Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne

Sophie Plassin

▶ **To cite this version:**

Sophie Plassin. Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne. Agronomie. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2018. Français. NNT : 2018IAVF0028 . tel-02592197

HAL Id: tel-02592197

https://pastel.hal.science/tel-02592197

Submitted on 15 May 2020

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

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

NNT° : 2018 IAVF 0028

THESE DE DOCTORAT

préparée à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech)

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier de France

Spécialité : Sciences Agronomiques

École doctorale n°581
Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Sophie PLASSIN

Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne

Directeur de thèse : **Jean-François TOURRAND**
Co-directeur de thèse : **René POCCARD-CHAPUIS**

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 21 décembre 2018 :

Composition du jury :

M. Philippe LESCOAT, Professeur, AgroParisTech	Président
M. Jacques BAUDRY, Directeur de recherche, INRA	Rapporteur
Mme Neli Aparecida DE MELLO-THÉRY, Professeur, Universidade de São Paulo	Rapporteur
M. Claude GARCIA, Chercheur, CIRAD, ETH Zurich	Examinateur
M. René POCCARD-CHAPUIS, Chercheur, CIRAD	Co-Directeur de thèse
M. Jean-François TOURRAND, Directeur de recherche, CIRAD	Directeur de thèse

CIRAD – UMR SELMET et UR GREEN
Campus International de Baillarguet, 34398 Montpellier

Ce doctorat a pu être réalisé grâce l'appui scientifique et au soutien financier de :

Au plus beau soleil d'Amazonie, Andreas.

Remerciements

Cette thèse est le fruit d'une formidable aventure qui a germé en 2008 sur la Transamazonienne pour me mener 10 ans plus tard sur les rives du Rio Grande. Cela n'aurait jamais été possible sans le soutien de nombreuses personnes. Grâce à vous, j'ai eu la chance d'étudier un sujet fascinant et de vivre une expérience humaine et professionnelle magnifique.

Mes plus chaleureux remerciements s'adressent à mes directeurs de thèse, René Poccard-Chapuis et Jean-François Tourrand. René, merci infiniment de m'avoir accordé toute ta confiance depuis 10 ans et d'avoir investi autant en ma personne. Rien de tel que d'avoir été encadré par un scientifique passionné et qui par son écoute, ses précieux conseils, son enthousiasme communicatif et ses innombrables idées m'ont toujours aidé à aller de l'avant. Bien d'autres collaborations nous attendent, je l'espère. Jean-François, grâce à toi j'ai fait mes premiers pas dans la recherche et l'Amazonie. Mille mercis pour tout ce que tu as fait et pour m'avoir donné la chance de marcher dans tes traces. Ma réserve de pâté landais ne sera jamais assez grande pour exprimer toute la gratitude que j'ai envers vous.

Merci aux membres de mon comite de thèse qui se sont investis dans mon encadrement et dont l'expertise a été essentielle pour mener à bout ce projet. Marie-Gabrielle Piketty merci pour cet accompagnement rapproché, ta capacité à formaliser les concepts et à poser les bonnes questions. François Laurent, merci pour ces beaux souvenirs du terrain et ta grande pédagogie. Christophe Le Page, grâce à toi, le modèle tourne ! Merci pour ton appui dans l'utilisation de Cormas et SmallTalk et ta présence pour résoudre les debuggages à distance. Philippe Lescoat, merci pour ton immense confiance et ton accompagnement jusqu'au bout. Livia Navegantes, merci pour les conseils avisés sur le sujet et la région.

Je remercie très chaleureusement le jury d'avoir évalué ce travail, pour leurs commentaires constructifs, les échanges fructueux et les nouvelles réflexions qui ont émergé lors de la soutenance. Cela restera un temps fort et ô combien agréable. Merci aux rapporteurs, Neli Aparecida de Méllo-Thery et Jacques Baudry, et aux examinateurs, Claude Garcia et Philippe Lescoat. Merci à Philippe Lescoat d'avoir présidé avec bienveillance ce jury.

Sans financement ce projet n'aurait pu aboutir. Merci au CIRAD et à la Fondation Rotary d'avoir joué ce rôle indispensable. J'adresse plus particulièrement toute ma gratitude envers les nombreux rotariens qui se sont investis bénévolement. Aux Rotary Clubs (RC) de Mont-de-Marsan et Redenção, les deux premières roues d'engrenage, merci de m'avoir parrainée humainement et financièrement. Un merci très particulier à Philippe Cuerq - à l'origine de cette idée - et à João Roberto Dias de Oliveira, qui ont été les premières personnes enthousiastes par mon projet. Merci aux districts 1690 et 4720, en particulier à Jean Sarraute et Bernard Fougère pour le montage et le suivi de mon dossier ainsi qu'aux gouverneurs qui se sont intéressés de près à mon expérience, Jean Cambar, Michel Queille, et Jean-Paul Nouhaud. Merci à Bernard Noblot du RC de La Grande Motte pour le précieux coup de pouce. Enfin, gratidão imenso aos socios dos RC de Paragominas e Redenção pela amizade e pelo grande apoio que facilitou minha integração nas comunidades locais.

Un très grand merci aux équipes du CIRAD qui m'ont accueilli. A l'UMR SELMET, en particulier à Philippe Lecomte et Alexandre Ickowizc, et à Charles-Henri Moulin pour ses conseils. Merci à Marie-Jo Darcq et Corine Chaillan pour l'appui administratif. A l'UR GREEN, notamment à Pierre Bommel et François Bousquet grâce à qui j'ai acquis mes premières bases en modélisation multi-agents et à Aurélie Botta, pour ses encouragements. La formation MISS-ABMS et la session de compagnonnage ont porté ses fruits !

Merci à l'école doctorale ABIES, en particulier à Alexandre Péry pour sa compréhension.

Agradeço muito a Embrapa Amazônia Oriental pelo convite no Napt Belém-Brasilia e pela ajuda no meu trabalho de campo. Muito obrigada ao chefe-geral Dr. Adriano Venturieri, e a toda a equipe do Napt, Dr. Jamil Chaar El Husny, Mario, Ronaldo, Myryam, e todos os técnicos para esses três anos maravilhosos.

Si cette thèse a vu le jour c'est surtout grâce à eux. Un immense merci aux éleveurs et responsables interviewés pour avoir partagé leur temps, un bout de leur vie et leur si grande hospitalité. Merci à Kalango e Maura, Zé Grusso, Eduardo, Pércio, Betto, Cassio, et à leur famille et salariés. Merci à ceux qui ont facilité mes allées et venues et mes prises de contact : Valdyr, Néné, dona Marivalda e José Raimundo.

Merci aux membres du DP Amazonie et associés que j'ai eu plaisir à côtoyer : Marc, Lilian, Emilie, Krishna, Soraya, Laura, Joice, e Marcelo. Spécial clin d'œil à Nathalie pour son hospitalité. Merci à Bernard Mallet et Jean-Luc Battini de la direction régionale du CIRAD à Brasília pour leur appui dans mes démarches d'expatriation.

