurelle.

1.3.a. Renforcer la robustesse de l'indice composite

L'utilisation d'une méthode de pondération endogène (Hatefi & Torabi, 2010) a répondu à l'objectif de réduire au maximum l'influence du dire d'expert dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Cependant, il est impossible de s'affranchir entièrement des décisions des opérateurs. Dans notre cas, nous avons dû (i) choisir les variables constitutives de l'indice composite, (ii) choisir les denrées pour lesquelles la dépendance alimentaire a été évaluée et (iii) choisir une méthode de pondération endogène particulière.

Ces limites pourraient être atténuées par l'intégration de variables de vulnérabilité complémentaires issues d'autres indices synthétiques (Atkins *et al.*, 2001; Adrianto & Matsuda, 2004; Turvey, 2007; Briguglio *et al.*, 2009). Le risque dans ce cas est d'intégrer des variables redondantes ou ne concernant pas directement la vulnérabilité structurelle, en particulier des mesures de résilience. Au niveau des denrées prises en compte dans le ratio de dépendance alimentaire, nous avons fait le choix de nous intéresser aux produits les plus échangés au niveau mondial. Cependant, cette approche exclut certains produits, en particulier les produits de la mer, qui peuvent avoir une importance considérable dans certains régimes alimentaires notamment dans les PEI. Il serait donc intéressant d'intégrer ces produits dans le ratio de dépendance alimentaire. Enfin, notre étude pourrait être étendue à d'autres méthodes de comparaison endogène (Adrianto & Matsuda, 2004; Karsak & Ahiska, 2005; Zhou *et al.*, 2007; Bates, Angeon & Ainouche, 2014) pour vérifier la cohérence des résultats obtenus et renforcer la robustesse de nos analyses.

I.3.b. Évaluer globalement l'impact du développement agricole sur la vulnérabilité économique structurelle

La seconde limite concerne notre approche du rôle de l'agriculture dans la vulnérabilité du point de vue exclusif de la dépendance alimentaire. Or, l'agriculture a une influence sur d'autres variables considérées dans l'IVE (Angeon & Bates, 2015a). En particulier, elle joue sur l'instabilité de la production agricole et sur la concentration et l'instabilité des exportations. La recherche d'autonomie alimentaire que nous préconisons dans le cas de la Réunion consisterait à diversifier l'agriculture vers les productions vivrières. Or, la diversification des productions à l'échelle du territoire est un facteur de stabilisation de la production agricole (Lin, 2011; BIRTHAL & HAZRANA, 2019; Thomine, 2019; Chonabayashi, Jithitikulchai & Qu, 2020; Szymczak *et al.*, 2020). Il est donc attendu que cette diversification contribue à réduire la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion dans une mesure qu'il serait intéressant d'évaluer. La diversification de l'agriculture pourrait également passer par le développement de productions à forte valeur ajoutée destinées aux exportations (CESE, 2021). Cela contribuerait à réduire la concentration et l'instabilité des exportations.

II. DEUXIÈME ENSEIGNEMENT : LES LEVIERS PRINCIPAUX POUR AUGMENTER LA PRODUCTION DE VIANDE BOVINE À LA RÉUNION SONT LE PRIX DE L'ALIMENT ET LES PERFORMANCES ZOOTECHNIQUES DES ANIMAUX

II.1. Principaux résultats de la deuxième partie

II.1.a. Rappel de la problématique

La première partie de la thèse a identifié la filière bovine allaitante comme la filière la plus à même d'assurer une réduction de la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion. En se basant sur ces résultats, la deuxième partie de la thèse a cherché à identifier les déterminants auxquels répond la filière et les leviers zootechniques mobilisables pour augmenter la production de viande. Pour cela, nous avons proposé une approche en deux temps correspondant aux troisième et quatrième chapitre de la thèse.

II.1.b. Rappel des résultats du troisième chapitre : la dynamique de l'élevage allaitant à la Réunion résulte des interactions entre conditions économiques, performances des animaux et choix de gestion

Dans le troisième chapitre, nous avons cherché à identifier les déterminants de l'évolution de la production de viande bovine à l'échelle de la Réunion. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l'analyse des conditions économiques et climatiques et des paramètres démographiques entre 2006 et 2017. En complément, nous avons interrogé des experts (Sicarévia, Cirad, ARP) pour valider les hypothèses émises. Nous avons montré qu'en réaction à une hausse des coûts de l'aliment du bétail, les éleveurs ont réorienté une partie des abattages des vaches de réforme vers les génisses. Cette décision a conduit à un vieillissement du troupeau et à une dégradation des performances des animaux. L'intervention de la Sicarévia par des plans de conservation des génisses a permis d'inverser la tendance et de rétablir la croissance du cheptel et de la production de viande. Nous avons démontré que les principaux déterminants de l'évolution du secteur allaitant sont d'ordre économique et non climatique. Ainsi, la production bovine allaitante à la Réunion présente les caractéristiques des systèmes des pays développés (Rosen *et al.*, 1994).

II.1.c. Rappel des résultats du quatrième chapitre : les performances clés pour la productivité du troupeau allaitant réunionnais sont les taux de mise bas et les poids carcasses

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté un modèle démographique du troupeau allaitant réunionnais. Notre modèle est relativement simple puisqu'il prend uniquement en compte le sexe et l'âge des animaux. Il est basé sur les données exhaustives de suivi individuel des bovins à la Réunion issues de la BDNI. Nous avons montré que notre modèle démographique permet de représenter fidèlement la dynamique passée du cheptel allaitant réunionnais. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité a montré que les taux de mise bas des femelles âgées de trois à dix ans et les poids carcasse des mâles âgés d'un à trois ans sont des facteurs clés pour l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion.

II.2. Implications pour les décideurs

Nos résultats montrent que la réduction de la dépendance de l'élevage allaitant réunionnais aux importations d'aliment du bétail est une piste à envisager pour sécuriser la production de viande bovine à un niveau élevé. Cela passe en particulier par l'amélioration des pratiques de gestion du fourrage et le développement de l'engraissement à l'herbe en remplacement de l'engraissement à l'auge, fort consommateur de concentrés importés. Ainsi, les importations de céréales à destination de l'alimentation animale seraient réduites tout en augmentant la production locale de viande bovine. À l'échelle zootechnique, nous avons montré que l'augmentation des taux de mise bas et des poids carcasses sont des leviers importants pour le développement de la production de viande. L'amélioration des taux de mise bas passera par une meilleure gestion de l'alimentation et une surveillance accrue des chaleurs et des vêlages en élevage naisseur. L'amélioration des poids carcasses nécessitera une augmentation de la complémentation des broutards pour augmenter les poids vifs en début d'engraissement, une augmentation des quantités de concentrés distribués pendant l'engraissement et une lutte efficace contre le stress thermique en été.

II.3. Limites et perspectives de la deuxième partie

Notre étude a permis d'appréhender les dynamiques passées et actuelles de la production de viande bovine à la Réunion. Pour cela, nous avons choisis une approche par la démographique. Quatre limites principales ont été identifiées : l'absence de résultats expérimentaux pour l'identification des déterminants, la difficulté d'accès aux données démographiques, la simplicité théorique du modèle démographique et la difficulté de transfert du modèle à la coopérative en l'état actuel. Nous proposons de détailler ces limites et présentons des pistes pour les dépasser.

II.3.a. Confirmer les résultats de l'étude empirique des déterminants de l'évolution de l'élevage par des méthodes expérimentales

Notre approche des déterminants de l'évolution de l'élevage a reposé sur une analyse empirique des conjonctions entre les conditions économiques et climatiques et les évolutions des paramètres démographiques du troupeau allaitant réunionnais. Toutes nos interprétations se sont appuyées sur notre expertise et sur celle des différents acteurs du terrain. Un approfondissement possible de nos travaux pourrait être la vérification expérimentale de nos hypothèses. Cette validation expérimentale pourrait par exemple passer par l'introduction de chocs similaires à ceux observés dans le chapitre 3 (augmentation des coûts des aliments, cyclones) dans des modèles bio-économiques de fermes (Berentsen & Giesen, 1995; Janssen & van Ittersum, 2007; Janssen *et al.*, 2010; Louhichi *et al.*, 2010; Ricome *et al.*, 2017).

II.3.b. Faciliter la récolte des données démographiques

La notification des événements de la vie des animaux par les éleveurs dans la BDNI étant obligatoire, son utilisation comme source de données à l'échelle d'un territoire est adaptée du fait de son exhaustivité. Bien qu'elle ait à l'origine une fonction de traçabilité, son utilisation pour le contrôle de performances et la recherche a été envisagée y compris au niveau du Ministère de l'Agriculture (Delomez & Gibon, 2019). Dans le cas de la Réunion, le consentement des éleveurs et de la coopérative à l'utilisation de leurs données a été obtenu par le Cirad depuis les années 2000. Cependant, la procédure de formatage des données de la BDNI pour permettre leur utilisation dans les packages laser2demog (Lesnoff *et al.*, 2011) et mmage (Lesnoff, 2015a) est relativement lourde. Elle nécessite d'abord un important travail de nettoyage manuel pour éliminer les erreurs de déclaration. La transformation de la BDNI au format Laser2 (Juanès *et al.*, 2014) est ensuite réalisée manuellement par le Cirad. Enfin, la décomposition de cette base de données Laser2 pour permettre l'utilisation dans R est relativement longue (une douzaine d'heures) et nécessite plusieurs étapes techniques. Dans le but de faciliter l'utilisation du modèle par les partenaires du Cirad, et notamment par la Sicarévia, l'automatisation de la procédure pourrait être un atout majeur.

II.3.c. Envisager des modèles démographiques plus hétérogènes

Le modèle que nous avons proposé est un modèle phénoménologique qui ne décrit pas les variations internes des phénomènes étudiés. L'ensemble des changements affectant la production allaitante réunionnaise sont intégrés au modèle par leurs effets sur les paramètres démographiques et sur les poids carcasse des animaux. Il ne prend en compte que des paramètres moyens à l'échelle de la Réunion sans distinction de groupes d'éleveurs ou d'animaux à un niveau plus désagrégé. L'avantage de ce modèle est sa facilité de compréhension et sa rapidité d'exécution. En revanche, il ne permet pas d'appréhender les effets des dynamiques internes (changements de races, relations entre types d'éleveurs) autrement que par leur impact estimé sur les paramètres démographiques.

Pour lever cette limite, un approfondissement du modèle pourrait être envisagé selon deux niveaux d'hétérogénéité. Le premier niveau concerne l'orientation des animaux vers la reproduction ou vers l'engraissement. Le second niveau d'hétérogénéité prend en compte les races et leurs dynamiques.

Le type d'élevage naisseur ou engraisseur était insuffisant pour déterminer l'orientation reproduction/engraissement des animaux puisque certains élevages considérés comme naisseurs ont également une activité d'engraissement. Nous avons donc choisi de différencier directement l'orientation des animaux à l'échelle individuelle (reproduction/engraissement) indépendamment du type d'élevage (naisseur/engraisseur) dans lequel ils se trouvent (Figure 23). Pour cela, nous avons considéré que tous les animaux abattus avant 25 mois appartiennent au cheptel engraisé. Les animaux conservés au-delà de cet âge ont été considérés comme de renouvellement.

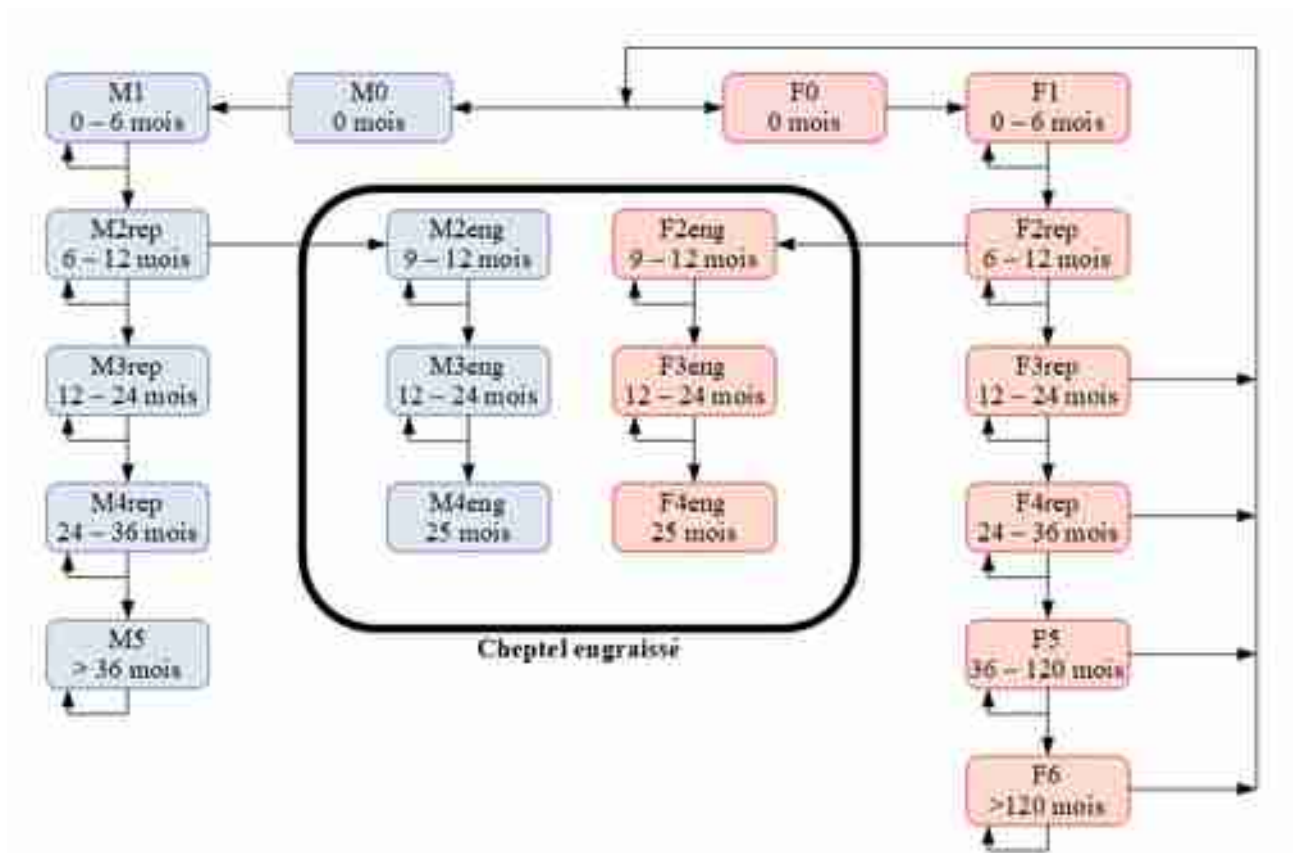


Figure 23: Modèle démographique avec prise en compte de l'orientation des animaux
 Par souci de lisibilité, les paramètres démographiques n'apparaissent pas sur le schéma. Le cheptel engraisé est supposé être complètement abattu à 25 mois.

L'implémentation de ce modèle sur les années 2006 à 2017 a montré qu'il permet de représenter fidèlement la dynamique d'animaux engraisés. En revanche, il sous-estime d'environ 3 % par an l'effectif d'animaux dans le troupeau reproducteur. Des investigations complémentaires sont donc nécessaires pour comprendre l'origine de ce décalage et le corriger dans l'optique future de l'utiliser pour simuler le troupeau allaitant réunionnais.

La seconde source d'hétérogénéité envisagée concerne les races des animaux. En effet, nous avons montré dans le Chapitre 3 qu'une dynamique de substitution des croisés par les limousins était en cours (Figure 8). Or, ces deux races n'ont pas les mêmes performances démographiques et de croissance (Tableau 23, Annexe A.3). Dans le cas de croisements unidirectionnels race pure \rightarrow croisés, une approche en sous-modèles est possible (Groshens, Maigné & Pauly, 2020). Dans ce cas, un premier sous-modèle de race pure simule la dynamique pour chaque race. Les animaux issus de croisement sont donc sortis de ce sous-modèle dès la naissance. Un sous-modèle croisés simule ensuite la dynamique pour les animaux croisés. Dans le cas de la Réunion, les croisements sont bidirectionnels race pure \leftrightarrow croisés du fait de l'existence de croisements d'absorption des animaux croisés par des limousins. Dans ce cas, les interconnexions entre races rendent l'approche en sous-modèles impossible. La prise en compte de ces échanges nécessiterait de construire un modèle de métapopulations connectées (Levins, 1969) plus compliqué à mettre en œuvre.

II.3.d. Créer une interface au modèle pour faciliter le transfert à la coopérative

L'un des objectifs de cette thèse était d'accompagner la prise de décision pour la Sicarévia. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur un modèle démographique dans lequel nous avons fait varier certains paramètres. Le modèle démographique actuel est construit avec le package `mmage` (Lesnoff, 2015a) dans R (R Core Team, 2019). Or, la forme actuelle du modèle est peu adaptée à une utilisation par les partenaires du Cirad. La création d'une interface par exemple au moyen du package `shiny` (Chang *et al.*, 2017) pourrait permettre de faciliter le transfert de nos résultats à la coopérative.

III. TROISIÈME ENSEIGNEMENT : L'AUGMENTATION DE LA PRODUCTION DE VIANDE BOVINE À LA RÉUNION NÉCESSITE UNE AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES ANIMAUX ET D'IMPORTANTES CHANGEMENTS ORGANISATIONNELS

III.1. Principaux résultats de la troisième partie

III.1.a. Rappel de la problématique

Après avoir identifié l'élevage bovin allaitant comme un moyen de réduire la vulnérabilité économique structurelle à la Réunion (première partie) et avoir étudié les dynamiques passées et les leviers pour augmenter la production de viande bovine (deuxième partie), la troisième partie de la thèse cherche à identifier les options d'évolution permettant d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion sans dépasser les limites de l'île.

En nous basant sur le modèle présenté au quatrième chapitre et sur les résultats des troisième et quatrième chapitres, nous avons construit des scénarios d'évolution de l'élevage allaitant en lien étroit avec la Sicarévia. Ces scénarios prennent en compte des améliorations des performances des animaux et des changements d'organisation de la production.

III.1.b. Rappel des résultats du cinquième chapitre : l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion passe par l'amélioration des performances des animaux, l'introduction d'insémination artificielle sexée et le développement de l'engraissement à l'herbe

Les scénarios construits dans le cinquième chapitre répondaient aux objectifs d'atteindre une production de viande de 2 000 tec/an, de maintenir la part de viande de génisse dans la production totale à son niveau actuel ou de l'augmenter et de limiter le chargement au pâturage à 1,5 UGB/ha. Nous montrons que l'amélioration des performances de reproduction et de croissance et l'augmentation du renouvellement avec notamment une réforme stricte à dix ans permettent d'augmenter la production de viande et de limiter l'augmentation du chargement. En revanche, ces évolutions ne permettent pas le maintien de la part actuelle de viande de génisse dans la production totale de viande. L'insémination artificielle sexée et l'engraissement de génisses lourdes à l'herbe sont les leviers supplémentaires identifiés pour remplir cet objectif.

III.2. Implications pour les décideurs

Le rajeunissement du troupeau pourrait être encouragé par l'introduction de conditionnalités relatives à la productivité et au renouvellement dans les aides. La meilleure finition des vaches âgées permettrait également de mieux valoriser économiquement ces animaux et donc d'encourager leur abattage. L'insémination artificielle sexée pourrait être mise en place prioritairement dans certains grands élevages aux performances de reproduction élevées. Ces élevages pourraient se spécialiser dans la production de génisses de renouvellement vendues aux autres naisseurs. L'avantage d'une telle approche serait également de favoriser le gain génétique du troupeau réunionnais. Enfin, l'engraissement de génisses lourdes à l'herbe pourrait passer par l'identification de sites et d'éleveurs intéressés et l'augmentation progressive du cheptel engraisé à l'herbe.

III.3. Limites et perspectives de la troisième partie

Les scénarios du cinquième chapitre ont été construits uniquement avec la Sicarévia et évalués sur des indicateurs de production. Il serait envisageable d'élargir la construction et l'évaluation des scénarios à d'autres acteurs et d'autres indicateurs. Par ailleurs, notre modèle à l'échelle de l'ensemble de la filière était adapté à des discussions avec l'équipe dirigeante de la Sicarévia. En revanche, l'absence de références techniques à l'échelle de l'élevage a rendu compliquées les discussions avec les techniciens de terrain. Le couplage de notre modèle démographique à des modèles de ferme ou à des exploitations types pourrait permettre de faciliter ces échanges. Enfin, nos scénarios sont restés relativement prudents dans les changements envisagés. Or, notre modèle pourrait être utilisé pour simuler des scénarios plus contrastés ou de rupture.