Aux nouveaux amis rencontrés en terre amazonienne et qui ont pimenté mon quotidien paragominense. A todos meus amigos de Paragominas, sobre tudo a Marília, Ronaldo e Otiniel *saudades* ! A Fabien et Etienne, pour leurs conseils et accueil. A Fabricia, pour nos sacrés aventures dans les juquiras. A Gustavo, Carine, Thomas, Reinis et Daniel pour les échanges et bons moments passés ensemble. Enfin, une spéciale dédicace à Guilherme et Joseph : *desculpam qualquer coisa, vão com Deus* !

Cette thèse s'inscrit dans une trajectoire dont le début et la fin ont été un peu floutées. Alors merci aussi à tous ceux qui se sont investies dans ces moments-là. En France, je pense aux paysans et salariés du Modef 40 et de l'Alpad. In United States, I am grateful to Jennifer Koch for her precious trust and beyond that, to invest a lot in my professional development.

A mes proches, leurs précieux encouragements et leur présence malgré la distance étaient essentiels. Merci à mes amis, Cécile, Elodie, Elsa, Maud, Nelly, Noémie, et Baptiste, qui sont toujours une grande source de motivation et de réconfort. Merci infiniment à toute ma famille pour leur amour et leur soutien. Merci à mes parents de m'avoir encouragé à aller plus loin et d'être fiers de mon parcours et de mes projets. Merci à maman pour les longues heures dédiées à la relecture du manuscrit et à papa pour ce délicieux foie-gras. A mon frère, mon coach, lui aussi fier de sa petite soeur, heureusement que tu as été là pour dire les mots qu'il fallait pour m'encourager. Une dernière pensée pour mami Raymonde, mamou et enfin papi Gervais qui m'a transmis son goût pour la découverte et le voyage.

Table des matières

Remerciements *5*

Table des matières *7*

Table des illustrations *11*

Préface *18*

Liste des abréviations *20*

Introduction *23*

Chapitre 1. Contexte : Des systèmes d'élevage efficaces sur les fronts pionniers amazoniens mais générateurs de paysages peu éco-efficients *27*

1.1 Expansion de l'élevage bovin en Amazonie : état des lieux et enjeux socio-économiques et environnementaux 28

1.1.1 Importance économique et sociale de l'élevage bovin en Amazonie 28

1.1.2 Conséquences environnementales des pratiques d'élevage extensives 33

1.2 La transition agraire : nouveau défi pour les systèmes d'élevage bovins amazoniens 40

1.2.1 Initiatives publiques et privées vers une « déforestation zéro » 40

1.2.2 Nouvelle multifonctionnalité : vers un élevage plus productif et plus vert 52

1.3 Concilier élevage et forêt dans des paysages plus éco-efficients 56

1.3.1 Limites du mouvement basé sur l'intensification et la déforestation zéro 56

1.3.2 Application du concept d'éco-efficience aux paysages d'Amazonie orientale 60

1.3.3 Intensification de l'élevage et espace : caractériser et comprendre les nouvelles dynamiques 63

1.4 Question de recherche, hypothèses et objectifs de la thèse 64

Chapitre 2. Cadre théorique et méthode *66*

2.1 Un cadre d'analyse intégrant paysage, système de décision et trajectoires 68

2.1.1 Introduction : Cadre d'analyse général 68

2.1.2 Approche par le paysage : un cadre pour l'analyse spatiale des interactions entre pratiques, processus écologiques et ressources naturelles localisées dans l'espace 70
2.1.3 Approche systémique de l'exploitation agricole pour comprendre les décisions d'intensification d'usage des sols 79
2.1.4 Modéliser les changements socio-techniques et les dynamiques de paysage : Trajectoires des exploitations et Modélisation Multi-Agents 87
2.1.5 Conclusion 96

2.2 Zones d'étude 97
2.2.1 Paragominas et Redenção, deux communes de front post-pionniers aux dynamiques contrastées 97
2.2.2 Localisation géographique et données socio-économiques 98
2.2.3 Des conditions biophysiques favorables à la production fourragère 99
2.2.4 Histoire de la colonisation : une succession de cycles économiques 102
2.2.5 Structure foncière 104
2.2.6 Mouvement d'intensification de l'élevage : deux situations contrastées 105
2.2.7 Dynamique des usages des sols 106
2.2.8 Décentralisation de la gestion environnementale 108

2.3 Méthode 110
2.3.1 Entretiens avec des acteurs clés et réunions locales 111
2.3.2 Echantillonnage des exploitations 112
2.3.3 Collecte des données 118
2.3.4 Méthode d'analyse des systèmes de décision et des paysages 122
2.3.5 Evaluation quantitative et qualitative des éco-efficiences 129
2.3.6 Modélisation multi-agents des interactions entre système de décision, paysage et ressources naturelles 132

Chapitre 3. Intensification des systèmes d'élevage, reconfiguration des paysages et valorisation des ressources naturelles : études de cas dans six exploitations d'élevage 138

3.1 Caractérisation des six systèmes d'exploitation étudiés 141
3.1.1 Fonctionnement général des exploitations 141
3.1.2 Pratiques d'usages des sols et de gestion du système fourrager 152

3.2 Rôle des pratiques agricoles dans les éco-efficiences 158

3.2.1 A l'échelle de l'exploitation : Efficience énergétique et émissions de gaz à effet de serre 158
3.2.2 A l'échelle de la parcelle : Effets des facteurs naturels et anthropiques sur les ressources hydriques et pédologiques....166
3.2.3 Evolution des perceptions des éleveurs sur les ressources naturelles et adaptation des pratiques....174

3.3 De nouvelles projections dans les paysages....178
3.3.1 Impacts de l'intensification sur l'organisation des usages des sols dans les paysages....179
3.3.2 Déterminants de la localisation des pratiques d'intensification....199

3.4 Moteurs de changement et barrières à l'intensification....208

3.5 Discussion....213
3.5.1 Changement de perceptions et construction de paysages plus éco-efficients...213
3.5.2 Diversité des stratégies techniques et spatiales d'intensification d'usage des sols 215
3.5.3 Quels liens entre intensification, récupération des pâturages dégradés et préservation des forêts ?....217

Chapitre 4. Un modèle multi-agents pour représenter les interactions entre les stratégies d'intensification d'usage des sols, les paysages et l'évolution des ressources naturelles....221

4.1 Description du modèle par l'approche ODD + D (Overview - Design concepts - Details + Decision)....223
4.1.1 Objectifs....223
4.1.2 Entités, variables et échelles....223
4.1.3 Vue d'ensemble des processus et de leur séquence....231
4.1.4 Concepts....232
4.1.5 Implémentation informatique....235
4.1.6 Initialisation....235
4.1.7 Données....238
4.1.8 Sous-modèles....238

4.2 Résultats des simulations....256
4.2.1 Dynamiques des interactions élevage-paysage....256
4.2.2 Productivité fourragère et animale....277

4.2.3 Indicateurs socio-économiques 281

4.3 Discussion et perspectives futures de développement 284
4.3.1 Vérification et évaluation du modèle 284
4.3.2 Intérêt et limites du modèle pour raisonner l'intensification de l'élevage dans des paysages éco-efficients 286
4.3.3 Simuler d'autres scénarios et mesurer d'autres indicateurs 287

Chapitre 5. Discussion générale 291

5.1 Les apports de la thèse à la question de recherche 293
5.1.1 Retour sur les hypothèses 293
5.1.2 Apports et limites des concepts d'éco-efficience et de paysage pour analyser la durabilité de l'élevage en Amazonie 295

5.2 Implications pour l'aménagement des paysages et l'accompagnement des systèmes d'élevage 297
5.2.1 Comment favoriser un aménagement de paysages éco-efficients ? 297
5.2.2 Implications pour l'accompagnement des systèmes d'élevage 304

5.3 Perspectives de recherche 309
5.3.1 Tester d'autres approches pour comprendre et vérifier les décisions de localisation 309
5.3.2 Améliorer le modèle multi-agents 310
5.3.3 Changer d'échelle et d'entités de gestion : vers une gestion concertée des paysages 313

Conclusion générale 316

Références bibliographiques 321

Annexes 354

Resumo 454

Abstract 455

Résumé 456

Table des illustrations

Figures

Figure 1-1 : Croissance des effectifs bovins en Amazonie Légale et dans le reste du Brésil. . 29
Figure 1-2 : L'élevage bovin extensif, un système technique efficace sur les fronts pionniers. 33
Figure 1-3 : Localisation des déforestations cumulées jusqu'en 2016 en Amazonie Légale. . 34
Figure 1-4 : Différents types de dégradation (agronomique et biologique) 35
Figure 1-5 : Evolution du taux de déforestation annuel en Amazonie légale entre 1988 et 2016. 40
Figure 1-6 : Mesures existantes pour régulariser le passif environnemental dans la Réserve Légale 50
Figure 1-7 : Différentes formes d'intégration : Agriculture-Elevage-Forêt (1) et Agriculture-Elevage (2) 55
Figure 1-8 : Exemple d'une relation de *trade-off* entre produits souhaités (desired outputs) et externalités négatives (undesired outputs) 62
Figure 2-1 : Cadre d'analyse des interactions entre paysages, systèmes de décisions et les facteurs influençant ces relations dans le temps : la situation agraire et les facteurs externes régionaux et globaux. 69
Figure 2-2 : Cadre conceptuel mobilisé pour analyser l'éco-efficience des paysages en Amazonie orientale. 78
Figure 2-3 : Le Paysage dans la thèse : un agroécosystème spatialisé. 78
Figure 2-4 : Schéma conceptuel du système d'exploitation. 82
Figure 2-5 : Représentation imagée d'un Système Multi-Agents 91
Figure 2-6 : Localisation géographique de Paragominas et Redenção 98
Figure 2-7 : Schéma topographique dans la région de Paragominas 100
Figure 2-8 : Texture des sols à Paragominas obtenue à partir de l'interpolation spatiale de la cuirasse latéritique formée au Paléogène. 101
Figure 2-9 : Texture des sols à Redenção. 101
Figure 2-10 : Evolution du cheptel de bovins entre 1983 et 2015 à Paragominas et Redenção. 103
Figure 2-11 : Evolution de la production en maïs, soja, riz et manioc entre 2000 et 2015 à Paragominas et Redenção. 104
Figure 2-12 : Vue aérienne d'une communauté d'agriculture familiale (Luiz Inacio, Paragominas) entourée de fazendas 105
Figure 2-13 : Carte des usages des sols de Paragominas et Redenção 107

Figure 2-14 : Usage des sols à Paragominas et Redenção. 108
Figure 2-15 : Evolution de la surface annuelle déforestée (km²) à Paragominas et Redenção entre 2001 et 2015. 109
Figure 2-16 : Démarche méthodologique 111
Figure 2-17 : Localisation des différentes situations agraires à Paragominas et Redenção ... 114
Figure 2-18 : Exemple de croquis représentant les usages des sols et l'organisation territoriale des exploitations. 122
Figure 2-19 : Exemple de chronique d'une exploitation enquêtée 124
Figure 2-20 : Liste des variables décisionnelles et des critères de décision potentiellement déterminants dans la localisation des pratiques et testés au cours des enquêtes 128
Figure 2-21 : Flux entrants et sortants dans le calcul du bilan énergétique 130
Figure 2-22 : Dix étapes itératives dans le développement et l'évaluation de modèles environnementaux 133
Figure 3-1 : Usages des sols dans les six cas d'étude 141
Figure 3-2 : Localisation des exploitations 142
Figure 3-3 : Bilan énergétique des six établissements agricoles 162
Figure 3-4 : Répartition de la consommation énergétique entre les principaux postes 162
Figure 3-5 : Part des émissions de gaz à effet de serre entre les différents postes 165
Figure 3-6 : Modèle paysager de l'exploitation familiale laitière intensive (type 3) en phase d'expansion 181
Figure 3-7 : Modèle paysager de l'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) en phase d'expansion 182
Figure 3-8 : Modèle paysager de la fazenda intensive en intrants (type 6) en phase de modernisation 184
Figure 3-9 : Modèle paysager de l'exploitation familiale pionnière (type 1) en phase d'intensification 186
Figure 3-10 : Modèle paysager de l'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) en phase d'intensification 188
Figure 3-11 : Modèle paysager de la fazenda viande intensive (type 6), projet *land-sparing* 191
Figure 3-12 : Modèle paysager de l'exploitation laitière intensive (type 3), projet *land-sparing* 193
Figure 3-13 : Modèle paysager de la fazenda intensification écologique (type 5), projet *land-sharing* 196
Figure 3-14 : Modèle paysager de la fazenda extensive (type 4) en phase d'intensification via l'intégration avec l'agriculture 198
Figure 4-1 : Diagramme de classe du modèle 224
Figure 4-2 : Caractérisation et stratégie d'intensification des six types d'exploitation d'élevage 225

Figure 4-3 : Zoom sur les agents du modèle (extrait du diagramme de classe UML) 226
Figure 4-4 : Zoom sur les entités spatiales du modèle (extrait du diagramme de classe UML) 227
Figure 4-5 : Zoom sur les types d'usages des sols dans le modèle (extrait du diagramme de classe UML) 229
Figure 4-6 : Distribution spatiale et proportion des différentes unités géomorphologiques représentées dans l'environnement virtuel du modèle sous Cormas (cas de l'exploitation moyenne de 1000 ha) 230
Figure 4-7 : Diagramme de séquence 232
Figure 4-8 : Distribution spatiale des usages de sols à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha) 236
Figure 4-9 : Distribution des différents types d'usages de sols par unité géomorphologique à l'initialisation du modèle (cas de l'exploitation de 1000 ha) 236
Figure 4-10 : Distribution spatiale de la dégradation des pâturages et de la capacité de charge à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha) 237
Figure 4-11: Distribution spatiale des ressources naturelles à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha) 237
Figure 4-12 : Diagramme d'activités - Activités Essentielles 239
Figure 4-13 : Diagramme d'activités - Projet d'intensification 240
Figure 4-14 : Diagramme d'activités - Abandon des paddocks 243
Figure 4-15 : Diagramme d'activités - Implantation des cultures annuelles 244
Figure 4-16 : Diagramme d'activités - Entretien amélioré des pâturages 245
Figure 4-17 : Diagramme d'activités - Entretien traditionnel des pâturages 245
Figure 4-18 : Chronologie de l'entretien des pâturages dans les ranchs de type intensif et semi-intensif 246
Figure 4-19 : Diagramme d'activités - Division des paddocks 247
Figure 4-20 : Diagramme d'activités - Réforme des pâturages 248
Figure 4-21 : Diagramme d'activités - Bilan économique 249
Figure 4-22 : Diagramme d'état et de transition de la végétation. 251
Figure 4-23 : Arbre de décision utilisé pour définir l'usage des sols dans les Paddocks composés d'une mosaïque de végétation 252
Figure 4-24 : Evolution des usages des sols dans le ranch moyen de type intensif 257
Figure 4-25 : Evolution des usages des sols dans le ranch moyen de type semi-intensif 258
Figure 4-26 : Evolution des surfaces en paddocks productifs et dégradés dans le ranch moyen de type intensif 259
Figure 4-27 : Evolution des surfaces en paddocks productifs et dégradés dans le ranch moyen de type semi-intensif 259