III.3.a. Élargir la construction des scénarios à d'autres acteurs

Les scénarios que nous avons construits visaient à répondre à la demande de la Sicarévia d'augmenter la production de viande bovine. Pour cette raison, ils ont été discutés principalement avec l'équipe dirigeante de la coopérative. Dans une optique de démarche participative, d'autres acteurs auraient pu être associés dans la phase de définition des scénarios. Cela aurait pu en particulier concerner des responsables politiques (DAAFR), des acteurs de l'aménagement du territoire (Parc national, chambre d'agriculture), des acteurs du monde agricole (ARP, URCOOPA) et des acteurs commercialisant la viande bovine locale (boucheries traditionnelles, GMS).

III.3.b. Élargir l'évaluation des scénarios à des indicateurs économiques et environnementaux

Nous avons choisi d'évaluer nos scénarios uniquement sur les indicateurs les plus pertinents pour mesurer l'augmentation de la production de viande et évaluer leur faisabilité. Nous pourrions tout d'abord envisager d'évaluer les scénarios d'un point de vue économique à l'échelle des élevages (Veysset, Lherm & Bébin, 2005; Veysset *et al.*, 2017; Herrero *et al.*, 2014; Hughes & Isengildina-Massa, 2015) pour identifier les freins aux changements de pratiques et les moyens d'y remédier. Par ailleurs, l'évaluation environnementale des scénarios a été succincte puisqu'elle s'est résumée au calcul de la charge animale au pâturage et en bâtiment. Il serait intéressant d'évaluer nos scénarios avec d'autres méthodes environnementales (van der Werf *et al.*, 2007; Gerber *et al.*, 2008; Vayssières *et al.*, 2009; Vigne, 2012).

Ces méthodes d'évaluation économique et environnementale demandent de nombreuses données sur les systèmes d'élevage qui ne sont pour le moment pas disponibles à la Réunion (par exemple : structure des charges d'exploitation, structure du chiffre d'affaire, intrants consommés, effluents produits). Ces données pourraient être obtenue par des enquêtes approfondies en élevage, enquêtes qui sont cependant très chronophages pour les enquêteurs et les éleveurs. Par ailleurs, la mise en place de ces évaluations remettrait en cause notre approche volontairement économe en données.

III.3.c. Approfondir la dimension technique des scénarios

Notre approche de construction des scénarios s'est située à l'échelle de l'ensemble de la coopérative. Ce positionnement au niveau du territoire a facilité les discussions avec l'équipe dirigeante de la Sicarévia. En revanche, cela a pu être un frein dans les discussions avec les techniciens de terrain. Ceux-ci étaient en effet demandeurs d'exemples concrets pour baser une réflexion à l'échelle de l'exploitation. Dans ce cas, la complémentarité entre l'approche filière (démographique) et une approche technico-économique de certaines exploitations (par exemple, les cas-types objectifs définis par le référentiel (IDELE, Réseaux d'élevage DOM, & Chambre d'agriculture de la Réunion, 2019a, 2019b, 2019c)) pourrait être bénéfique. En facilitant le dialogue avec les conseillers de la coopérative au plus proche du terrain, elle permettrait d'apporter un surcroît de vraisemblance aux travaux réalisés. Une autre approche pourrait être d'évaluer *ex-ante* les voies envisagées par la coopérative pour atteindre les objectifs des scénarios à partir de modèle de fermes (Taylor & Adelman, 2003; Janssen & van Ittersum, 2007; Ricome *et al.*, 2017).

III.3.d. Envisager des scénarios de rupture

Les scénarios construits avec la Sicarévia ont permis d'étudier les voies envisageables pour augmenter la production de viande bovine à la Réunion. En particulier, l'utilisation de scénarios

emboîtes a permis d'encourager les dirigeants de la coopérative à se projeter dans d'autres scénarios que le tendanciel (Lauer & Dockes, 2010). Cependant, ces scénarios sont relativement peu contrastés entre eux et restent prudents quant aux changements envisagés. Un approfondissement de notre étude pourrait consister à construire et évaluer des scénarios de rupture. Notre modèle est adapté à de telles simulations sous réserve de pouvoir traduire ces scénarios en paramètres démographiques. Par exemple, les effets d'un accident climatique pourraient être aisément simulés à travers son impact sur la mortalité et les performances de reproduction et de croissance. La dynamique de rémission après un tel choc pourrait être explorée à l'aide de notre modèle (Lesnoff, Corniaux & Hiernaux, 2012). Un deuxième exemple pourrait être l'étude d'une levée du moratoire sur les importations d'animaux vivants et l'arrivée d'un certain nombre de génisses pleines à la Réunion. La prise en compte de ce scénario correspondrait à une augmentation du nombre de femelles à un moment donné. D'autres scénarios de rupture ou de catastrophe pourraient également être envisagés et simulés dans notre modèle.

IV. QUATRIÈME ENSEIGNEMENT : UNE APPROCHE COMBINÉE PAR L'ÉCONOMIE ET LA ZOOTECHNIE PERMET DE CONTEXTUALISER ET EXPLORER LES PISTES DE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLEVAGE À LA RÉUNION

IV.1. Rappel des principaux résultats

Notre thèse a consisté en une approche économique et zootechnique de la production bovine allaitante à la Réunion. Elle a répondu à la double problématique de la **justification de l'augmentation de la production de viande bovine à la Réunion** et de **l'identification des moyens d'assurer cette augmentation**. En partant d'une approche globale de la vulnérabilité économique structurelle dans les PEI, la première partie de la thèse a permis de démontrer l'intérêt d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion. Les deuxième et troisième parties de la thèse ont ensuite cherché les moyens pour accompagner le développement de la production bovine allaitante.

Notre démarche a permis d'avoir une approche complète de la question de l'élevage allaitant à la Réunion. Dans cette partie, nous discuterons tout d'abord de notre décision de nous concentrer sur la filière allaitante pour augmenter la production de viande bovine. Nous aborderons ensuite la question de l'introduction d'une démarche de modélisation participative par la modification du modèle utilisé après évaluation des scénarios. Enfin, nous proposerons quelques pistes d'approfondissement pour prendre en compte les effets escomptés des scénarios sur la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion.

IV.2. Limites et perspectives

IV.2.a. Intégrer la viande bovine issue de la filière laitière dans notre étude

À la Réunion, la production de viande bovine est le fait à la fois de la filière allaitante, des réformes de la filière laitière et des éleveurs indépendants. Dans les trois premiers chapitres de la thèse, nous nous sommes intéressés à la production de viande bovine à l'échelle de l'ensemble du territoire en incluant de ce fait ces trois sources. Par la suite (chapitres 4 et 5), notre propos a concerné uniquement les éleveurs allaitants adhérents à la Sicarévia. Dans une première approche de la production de viande à la Réunion, cette restriction à la seule Sicarévia était justifiée puisqu'elle a assuré entre 80 % et 90 % de la production de viande bovine sur les années étudiées

(2006 à 2017) (Sicarévia, 2011; DAAFR, 2018). Cependant, cette approche a exclu 10 % à 20 % du tonnage de viande bovine de notre étude. Pour mieux appréhender les moyens d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion, il est donc nécessaire d'approfondir notre analyse en incluant toutes les sources de production de viande bovine. Cela pourrait notamment passer par l'intégration de l'ensemble des éleveurs bovins de l'île dans notre base de données Laser et par la mise en place de différents modèles démographiques selon le type d'éleveurs (allaitants, laitiers, petits détenteurs de bovins). La construction de scénarios autonomes ou interdépendants pour les différents systèmes de production permettrait de mieux appréhender les moyens d'augmenter la production de viande bovine à la Réunion.

IV.2.b. Approfondir la démarche de modélisation participative

La modélisation participative est une méthode d'accompagnement et de définition de stratégies qui articule les savoirs des chercheurs et ceux des acteurs de terrain (Choisit *et al.*, 2010; Leclerc *et al.*, 2010). Elle est basée sur des échanges et une co-construction de savoirs, en particulier de modèles et de scénarios. Dans notre thèse, nous avons eu une démarche participative incomplète dans la mesure où le modèle démographique a été construit par le Cirad avant d'être proposé à la Sicarévia. Pour compléter cette démarche, il serait nécessaire de discuter de la structure du modèle avec la coopérative pour en affiner le fonctionnement. Une telle approche est chronophage et n'a pas pu être mise en place dans le cadre de la thèse ; cependant, il est possible d'envisager une poursuite de notre étude sur la base d'une démarche participative.

IV.2.c. Évaluer l'impact des scénarios sur la vulnérabilité économique structurelle de la Réunion

Les scénarios que nous avons construits visaient à améliorer l'autonomie alimentaire de la Réunion dans une optique de réduction de la vulnérabilité économique structurelle. Or, notre thèse a suivi un cheminement unidirectionnel (Figure 1) de la macroéconomie vers la zootechnie. L'évaluation de l'impact des différents scénarios sur la dépendance alimentaire et sur la vulnérabilité de la Réunion pourrait constituer un approfondissement intéressant à notre travail. En particulier, l'analyse de la contribution du développement de l'élevage allaitant à l'augmentation des importations de céréales *via* l'alimentation du bétail serait à explorer. Cette évaluation nécessiterait des investigations complémentaires pour mieux comprendre les conséquences des différents moyens de développement envisagés. En particulier, les pratiques d'alimentation des exploitations devraient être approfondies au préalable.

Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que notre thèse s'est intéressée à l'élevage allaitant non parce qu'il permettrait de réduire largement la dépendance alimentaire mais plutôt parce qu'il représente la production où un gain d'autonomie alimentaire est le plus envisageable à horizon 2030. En d'autres termes, il semble que même dans l'éventualité où toute la viande bovine

consommée à la Réunion était produite localement, l'impact sur la dépendance alimentaire et sur la vulnérabilité économique structurelle resterait limité. En ce sens, notre thèse répondait plus à un principe de réalité (quelle production pourrait permettre un gain d'autonomie ?) qu'à un principe d'efficacité (quelle production faudrait-il développer pour gagner largement en autonomie alimentaire ?). Dépasser ce principe de réalité pour élargir les perspectives pourrait constituer une poursuite intéressante de nos travaux.

Annexes

Annexe A.1 : Annexes du chapitre 1

Table 18: Spearman's rank correlation rho and p-values

	Dimensions	EVI		
		Standard EVI	FDEVI	DEA FDEVI
Dimensions	Population	0.5434***	0.6720***	0.7172***
	Remoteness	0.3306***	0.3173***	0.2019**
	Population in Low Elevation Coastal Zone	0.0839	0.1527*	0.2062**
	Export Concentration index	0.5210***	0.5293***	0.6041***
	Share of Agriculture in GDP	0.2909***
	Total Food Dependency	..	0.0495	-0.1387
	Number of Victims of Natural Disasters	0.3020***	0.1919**	0.0371
	Instability of Agricultural Production	0.4328***	0.5093***	0.6864***
	Instability of Exports	0.6779***	0.5893***	0.4142***
	EVI	Standard EVI	1	
FDEVI		0.9545***	1	
DEA FDEVI		0.8228***	0.9246***	1

Note: *, ** and *** indicates that the null hypothesis is rejected at $\alpha = 0.1, 0.05$ and 0.01 .

Source: from authors.

Table 19: Pairwise Wilcoxon rank sum tests with Bonferroni corrections

EVI

	DVP	LDC	LDCSIS
LDC	1.78 e-06 ***		
LDCSIS	2.01 e-04 ***	2.54 e-02 **	
SIS	1.17 e-04 ***	1	6.29 e-02 *

FDEVI

	DVP	LDC	LDCSIS
LDC	7.28 e-04 ***		
LDCSIS	2.35 e-04 ***	9.87 e-03 ***	
SIS	1.44 e-06 ***	6.94 e-02 *	9.98 e-01

DEA-FDEVI

	DVP	LDC	LDCSIS
LDC	4.15 e-02 **		
LDCSIS	1.39 e-03 ***	2.18 e-02 **	
SIS	1.14 e-06 ***	5.77 e-03 ***	1

Note: *, ** and *** indicates that the null hypothesis is rejected at $\alpha = 0.1$, 0.05 and 0.01. Because of the entanglement of the categories of SIS and LDC, the comparison of the groups is not possible. For that reason, we tested the significance of the difference between the groups 'LDC not SIS', 'SIS not LDC', 'LDC and SIS' and 'not LDC nor SIS'.

Source: from authors.

Table 20: Global ranking by quarters for standard EVI, FDEVI and DEA-FDEVI, 2015

	Country	EVI		FDEVI				DEA-FDEVI		
		Score	Rank	Value	m-score	Rank	Diff. Rank	Value	Rank	Diff. Rank
First quarter	Turkey	11.7827	1	10.9639	0	1	0	0	1	0
	China	20.6711	17	19.7008	9.8128	9	-8	4.3292	2	-7
	Brazil	20.3394	15	19.863	9.9949	11	-4	6.4366	3	-8
	Mexico	18.8454	11	19.9678	10.1127	12	1	6.7403	4	-8
	Republic of Korea	13.2485	2	16.8523	6.6135	4	2	7.2284	5	1
	Egypt	18.6973	10	18.9071	8.9213	7	-3	7.2611	6	-1
	India	22.2693	20	20.483	10.6913	15	-5	8.2608	7	-8
	Cameroon	18.9553	13	16.9423	6.7145	5	-8	8.5081	8	3
	Nepal	26.7989	39	23.1152	13.6476	22	-17	8.754	9	-13
	Cote d'Ivoire	17.988	8	16.3742	6.0765	2	-6	8.7932	10	8
	Thailand	23.9838	25	23.0904	13.6198	21	-4	8.8295	11	-10
	Indonesia	24.9456	30	23.6675	14.2679	26	-4	8.8759	12	-14
	Pakistan	23.1598	22	20.5904	10.8119	16	-6	10.0002	13	-3
	Uzbekistan	29.3694	52	27.4089	18.47	39	-13	10.5936	14	-25
	Lebanon	16.8892	7	20.2622	10.4433	14	7	11.4773	15	1
	Philippines	25.0113	32	24.7763	15.5133	30	-2	11.9856	16	-14
	Viet Nam	31.1203	59	29.1737	20.4521	49	-10	12.2224	17	-32
	Argentina	23.8017	23	23.1422	13.6779	23	0	12.397	18	-5
	Guinea	24.8594	29	22.5829	13.0498	18	-11	12.4526	19	1
	Kenya	27.1579	42	24.3157	14.9959	29	-13	12.5073	20	-9
	Uganda	31.7725	65	28.9682	20.2213	47	-18	12.5943	21	-26
	Bangladesh	25.1071	33	23.4093	13.9779	25	-8	12.7891	22	-3
	Guatemala	24.2978	27	25.3928	16.2057	33	6	12.9701	23	-10
	Peru	24.6922	28	25.03	15.7982	31	3	12.9881	24	-7
	South Africa	24.076	26	24.2973	14.9752	28	2	13.178	25	-3
	Morocco	16.3545	5	16.7354	6.4822	3	-2	13.2154	26	23
	Dominican Republic*	22.0503	19	24.2793	14.9551	27	8	13.2859	27	0
	Malaysia	18.9109	12	22.5892	13.0568	19	7	13.3148	28	9
	Israel	19.8233	14	23.0307	13.5527	20	6	13.6215	29	9
	Colombia	22.8876	21	23.2454	13.7938	24	3	13.7997	30	6
	Kyrgyzstan	29.6266	54	27.8757	18.9943	42	-12	14.0725	31	-11
	Cyprus*	16.7617	6	20.1204	10.2841	13	7	14.3433	32	19
	Panama	26.4179	38	28.8012	20.0338	46	8	14.5985	33	-13

Second quarter	Tanzania	28.7723	47	25.428	16.2452	34	-13	14.7175	34	0
	Iran	21.7564	18	21.5903	11.935	17	-1	15.0818	35	18
	Chile	26.1459	35	26.9841	17.993	37	2	15.5766	36	-1
	Ethiopia	31.8106	66	27.0061	18.0176	38	-28	15.6687	37	-1
	Central African Republic	33.517	73	29.1858	20.4657	50	-23	15.9714	38	-12
	Sri Lanka	24.9875	31	25.9647	16.848	36	5	16.2863	39	3
	Nicaragua	28.4492	46	27.5706	18.6517	41	-5	16.3316	40	-1
	Togo	33.5503	74	28.9818	20.2367	48	-26	16.6072	41	-7
	Myanmar	33.701	75	30.4107	21.8415	53	-22	16.9254	42	-11
	Madagascar	36.7079	83	33.959	25.8267	71	-12	17.0456	43	-28
	Réunion*	27.0225	40	29.8692	21.2333	52	12	17.4405	44	-8
	Ghana	35.2159	78	32.8317	24.5606	66	-12	17.8353	45	-21
	Benin	31.1896	60	27.8896	19.0099	43	-17	18.0884	46	3
	Saudi Arabia	15.1202	4	18.912	8.9268	8	4	18.3367	47	39
	Algeria	14.7486	3	17.1992	7.0031	6	3	18.5613	48	42
	Bolivia	32.0665	67	31.0689	22.5808	58	-9	19.1512	49	-9
	El Salvador	29.1007	49	30.8909	22.3808	57	8	19.5527	50	-7
	Uruguay	31.5515	63	30.6529	22.1135	56	-7	19.8365	51	-5
	Ecuador	27.8451	45	27.4335	18.4977	40	-5	20.3744	52	12
	DPR of Korea	32.4854	69	30.4346	21.8683	54	-15	20.6985	53	-1
	Tunisia	18.228	9	19.8506	9.9811	10	1	20.8428	54	44
	Lao PDR	36.2388	81	33.6212	25.4474	70	-11	21.0464	55	-15
	Honduras	30.5057	57	31.1859	22.7121	59	2	21.1765	56	-3
	Jordan	20.5105	16	25.2244	16.0165	32	16	21.1943	57	25
	Venezuela	23.9544	24	25.5242	16.3532	35	11	21.2331	58	23
	Costa Rica	29.446	53	31.5767	23.1511	62	9	21.8336	59	-3
	Afghanistan	35.1099	77	32.8985	24.6356	68	-9	21.9678	60	-8
Congo	27.5105	43	28.0171	19.1531	44	1	22.0411	61	17	
Armenia	36.2634	82	35.2224	27.2456	80	-2	22.6423	62	-18	
Mali	33.2895	72	29.1886	20.4689	51	-21	22.8447	63	12	
Haiti*	34.1217	76	34.2059	26.1041	73	-3	23.333	64	-9	
Barbados*	27.8164	44	33.2829	25.0673	69	25	24.5598	65	-4	
Third quarter	Cambodia	38.2674	90	34.638	26.5893	75	-15	24.653	66	-9
	Djibouti	30.2871	56	34.0061	25.8796	72	16	25.1122	67	-5
	Mozambique	38.0565	89	35.0593	27.0625	77	-12	25.3791	68	-9
	Gabon	29.247	51	31.5497	23.1208	61	10	25.5587	69	8

	Jamaica*	31.5495	62	34.7878	26.7576	76	14	25.8626	70	-6
	Nigeria	37.2814	85	35.0802	27.0859	79	-6	26.1451	71	-8
	Rwanda	40.7297	102	37.1508	29.4116	88	-14	26.1496	72	-16
	Mauritius*	25.5753	34	31.1867	22.713	60	26	26.6024	73	13
	Guadeloupe*	26.3477	37	30.6474	22.1073	55	18	27.1345	74	19
	Tajikistan	36.7767	84	35.4375	27.4872	82	-2	27.3871	75	-7
	Yemen	35.4268	79	38.8371	31.3055	92	13	27.6094	76	-16
	Georgia	31.4131	61	32.8847	24.6201	67	6	27.6151	77	10
	Cuba*	32.8917	70	35.3962	27.4408	81	11	27.8544	78	-3
	Niger	37.6251	88	34.329	26.2423	74	-14	27.9065	79	5
	Martinique*	28.9568	48	32.1486	23.7934	63	15	28.4936	80	17
	Eswatini	39.0869	93	42.3604	35.2627	101	8	28.6493	81	-20
	Sudan	49.9397	119	45.9466	39.2904	111	-8	28.6616	82	-29
	Kazakhstan	29.1704	50	28.7441	19.9696	45	-5	28.813	83	38
	Mauritania	41.1837 9735119 33	104	41.8672	34.7087	98	-6	28.8341	84	-14
	Burkina Faso	39.4576	95	36.6609	28.8613	84	-11	29.5718	85	1
	Comoros*	45.8475	115	42.5951	35.5263	102	-13	29.624	86	-16
	Paraguay	43.812	109	41.7514	34.5787	96	-13	30.915	87	-9
	Azerbaijan	39.5132	96	40.1473	32.7771	94	-2	30.9531	88	-6
	Turkmenistan	43.7924	108	42.3571	35.259	100	-8	31.15	89	-11
	Trinidad and Tobago*	32.3811	68	38.1801	30.5676	91	23	32.2287	90	-1
	Oman	26.1684	36	32.4009	24.0767	64	28	33.0065	91	27
	Kuwait	27.1167	41	32.7681	24.4891	65	24	33.1572	92	27
	Fiji*	38.8224	92	41.6709	34.4882	95	3	33.1798	93	-2
	Malawi	41.0852	103	37.7682	30.105	89	-14	33.3232	94	5
	Sierra Leone	48.9306	118	43.4918	36.5334	106	-12	33.6438	95	-11
	Namibia	36.2028	80	38.1472	30.5307	90	10	33.711	96	6
	Sao Tome and Principe*	39.2437	94	41.7607	34.5891	97	3	34.0846	97	0
	Zambia	45.612	114	43.7497	36.823	107	-7	34.9437	98	-9
Fourth quarter	Dominica*	39.522	97	42.0419	34.905	99	2	34.947	99	0
	Mongolia	37.545	87	36.8647	29.0902	87	0	35.7536	100	13
	Chad	45.9502	116	43.9679	37.0681	108	-8	35.8912	101	-7
	Belize*	45.1885	112	45.9901	39.3393	112	0	35.8951	102	-10
	St Vincent and the Grenadines*	37.2965	86	42.8908	35.8584	104	18	36.4091	103	-1

Angola	39.7343	98	38.8517	31.3219	93	-5	36.5392	104	11
Samoa*	43.9973	110	48.0511	41.6541	115	5	36.7094	105	-10
Senegal	32.9922	71	35.0791	27.0847	78	7	37.0056	106	28
Solomon Islands*	50.7926	122	49.5457	43.3328	117	-5	37.2966	107	-10
Lesotho	42.9104	105	45.4887	38.7762	110	5	37.3407	108	-2
Antigua and Barbuda*	40.4297	100	45.217	38.471	109	9	38.4193	109	0
Guinea-Bissau*	53.5544	125	49.9605	43.7987	120	-5	38.4458	110	-10
Liberia	57.9153	127	53.1649	47.3976	123	-4	39.1271	111	-12
Guyana	49.9414	120	49.8222	43.6433	119	-1	39.2876	112	-7
Iraq	40.0494	99	43.0924	36.0848	105	6	40.3135	113	8
Timor-Leste*	54.9756	126	55.236	49.7237	125	-1	40.4555	114	-11
Cabo Verde*	38.796	91	42.763	35.7148	103	12	40.7867	115	12
Zimbabwe	58.9504	128	59.1245	54.0911	128	0	41.3769	116	-12
Brunei Darussalam	31.7557	64	36.7221	28.9301	86	22	42.9877	117	31
Botswana	43.4411	107	47.3381	40.8533	114	7	44.0207	118	4
Seychelles*	45.3518	113	50.7547	44.6906	122	9	45.1919	119	-3
Grenada*	44.4337	111	50.2143	44.0837	121	10	45.2911	120	-1
Bahamas*	40.5067	101	46.0936	39.4556	113	12	45.5044	121	8
Suriname*	52.6012	123	54.0754	48.4203	124	1	46.0157	122	-2
Singapore*	30.6957	58	36.6966	28.9014	85	27	46.5998	123	38
United Arab Emirates	30.2387	55	36.4887	28.6679	83	28	46.8589	124	41
Vanuatu*	47.7012	117	49.7876	43.6045	118	1	47.0444	125	7
Saint Lucia*	43.089	106	48.4753	42.1306	116	10	47.4408	126	10
Guyane*	62.6059	129	62.3549	57.7192	129	0	50.0229	127	-2
Maldives*	49.942	121	55.8773	50.4441	126	5	54.1053	128	2
Gambia	70.6627	130	72.6315	69.2614	130	0	64.3231	129	-1
Kiribati*	71.5262	131	74.4481	71.3017	131	0	64.3231	130	-1
Saint Kitts and Nevis*	52.7135	124	58.8981	53.8368	127	3	64.3231	131	4

Note: Countries are ordered by DEA-FDEVI. The sample is split into quarters to facilitate the interpretation. Variations of ranks (Diff. Rank) are calculated as $rank_{EVI} - rank_{FDEVI}$ and $rank_{EVI} - rank_{FDEVI}$, so that a positive variation consists in a loss of vulnerability and a negative variation in a gain of vulnerability. * indicates a SIS.

Source: from DESA, Goujon et al. (2015) and authors.

Annexe A.2 : Annexes du chapitre 5

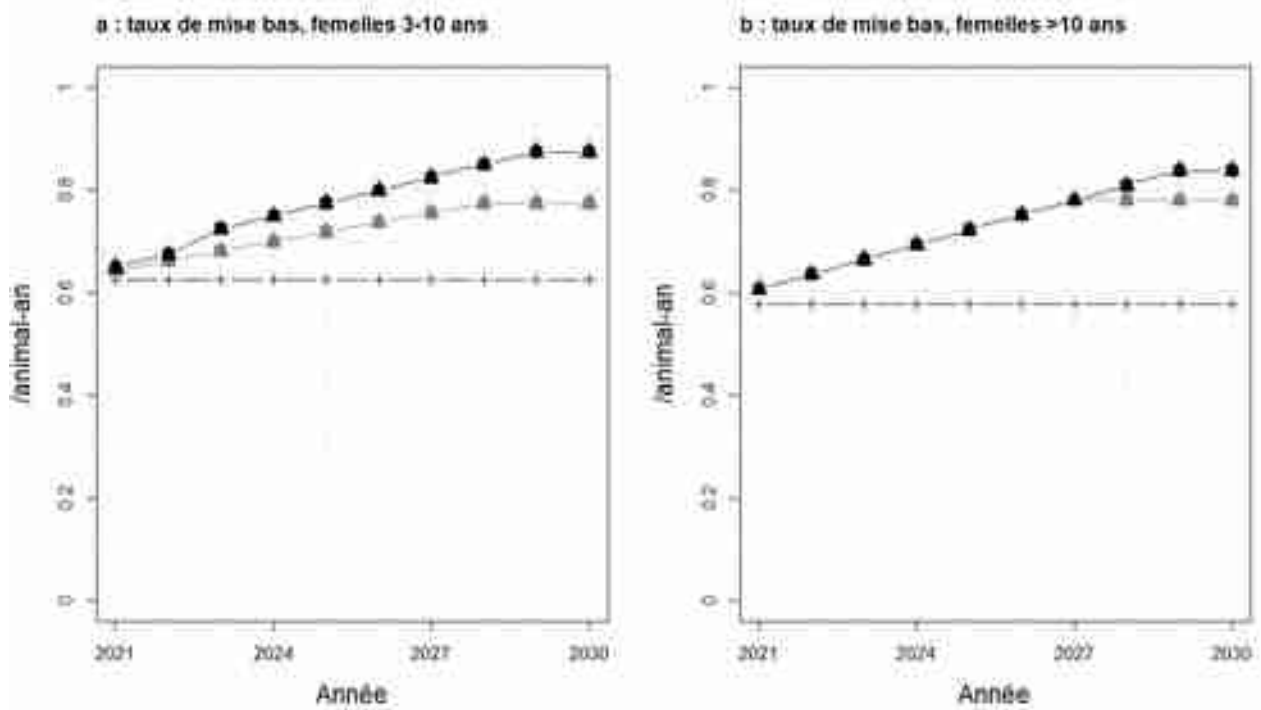


Figure 24: Taux de mise bas des femelles de 3 à 10 ans (a) et de plus de 10 ans (b) entre 2021 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

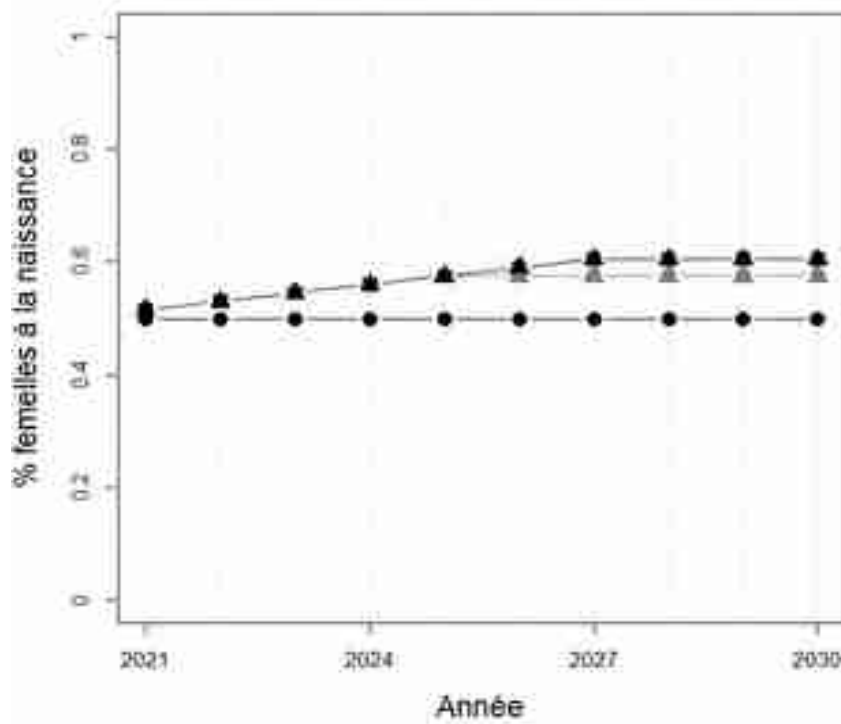


Figure 25: Sex-ratio à la naissance entre 2021 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

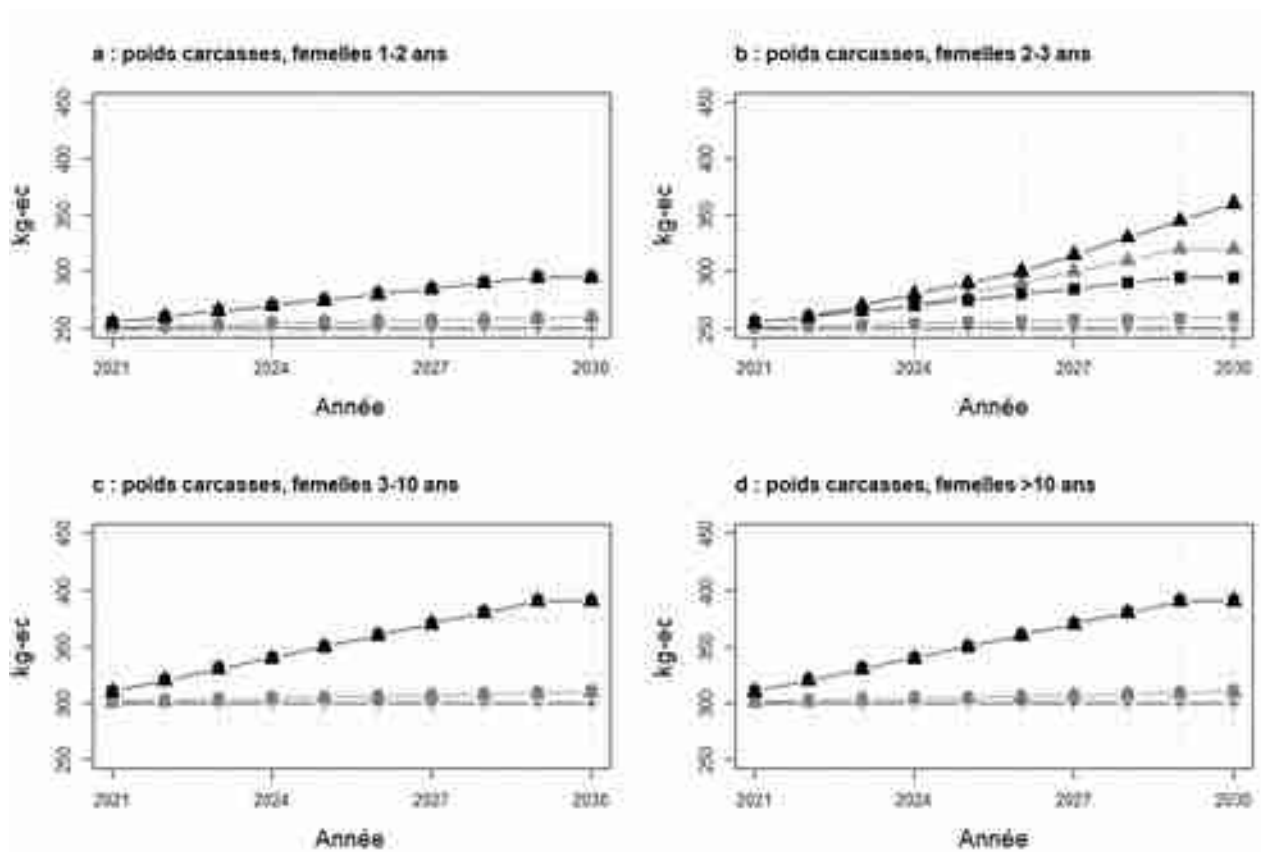


Figure 26: Poids carcasses des femelles de un à deux ans (a), de deux à trois ans (b), de trois à dix ans (c) et de plus de dix ans (d) entre 2021 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

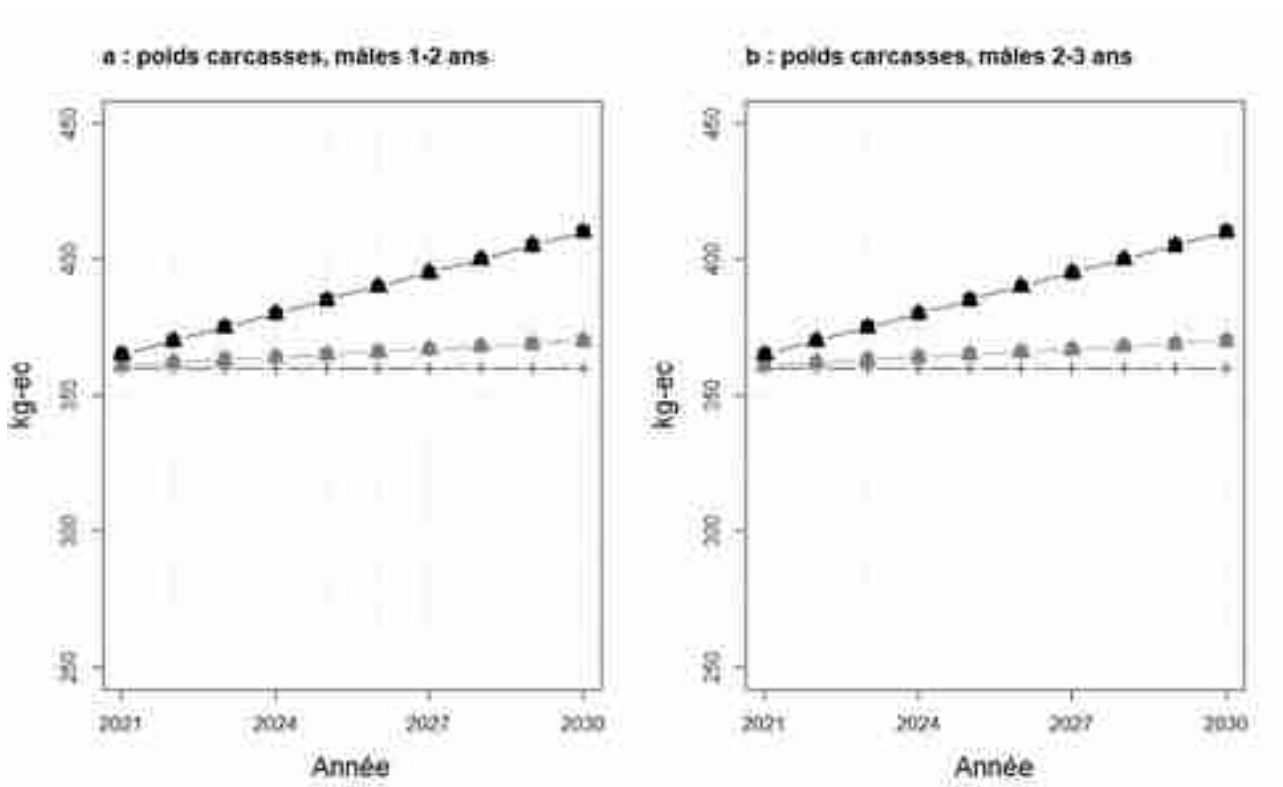


Figure 27: Poids carcasses des mâles de un à deux ans (a) et de deux à trois ans (b) entre 2021 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGHERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGHERB.Haut (triangles noirs)

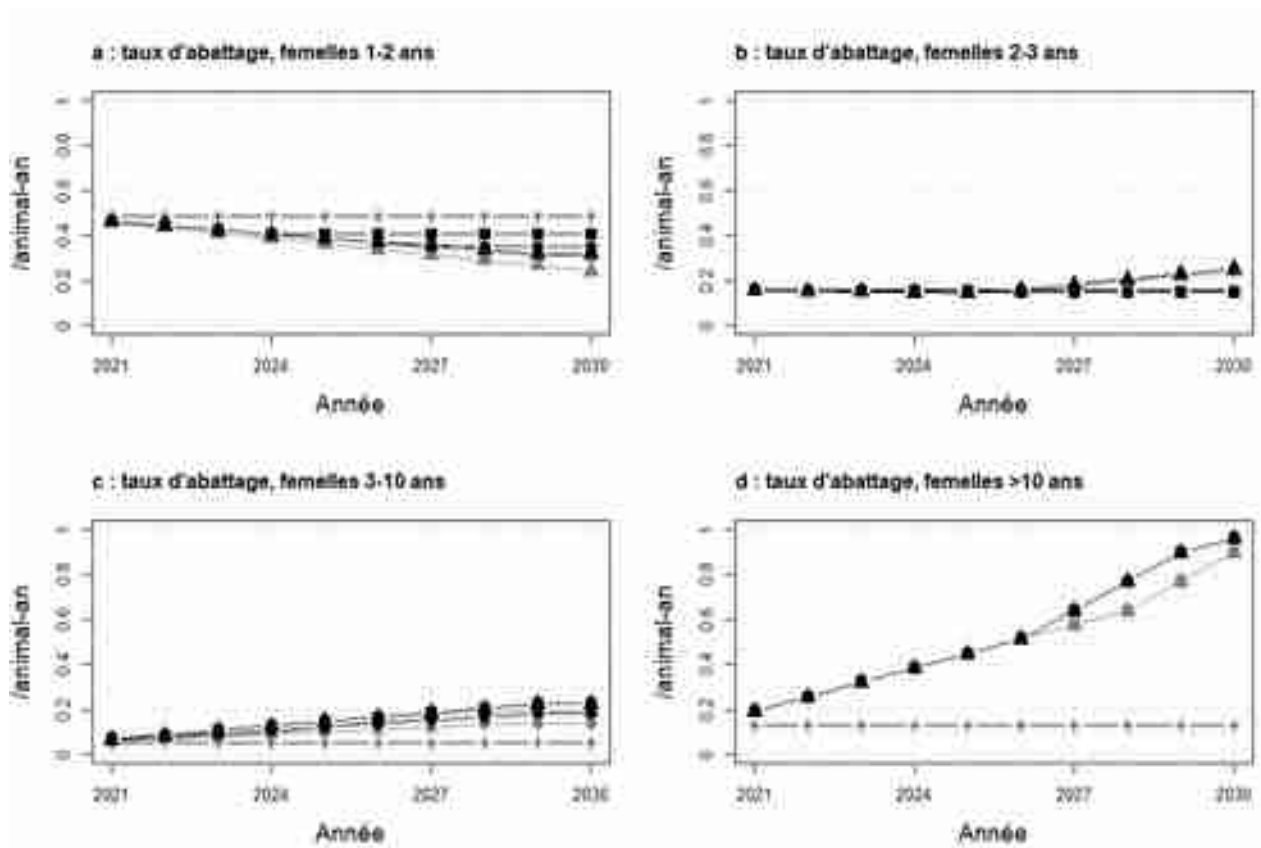


Figure 28: Taux d'abattage des femelles de un à deux ans (a), de deux à trois ans (b), de trois à dix ans (c) et de plus de dix ans (d) entre 2021 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGHERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGHERB.Haut (triangles noirs)

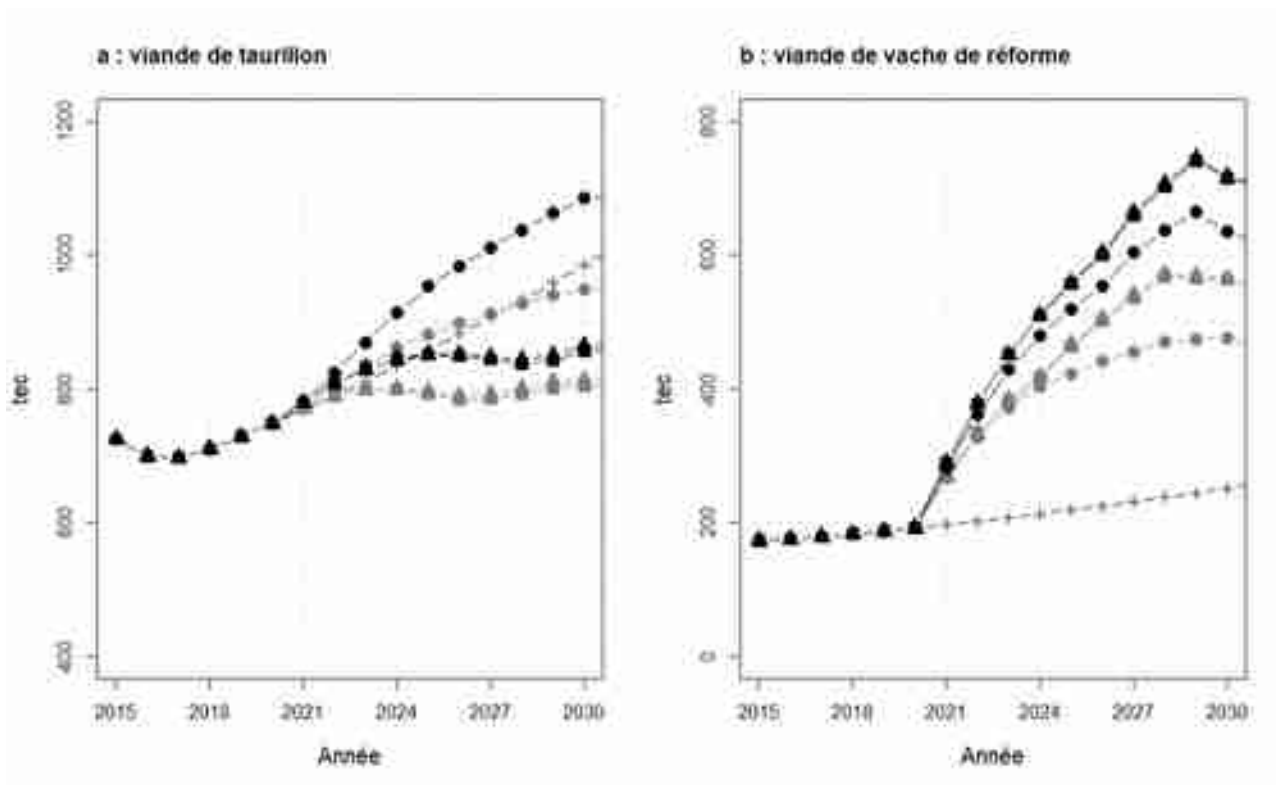


Figure 29: Production de viande de taurillon (a) et production de viande de vache de réforme (b) entre 2015 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs).