Figure 4-28 : Evolution de la moyenne de l'indice de dégradation des pâturages dans le ranch de type intensif 260
Figure 4-29 : Evolution de la moyenne de l'indice de dégradation des pâturages dans le ranch de type semi-intensif 260
Figure 4-30 : Dynamique spatio-temporelle de la dégradation des pâturages dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 261
Figure 4-31 : Evolution du nombre de Paddocks dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 262
Figure 4-32 : Evolution de la taille moyenne des Paddocks dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 262
Figure 4-33 : Evolution du périmètre des clôtures dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 262
Figure 4-34 : Evolution de la distribution spatiale des usages des sols dans le ranch moyen de type intensif 264
Figure 4-35 : Evolution de la distribution spatiale des usages des sols dans le ranch moyen de type semi-intensif 265
Figure 4-36 : Evolution des usages des sols dans les vallées du ranch moyen de type Intensif 266
Figure 4-37 : Evolution des usages des sols dans les vallées du ranch moyen de type semi-intensif 267
Figure 4-38 : Evolution des usages des sols dans les fonds de vallées du ranch moyen de type intensif 268
Figure 4-39 : Evolution des usages des sols dans les fonds de vallées du ranch moyen de type semi-intensif 268
Figure 4-40 : Evolution des usages des sols sur les plateaux du ranch moyen de type intensif 269
Figure 4-41 : Evolution des usages des sols sur les plateaux du ranch moyen de type semi-intensif 269
Figure 4-42 : Evolution des usages des sols dans les vallées ondulées du ranch moyen de type intensif 270
Figure 4-43 : Evolution des usages des sols dans les vallées ondulées du ranch moyen de type semi-intensif 271
Figure 4-44 : Evolution des usages des sols sur les reliefs escarpés des ranchs moyens de type intensif et semi-Intensif 271
Figure 4-45 : Evolution des indices moyens Eau, Fertilité et Structure à l'échelle du ranch moyen de type intensif 273
Figure 4-46 : Evolution des indices moyens Eau, Fertilité et Structure à l'échelle du ranch moyen de type semi-intensif 273

Figure 4-47 : Dynamique spatio-temporelle de la ressource en eau dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 274
Figure 4-48 : Dynamique spatio-temporelle de la ressource fertilité des sols dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 275
Figure 4-49 : Dynamique spatio-temporelle de la structure des sols dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 276
Figure 4-50 : Evolution du pourcentage de Réserve Légale (ARL) et de zones ripariennes défrichées dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif. 277
Figure 4-51 : Variation de la capacité de charge des pâturages (k) et de la démographie en bovins dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 278
Figure 4-52 : Variation de la capacité de charge moyenne par hectare de pâturage dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif..... 279
Figure 4-53 : Dynamique spatio-temporelle de la capacité de charge des pâturages dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif..... 280
Figure 4-54 : Comparaison du nombre de bovins vendus annuellement par les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 281
Figure 4-55 : Part du revenu généré par les cultures et de l'élevage chez le ranch moyen de type intensif 282
Figure 4-56 : Evolution du cash (trésorerie) des ranchs moyens de type intensif et semi-intensif 283
Figure 4-57 : Evolution annuelle de la main d'œuvre disponible (en nombre de jours)..... 283

Tableaux

Tableau 1-1 : Largeur minimum de l'APP à recomposer dans les aires rurales consolidées .. 47
Tableau 1-2 : Procédure pour la déclaration de nettoyage ou demande de suppression de la végétation secondaire initiale 52
Tableau 2-1 : Typologie des pratiques étudiées dans les exploitations d'élevage 86
Tableau 2-2 : Les sept parties du protocole ODD 95
Tableau 2-3 : Caractéristiques géographiques et socio-économiques des communes de Paragominas et Redenção 97
Tableau 2-4 : Indicateurs de développement socio-économique des communes étudiées..... 99
Tableau 2-5 : Décentralisation de la gestion environnementale à Paragominas et Redenção 109
Tableau 2-6 : Caractéristiques des huit situations agraires identifiées 115
Tableau 2-7 : Caractéristiques des exploitations sélectionnées 117
Tableau 2-8 : Type de données collectées 120
Tableau 2-9 : Indicateurs utilisés pour caractériser les archétypes paysagers 126
Tableau 3-1 : Caractéristiques des exploitations étudiées 141
Tableau 3-2 : Atouts et contraintes du type 1 pour l'intensification de l'élevage..... 144
Tableau 3-3 : Atouts et contraintes du type 2 pour l'intensification de l'élevage..... 146
Tableau 3-4 : Atouts et contraintes du type 3 pour l'intensification de l'élevage..... 148
Tableau 3-5 : Atouts et contraintes du type 4 pour l'intensification de l'élevage..... 149
Tableau 3-6 : Atouts et contraintes du type 5 pour l'intensification de l'élevage..... 151
Tableau 3-7 : Atouts et contraintes du type 6 pour l'intensification de l'élevage..... 152
Tableau 3-8 : Indicateurs d'efficience énergétique calculés dans les six établissements agricoles 161
Tableau 3-9 : Emissions de Gaz à Effet de Serre 164
Tableau 3-10 : Pratiques favorisant la dégradation des ressources naturelles dans les systèmes d'élevage en Amazonie brésilienne 172
Tableau 3-11 : Pratiques favorisant l'aggradation des ressources naturelles dans les systèmes d'élevage en Amazonie brésilienne 173
Tableau 3-12 : Règles de localisation des pratiques dans le processus d'intensification 201
Tableau 3-13 : Synthèse des principaux évènements et de leurs attributs ayant stimulé le processus d'intensification. 213
Tableau 4-1 : Caractéristiques des unités géomorphologiques représentées dans le modèle 226
Tableau 4-2 : Caractéristiques des usages des sols dans le modèle 228
Tableau 4-3 : Variables décisionnelles et critères considérés pour localiser les pratiques d'intensification..... 241
Tableau 4-4 : Données statistiques relatives à la vente annuelle de bovins 281
Tableau 4-5 : Données statistiques relatives à la trésorerie..... 283

Encadré

Encadré 1-1 : Les fronts pionniers 30
Encadré 1-2 : Services Ecosystémiques 38
Encadré 1-3 : Définition de APP et ARL 45
Encadré 1-4 : L'intensification 53
Encadré 1-5 : Agroécosystème, processus écologiques, ressources naturelles 59
Encadré 2-1 : Langage structural et fonctionnalités en écologie du paysage 73
Encadré 2-2 : Approche systémique 79
Encadré 2-3 : Différenciation des usages des sols 127

Préface

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans les programmes de recherche du CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), établissement de recherche public français à caractère industriel et commercial. Le CIRAD mène des activités de recherche dans plus de 100 pays du Sud en coopération avec des instituts de recherche locaux. Ses missions visent à produire et transmettre de nouvelles connaissances, accompagner le développement agricole et rural des pays du Sud et contribuer au débat sur les grands enjeux de l'agriculture.