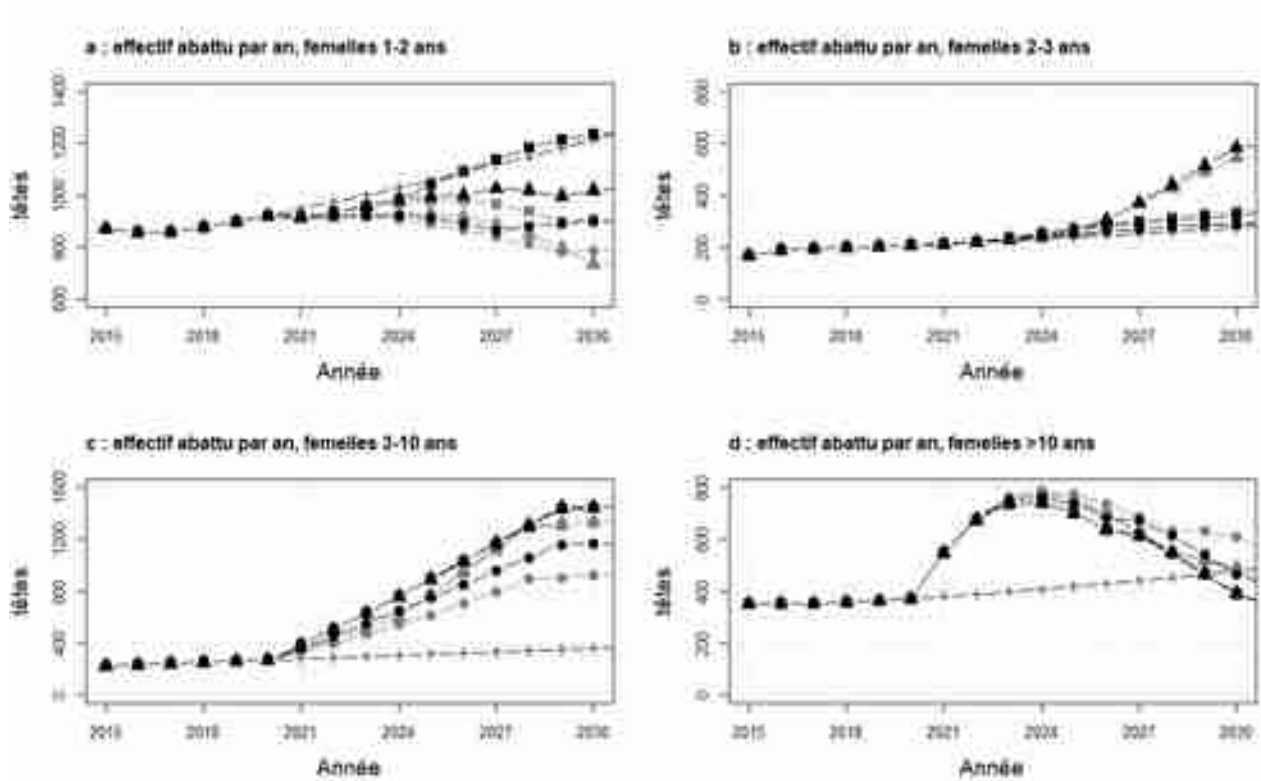


Figure 30: Nombre de femelles de un à deux ans (a), de deux à trois ans (b), de trois à dix ans (c) et de plus de dix ans (d) abattues par an entre 2015 et 2030 pour les scénarios BAU (croix), BASE.Bas (ronds gris), IASEX.Bas (carrés gris), ENGERB.Bas (triangles gris), BASE.Haut (ronds noirs), IASEX.Haut (carrés noirs) et ENGERB.Haut (triangles noirs)

**Annexe A.3 : Diagnostic démographique de la
production allaitante à la Réunion**

Les éléments présentés ci-après permettent d'avoir une meilleure compréhension de l'organisation de l'élevage allaitant à la Réunion et de ses performances. Ils ont nourri les discussions avec la coopérative lors de la définition des scénarios d'évolution de l'élevage.

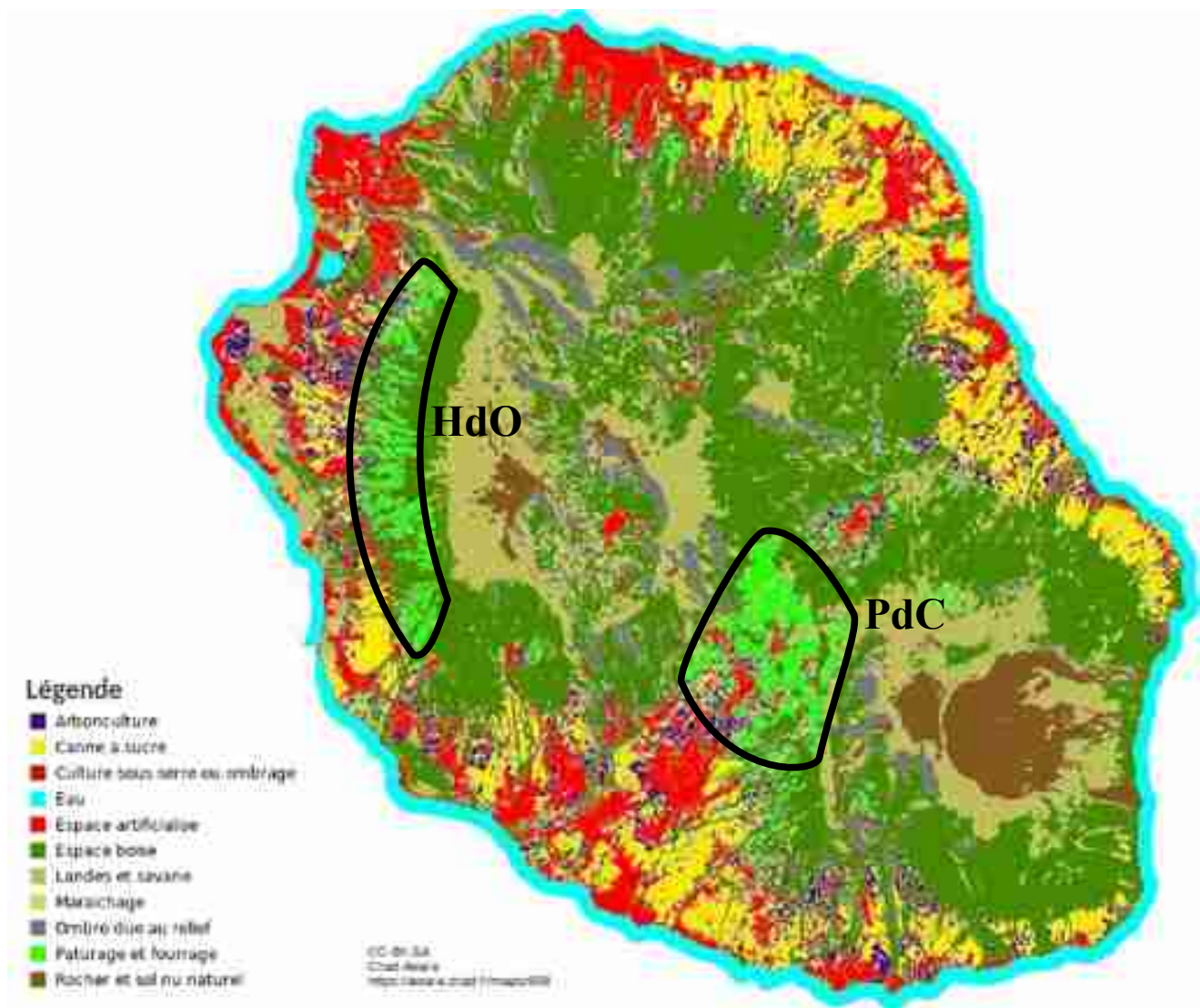


Figure 31: Répartition des surfaces par type d'occupation du sol à la Réunion (2019)

Source : Cirad, AWARE (Atlas Web Agricole pour la Recherche), 2020

Les zones PdC (Plaine des Cafres) et HdO (Hauts de l'Ouest) correspondent aux deux principaux bassins d'élevage naisseur à la Réunion.

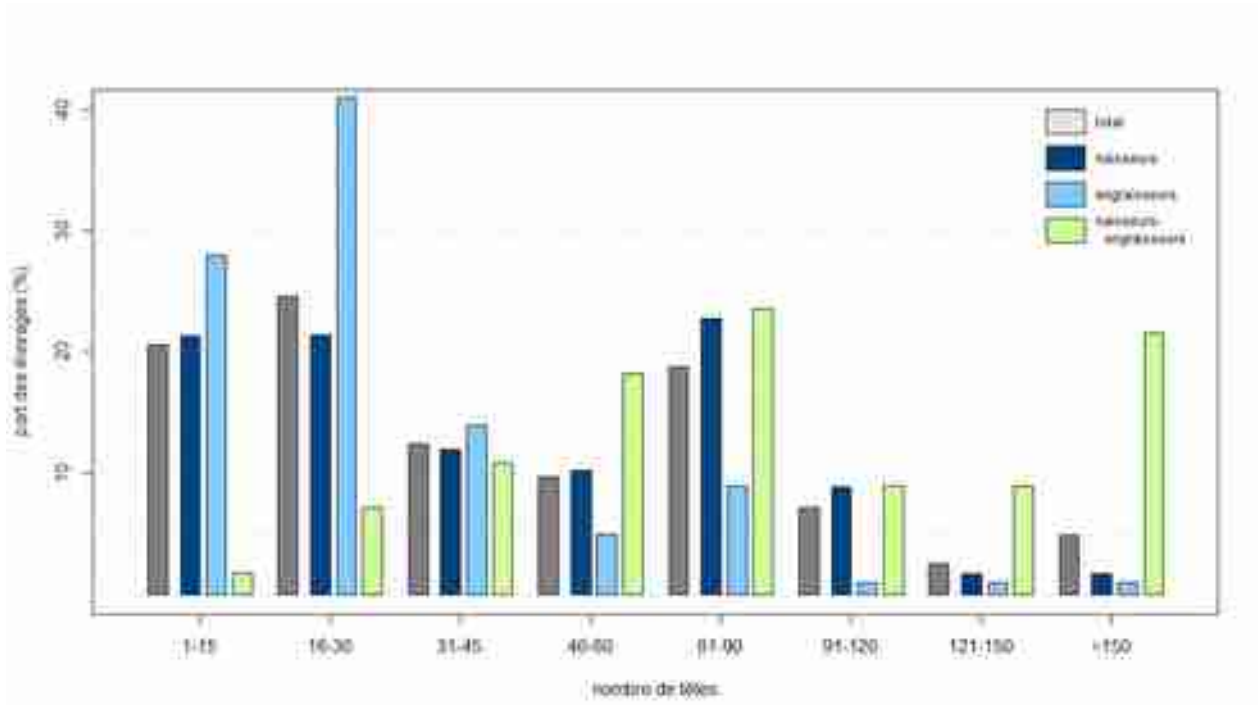


Figure 32: Taille des élevages allaitants à la Réunion, années 2015-2017

Tableau 21: Taille des élevages allaitants à la Réunion et en France métropolitaine

Type d'élevage	Part des éleveurs		Nombre de têtes de bétail (moyenne)	
	Réunion (2015-2017)	France métropolitaine (2018)	Réunion (2015-2017)	France métropolitaine (2018)
Naisseur	60 %	67 %	47,1	47
Engraisseurs	25 %	17 %	29,2	244,58

Source : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, (IDELE & Confédération nationale de l'élevage, 2019; Poizat et al., 2019)

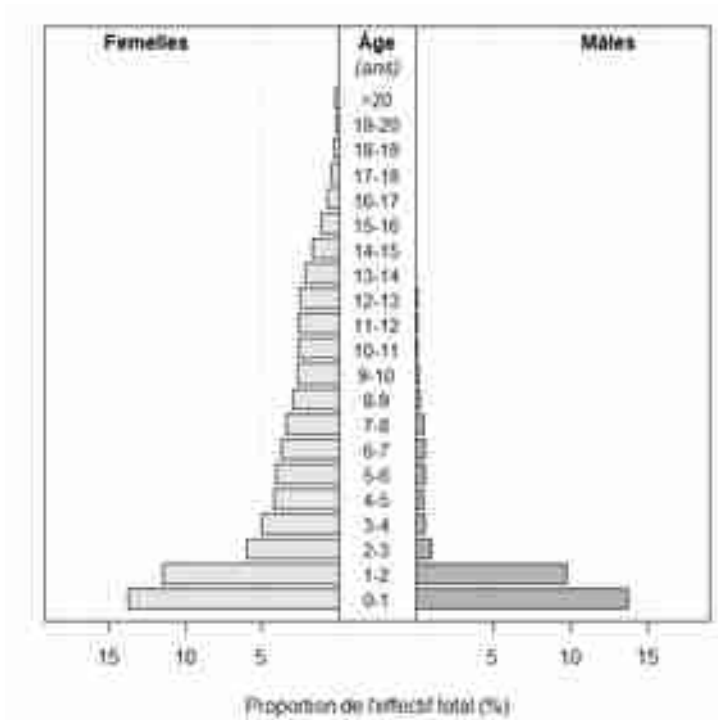


Figure 33: Pyramide des âges du troupeau allaitant réunionnais, années 2015-2017

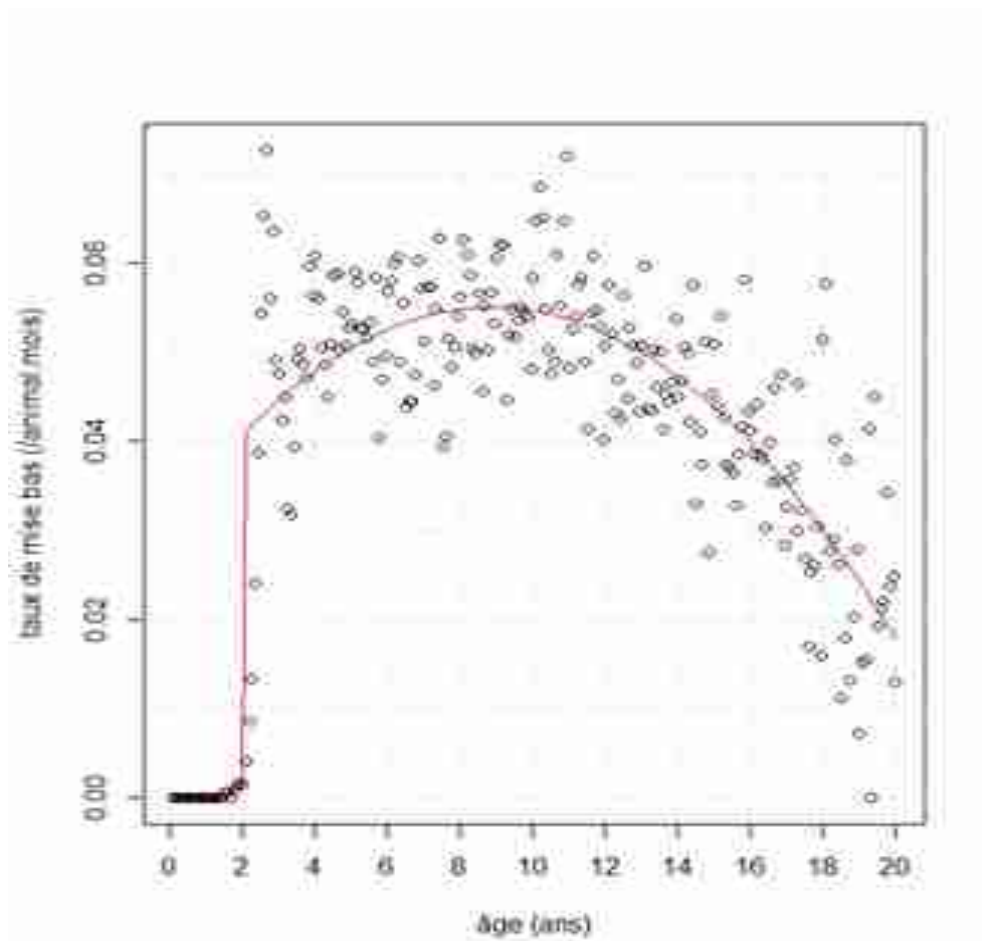


Figure 34: Taux de mise bas (/animal-an) selon l'âge des femelles à la Réunion, années 2015-2017

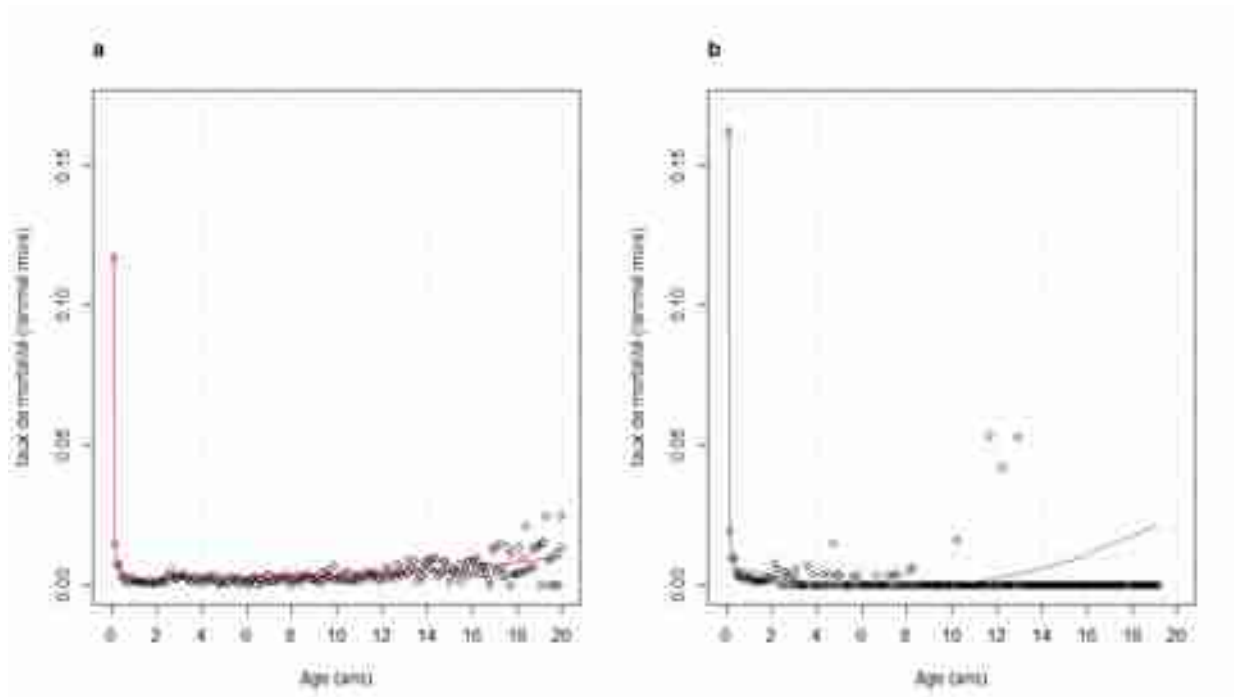


Figure 35: Taux de mortalité (/animal-an) selon l'âge des femelles (a) et des mâles (b) à la Réunion, années 2015-2017

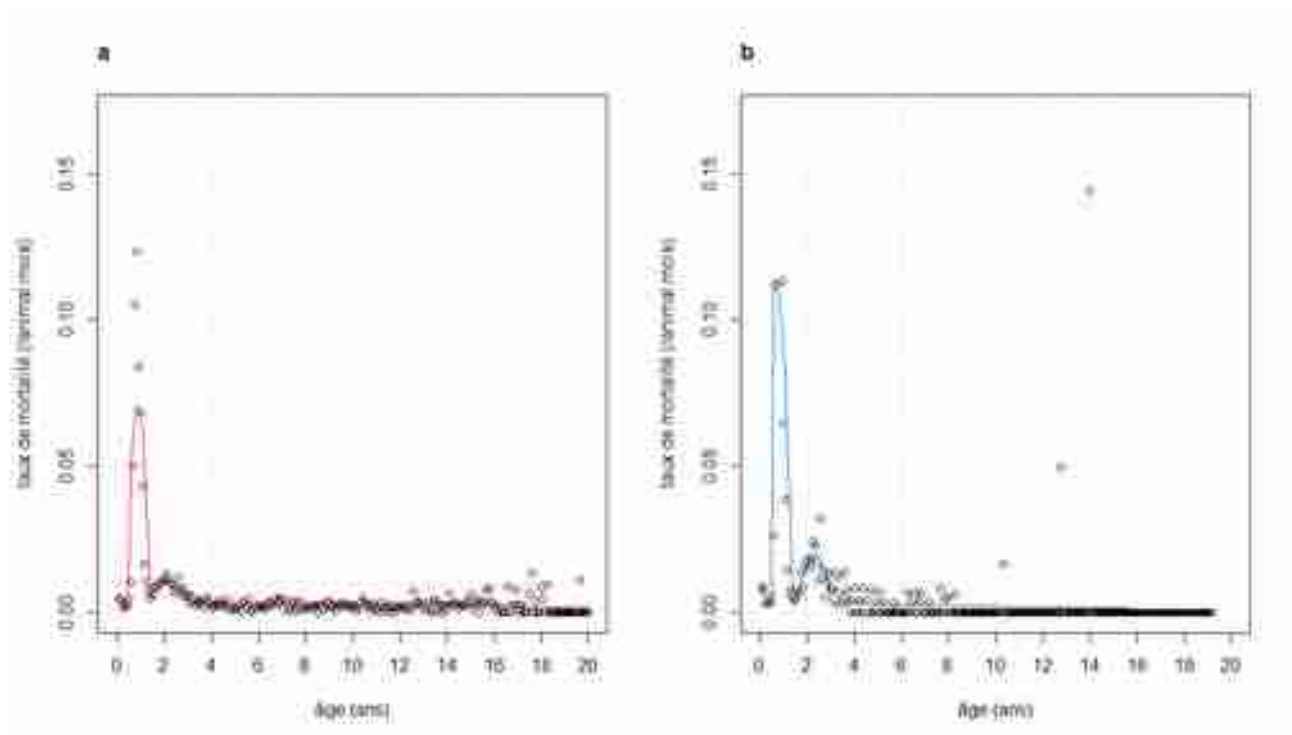


Figure 36: Taux de vente (/animal-an) selon l'âge des femelles (a) et des mâles (b) à la Réunion, années 2015-2017

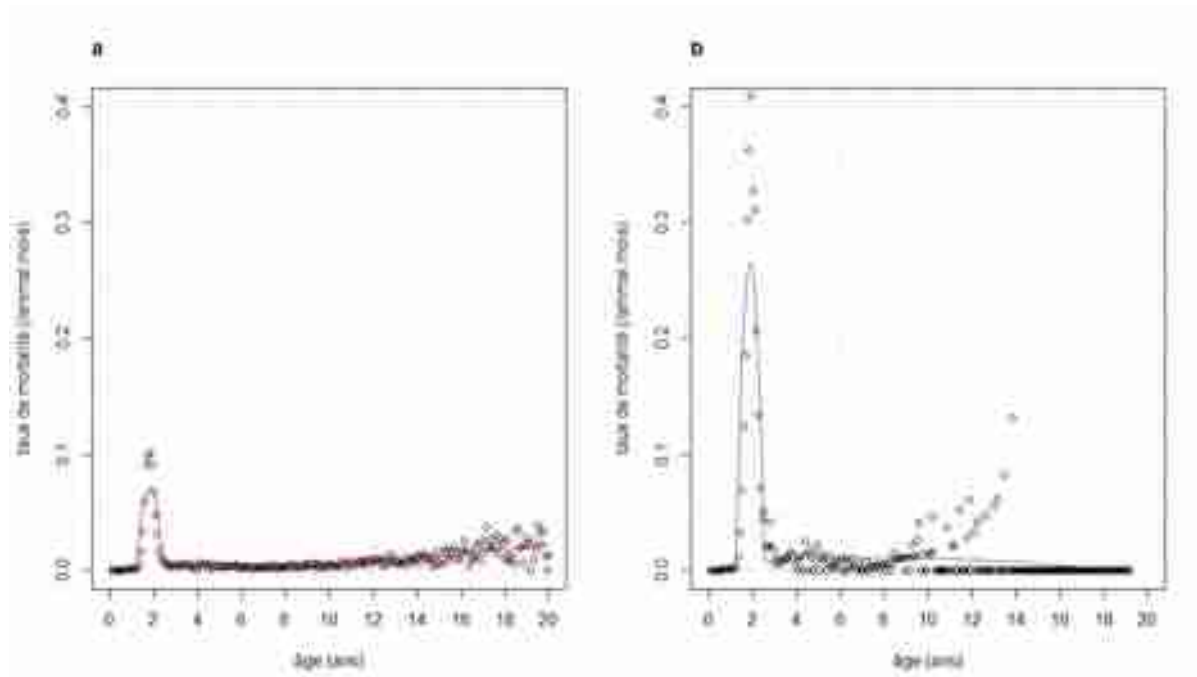


Figure 37: Taux d'abattage (/animal-an) selon l'âge des femelles (a) et des mâles (b) à la Réunion, années 2015-2017

Tableau 22: Taux démographiques des bovins allaitants à la Réunion (en /animal-an), années 2015-2017

Sexe	Classe d'âge	Dénomination	Taux de mise bas /animal-an	Taux de mortalité /animal-an	Taux d'abattage /animal-an
F	1 (0 – 6 mois)	Velles	0,000	0,210	0,001
F	2 (6 mois – 1 an)	Broutardes	0,000	0,024	0,007
F	3 (1 – 2 ans)	Génisses	0,000	0,012	0,492
F	4 (2 – 3 ans)	Jeunes vaches	0,483	0,029	0,154
F	5 (3 – 10 ans)	Vaches adultes	0,625	0,026	0,042
F	6 (>10 ans)	Vaches sénescences	0,578	0,057	0,112
M	1 (0 – 6 mois)	Veaux	-	0,294	0,001
M	2 (6 mois – 1 an)	Broutards	-	0,034	0,012
M	3 (1 – 2 ans)	Taurillons	-	0,021	1,127
M	4 (2 – 3 ans)	Jeunes taureaux	-	0,035	1,236
M	5 (>3 ans)	Taureaux adultes	-	0,015	0,087

Tableau 23: Taux démographique (/animal-an) selon la race et la zone d'élevage à la Réunion, années 2015-2017

Facteur	Modalité	Taux de mise bas femelles > 3 ans /animal-an	Taux de mortalité animaux < 6 mois /animal-an ²¹	Taux d'abattage mâles 1-2 ans /animal-an	Taux d'abattage femelles 1-2 ans /animal-an
Ensemble	Ensemble	0,60	0,25	1,11	0,49
Race	Croisé	0,60	0,24	1,14	0,56
Race	Limousine	0,63	0,26	1,09	0,46
Race	Blonde d'Aquitaine	0,48	0,25	1,08	0,38
Race	Autre	0,71	0,17	1,25	0,33
Zone naisseur	Hauts de l'Ouest ²²	0,58	0,24	-	-
Zone naisseur	Plaine des Cafres ²³	0,72	0,24	-	-
Zone naisseur	Autres	0,54	0,29	-	-
Zone engraisseur	Sud ²⁴	-	-	1,09	0,39
Zone engraisseur	Sud-Ouest ²⁵	-	-	1,10	0,82
Zone engraisseur	Autres	-	-	1,07	0,35

Les zones naisseur sont mentionnées sur la carte d'occupation des sols (Figure 31)

21 Du fait que la classe d'âge est d'une longueur inférieure à un an, le taux de mortalité apparaît artificiellement élevé. Le temps à risque est en effet au plus de 0,5 (les animaux ne peuvent être présents plus de 0,5 an dans la classe d'âge 0-6 mois), et le dénominateur du taux de mortalité pour la classe d'âge particulièrement faible.

22 Communes des Avirons, Saint Leu, Trois Bassins, Saint Paul, Le Port, La Possession, altitude >800 m.

23 Commune du Tampon, altitude > 800 m.

24 Communes de Saint-Joseph et Saint-Philippe, altitude < 800 m.

25 Communes de Saint-Pierre, Cilaos, Saint-Louis, Entre-Deux, Étang-Salé, Petite-Île et du Tampon, altitude < 800 m.

Tableau 24: Performances historiques et actuelles des bovins allaitants à la Réunion

Mesure	Tillard <i>et al.</i> (2000)	Choisis <i>et al.</i> (2008)	Réunion, 2015-2017
IVV (jours)	470	374,6	449,3
Taux de mise bas (%)	0	80,6	57
Âge au premier vêlage (mois)	42,3	0	37,5
PAT 120 j femelles (kg)	134	-	124
PAT 210 j femelles (kg)	203	-	203
PAT 120 j mâles (kg)	143	149	142
PAT 210 j mâles (kg)	221	-	243

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, (Tillard *et al.*, 2000; Choisis *et al.*, 2008)

Tableau 25: Performances de reproduction des bovins allaitants à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés

Référence	Groupe/race	Tx mise bas /animal-an	IVV jours	Âge au 1 ^{er} vêlage mois	Âge moyen au vêlage ans
Belvèze & Lafon, 2012	Blonde d'Aquitaine		417		
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine		408	36,6	6
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine		385	35,2	6
Brzáková <i>et al.</i> , 2016			384,7		
Goyache & Gutiérrez, 2001	Asturiana de los Valles		389,6	34,5	
Grimard <i>et al.</i> , 2018	Blonde d'Aquitaine		401	36	
Grimard <i>et al.</i> , 2018	Limousine		384	35	
Gutiérrez <i>et al.</i> , 2002	Asturiana de los Valles		488	35,5	
Titterington <i>et al.</i> , 2017	Blonde d'Aquitaine		395		
Titterington <i>et al.</i> , 2017	Limousine		395		
Titterington <i>et al.</i> , 2017	Hereford		396		
Veyssset <i>et al.</i> , 2004	Charolais		378,3		
Abdel-Aziz <i>et al.</i> , 2005	Zébu Butana		378	43,2	
Abdel-Aziz <i>et al.</i> , 2005	Zébu Kenana		456	53,6	
Abdel-Aziz <i>et al.</i> , 2005	Frison × Keana		444	42,3	
Ba <i>et al.</i> , 2011	Troupeaux >20 vaches	0,49			
Lesnoff, 2015	Femelles > 4 ans méthode 12MO	0,57			
Lesnoff, 2015	Femelles > 4 ans méthode 12MO-REG	0,49			
Lesnoff, 2015	REV (revue de littérature)	0,57			
Razafinarivo <i>et al.</i> , 2018	Zébu	0,59		75	
Réunion, 2015-2017	Femelles > 2 ans	0,59	434,1	38,9	7,7

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion Goyache & Gutiérrez, 2001; Gutiérrez *et al.*, 2002; Veyssset *et al.*, 2004; Abdel-Aziz *et al.*, 2005; Ba *et al.*, 2011; Belvèze & Lafon, 2012; Lesnoff, 2015b; Blachon *et al.*, 2016; Brzáková *et al.*, 2016; Titterington *et al.*, 2017; Grimard *et al.*, 2018; Razafinarivo *et al.*, 2018

Tableau 26: Mortalité des bovins allaitants à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés

Référence	Groupe/race	Taux de mortalité 0-1 an /animal-an	Probabilité de mort avant sevrage %
Belvèze & Lafon, 2012	Blonde d'Aquitaine		9,5
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine		11
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine		8,9
Ba <i>et al.</i> , 2011		0,1	
Lesnoff, 2015	12MO	0,18	
Lesnoff, 2015	REV	0,27	
Razafinarivo <i>et al.</i> , 2018	Zébu	0,08	2,36
Réunion, 2015-2017	Ensemble des races	0,13	9

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Ba *et al.*, 2011; Belvèze & Lafon, 2012; Lesnoff, 2015b; Blachon *et al.*, 2016; Razafinarivo *et al.*, 2018

Tableau 27: Taux d'abattage et éléments de gestion des animaux engraisés à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés

Référence	Groupe/race	Taux d'abattage 1-4 ans /animal-an		Âge à la mise en lot mois	Âge à l'abattage mois ou ans			Poids à l'abattage kg	
		femelles	mâles		femelles engraissées	mâles	femelles réforme	femelles	mâles
Valance <i>et al.</i> , 2014	Blonde d'Aquitaine			9		16,8			700,9
Valance <i>et al.</i> , 2014	Limousine			7,3		18,7			697,7
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine				31,8	16,8	6,2		
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine				27,8	17,6	6,7		
Ba <i>et al.</i> , 2011		0,12	0,2						
Lesnoff, 2015	12MO	0,04	0,35						
Lesnoff, 2015	REV	0,04	0,18						
Réunion 2015-2017		0,3	1,07	9,3	21,6	20,3	10,8	547,6	596,7

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Ba *et al.*, 2011; Valance *et al.*, 2014; Lesnoff, 2015b; Blachon *et al.*, 2016

Tableau 28: Poids âges types des bovins chez les naisseurs à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés

Référence	Groupe/race	Poids à la naissance		PAT 120 jours		PAT 210 jours	
		kg		kg		kg	
		elles	mâles	elles	mâles	elles	mâles
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine			172	180	277	301
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine			165	176	264	291
Valance <i>et al.</i> , 2014	Blonde d'Aquitaine		48,8				277,3
Valance <i>et al.</i> , 2014	Limousine		42,9				277
Razafinarivo <i>et al.</i> , 2018	Zébu	12 – 20					
Réunion 2015-2017		34,9	36,6	123,9	141,9	203,3	243

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Valance *et al.*, 2014; Blachon *et al.*, 2016; Razafinarivo *et al.*, 2018

Tableau 29: Croissance des bovins engraisés à la Réunion et en France métropolitaine

Référence	Groupe/race	GMQ 0 – 120 jours g/j		GMQ 120 – 210 jours g/j	
		femelles	mâles	femelles	mâles
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine	1 046	1 091	1 173	1 363
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine	1 027	1 098	1 095	1 283
Réunion 2015-2017		742	878	882	1 123

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Blachon *et al.*, 2016

Tableau 30: Poids des femelles de renouvellement à la Réunion et en France métropolitaine

Référence	Groupe/race	PAT femelles 360 jours kg	PAT femelles 540 jours kg
Grimard <i>et al.</i> , 2018	Blonde d'Aquitaine	392	500
Grimard <i>et al.</i> , 2018	Limousine	367	465
Réunion 2015-2017		292,4	385,1

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Grimard *et al.*, 2018

Tableau 31: Comparaison des poids carcasses à la Réunion et dans différents territoires tropicaux et tempérés

Référence	Groupe/race	Poids carcasse mâles kg-ec	Poids carcasse femelles engraisées kg-ec	Poids carcasse femelles réforme kg-ec
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Blonde d'Aquitaine	438	432	505
Blachon <i>et al.</i> , 2016	Limousine	424	356	427
Lesnoff, 2015	REV			109,9
Réunion 2015-2017		362,9	252,2	302,5

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Lesnoff, 2015b; Blachon *et al.*, 2016

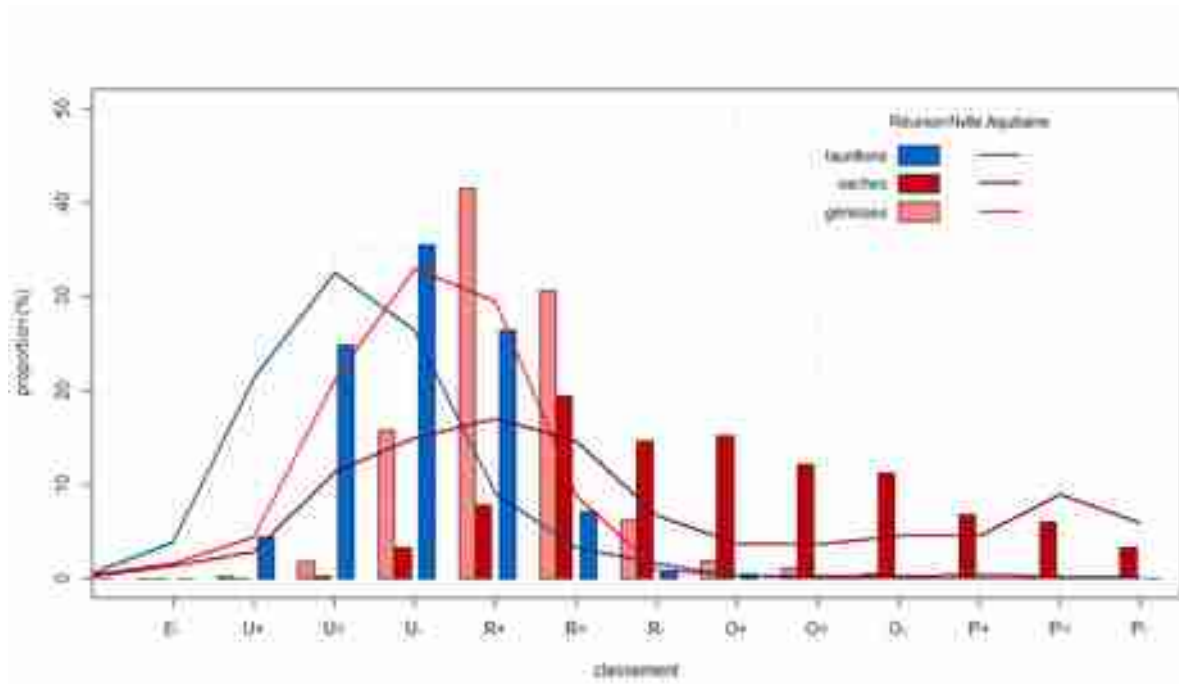


Figure 38: Classement des taurillons, génisses et vaches de réforme de race allaitante abattus à la Réunion et en Nouvelle Aquitaine

Sources : calcul des auteurs à partir de la BDNI Réunion, Interbev Nouvelle-Aquitaine, 2017b, 2017a²⁶²⁷

26 Les données de classement à l'échelle de la France métropolitaine ne sont pas disponibles. Nous avons considéré que la région Nouvelle Aquitaine est la plus adaptée pour une comparaison avec la Réunion en ce qu'elle inclut le principal bassin d'élevage des races limousines et blondes d'Aquitaine en métropole.

27 La présence de deux modes pour le classement des vaches de réforme (autour de R+ et autour de P=) tient à la présence d'animaux de réforme laitiers dans les statistiques.

Annexe A.4 : Photographies



Photographie 1: La Baie de Saint Paul depuis le Cap la Houssaye

La Baie de Saint-Paul était considérée comme le meilleur ancrage de la Réunion. Le débarcadère, visible dans la baie, était un des points d'embarquement principaux de l'île pour l'exportation du sucre vers la France métropolitaine. Construit au début du XIX^e siècle, déprivatisé en 1849, il fonctionnera jusqu'en 1911.



Photographie 2: Le village de Bourg Murat vu depuis le piton Dugain

Le village de Bourg-Murat est situé à 1 600 m d'altitude. Il s'agit d'une des zones d'élevage principales de l'île. À l'arrière-plan, la vallée du bras de la Plaine et les sommets du Grand Bénare et du Piton des Neiges donnent un aperçu des pentes pouvant exister à la Réunion.



Photographie 3: Troupeau allaitant limousin au pâturage dans la région du Nez de Bœuf (Plaine des Cafres)

a



b



Photographie 4: a : Élevage engraisseur traditionnel en diversification de canne à sucre (a) et élevage engraisseur moderne spécialisée (b)

a : Élevage de 15 génisses, aire en béton raclé, alimentation à base de canne à sucre verte broyée, complémentation moyenne en concentrés.

b : Élevage de 80 taurillons, aire paillée, alimentation à base de paille de canne à sucre et d'enrubannage, complémentation élevée en concentrés.