Ce travail de recherche a été mené au sein de l'UMR SELMET (*Unité Mixte de Recherche sur les Systèmes d'Elevages Méditerranéens et Tropicaux*), de l'UPR GREEN (*Gestion des ressources renouvelables et de l'environnement*), et du DP Amazonie (*Dispositif de recherche et d'enseignement en Partenariat, Forêt, Agriculture et Territoire en Amazonie*), réunissant l'Embrapa Amazônia Oriental, l'Université Fédérale du Pará (UFPA) et le CIRAD. Ma thèse avait pour objectif de contribuer aux réflexions sur la durabilité de l'élevage dans les exploitations agricoles en Amazonie.

La thèse s'est déroulée dans le cadre de deux projets de recherche animés par le DP Amazonie : ECOTERA (*Ecoefficiences et développement territorial en Amazonie brésilienne*) et TerraCert (*Linking sustainable production and enhanced landscape governance in the Amazon: Towards territorial certification*). Ces projets impliquaient, outre les partenaires du DP, plusieurs partenaires brésiliens (Museu Paraense Emílio Goeldi, Université Fédérale Rurale d'Amazonie - UFRA), français (AgroParisTech, INRA, Université du Mans, SupAgro) et internationaux (CIFOR).

Pour acquérir une bonne compréhension de la dynamique agraire locale et faciliter les interactions avec les acteurs locaux, je me suis installée pendant trois ans dans cette région, à Paragominas, une commune au nord-est de l'Etat du Pará. J'ai été accueillie au sein du NAPT Belém/Brasília (*Núcleo de Apoio a Pesquisa e Transferência de Tecnologias*), une unité régionale de recherche et de vulgarisation technique de l'Embrapa. J'ai également effectué quatre missions de terrain de six semaines au total dans la région de Redenção (Sud du Pará), située à 700 km de Paragominas.

La thèse a été dirigée scientifiquement par deux chercheurs du CIRAD qui disposent d'une expertise internationale sur les systèmes d'élevage et en Amazonie brésilienne notamment : René Poccard-Chapuis (géographe) et Jean-François Tourrand (vétérinaire-zootechnicien). Un comité de suivi interinstitutionnel et multidisciplinaire (géographie, sociologie rurale, modélisation, économie, zootechnie) m'a aussi accompagné pendant ces trois années, à la fois sur des aspects théoriques et méthodologiques. Il était composé de Marie-Gabrielle Piketty et Christophe Le Page (CIRAD, UR-Green), Livia Navegantes (UFPA, *Núcleo de Ciências*

Agrárias e Desenvolvimento Rural), François Laurent (Université du Mans, UMR-ESO), et Philippe Lescoat (AgroParisTech, UMR SADAPT).

La thèse a débouché sur la conceptualisation, l'implémentation et la programmation d'un modèle SMA (Systèmes Multi-Agents) sur la plateforme Cormas (langage SmallTalk). La construction de ce modèle a été possible après avoir participé à la formation MISS-ABMS 2015 (*Multi-platform International Summer School on Agent-Based Modelling & Simulation*) et au dispositif de compagnonnage à la Programmation-Orienté-Objet, proposé par l'UPR GREEN (François Bousquet, Christophe Le Page et Pierre Bommel).

Dans le cadre des projets ECOTERA et TERRACERT, j'ai par ailleurs contribué à différents travaux de collecte de données et de cartographie (texture des sols, usage des sols, éco-efficience hydrique des pâturages) qui m'ont permis d'acquérir un protocole pour l'analyse des paysages et un regard interdisciplinaire pour échantillonner des cas d'étude. Ils ont été menés dans les régions de Paragominas (communes d'Ipixiuna, Paragominas, Ulianópolis, Dom Eliseu, Rondon do Pará) et Redenção (communes de Conceição do Araguaia, Redenção, Cumaru do Norte, Santa Maria do Pará, Santana do Araguaia) avec René Poccard-Chapuis (CIRAD), François Laurent (Université du Mans) et Fabricia Marquez (Museu Goeldi au moment du projet).

Sur le plan financier, la thèse a bénéficié de plusieurs contributions. Cette thèse a reçu le soutien financier du CIRAD à travers son programme d'appui « Doctorants du Nord ». Elle a également été sponsorisée par la Fondation Rotary dans le cadre d'une Subvention Mondiale, dans l'axe stratégique « Développement économique et local » (Global Grant 1410684). L'accès à cette bourse a été rendu possible grâce au soutien et au montage d'un projet binational entre les districts rotariens 1690 (France) et 4720 (Brésil), et les Rotary clubs locaux de Mont-de-Marsan (Landes) et Redenção (Pará). Outre l'appui financier, les Rotary clubs locaux, parrains de mon projet, m'ont aidé à m'insérer auprès des acteurs et à mieux comprendre les dynamiques locales. Les frais de fonctionnement sur le terrain ont été soutenus par les projets ECOTERA financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), TERRACERT financé par le CGIAR (Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale) dans le cadre du programme CCAFS (*Climate Change, Agriculture and Food Security*), et trois appuis doctorants du CIRAD (2014, 2015 et 2016).

Liste des abréviations

ABC	Agricultura Baixo Carbono (Agriculture à Faible émission de Carbone)
ADEME	Agence française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADEPARÁ	Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (Agence de Défense Agricole de l'Etat du Pará)
ANERPAAM	Analyse énergétique des propriétés agricoles d'Amazonie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APP	Área de Preservação Permanente (Aire de Protection Permanente)
ARL	Área de Reserva Legal (Aire de Réserve Légale)
BASA	Banco da Amazônia S.A (Banque d'Amazonie S.A)
BDI	Belief-Desire-Intention
BPA	Boas Práticas Agropecuárias (Bonnes Pratiques Agricoles)
CAR	Cadastro Ambiental Rural (Cadastre Environnemental Rural)
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CCAFS	Climate Change, Agriculture and Food Security
CCIR	Certificado de Cadastro de Imóvel Rural (Certificat du Cadastre de l'Immobilier Rural)
CGIAR	Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale
CIAT	International Center for Tropical Agriculture
CIFOR	Center for International Forestry Research
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CMN	Conselho Monetario Nacional
CNA	Confederação Nacional da Agricultura (Confédération Nationale de l'Agriculture)
DETER	Detecção de Desmatamento em Tempo Real (Détection de la Déforestation en Temps Réel)
ECOTERA	Eco-efficiences et développement Territorial durable en Amazonie Brésilienne
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Centre de recherche brésilien en agronomie)
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Entreprise d'Assistance Technique et d'Extension Rurale)
ESALQ-USP	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (Ecole Supérieure d'Agriculture Luiz de Queiroz, Université de São Paulo)
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FAPESPA	Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas
FNO	Fundo Constitucional de Financiamento do Norte (Crédit pour le développement de la région Nord)
GES	Gaz à Effet de Serre
GMQ	Gain Moyen Quotidien