Photographie 5: Culture de pommes de terre et prairie au Piton Mahot



Photographie 6: Enrubannage d'herbe et paille de canne dans un élevage engraisseur



Photographie 7: Matériel utilisé dans les élevages engraisseurs traditionnels : pick-up pour l'affouragement en vert (a) et broyeuse péi pour le broyage de la canne à sucre fraîche (b)



Photographie 8: Jeune bovin croisé (a) et génisses limousines (b) dans deux élevages engraisseurs.



Photographie 9: Cornadis et aire d'alimentation en plein air à Bourg Murat

Annexe A.5 : Engagement de non plagiat

LETTER D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je soussigné(e) Mathieu Ramier en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (livres, sites, audiovisuel, internet), dès le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à La Favière le (date) 14 mars 2021

Signature

Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 3. Protection de la propriété intellectuelle - Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous ceux titulaires de tels droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit voisin, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L.335-3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque le source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L.335-3 et L.335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une fautive disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux académiques, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage... doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents cités, si elles sont assorties de leur référence (titre d'œuvre, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.

Références

- Abdel-Aziz B.E., Ali T.E., Ahmed F.A., 2005. A Study of Some Factors Affecting the Age at First Calving and the Calving Interval of Different Sudan Zebu Breeds. *J. Anim. Vet. Adv.*, **4** (7): 668-675
- Adhikari J., Timsina J., Khadka S.R., Ghale Y., Ojha H., 2021. COVID-19 impacts on agriculture and food systems in Nepal: Implications for SDGs. *Agric. Syst.*, **186**102990, doi: 10.1016/j.agsy.2020.102990
- Adrianto L., Matsuda Y., 2004. Study on Assessing Economic Vulnerability of Small Island Regions. *Environ. Dev. Sustain.*, **6** (3): 317-336, doi: 10.1023/B:ENVI.0000029902.39214.d0
- Agarwal B., 2014. Food sovereignty, food security and democratic choice: critical contradictions, difficult conciliations. *J. Peasant Stud.*, **41** (6): 1247-1268, doi: 10.1080/03066150.2013.876996
- Agreste, 2020. Abattages d'animaux de boucherie, en têtes et tonnes équivalent carcasse (téc), France yc DOM – Nouvelle nomenclature d'animaux - Agreste-Saiku
https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/D_0001#query/open/D_0001 (consulté le 06 avril 2020)
- Agreste, 2020. Cultures développées (hors fourrage, prairies, fruits, fleurs et vigne). Portail Stat. Agric. Fr., https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/SAANR_DEVELOPPE_2/detail/ (consulté le 10 août 2020)
- Agreste La Réunion, 2019a. Fiche filière laitière
- Agreste La Réunion, 2019b. Fiche filière viande bovine
- Ahmed S., Downs S.M., Yang C., Chunlin L., ten Broek N., Ghosh-Jerath S., 2020. Rapid tool based on a food environment typology framework for evaluating effects of the COVID-19 pandemic on food system resilience. *Food Secur.*, **12** (4): 773-778, doi: 10.1007/s12571-020-01086-z
- Andersson M., Taponen J., Kommeri M., Dahlbom M., 2006. Pregnancy Rates in Lactating Holstein-Friesian Cows after Artificial Insemination with Sexed Sperm. *Reprod. Domest. Anim.*, **41** (2): 95-97, doi: 10.1111/j.1439-0531.2006.00625.x
- Angel H., Poly J., 1956. Facteurs affectant le poids des veaux à la naissance. *Ann. Zootech.*, **5** (1): 81-95, doi: 10.1051/animres:19560104
- Angeon V., Bates S., 2015a. L'agriculture, facteur de vulnérabilité des petites économies insulaires ? *Région Dév.*, **4227**
- Angeon V., Bates S., 2015b. Reviewing Composite Vulnerability and Resilience Indexes: A Sustainable Approach and Application. *World Dev.*, **72**140-162, doi: 10.1016/j.worlddev.2015.02.011

- Angeon V., Chia E., Fusillier J.-L., 2007. Une agriculture exemplaire de la fragilité des régions, l'exemple des trois départements d'Outre-mer insulaires. In: Comprendre les économies d'outre-mer. HARMATTAN, Paris, 141-174
- ARIBEV, ARIV, 2015. D.E.F.I - Dossier de presse. Observatoire des Prix, des Marges et des Revenus de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France, 13 p.
- Association Riz Réunion, 2020. Ré-introduction de la culture du riz pluvial à La Réunion
- Atkins J., Mazzi S., Easter C., 2001. Small states: a composite vulnerability index. In: Small States in the Global Economy. COMMONWEALTH SECRETARIAT PUBLICATION, 53-92
- Augusseau X., Bonin M., Queste J., Dare W., Antona M., 2012. Adaptations locales de dispositifs agrienvironnementaux français et européens dans deux départements d'Outre-mer français : la Réunion et la Guadeloupe. *VertigO* (Volume 12 numéro 3): , doi: 10.4000/vertigo.13139
- Azzam A.M., Rettab B., 2012. A welfare measure of consumer vulnerability to rising prices of food imports in the UAE. *Food Policy*, **37** (5): 554-560, doi: 10.1016/j.foodpol.2012.05.003
- Ba A., Lesnoff M., Pocard-Chapuis R., Moulin C.-H., 2011. Demographic dynamics and off-take of cattle herds in southern Mali. *Trop. Anim. Health Prod.*, **43** (6): 1101-1109, doi: 10.1007/s11250-011-9808-2
- Bacaër N., 2009. Periodic Matrix Population Models: Growth Rate, Basic Reproduction Number, and Entropy. *Bull. Math. Biol.*, **71** (7): 1781-1792, doi: 10.1007/s11538-009-9426-6
- Bagath M., Krishnan G., Devaraj C., Rashamol V.P., Pragna P., Lees A.M., Sejian M., 2019. The impact of heat stress on the immune system in dairy cattle: A review. *Res. Vet. Sci.*, **1269**
- Banerjee A., 2011. Food, Feed, Fuel: Transforming the Competition for Grains. *Dev. Change*, **42** (2): 529-557
- Baptist R., 1992. Derivation of steady-state herd productivity. *Agric. Syst.*, **39** (3): 253-272, doi: 10.1016/0308-521X(92)90099-A
- Barbet-Massin V., Grimaud P., Michon A., Thomas P., 2004. Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion. UAFP - Cirad, Plaine des Cafres, Réunion, France, 97 p.
- Bareille N., Assie S., Fanuel P., Quillet J.M., Denis G., Seegers H., 2008. Incidence et impact économique des troubles de santé des jeunes bovins lors de l'engraissement en Pays de la Loire. Chambre régionale d'agriculture Pays de la Loire, Nantes, France, 4 p.
- Barlagne C., Bazoche P., Thomas A., Ozier-Lafontaine H., Causeret F., Blazy J.-M., 2015. Promoting local foods in small island states: The role of information policies. *Food Policy*, **57**62-72, doi: 10.1016/j.foodpol.2015.09.003
- Barnett J., Waters E., 2016. Rethinking the Vulnerability of Small Island States: Climate Change and Development in the Pacific Islands. In: The Palgrave Handbook of International Development (Eds. Grugel J., Hammett D.). PALGRAVE MACMILLAN UK, London, 731-748

- Bastien D., Le Pichon D., Guillaume A., 2014. Modes de conduite innovants visant à maîtriser les coûts de production pour les bovins mâles et femelles. In: L'engraissement des mâles et des femelles, un secteur d'avenir et créateur de valeurs (Eds. Interbev, Chambres d'agriculture, Idele). IDELE
- Bastien D., Le Pichon D., Valance S., Renon J., Agabriel J., Crassat J.L., Lavedrine M., 2017. NEOBIF : Etude de nouveaux modes de production de viande bovine à partir des bovins mâles allaitants. *Innov. Agron.*, **5571-84**, doi: 10.15454/1.5137757610632153e12
- Bates S., Angeon V., Ainouche A., 2014. The pentagon of vulnerability and resilience: A methodological proposal in development economics by using graph theory. *Econ. Model.*, **42445-453**, doi: 10.1016/j.econmod.2014.07.027
- Bellemare M., 2014. Comment on « Food Price Spikes, Price Insulation, and Poverty ». In: The economics of food price volatility, A National Bureau of Economic Research conference report (Eds. Chavas J.-P., Hummels D., Wright B.). UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS, Chicago ; London, (Coll. A National Bureau of Economic Research conference report), 339-344
- Belvèze J., Lafon B., 2012. Performances de élevages bovins croissance - des repères pour le conseil
- Benoit G., 2015. Cinquante années de politique agraire et d'aménagement du territoire dans l'île de La Réunion. *Ann. Mines - Responsab. Environ.*, **N° 79 (3)**: 51, doi: 10.3917/re1.079.0051
- Berazneva J., Lee D.R., 2013. Explaining the African food riots of 2007–2008: An empirical analysis. *Food Policy*, **3928-39**, doi: 10.1016/j.foodpol.2012.12.007
- Berentsen P.B.M., Giesen G.W.J., 1995. An environmental-economic model at farm level to analyse institutional and technical change in dairy farming. *Agric. Syst.*, **49 (2)**: 153-175, doi: 10.1016/0308-521X(94)00042-P
- Berg E., Amoako K.Y., Gusten R., Meerman J., Tidrick G., 1981. *Accelerated development in Sub-Saharan Africa: an agenda for action*. World Bank, Washington, D.C
- Berger Q., 2017. Étude de la mise en place d'une évaluation génétique des bovins allaitants de l'île de la Réunion. AgroCampus Ouest, Rennes, France, 77 p.
- Bertile W., 2013. Mascareignes et Seychelles, archipels créoles de l'océan Indien. *Études Océan Indien (49-50)*: , doi: 10.4000/oceanindien.1811
- Birthal P.S., Hazrana J., 2019. Crop diversification and resilience of agriculture to climatic shocks: Evidence from India. *Agric. Syst.*, **173345-354**, doi: 10.1016/j.agry.2019.03.005
- Blachon A., Lapostolle L., Lomelet B., Oden D., Lecomte C., Dimon P., 2016. Résultats 2016 des élevages bovins viande suivis par Bovins Croissance. France Conseil Élevage, IDELE, Inosys - Réseaux d'élevage, Paris, 86 p.
- Blancard S., Bonnet M., Hoarau J.-F., 2021. The influence of agriculture on the structural economic vulnerability of small island spaces: Assessment using DEA based composite indicators. *Appl. Econ.*, **53 (1)**: 79-97, doi: 10.1080/00036846.2020.1795071

- Blancard S., Hoarau J.-F., 2013. A new sustainable human development indicator for small island developing states: A reappraisal from data envelopment analysis. *Econ. Model.*, **30**:623-635, doi: 10.1016/j.econmod.2012.10.016
- Blancard S., Hoarau J.-F., 2016. Les petites économies insulaires en développement: Des territoires particulièrement vulnérables sur le plan économique ? *Rev. Économique*, **67** (1): 117, doi: 10.3917/reco.pr2.0060
- Bleul U., 2011. Risk factors and rates of perinatal and postnatal mortality in cattle in Switzerland. *Livest. Sci.*, **135**:257-264
- Bonaïti B., Bibé B., Havy A., Ménessier F., 1988. Comparaison des races bovines Charolaise, Limousine et Maine-Anjou en race pure et en intercroisement. 2. Performances d'engraissement des taurillons purs et F1. *Génétique Sélection Évolution*, **20** (3): 343-356
- Bonnet M., 2021. L'agriculture réunionnaise face au défi de l'autonomie alimentaire. *Artic. Soumis À Économie Rurale*
- Bonnet M., Valls-Fox H., Tillard E., Bigot C.-É., Lesnoff M., 2020. Influence of extrinsic factors, herd management and animal performances on the dynamics of the beef sector in a tropical island. *Artic. Soumis À Anim. Sci. J.*
- Bonnet M., Valls-Fox H., Tillard E., Juanès X., Vayssières J., Vigne M., Lesnoff M., 2021. Un modèle démographique pour identifier les leviers d'amélioration de la productivité de l'élevage bovin allaitant à la Réunion : validation et analyse de sensibilité. *Artic. Soumis À Rev. D'Élevage Médecine Vét. Pays Trop.*
- Briguglio L., 1995. Small island developing states and their economic vulnerabilities. *World Dev.*, **23** (9): 1615-1632, doi: 10.1016/0305-750X(95)00065-K
- Briguglio L., 2014. A Vulnerability and Resilience Framework for Small States. 102 p.
- Briguglio L., Cordina G., Farrugia N., Vella S., 2009. Economic Vulnerability and Resilience: Concepts and Measurements. *Oxf. Dev. Stud.*, **37** (3): 229-247, doi: 10.1080/13600810903089893
- Brown L.R., 2011. *World on the edge: how to prevent environmental and economic collapse*. Norton, New York, 240 p.
- Brunning-Fann C., Kaneene J.B., 1992. Environmental and management risk factors associated with morbidity and mortality in perinatal and pre weaning calves: A review from an epidemiological perspective. *Vet. Bull.*, **62** (5): 399-413
- Brzáková M., Svitáková A., Veselá Z., Čítek J., 2016. Genetic parameters for first calving interval in beef cattle. *Acta Fytotech. Zootech.*, **19** (Special Issue): 22-24, doi: 10.15414/afz.2016.19.si.22-24
- Bush R., Martiniello G., 2017. Food Riots and Protest: Agrarian Modernizations and Structural Crises. *World Dev.*, **91**:193-207, doi: 10.1016/j.worlddev.2016.10.017
- Cabaraux J.-F., Dufrasne I., Roux M., Istasse L., Hornick J.-L., 2005. La production de viande bovine à partir de femelles de réforme. *INRAE Prod. Anim.*, **18** (1): 37-48, doi: 10.20870/productions-animales.2005.18.1.3508

- Cabidoche Y.-M., Cattan P., Dorel M., Paillat J.-M., 2002. Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires: surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués¹⁷
- Caswell H., 1989. Matrix population models: construction, analysis, and interpretation. Sinauer Associates, MS, USA, 325 p.
- Caswell H., 2001. Matrix population models: construction, analysis, and interpretation. 2nd ed. Sinauer Associates, Sunderland, Mass, 722 p.
- Cazes G., 1985. Transport aérien et développement touristique des relations vitales et dialectiques. L'exemple de la Réunion. *Trav. Inst. Géographique Reims*, **63** (1): 45-59, doi: 10.3406/tigr.1985.1173
- CESE, 2021. *Plan de relance et déclinaison territoriale dans les Outre-mer* (Avis du CESE No. CESL1100003X). Conseil économique, social et environnemental, Paris
- Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021a. Repères & statistiques de l'agriculture réunionnaise. In: Agenda 2021 de la Chambre d'Agriculture de la Réunion. Saint-Denis, Réunion, France, 36-41
- Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021b. Les filières de production végétales à la Réunion. In: Agenda 2021 de la Chambre d'Agriculture de la Réunion. Saint-Denis, Réunion, France, 49-51
- Chambre d'agriculture de la Réunion, 2021c. Les filières de production animales à la Réunion. In: Agenda 2021 de la Chambre d'Agriculture de la Réunion. Saint-Denis, Réunion, France, 53-57
- Chang W., Cheng J., Allaire J.J., Xie Y., McPherson J., 2017. shiny: Web Application Framework for R. R
- Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *Eur. J. Oper. Res.* (2): 429-444
- Cherchye L., Moesen W., Rogge N., Puyenbroeck T.V., 2007. An Introduction to 'Benefit of the Doubt' Composite Indicators. *Soc. Indic. Res.*, **82** (1): 111-145, doi: 10.1007/s11205-006-9029-7
- Choisis J.-P., Fusillier J.-L., Lemoine F., 2011. Perspectives de diversification des exploitations cannières de l'île de la Réunion : exemple du modèle canne à sucre-engraissement. In: Exploitations agricoles, stratégies paysannes et politiques publiques : les apports du modèle Olympe, Update Sciences & Technologies (Ed. Penot É.). QUAE, Versailles, (Coll. Update Sciences & Technologies), 47-64
- Choisis J.-P., Gibon A., Lasseur J., Morales H., Touré I., Tourrand J.-F., 2010. Acteurs et temporalités dans les processus de modélisation participative de l'interaction entre systèmes agropastoraux et territoires : analyse comparée de sept études de cas. *Cah. Agric.*, **19** (2): 135-142, doi: 10.1684/agr.2010.0381

- Choisis J.-P., Grimaud P., Lassalle C., 2009. Pratiques d'élevage dans les exploitations bovines allaitantes conduites sur pâturage dans les Hauts de la Réunion. *INRA Prod. Anim.*, **22** (4): 345-354
- Choisis J.-P., Lassalle C., Messad S., Grimaud P., 2008. Performances zootechniques et pratiques des éleveurs en élevage bovin naisseur à la Réunion. *Rev. D'élevage Médecine Vét. Pays Trop.*, **61** (2): 89, doi: 10.19182/remvt.10004
- Chonabayashi S., Jithitikulchai T., Qu Y., 2020. Does agricultural diversification build economic resilience to drought and flood? Evidence from poor households in Zambia, **15** (1): 16
- Ciceri D., Allanore A., 2019. Local fertilizers to achieve food self-sufficiency in Africa. *Sci. Total Environ.*, **648**669-680, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.154
- Clapp J., 2009. Food Price Volatility and Vulnerability in the Global South: considering the global economic context. *Third World Q.*, **30** (6): 1183-1196, doi: 10.1080/01436590903037481
- Clapp J., 2015. *Food self-sufficiency and international trade: a false dichotomy?* FAO, Rome
- Clapp J., 2017. Food self-sufficiency: Making sense of it, and when it makes sense. *Food Policy*, **66**88-96, doi: 10.1016/j.foodpol.2016.12.001
- Clapp J., Moseley W.G., 2020. This food crisis is different: COVID-19 and the fragility of the neoliberal food security order. *J. Peasant Stud.*, **47** (7): 1393-1417, doi: 10.1080/03066150.2020.1823838
- Closset M., Feindouno S., Guillaumont P., Simonet C., 2017. A Physical Vulnerability to Climate Change Index: Which are the most vulnerable developing countries? *FERDI Work. Pap.*, **21337**
- Coder Y., Duplouy B., Fabre É., 2016. *La départementalisation de La Réunion - 1946-2016 : 70 ans de mutations économiques* (INSEE No. 18). INSEE, Saint-Denis, Réunion, France
- Coronado J.J.A., Bijman J., Omta O., Lansink A.O., 2010. Relationship characteristics and performance in fresh produce supply chains: the case of the Mexican avocado industry. *J. Chain Netw. Sci.*, **10** (1): 1-15, doi: 10.3920/JCNS2010.x101
- CTICS, 2018. *Rapport sur la campagne sucrière 2018*. Centre technique interprofessionnel de la canne et du Sucre de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France
- DAAFR, 2013. *L'observatoire des importations des produits agricoles sur la Réunion - Bilan de 5 années d'importation* (Agreste conjoncture la Réunion No. 88). Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Réunion, Saint-Denis, Réunion
- DAAFR, 2018. *Mémento La Réunion 2018*. Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France
- DAAFR, 2019a. *Observatoire des importations de fruits, légumes et viandes 2009 - 2018*. Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France
- DAAFR, 2019b. *Projet D.E.F.I. Dir. Aliment. Agric. For. La Réunion*, <http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Projet-DEFI> (consulté le 13 septembre 2019)

- DAAFR, 2019c. *Volumes des importations de viande en tonnes*. Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France
- DAAFR, 2020a. Canne à sucre. Dir. Aliment. Agric. For. La Réunion, <http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Presentation-production> (consulté le 10 août 2020)
- DAAFR, 2020b. Fruits et légumes. Dir. Aliment. Agric. For. La Réunion, <http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Fruits-et-legumes> (consulté le 08 septembre 2020)
- Dash S., Chakravarty A.K., Singh A., Upadhyay A., Singh M., Yousuf S., 2016. Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review. *Vet. World*, **9** (3): 235-244, doi: 10.14202/vetworld.2016.235-244
- Davis K.F., D'Odorico P., 2015. Livestock intensification and the influence of dietary change: A calorie-based assessment of competition for crop production. *Sci. Total Environ.* **7**
- De Vries A., Overton M., Fetrow J., Leslie K., Eicker S., Rogers G., 2008. Exploring the Impact of Sexed Semen on the Structure of the Dairy Industry. *J. Dairy Sci.*, **91** (2): 847-856, doi: 10.3168/jds.2007-0536
- de Cambiaire J., 1983. La certitude du développement : une référence mutualiste à la Réunion. Atya, Paris, 286 p.
- de Kroon H., Plaisier A., van Groenendael J., Caswell H., 1986. Elasticity: The Relative Contribution of Demographic Parameters to Population Growth Rate. *Ecology*, **67** (5): 1427-1431, doi: 10.2307/1938700
- Delanoue E., 2018. Débats et mobilisations autour de l'élevage : analyse d'une controverse. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, Rennes, France, 425 p.
- del Campo M., Brito G., de Lima J.M.S., Martins D.V., Sañudo C., Julián R.S., Hernández P., Montossi F., 2008. Effects of feeding strategies including different proportion of pasture and concentrate, on carcass and meat quality traits in Uruguayan steers. *Meat Sci.*, **80** (3): 753-760, doi: 10.1016/j.meatsci.2008.03.026
- DelCurto T., Hess B.W., Huston J.E., Olson K.C., 2000. Optimum supplementation strategies for beef cattle consuming low-quality roughages in the western United States. *J. Anim. Sci.*, **771**-16, doi: 10.2527/jas2000.77E-Suppl1v
- Delomez X., Gibon C., 2019. *Évaluation de la base de données nationale d'identification (BDNI)* (CGAAER No. 18083). Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, Paris
- Denman V.M., Dewey K.G., 1989. Food self-sufficiency in Micronesia: Effects of a nutrition assistance programme on food consumption. *Food Policy* **330**-346
- de Rouffignac A., Choisit J.-P., Salles J.-M., 2011. Enjeux des incitations économiques en élevage allaitant pour la gestion de la biodiversité dans les Hauts de la Réunion. In: Exploitations agricoles, stratégies paysannes et politiques publiques: les apports du modèle Olympe, Update Sciences & Technologies. ÉDITIONS QUAE, Versailles, (Coll. Update Sciences & Technologies), 65-74

- Desse M., 2012. Guadeloupe, Martinique, LKP, crise de 2009, crise économique, déclin économique : de crises en crises : la Guadeloupe et la Martinique. *Études Caribéennes* (17): , doi: 10.4000/etudescaribeennes.4880
- Dimier V., 2005. De la France coloniale à l'outre-mer. *Pouvoirs*, **113** (2): 37, doi: 10.3917/pouv.113.0037
- Dimova R., Gbakou M., 2013. The Global Food Crisis: Disaster, Opportunity or Non-event? Household Level Evidence from Côte d'Ivoire. *World Dev.*, **46**185-196, doi: 10.1016/j.worlddev.2013.02.007
- Dindar N., 2018. *Lutte contre les produits de dégagement à La Réunion* (Question écrite au gouvernement No. 05491). Sénat, Paris
- Dogru T., Marchio E.A., Bulut U., Suess C., 2019. Climate change: Vulnerability and resilience of tourism and the entire economy. *Tour. Manag.*, **72**292-305, doi: 10.1016/j.tourman.2018.12.010
- Domingues J.P., Gameiro A.H., Bonaudo T., Gabrielle B., Tichit M., 2020. Past intensification trajectories of livestock led to mixed social and environmental services. *Animal*, **14** (3): 598-608, doi: 10.1017/S1751731119001952
- Douanes françaises, 2020. Statistiques régionales annuelles du commerce extérieur. Portail Dir. Générale Douan. Droits Indirects, <https://www.douane.gouv.fr/la-douane/opendata> (consulté le 10 août 2020)
- DRAAF Rhône-Alpes, 2010. Table des équivalences Unité Gros Bétail
- Dumont R., Agabriel J., Bécherel F., Durand Y., Farrié J.P., Micol D., Pichereau F., Pierret P., Renon J., Roudier J., 2006. Le jeune bœuf Charolais à l'herbe : une voie de développement de la production de viande finie en Bourgogne. *INRAE Prod. Anim.*, **19** (5): 381-392, doi: 10.20870/productions-animales.2006.19.5.3504
- Durunna O.N., Girardin L.C., Scott S.L., Robins C., Block H.C., Iwaasa A.D., Khakbazan M., Lardner H.A., 2014. The effects of spring versus summer calving on beef cattle reproductive and growth performance in western Canada. *Can. J. Anim. Sci.*, **94** (2): 259-271, doi: 10.4141/cjas2013-180
- Easterly W., Levine R., 2003. Tropics, germs, and crops: how endowments influence economic development. *J. Monet. Econ.*, **50** (1): 3-39, doi: 10.1016/S0304-3932(02)00200-3
- Encontre P., 1999. The vulnerability and resilience of small island developing states in the context of globalization. *Nat. Resour. Forum*, **23** (3): 261-270, doi: 10.1111/j.1477-8947.1999.tb00914.x
- Encontre P., 2004. SIDS as a category: adopting criteria would enhance credibility. In: Is a special treatment of small island developing States possible? UNCTAD, New-York and Geneva
- Erokhin V., 2017. Self-Sufficiency versus Security: How Trade Protectionism Challenges the Sustainability of the Food Supply in Russia. *Sustainability*, **9** (11): 1939, doi: 10.3390/su9111939

- Ezanno P., 2005. Dynamics of a tropical cattle herd in a variable environment: A modelling approach in order to identify the target period and animals on which concentrating management efforts to improve productivity. *Ecol. Model.*, **188** (2-4): 470-482, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.02.016
- Fages F., 2017. Diagnostic du coût des fourrages à la Réunion. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, INP Purpan, Purpan, France, 162 p.
- Faisal I.M., Parveen S., 2004. Food Security in the Face of Climate Change, Population Growth, and Resource Constraints: Implications for Bangladesh. *Environ. Manage.*, **34** (4): 487-498, doi: 10.1007/s00267-003-3066-7
- Faivre R., Iooss B., Mahévas S., Goffinet B., Saltelli A., 2013. Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement. Editions Quae, Versailles, France, 352 p. (Coll. Savoir faire)
- FAO, 1996. *Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action*. FAO, Rome
- FAO, 2003. *Trade Reforms and Food Security. Conceptualizing the linkages*. Food and Agriculture Organization, Rome
- FAO, 2008. Introduction aux concepts de la sécurité alimentaire. In: Sécurité alimentaire: l'information pour l'action, Guides pratiques. FAO, (Coll. Guides pratiques), 4
- FAO, 2009. High food prices and the food crisis: experiences and lessons learned. FAO, Rome, 63 p. (Coll. The state of agricultural commodity markets)
- FAO, 2011. How does international price volatility affect domestic economies and food security? FAO, Rome, 50 p. (Coll. The state of food insecurity in the world)
- FAO, 2012. *FAO Statistical Yearbook 2012 – World Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization, Rome
- FAO, 2020. FAOSTAT. Food Agric. Organ., <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Farooq U., Samad H.A., Shehzad F., Qayyum A., 2010. Physiological Responses of Cattle to Heat Stress. *World Appl. Sci. J.*, **8**38-43
- Farrell P., Thow A.M., Wate J.T., Nonga N., Vatucawaqa P., Brewer T., Sharp M.K., Farmery A., Trevena H., Reeve E., Eriksson H., Gonzalez I., Mulcahy G., Eurich J.G., Andrew N.L., 2020. COVID-19 and Pacific food system resilience: opportunities to build a robust response. *Food Secur.*, **12** (4): 783-791, doi: 10.1007/s12571-020-01087-y
- FDGDON de la Réunion, 2017. La mouche orientale des fruits (*Bactrocera dorsalis*)
- Fontaine O., Niobé D., Shitalou É., Fontaine D., Choisis J.-P., 2008. Hindouisme et sacrifice de bouc à l'île de la Réunion. *Ethnozootechnie*, **8**5101-110
- Forum for Food Sovereignty, 2007. Declaration of Nyéléni
- Franque S., 2016. Étude des facteurs de risques liés à la mortalité des veaux avant sevrage et l'infertilité des mères en élevage allaitant à la Réunion. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, AgroParisTech, Paris, 142 p.

- Furtado C., 1976. *Economic Development of Latin America: Historical Background and Contemporary Problems*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 340 p.
- Fusillier J.-L., Choisis J.-P., Lejars C., 2007. Aides à l'agriculture - L'impact de la réforme. In: *Économie de la Réunion n°131, Économie de la Réunion*. (Coll. *Économie de la Réunion*), 23-33
- Fusillier J.-L., Piraux M., Choisis J.-P., 2005. *Dynamique structurelle 1989-2000 et viabilité économique des exploitations agricoles réunionnaises* (Cirad-Tera No. 2005/16). Cirad
- Galan F., Reuillon J.-L., Letellier O., Bleubar S., Marie F., 2009. Caractérisation des systèmes d'élevage bovin des départements d'outre-mer (DOM): premiers résultats issus des réseaux de références. In: *Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants*. IDELE, Paris, 369-376
- Garcia-Launay F., Garel J.-P., Micol D., Agabriel J., 2008. Alimentation des broutards : ingestion et substitution entre aliments, efficacité d'utilisation de l'énergie. In: *Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants*. IDELE, Paris, 263-266
- García-Martínez A., Olaizola A., Bernués A., 2009. Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. *Animal*, **3** (1): 152-165, doi: 10.1017/S1751731108003297
- Genave A., Blancard S., Garabedian S., 2020. An assessment of energy vulnerability in Small Island Developing States. *Ecol. Econ.*, **171**106595, doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106595
- Gérard O., Ponsart C., Petit M., Humblot P., 2008. Evolution des techniques de préparation de la semence et d'insémination artificielle chez les bovins. In: *Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants*. IDELE, Paris
- Gerber M., Astigarraga M.L., Bockstaller C., Fiorelli J.-L., Hostiou N., Ingrand S., Marie M., Sadok W., Veysset P., Ambroise R., Peigné J., Plantureux S., Coquil X., 2008. Le modèle Dexi-SH* pour une évaluation multicritère de la durabilité agro-écologique des systèmes d'élevage laitier herbager. In: *DinABio : Développement & innovation en agriculture biologique. Colloque national DinABio : Développement & innovation en agriculture biologique*. Montpellier, France, 2
- Goavec C., 2016. *Vulnérabilité et résilience des Petites Economies Insulaires en Développement*. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France, 409 p.
- Goavec C., Hoarau J.-F., 2015. Une mesure de la vulnérabilité économique structurelle pour une économie ultrapériphérique européenne : le cas de La Réunion. *Géographie Économie Société*, **17** (2): 177-200, doi: 10.3166/ges.17.177-200
- Golay C., 2010. The Food Crisis and Food Security: Towards a New World Food Order? *Int. Dev. Policy Rev. Int. Polit. Dév.*, 1215-232
- Goyache F., Gutiérrez J.P., 2001. Heritability of reproductive traits in Asturiana de los Valles beef cattle breed. *Arch. Anim. Breed.*, **44** (5): 489-496, doi: 10.5194/aab-44-489-2001

- Grima N., Singh S.J., 2020. The self-(in)sufficiency of the Caribbean: Ecosystem services potential Index (ESPI) as a measure for sustainability. *Ecosyst. Serv.*, **42**101087, doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101087
- Grimard B., Agabriel J., Chambon G., Chanvallon A., Constant F., Chastant S., 2018. Particularités de la reproduction des vaches allaitantes de races françaises. *INRA Prod. Anim.*, **30** (2): 125-138, doi: 10.20870/productions-animales.2017.30.2.2239
- Groshens É., Maigné É., Pauly O., 2020. Outil Modemo'Bovins, Modélisation démographique des cheptels bovins à partir des données d'identification animale. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. Paris
- Guillaumont P., 2004a. *A revised EVI* (No. CDP2004/PLEN/16). Committee for Development Policy
- Guillaumont P., 2004b. On the economic vulnerability of low income countries. In: Economic vulnerability and resilience of small states. FORMATEK MALTA, Malta, 54-71
- Guillaumont P., 2009a. An Economic Vulnerability Index: Its Design and Use for International Development Policy. *Oxf. Dev. Stud.*, **37** (3): 193-228, doi: 10.1080/13600810903089901
- Guillaumont P., 2009b. Caught in a trap: Identifying the least developed countries. Economica, Paris,
- Guillaumont P., 2010. Assessing the Economic Vulnerability of Small Island Developing States and the Least Developed Countries. *J. Dev. Stud.*, **46** (5): 828-854, doi: 10.1080/00220381003623814
- Guillaumont P., Guillaumont Jeanneney S., 2003. Dampening Price Shocks. In: Natural resources and violent conflict: options and actions (Eds. Bannon I., Collier P.). WORLD BANK, Washington, D.C, 353-367
- Gutiérrez J.P., Alvarez I., Fernández I., Royo L.J., Díez J., Goyache F., 2002. Genetic relationships between calving date, calving interval, age at first calving and type traits in beef cattle. *Livest. Prod. Sci.*, **78** (3): 215-222, doi: 10.1016/S0301-6226(02)00100-8
- Gwazdauskas F.C., 1985. Effects of Climate on Reproduction in Cattle. *J. Dairy Sci.*, **68** (6): 1568-1578, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(85)80995-4
- Hamilton-Hart N., 2019. Indonesia's Quest for Food Self-sufficiency: A New Agricultural Political Economy? *J. Contemp. Asia* 1-25, doi: 10.1080/00472336.2019.1617890
- Hary I., 2004. Assessing the effect of controlled seasonal breeding on steady-state productivity of pastoral goat herds in northern Kenya. *Agric. Syst.*, **81** (2): 153-175, doi: 10.1016/j.agsy.2003.10.008
- Hassan R.M., Faki H., Byerlee D., 2000. The trade-off between economic efficiency and food self-sufficiency in using Sudan's irrigated land resources. *Food Policy*, **25**35-54, doi: 10.1016/S0306-9192(99)00063-9
- Hatefi S.M., Torabi S.A., 2010. A common weight MCDA-DEA approach to construct composite indicators. *Ecol. Econ.*, **70** (1): 114-120, doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.08.014

- Healy A.A., House J.K., Thomson P.C., 2013. Artificial insemination field data on the use of sexed and conventional semen in nulliparous Holstein heifers. *J. Dairy Sci.*, **96** (3): 1905-1914, doi: 10.3168/jds.2012-5465
- Hein P., 2004. Small island developing States: origin of the category and definition issues. In: Is a special treatment of small island developing States possible? (Ed. UNCTAD). New-York, Geneva, 22
- Herrero M., Thornton P.K., Bernués A., Baltenweck I., Vervoort J., van de Steeg J., Makokha S., van Wijk M.T., Karanja S., Rufino M.C., Staal S.J., 2014. Exploring future changes in smallholder farming systems by linking socio-economic scenarios with regional and household models. *Glob. Environ. Change*, **24**165-182, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2013.12.008
- Hickey G.M., Unwin N., 2020. Addressing the triple burden of malnutrition in the time of COVID-19 and climate change in Small Island Developing States: what role for improved local food production? *Food Secur.*, **12** (4): 831-835, doi: 10.1007/s12571-020-01066-3
- Hughes D.W., Isengildina-Massa O., 2015. The economic impact of farmers' markets and a state level locally grown campaign. *Food Policy*, **54**78-84, doi: 10.1016/j.foodpol.2015.05.001
- Hughes S., Yau A., Max L., Petrovic N., Davenport F., Marshall M., McClanahan T.R., Allison E.H., Cinner J.E., 2012. A framework to assess national level vulnerability from the perspective of food security: The case of coral reef fisheries. *Environ. Sci. Policy*, **23**95-108, doi: 10.1016/j.envsci.2012.07.012
- IDELE, Confédération nationale de l'élevage, 2019. Chiffres clés bovins viande et lait
- IDELE, Réseaux d'élevage DOM, Chambre d'agriculture de la Réunion (Eds.), 2019a. Cas type objectif bovin viande naisseur strict
- IDELE, Réseaux d'élevage DOM, Chambre d'agriculture de la Réunion (Eds.), 2019b. Cas type objectif bovin naisseur avec diversification végétale
- IDELE, Réseaux d'élevage DOM, Chambre d'agriculture de la Réunion (Eds.), 2019c. Cas type objectif bovin viande naisseur engraisseur
- IEDOM, 2007. *La filière rizicole de Guyane : évolution et perspectives* (No. 42). Institut d'émission des départements d'Outre-mer, Paris
- IEDOM, 2019. *Rapport annuel 2018 La Réunion*. IEDOM, Paris
- Interbev Nouvelle-Aquitaine, 2017a. Production régionale 2016 par race
- Interbev Nouvelle-Aquitaine, 2017b. Production régionale 2016 par classement
- International Monetary Fund, 2011. Slowing growth, rising risks. International Monetary Fund, Washington, DC, 219 p. (Coll. World economic outlook)
- Iooss B., Lemaître P., 2015. A Review on Global Sensitivity Analysis Methods. In: Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems, Operations Research/Computer Science Interfaces Series (Eds. Dellino G., Meloni C.). SPRINGER US, Boston, MA, (Coll. Operations Research/Computer Science Interfaces Series), 101-122

- Ivanic M., Martin W., 2008. Implications of higher global food prices for poverty in low-income countries. *Agric. Econ.*, **39**405-416, doi: 10.1111/j.1574-0862.2008.00347.x
- Ivanic M., Martin W., Zaman H., 2012. Estimating the Short-Run Poverty Impacts of the 2010–11 Surge in Food Prices. *World Dev.*, **40** (11): 2302-2317, doi: 10.1016/j.worlddev.2012.03.024
- James A.D., Carles A.B., 1996. Measuring the productivity of grazing and foraging livestock. *Agric. Syst.*, **52** (2-3): 271-291, doi: 10.1016/0308-521X(96)00006-6
- Janssen S., Louhichi K., Kanellouopoulos A., Zander P., Flichman G., Hengsdijk H., Meuter E., Andersen E., Belhouchette H., Blanco M., Borkowski N., Heckelei T., Hecker M., Li H., Oude Lansink A., Stokstad G., Thorne P., van Keulen H., van Ittersum M.K., 2010. A Generic Bio-Economic Farm Model for Environmental and Economic Assessment of Agricultural Systems. *Environ. Manage.*, **46** (6): 862-877, doi: 10.1007/s00267-010-9588-x
- Janssen S., van Ittersum M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agric. Syst.*, **94** (3): 622-636, doi: 10.1016/j.agsy.2007.03.001
- Juanès X., Lesnoff M., Messad S., Julien J., Capron J.-M., Lancelot R., 2014. Laser2 - a database for animal-based herd monitoring in tropical livestock husbandry systems. Technical document. Cirad, Montpellier, France, 22 p.
- Kalkuhl M., von Braun J., Torero M. (Eds.), 2016. Food Price Volatility and Its Implications for Food Security and Policy. Springer International Publishing, Cham,
- Kao R.R., Danon L., Green D.M., Kiss I.Z., 2006. Demographic structure and pathogen dynamics on the network of livestock movements in Great Britain. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, **273** (1597): 1999-2007, doi: 10.1098/rspb.2006.3505
- Karsak E.E., Ahiska S.S., 2005. Practical common weight multi-criteria decision-making approach with an improved discriminating power for technology selection. *Int. J. Prod. Res.*, **43** (8): 1537-1554, doi: 10.1080/13528160412331326478
- Karsak E.E., Ahiska S.S., 2007. A Common-Weight MCDM Framework for Decision Problems with Multiple Inputs and Outputs. In: Computational Science and Its Applications – ICCSA 2007 (Eds. Gervasi O., Gavrilova M.L.). SPRINGER BERLIN HEIDELBERG, Berlin, Heidelberg, 779-790
- Kim K., Burnett K., Ghimire J., 2015. Assessing the potential for food and energy self-sufficiency on the island of Kauai, Hawaii. *Food Policy*, **54**44-51, doi: 10.1016/j.foodpol.2015.04.009
- Kurtz A., 2019. Typologie des élevages engraisseurs de la Réunion. Rapport technique de stage de césure, AgroParisTech, Paris, 39 p.
- La Via Campesina, 1996. Déclaration pour la souveraineté alimentaire
- Laboureur E., 2019. Quelle intégration sociale et territoriale pour les habitants des Hauts de l'île de la Réunion ? Dynamique d'adaptation chez les éleveurs bovins de la Grande Ferme. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, Saint-Denis, Réunion, France, 500 p.