GTA	Guia de Trânsito Animal (Autorisation pour le Transport d'Animaux)
IA	Insémination Artificielle
IATF	Insémination Artificielle à Temps Fixe
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Institut National de l'Environnement et des Ressources Naturelles Renouvelables)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Institut Brésilien de Géographie et de Statistique)
iLPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (Intégration Agriculture-Elevage)
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e de Reforma Agrária (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Institut national de recherches spatiales)
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
IPAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Institut de Recherche Environnemental d'Amazonie)
ITERPA	Instituto das Terras do Pará (Institut des Terres du Pará)
LAR	Licença Ambiental Rural (Licence Environnementale Rurale)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche)
MF	Module Fiscal
MMA	Ministério do Meio Ambiente (Ministère de l'Environnement)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAPT	Núcleo de Apoio a Pesquisa e Transferência de Tecnologias
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ODD + D	Overview - Design concepts - Details+Decision
PIB	Produit Intérieur Brut
PLANETE	Méthode Pour L'Analyse EnergéTique de l'Exploitation agricole
PMV	Programa Município Verde (Programme Municipe Vert)
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima (Politique Nationale sur le Changement Climatique)
PPCDAm	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (Plan de Prévention et d'Action contre la Déforestation en Amazonie légale)
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (Projet d'observation de la déforestation en Amazonie légale par images satellites)
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Programme National d'Appui à l'Agriculture Familiale)
PV	Poids Vif
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation
SAU	Surface Agricole Utile
SEDAP	Secretaria de Estado de Desenvolimento Agropecuário e da Pesca (Secrétariat d'État du Développement Agricole et de la Pêche)

SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente (Secrétariat de l'Environnement de l'Etat)
SEMAGRI	Secretaria Municipal de Agricultura (Secrétariat Municipal d'Agriculture d'Etat)
SEMMA	Secretaria Municipal do Meio Ambiente (Secrétariat Municipal de l'Environnement)
SIG	Système d'Information Géographique
SMA	Systèmes Multi-Agents
SPRP	Sindicato dos Produtores Rurais de Paragominas (Syndicat des Producteurs Ruraux de Paragominas)
SRR	Sindicato Rural de Redenção (Syndicat Rural de Redenção)
STTR	Sindicato dos Trabalhadores e das Trabalhadoras Rurais (Syndicat des Travailleurs Ruraux)
SUDAM	Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (Surintendance pour le Développement de l'Amazonie)
TAC	Termo de Ajustamento de Conduta (Terme d'Ajustement de Conduite)
TNC	The Nature Conservancy
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UFPA	Universidade Federal do Pará (Université Fédérale du Pará)
UML	Unified Modeling Language
UMR SELMET	Unité Mixte de Recherche sur les Systèmes d'Elevages Méditerranéens et Tropicaux
UNESP	Universidade Estadual Paulista (Université de l'Etat Pauliste)
UR GREEN	Unité de Recherche sur la Gestion des Ressources renouvelables et environnement
USP	Universidade de São Paulo (Université de São Paulo)
ZEE	Zoneamento Ecológico e Econômico (Zonage Ecologique et Economique)
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

Unité de mesure

R$	Real – 1R$
US$	Dollar des Etats-Unis – 1 US$
MJ	Mégajoule
T	Tonne
Mt	Million de tonnes
GtC	Gigatonne
UA	Unité Animale - 1 UA = 450 kg de poids vif
Alqueire	1 alqueire = 4,84 ha
Tarefa (linha)	1 tarefa = 3,025 m²

Introduction

L'Amazonie est une région emblématique des enjeux agricoles et écologiques planétaires. Abritant la plus grande forêt tropicale mondiale (FAO & ITTO, 2011) et l'une des plus importantes réserves de terres potentiellement convertibles en agriculture (Lambin *et al.*, 2013), elle confronte ces deux perspectives majeures de grenier alimentaire mondial et de sanctuaire de biodiversité et de biomasse forestière. Forte d'avantages comparatifs pour la production fourragère mis en valeur par l'avancée des fronts pionniers de déforestation, l'Amazonie brésilienne est devenue l'une des principales régions d'élevage bovin sur la scène internationale (Veiga *et al.*, 2010), avec plus de 80 millions de têtes, soit 38% du cheptel brésilien[1] (IBGE, 2013a) et plus de 60 millions d'hectares de pâturages (INPE & EMBRAPA, 2012). A l'instar d'autres régions tropicales (Deakin *et al.*, 2016), l'Amazonie brésilienne connaît actuellement une nouvelle phase de transformations majeures de son agriculture, caractéristique d'une transition agraire. Gérant environ 80% de la SAU amazonienne, les éleveurs, dans leur large diversité, sont les premiers concernés par cette transition. Les fermes d'élevage amazoniennes deviennent un théâtre majeur, où s'inventent sous nos yeux les solutions à cette confrontation de perspectives agricoles et écologiques.

Par leurs aspects multifonctionnels (constitution d'un patrimoine foncier, prestige social, sécurité d'une épargne et d'un revenu régulier, flexibilité de gestion, etc.), les systèmes d'élevage extensifs ont montré leur efficacité et leur adéquation au processus de colonisation, dans un contexte de frontière agricole (Veiga *et al.*, 2004). Contrepartie de cette bonne adaptation aux projets pionniers et aux territoires de frontière, l'élevage a été l'un des principaux moteurs de déforestation et de dégradation des sols, générant d'immenses surfaces de prairies peu productives. Ces pratiques extensives d'élevage sont aujourd'hui fondamentalement remises en question à cause des conséquences environnementales négatives qu'elles engendrent sur la biodiversité (Barlow *et al.*, 2016) et les cycles biogéochimiques (eau, carbone) (Malhi *et al.*, 2006 ; Davidson *et al.*, 2012). En outre, ces systèmes fourragers faiblement productifs n'utilisent pas de manière efficiente les ressources naturelles, notamment la fertilité des sols. Le ratio entre utilisation des ressources naturelles et productivité fourragère, s'il est élevé les premières années grâce aux nutriments hérités des forêts, décroit très rapidement par manque de pratiques adéquates. Plusieurs organisations environnementales ont ainsi critiqué la dévastation de l'Amazonie par l'élevage bovin (Greenpeace International, 2009 ; Amis de la Terre, 2010), ce qui d'un point de vue strictement écologique est une réalité. L'Amazonie et ses territoires ne sont cependant pas réductibles à des objets écologiques. Ils possèdent des dimensions sociales, économiques et politiques qui interpellent tout autant.

[1] Taille du cheptel calculé pour l'Amazonie légale. Définie par la loi 1.806 du 06/01/1953, l'Amazonie légale englobe les sept états de la région Nord du Brésil (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima et Tocantins), une partie du Maranhão (à l'ouest du 44ème méridien) et le Mato Grosso.

Ce n'est ainsi qu'à partir de 2004 que le Brésil met en place un ensemble efficace de mesures de lutte contre la déforestation. Combinés aux pressions des acteurs de l'aval à la recherche de produits exempts de déforestation (Pacheco & Poccard-Chapuis, 2012 ; Arima *et al.*, 2014 ; Nepstad *et al.*, 2014 ; Gibbs *et al.*, 2015a), ces mesures ont permis de réduire d'environ 70% les taux annuels de déforestation (INPE, 2016). Face à cette fermeture du foncier et de la fertilité forestière, un mouvement d'intensification et de diversification des usages des sols s'est mis en place (Vaz *et al.*, 2012). Il s'oriente vers de meilleures productivités à l'hectare, chemin privilégié pour retrouver des performances économiques satisfaisantes. Ce mouvement très médiatisé interpelle la recherche pour plusieurs raisons. Les modèles de production développés reposent sur une artificialisation de l'agroécosystème ce qui peut engendrer de nouveaux risques sur le plan environnemental (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b). De plus, sa portée reste limitée tant sur le plan spatial que social (Godar *et al.*, 2014 ; Piketty *et al.*, 2015a). Les fortes attentes de la société, des filières, des pouvoirs publics et des éleveurs sont ainsi encore largement frustrées.

Au-delà des objectifs de la déforestation zéro, favoriser une transition vers des pratiques d'élevage qui valorisent mieux les ressources naturelles et les processus écologiques et qui puissent être adaptées par une large diversité de profil d'éleveurs est devenu un enjeu clé pour tendre vers une intensification plus durable de l'élevage bovin (Pacheco *et al.*, 2017). Au niveau international, ce genre de problématique est notamment appréhendé par la communauté scientifique interdisciplinaire du *Farming System Design*, qui a souligné l'importance du concept de paysage pour adresser ces enjeux (Gritti & Wery, 2015). En Amazonie, l'équipe du projet ECOTERA, à la suite de Lavelle *et al.* (2016), a exploré la notion de paysage éco-efficient pour raisonner les pistes d'intensification. Les paysages éco-efficients sont appréhendés comme des paysages où les pratiques et leur localisation permettent une mobilisation forte des processus écologiques, et une utilisation efficiente des ressources naturelles en adéquation avec la distribution spatiale de ces ressources. Cependant, les logiques spatiales d'intensification des usages des sols à l'échelle des exploitations sont encore mal comprises. Il en est de même pour les dynamiques et impacts sur les ressources naturelles, dont la spatialité a été peu étudiée. Notre étude s'inscrit ainsi dans la perspective de combler ces lacunes, spécifiquement concernant l'élevage bovin, dont les spécificités et l'importance ont été soulignées ci-dessus.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont : i) de produire des connaissances sur les systèmes de décision des éleveurs afin de mieux comprendre, dans l'actuelle dynamique d'intensification de l'élevage, les processus de construction des paysages et leurs causes ; ii) d'analyser le rôle des pratiques dans l'éco-efficience des paysages ; et iii) construire un modèle multi-agents représentant la diversité des stratégies d'intensification et l'hétérogénéité des paysages et de leurs ressources, dans le but d'évaluer les impacts et interactions entre ces composants et analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies à l'échelle de l'exploitation.

La principale hypothèse qui guide la recherche est que le processus d'intensification de l'élevage conduit à une reconfiguration des paysages à l'échelle des exploitations agricoles, pour mieux profiter de la distribution spatialement hétérogène des ressources naturelles. Afin d'étudier cette hypothèse et répondre à nos objectifs, nous proposons de conceptualiser le paysage comme un agroécosystème spatialisé où interagissent des pratiques agricoles (liées aux systèmes de décision des éleveurs), des ressources naturelles et des processus écologiques. Multiscalaire, le concept de paysage sera ici mobilisé uniquement à l'échelle de l'exploitation. Cette unité décisionnelle constitue la principale entité de gestion des agroécosystèmes et des paysages sur les fronts pionniers d'Amazonie brésilienne.

La démarche suivie s'articule en trois parties. Nous avons premièrement mené des entretiens semi-directifs couplés à des analyses de paysages dans deux régions d'élevage emblématiques d'Amazonie brésilienne orientale, Paragominas et Redenção, dans le but de comprendre les décisions des éleveurs en termes de pratiques (usages des sols, gestion du système fourrager et des ressources naturelles), et de localisation de ces pratiques. Par ailleurs, dans un échantillon de six établissements agricoles, représentatifs d'un gradient d'intensification et d'une diversité de situations agraires, nous avons reconstitué les trajectoires d'évolution des systèmes d'élevage et des paysages et nous avons engagé une réflexion prospective sur la façon dont ils souhaiteraient modifier l'organisation spatiale des pratiques. Deuxièmement, pour analyser le rôle des pratiques dans l'éco-efficience des paysages, nous avons mesuré l'efficience énergétique des exploitations et procédé à un inventaire des effets des pratiques et de leur localisation sur les différents processus écologiques. Troisièmement, nous avons développé un modèle multi-agents empirique stylisé, conceptualisé sur la base du langage UML et implémenté sur la plateforme de simulation Cormas. Le choix de cette formule tient à sa capacité à représenter le comportement individuel d'un agent (décisions d'un exploitant agricole en termes de pratiques et de leur localisation), en interaction avec l'agroécosystème (dynamiques des ressources naturelles et de végétation) dans un cadre spatialisé (paysage). Ce modèle simule les stratégies d'intensification de deux types d'éleveurs, intensif et semi-intensif et leurs impacts sur l'éco-efficience des paysages. Différents indicateurs sont observés à cet effet : la productivité fourragère et le revenu, les dynamiques de trois ressources naturelles (eau, fertilité et structure des sols) retenus pour leur rôle majeur dans le fonctionnement des systèmes d'élevage amazoniens, les dynamiques d'usages des sols et la distribution spatiale de ces usages des sols en fonction du type d'unités géomorphologiques.

La thèse est structurée en cinq parties. Afin de mieux appréhender le contexte de transition agraire dans lequel se trouvent les éleveurs d'Amazonie orientale brésilienne, le Chapitre 1 exposera le processus d'expansion de l'élevage bovin, ses causes et conséquences, et les nouveaux enjeux pour les systèmes d'élevage qui ont conduit à notre problématique. Après avoir expliqué le cadre théorique et la méthode (Chapitre 2), les deux chapitres suivants présenteront les résultats. Dans le Chapitre 3, nous présenterons la diversité de stratégies d'intensification adoptées par les éleveurs et les dynamiques de paysages associées et nous montrerons quels sont les principaux déterminants qui influencent le processus de

construction des paysages. Nous analyserons également dans ce chapitre le rôle des pratiques dans les éco-efficiences et les principales barrières à l'intensification. Le Chapitre 4 présentera la structure du modèle multi-agents, les résultats des simulations et les discutera. Dans le Chapitre 5, nous reviendrons sur les principaux apports de la thèse. Nous proposerons également des pistes pour favoriser l'éco-efficience des paysages et accompagner les systèmes d'élevage bovins vers un processus d'intensification plus durables. Enfin, de nouvelles perspectives de recherche seront évoquées.