- Laroche-Dupraz C., Postolle A., 2010. La souveraineté alimentaire en Afrique est-elle compatible avec les négociations commerciales agricoles à l'OMC ? *Polit. Afr.*, **119** (3): 107, doi: 10.3917/polaf.119.0107
- Laudié-Lecomte N., 2003. Le compromis agricole réunionnais : mutation sectorielle et construction territoriale à l'île de la Réunion. Thèse de doctorat, ENSAM, Montpellier, 443 p.
- Lauer F., Dockes A.-C., 2010. L'élevage et les filières des ruminants en Lorraine à l'horizon 2020 : 4 scénarios pour anticiper et préciser les actions du développement. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris, 219-222
- Lebouvier E., 2016. *Les modes de gestion des périmètres d'irrigation en métropole et dans les DROM (Guadeloupe, Réunion, Martinique)* (Les synthèses de l'OIEau). Office international de l'eau, Limoges, France
- Leclerc G., Bommel P., Gibon A., Lasseur J., Morales H., 2010. Élaboration participative de modèles et de scénarios : une entrée pour analyser la coévolution des systèmes d'élevage extensif et des territoires. *Cah. Agric.*, **19** (2): 152-159, doi: 10.1684/agr.2010.0380
- Leslie P.H., 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika*, **33** (3): 183-212
- Lesnoff M., 2011. Démographie et zootechnie tropicales : un lien par les modèles matriciels appliqués aux cheptels de ruminants dans les élevages extensifs. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Montpellier II, Montpellier, 218 p.
- Lesnoff M., 2015a. mmage: A R package for age-structured population matrix models. Cirad, Montpellier, France, 88 p.
- Lesnoff M., 2015b. Uncertainty analysis of the productivity of cattle populations in tropical drylands. *Animal*, **9** (11): 1888-1896, doi: 10.1017/S175173111500124X
- Lesnoff M., Corniaux C., Hiernaux P., 2012. Sensitivity analysis of the recovery dynamics of a cattle population following drought in the Sahel region. *Ecol. Model.*, **232**28-39, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.018
- Lesnoff M., Ezanno P., Caswell H., 2003. Sensitivity analysis in periodic matrix models: A postscript to Caswell and Trevisan. *Math. Comput. Model.*, **37** (9-10): 945-948, doi: 10.1016/S0895-7177(03)00110-9
- Lesnoff M., Lancelot R., Moulin C.-H., Messad S., Juanès X., Sahut C., 2011. Calculation of demographic parameters in tropical livestock herds: a discrete time approach with laser animal-based monitoring data. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 98 p.
- Leung P., Loke M., 2008. Increasing Hawai'i's Food Self-Sufficiency8
- Levins R., 1969. Some Demographic and Genetic Consequences of Environmental Heterogeneity for Biological Control. *Bull. Entomol. Soc. Am.*, **15** (3): 237-240, doi: 10.1093/besa/15.3.237
- Lim L.Y.C., 2017. Singapore's success: after the miracle. In: Business, Government and Labor: Essays on Economic Development in Singapore and Southeast Asia, Google-Books-ID: IPIGDwAAQBAJ. WORLD SCIENTIFIC

- Lin B.B., 2011. Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience*, **61** (3): 183-193, doi: 10.1525/bio.2011.61.3.4
- Lorré F., 2019. Évaluation du disponible fourrager à l'échelle de l'île de la Réunion et leviers pour une meilleure valorisation des ressources fourragères. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, École supérieure d'agriculture d'Angers, Angers, France, 153 p.
- Louhichi K., Kanellopoulos A., Janssen S., Flichman G., Blanco M., Hengsdijk H., Heckelei T., Berentsen P., Lansink A.O., Ittersum M.V., 2010. FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies. *Agric. Syst.*, **103** (8): 585-597, doi: 10.1016/j.agsy.2010.06.006
- Luan Y., Cui X., Ferrat M., 2013. Historical trends of food self-sufficiency in Africa. *Food Secur.*, **5** (3): 393-405, doi: 10.1007/s12571-013-0260-1
- Mader T.L., Davis M.S., Brown-Brandl T., 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, **84** (3): 712-719, doi: 10.2527/2006.843712x
- Magnier J., 2019. Évaluation de la consommation fourragère à la Réunion, construction et simulation de scénarios d'une « filière fourrages ». Mémoire de fin d'études d'ingénieur, École supérieure d'agriculture d'Angers, Angers, France, 166 p.
- Malterre C., Robelin J., Agabriel J., Bordes P., 1989. Engraissement des vaches de réforme de race Limousine. *INRAE Prod. Anim.*, **2** (5): 325-334, doi: 10.20870/productions-animales.1989.2.5.4426
- Manceron S., Ben-Ari T., Dumas P., 2014. Feeding proteins to livestock: Global land use and food vs. feed competition. *OCL*, **21** (4): D408, doi: 10.1051/ocl/2014020
- Mandret G., Blanfort V., Hassoun P., Paillat J.-M., Tillard E. (Eds.), 2000. L'élevage bovin à la Réunion: synthèse de quinze ans de recherche. Cirad, Montpellier, France, 395 p.
- Marblé Y., Aubron C., Vigne M., 2018. Le développement des Hauts de la Réunion par l'élevage bovin laitier : un modèle à bout de souffle. *Géocarrefour*, **92** (3): 20, doi: 10.4000/geocarrefour.10865
- Mazzeo J., 2009. Lavichè: Haiti's vulnerability to the global food crisis. *NAPA Bull.*, **32** (1): 115-129, doi: 10.1111/j.1556-4797.2009.01031.x
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., Liwenga E., Pradhan P., Rivera-Ferre M.G., Sapkota T., Tubiello F.N., Xu Y., 2019. Food Security. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, Geneva, 437-550
- Mee J.F., 2008. Prevalence and risk factors for dystocia in dairy cattle: A review. *Vet. J.*, **176** (1): 93-101, doi: 10.1016/j.tvjl.2007.12.032
- Mee J.F., Berry D.P., Cromie A.R., 2008. Prevalence of, and risk factors associated with, perinatal calf mortality in pasture-based Holstein-Friesian cows. *Animal*, **2** (4): 613-620, doi: 10.1017/S1751731108001699

- Meijerink G., Roza P., 2007. The role of agriculture in economic development. Wageningen University. 38 p.
- Méjean C., Debussche X., Martin-Prével Y., Réquillat V., Soler L.-G., Tibère L., 2020. Alimentation et nutrition dans les départements et régions d’Outre-mer. IRD Éditions. Institut de recherche pour le développement, Marseille, France, 208 p. (Coll. Expertise scientifique)
- Melyn W., Moesen W., 1991. Towards a synthetic indicator of macroeconomic performance: Unequal weighting when limited information is available. K.U.Leuven, Centrum voor Economische Studiën; Leuven, 1–24 p.
- Météo France, 2019a. Climat la Réunion- Informations, normales et statistiques sur le climat à La Réunion. Météo Fr. La Réunion., <http://www.meteofrance.re/climat/reunion> (consulté le 22 janvier 2020)
- Météo France, 2019b. Évènements mémorables - Pluies extrêmes à La Réunion. Météo Fr. La Réunion., <http://pluiesextremes.meteo.fr/lareunion/-Evenements-memorables-.html> (consulté le 18 septembre 2019)
- Micol D., Dubroeuq H., Martin C., Garcia F., Mialon M.M., Agabriel J., 2007. Utilisation de rations de valeur contrastée pour la finition de jeunes bovins de race Blond d’Aquitaine. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris, 233-236
- Naylor R.L., Falcon W.P., 2010. Food Security in an Era of Economic Volatility. *Popul. Dev. Rev.*, **36** (4): 693-723, doi: 10.1111/j.1728-4457.2010.00354.x
- O’Brien M.D., Rhoads R.P., Sanders S.R., Duff G.C., Baumgard L.H., 2010. Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. *Domest. Anim. Endocrinol.*, **38** (2): 86-94, doi: 10.1016/j.domaniend.2009.08.005
- O’Connor J., More S.J., Griffin J.M., O’Leary E., 2009. Modelling the demographics of the Irish cattle population. *Prev. Vet. Med.*, **89** (3-4): 249-254, doi: 10.1016/j.prevetmed.2009.02.011
- OECD, European Union, Joint Research Centre - European Commission, 2008. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD,
- Olafadehan O.A., Adewumi M.K., 2010. Livestock management and production system of agropastoralists in the derived savanna of South-West Nigeria. *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, **12** (3): 685-691
- Oluwatayo I.B., Ojo A.O., 2016. Is Africa’s dependence on agriculture the cause of poverty in the continent?: An empirical review. *J. Dev. Areas*, **50** (1): 93-102, doi: 10.1353/jda.2016.0016
- Onono J.O., Wieland B., Rushton J., 2013. Productivity in different cattle production systems in Kenya. *Trop. Anim. Health Prod.*, **45** (2): 423-430, doi: 10.1007/s11250-012-0233-y
- Otte M.J., Chilonda P., 2002. *Cattle and small ruminant production systems in sub-Saharan Africa: A systematic review*. FAO, Rome
- Pébarthe-Désiré H., Mondou V., 2014. L’île et l’avion: de la contrainte technique aux choix économiques des îles touristiques de l’océan Indien (Réunion, île Maurice, Seychelles, Maldives)19

- Perrin J.-B., Ducrot C., Vinard J.-L., Hendrikx P., Calavas D., 2011. Analyse de la mortalité bovine en France de 2003 à 2009. *INRA Prod. Anim.*, **24** (3): 235-244
- Pfuhl R., Bellmann O., Kühn C., Teuscher F., Ender K., Wegner J., 2007. Beef versus dairy cattle: a comparison of feed conversion, carcass composition, and meat quality. *Arch. Anim. Breed.*, **50** (1): 59-70, doi: 10.5194/aab-50-59-2007
- Poirine B., 2007. *Eloignement, insularité et compétitivité dans les petites économies d'outre-mer* (Document de travail No. 52). Agence française de développement, Paris
- Poizat A., Duvaléix-Treguer S., Rault A., Bonnet-Beaugrand F., 2019. Le marché des brouillards en France. Organisation de la filière, transmission de l'information et qualité. *Économie Rurale* (368): 107-127, doi: 10.4000/economierurale.6814
- Porkka M., Kummu M., Siebert S., Varis O., 2013. From Food Insufficiency towards Trade Dependency: A Historical Analysis of Global Food Availability. *PLoS ONE*, **8** (12): e82714, doi: 10.1371/journal.pone.0082714
- Pratt S., 2015. The economic impact of tourism in SIDS. *Ann. Tour. Res.*, **52**148-160, doi: 10.1016/j.annals.2015.03.005
- Prebisch R., 1950. *The economic development of latin America and its principal problems* (No. E/CN.12/89/Rev.I). United Nations
- Préfecture de la Réunion, 2008. Arrêté préfectoral DSV-2008-842 suspendant l'introduction de ruminants à la Réunion
- Puillet L., Agabriel J., Peyraud J.-L., Faverdin P., 2014. Modelling cattle population as lifetime trajectories driven by management options: A way to better integrate beef and milk production in emissions assessment. *Livest. Sci.*, **165**167-180, doi: 10.1016/j.livsci.2014.04.001
- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria,
- Rapey H., 2015. L'agrandissement-spécialisation des élevages en montagne. Une dynamique inégale. *Économie Rurale* (346): 3-14, doi: 10.4000/economierurale.4591
- Razafinarivo T.D., Michelle R.L.M., Rasoanomenjanahari A., Rakotomalala S., Rakotomanana O.R., Ralambomanana N., Rasambainarivo J.H., Vuattoux J., Janelle J., Juanès X., Salgado P., Tillard E., 2018. Performances générales des zébus malagasy de la région Bongolava
- Réseaux d'élevage DOM, Chambre d'agriculture de la Réunion, Sicarévia, IDELE, 2018. *Référentiel technico-économique bovins viande*. IDELE, Paris
- Ricome A., Affholder F., Gérard F., Muller B., Poeydebat C., Quirion P., Sall M., 2017. Are subsidies to weather-index insurance the best use of public funds? A bio-economic farm model applied to the Senegalese groundnut basin. *Agric. Syst.*, **156**149-176, doi: 10.1016/j.agry.2017.05.015
- Rieutort L., Ryschawy J., Guinot C., Doreau A., Nicolas A., Lossouarn J., Ciołoş D., 2014. Atlas de l'élevage herbivore en France: filières innovantes, territoires vivants. Autrement, Paris, 96 p.

- Roche B., Dedieu B., Ingrand S., 2001. Taux de renouvellement et pratiques de réforme et de recrutement en élevage bovin allaitant du Limousin. *INRAE Prod. Anim.*, **14** (4): 255-263, doi: 10.20870/productions-animales.2001.14.4.3748
- Rosen S., Murphy K.M., Scheinkman J.A., 1994. Cattle Cycles. *J. Polit. Econ.*, **102** (3): 468-492, doi: 10.1086/261942
- Saltelli A., Chan K., Scott E.M., 2008a. Sensitivity analysis. Paperback ed. Wiley, Chichester, United Kingdom, 475 p. (Coll. Wiley paperback series)
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., Tarantola S., 2008b. Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley, Chichester, England ; Hoboken, NJ, 292 p.
- Savary S., Akter S., Almekinders C., Harris J., Korsten L., Rötter R., Waddington S., Watson D., 2020. Mapping disruption and resilience mechanisms in food systems. *Food Secur.*, **12** (4): 695-717, doi: 10.1007/s12571-020-01093-0
- Schärrer S., Presi P., Hattendorf J., Chitnis N., Reist M., Zinsstag J., 2014. Demographic Model of the Swiss Cattle Population for the Years 2009-2011 Stratified by Gender, Age and Production Type. *PLoS ONE*, **9** (10): e109329, doi: 10.1371/journal.pone.0109329
- Scheyvens R., Momsen J., 2008. Tourism in Small Island States: From Vulnerability to Strengths. *J. Sustain. Tour.*, **16** (5): 491-510, doi: 10.1080/09669580802159586
- Schoonmaker J., 2013. Effect of Maternal Nutrition on Calf Health and Growth. In: Tri-State Dairy Nutrition Conference TSDNC. Fort Wayne, Indiana, USA, 63-80
- Sen A., Chander M., 2003. Disaster management in India: the case of livestock and poultry. *Rev. Sci. Tech. OIE*, **22** (3): 915-930, doi: 10.20506/rst.22.3.1453
- Sepchat B., Lherm M., Agabriel J., Micol D., Cirie C., Egal D., Garcia-Launay F., 2011. En production de taurillons Salers, la complémentation en concentré des broutards pénalise les performances zootechniques et économiques, l'apport supplémentaire de lait les améliore. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris, 221-224
- Serrano E., Pradel P., Agabriel J., Jailler R., Dubroeuq H., Micol D., 2005. Production de veaux rosés Salers : Effets du fourrage et de l'aliment concentré sur les caractéristiques zootechniques et sur les qualités organoleptiques de la viande. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris, 383-386
- Shabb D., Chitnis N., Baljinniyam Z., Saagii S., Zinsstag J., 2013. A mathematical model of the dynamics of Mongolian livestock populations. *Livest. Sci.*, **157** (1): 280-288, doi: 10.1016/j.livsci.2013.07.009
- Sicarévia, 2011. Présentation au CRALIM - La Sicarévia et la filière viande bovine
- Singer H.W., 1950. The Distribution of Gains between Investing and Borrowing Countries. *Am. Econ. Rev.*, **40** (2): 473-485
- Stewart T.P., Norton S.J., Madanat J.M., Stewart H.E., 2008. The Global Food Crisis: Urgent Need and Emerging Solutions8

- Sueur J.-P., Cointat C., Desplan F., 2012. *Services publics, vie chère, emploi des jeunes : La Réunion à la croisée des chemins* (Rapport d'information No. 676). Sénat, Paris
- Szymczak L.S., Carvalho P.C. de F., Lurette A., Moraes A. de, Nunes P.A. de A., Martins A.P., Moulin C.-H., 2020. System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. *Agric. Syst.*, **184**102904, doi: 10.1016/j.agry.2020.102904
- Tadesse G., Algieri B., Kalkuhl M., von Braun J., 2014. Drivers and triggers of international food price spikes and volatility. *Food Policy*, **47**117-128, doi: 10.1016/j.foodpol.2013.08.014
- Taylor J.E., Adelman I., 2003. Agricultural Household Models: Genesis, Evolution, and Extensions. *Rev. Econ. Househ.*, **133**-58
- Temple L., Marie P., Bakry F., 2008. Les déterminants de la compétitivité des filières bananes de Martinique et de Guadeloupe. *Économie Rurale* (308): 36-54, doi: 10.4000/economierurale.352
- Teng P., 2020. Assuring food security in Singapore, a small island state facing COVID-19. *Food Secur.*, **12** (4): 801-804, doi: 10.1007/s12571-020-01077-0
- Thomine E., 2019. Effet de la diversification spatiale et temporelle des cultures à l'échelle du paysage agricole sur le biocontrôle et les ravageurs de culture. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, Sophia Antipolis, 348 p.
- Tillard E., Hassoun P., Lanot F., Bigot C.-É., Brunshwig P., Latchimy J.-Y., 2000. Les performances zootechniques en élevage allaitant et engraisseur. In: L'élevage bovin à la Réunion: synthèse de quinze ans de recherche (Eds. Mandret G., Blanfort V., Hassoun P., Paillat J.-M., Tillard E.). CIRAD, Montpellier, France
- Titterington F.M., Lively F.O., Dawson S., Gordon A.W., Morrison S.J., 2017. The effects of breed, month of parturition and sex of progeny on beef cow fertility using calving interval as a measure. *Adv. Anim. Biosci.*, **8** (s1): s67-s71, doi: 10.1017/S2040470017001741
- Turvey R., 2007. Vulnerability Assessment of Developing Countries: The Case of Small-island Developing States. *Dev. Policy Rev.*, **25** (2): 243-264, doi: 10.1111/j.1467-7679.2007.00368.x
- United Nations, 1999. *Vulnerability and poverty in a global economy. Report of the Committee for Development Policy on the first session (26-30 April 1999)*. United Nations, New York
- United Nations (Ed.), 2011. *The global social crisis: report on the world social situation 2011*. United Nations Publications, New York, 115 p. (Coll. Economic and Social Affairs)
- Upton M., 1989. Livestock productivity assessment and herd growth models. *Agric. Syst.*, **29** (2): 149-164, doi: 10.1016/0308-521X(89)90060-7
- Urcoopa, 2020a. Les origines des matières premières <https://www.urcoopa.fr/les-origines-des-matieres-premieres/> (consulté le 13 août 2020)
- Urcoopa, 2020b. Volumes commercialisés <https://www.urcoopa.fr/volumes-commercialises/> (consulté le 28 février 2020)

- Valance S., Coutard J.-P., Guillaume A., Bastien D., Le Pichon D., 2014. Incidence des caractéristiques zootechniques et génétiques des broutards sur les performances des jeunes bovins en engraissement. In: 3R3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris
- van der Velde M., Green S.R., Vanclooster M., Clothier B.E., 2007. Sustainable development in small island developing states: Agricultural intensification, economic development, and freshwater resources management on the coral atoll of Tongatapu. *Ecol. Econ.*, **61** (2-3): 456-468, doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.03.017
- van der Werf H.M.G., Tzilivakis J., Lewis K., Basset-Mens C., 2007. Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **118** (1-4): 327-338, doi: 10.1016/j.agee.2006.06.005
- Van Puyenbroeck T., Rogge N., 2017. Geometric mean quantity index numbers with Benefit-of-the-Doubt weights. *Eur. J. Oper. Res.*, **256** (3): 1004-1014, doi: 10.1016/j.ejor.2016.07.038
- van Hal O., Weijenberg A.A.A., 2019. Accounting for feed-food competition in environmental impact assessment: Towards a resource efficient food-system. *J. Clean. Prod.* 8
- 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** (3): 128-138, doi: 10.1016/j.agry.2009.05.001
- Vergé-Dépré C.R., 2005. Transport aérien et intégration territoriale : l'exemple des Antilles françaises. *Études Caribéennes* (3): , doi: 10.4000/etudescaribeennes.563
- Verma M., Hertel T.W., 2009. Commodity Price Volatility and Nutrition Vulnerability. AAEA & ACCI Joint Annual Meeting. Milwaukee, Wisconsin
- Vernon M.C., Keeling M.J., 2009. Representing the UK's cattle herd as static and dynamic networks. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, **276** (1656): 469-476, doi: 10.1098/rspb.2008.1009
- Veysset P., Lherm M., Bébin D., 2004. Performances technico-économiques pour les grands troupeaux bovins allaitants : le cas du Charolais. In: Rencontres Recherches Ruminants3R - Rencontres Recherches Ruminants. IDELE, Paris, 141-144
- Veysset P., Lherm M., Bébin D., 2005. Evolutions, dispersions et déterminants du revenu en élevage bovin allaitant charolais. *INRA Prod. Anim.*, **18** (4): 265-275
- Veysset P., Lherm M., Boussemart J.-P., Natier P., 2017. Formation et répartition des gains de productivité en élevage bovin viande. Qui sont les gagnants et les perdants entre 1980 et 2015 ? *Économie Rurale* (361): 71-91, doi: 10.4000/economierurale.5294
- Vigne M., 2012. Flux d'énergie dans des systèmes d'élevage laitier contrastés - élaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter et intra-territoire. Thèse de doctorat, AgroCampus Ouest, Rennes, France, 283 p.
- West J.W., 2003. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.*, **86**2131-2144
- Woertz E., 2020. Wither the self-sufficiency illusion? Food security in Arab Gulf States and the impact of COVID-19. *Food Secur.*, **12** (4): 757-760, doi: 10.1007/s12571-020-01081-4

- Yang J., Qiu H., Huang J., Rozelle S., 2008. Fighting global food price rises in the developing world: the response of China and its effect on domestic and world markets. *Agric. Econ.*, **39**453-464, doi: 10.1111/j.1574-0862.2008.00351.x
- Zhou P., Ang B.W., Poh K.L., 2007. A mathematical programming approach to constructing composite indicators. *Ecol. Econ.*, **62** (2): 291-297, doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.12.020
- Zsuppán Z., Lherm M., Ingrand S., 2015. Performances de reproduction des vaches allaitantes charolaises : Analyse de leurs diversités en lien avec les pratiques des éleveurs. *Viandes Prod. Carnés*