Chapitre 1. Contexte : Des systèmes d'élevage efficaces sur les fronts pionniers amazoniens mais générateurs de paysages peu éco-efficients

1.1 Expansion de l'élevage bovin en Amazonie : état des lieux et enjeux socio-économiques et environnementaux

Exogène à la région amazonienne, l'élevage bovin a connu une forte expansion dans cette région au cours des 50 dernières années. Après avoir caractérisé l'ampleur de cette croissance, nous expliquerons le rôle des principaux déterminants sociaux, économiques, politiques et environnementaux qui ont contribué à cet essor (1.1.1). Dans un second temps, nous présenterons les principales conséquences environnementales des systèmes d'élevage extensif sur la déforestation, la dégradation des pâturages et la provision de services écosystémiques (1.1.2).

1.1.1 Importance économique et sociale de l'élevage bovin en Amazonie

1.1.1.1 Ampleur de l'expansion de l'élevage bovin en Amazonie

Acteur incontournable du commerce de produits agricoles sur la scène internationale, le Brésil est aujourd'hui le premier producteur de bovins au monde et le premier exportateur mondial de viande bovine désossée (FAO, 2016). L'ascension du Brésil sur le marché extérieur a été fulgurante, avec un quadruplement du volume exporté entre 2000 et 2013. S'élevant à 2 Mt (équivalent poids carcasse) en 2013, ce volume devrait continuer de croître et atteindre 2,6 Mt à l'horizon 2024. Les exportations devraient connaître une plus forte croissance (+ 2,7%/an) que le marché intérieur qui stagnerait du fait d'une limitation du pouvoir d'achat brésilien (OCDE/FAO, 2015).

Parallèlement à ces évolutions de marché, la production s'est développée dans le pays, en particulier en Amazonie brésilienne. Cette région est en effet devenue l'un des principaux bassins d'élevage du Brésil et du monde (Bowman *et al.*, 2012). Entre 1989 et 2013, le cheptel amazonien est passé de 25 millions à plus de 80 millions de têtes en Amazonie légale[1], ce qui représente 38% de l'effectif brésilien (IBGE, 2013a). Cette croissance à trois chiffre (+220%, soit 55 millions de têtes) est largement supérieure à celle du reste du Brésil (+10%, soit 12 millions de têtes). Et la part de la production amazonienne dans la production nationale devrait continuer de croître du fait de la croissance des effectifs et de potentiels gains de productivité (Veiga *et al.*, 2010), détrônant ainsi les régions traditionnelles d'élevage du Sud et Sud-est du pays.

[1] Définie par la loi 1.806 du 06/01/1953, cette région englobe les sept états de la région Nord du Brésil (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima et Tocantins), une partie du Maranhão (à l'ouest du 44ème méridien) et le Mato Grosso (Brasil, 1953).

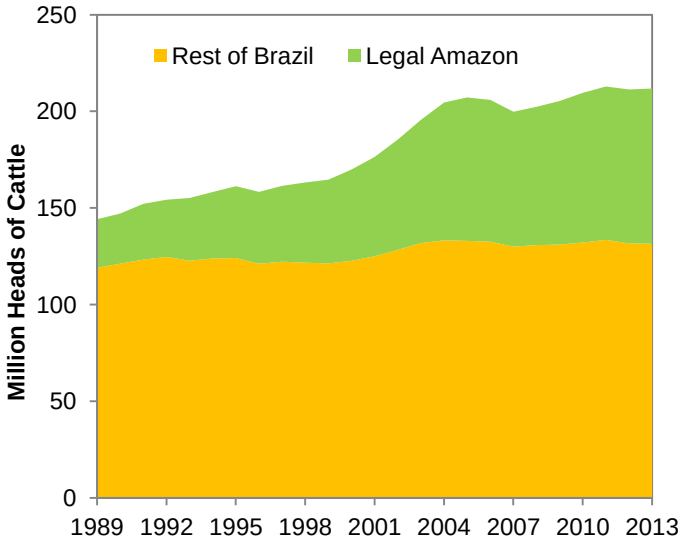


Figure 1-1 : Croissance des effectifs bovins en Amazonie Légale et dans le reste du Brésil.Source des données : IBGE (2013a)

1.1.1.2 Une colonisation planifiée par les politiques publiques

Exogène à la région amazonienne, l'élevage bovin a été introduit comme fer de lance de la colonisation planifiée de ce territoire. Dès les années 60 et jusqu'à la fin de la dictature militaire (1964-1985), le gouvernement fédéral développe une stratégie d'intégration et de colonisation de l'Amazonie au reste du Brésil. Les finalités sont : i) géopolitiques (il s'agit d'assurer la sécurité de cette région sous-peuplée et isolée face à des invasions de pays voisins et de préserver la stabilité politique face à de possibles mouvements révolutionnaires tels que la *Guérilla do Araguaia)*, ii) économiques (exploiter les ressources minières, forestières et hydriques via la construction de barrages) ; iii) sociales (faire l'économie d'une réforme agraire en attribuant des terres aux paysans « sans terre » du Sud, Sud-est et Nordeste du Brésil) (Léna, 1986 ; Becker, 2010). Cette stratégie d'intégration va transformer structurellement l'organisation territoriale de l'Amazonie et son économie jusqu'alors basée sur l'extractivisme de produits naturels.

Pour occuper le territoire, plusieurs stratégies ont été mises en œuvre. Le gouvernement a financé la construction de grands axes routiers afin de désenclaver la région et faciliter l'écoulement des productions. Ces axes de communication ont été dessinés selon un axe Nord-Sud et relient des pôles amazoniens au centre du Brésil : la Bélem-Brasília (BR-010), Cuiabá-Porto Velho-Rio Branco (BR-364) et Cuiabá-Santarém (BR-163). Deux autres axes de circulation sont planifiés selon un axe Est-Ouest : la *Transamazonienne* (BR-230) reliant le Nordeste (état de Paraiba) sur la façade Atlantique à l'Amazonas à la frontière avec le Pérou et la *Perimetral Norte* (BR-210) qui devait relier l'Amapá au Roraima mais dont seuls quelques tronçons ont été mis en service (Becker, 2010). De plus, des lots fonciers d'environ 4.500 ha ont été distribués avec obligation pour les bénéficiaires de mettre en valeur 30% de la surface pour acquérir le titre définitif (Veiga *et al.*, 2010). Pour attirer les investisseurs

notamment les grandes entreprises nationales et étrangères, le gouvernement a octroyé des exonérations fiscales et subventionné des crédits à travers la Surintendance pour le Développement de l'Amazonie (SUDAM) et la Banque d'Amazonie (BASA) (Becker, 2010). Adapté aux caractéristiques de territoires de fronts pionniers (définition dans Encadré 1-1 et raisons expliquées dans 1.1.1.3), le secteur de l'élevage bovin a été l'un des principaux bénéficiaires des fonds publics de la SUDAM (Schmink & Wood, 2012). Enfin, entre 1971 et 1974, le gouvernement lance un vaste programme de colonisation agraire à la suite d'une crise sociale déclenchée par une grave sécheresse dans le Nordeste. De part et d'autre de ces nouveaux axes routiers fédéraux, une bande de 100 km est expropriée de la main des Etats et placée sous la tutelle de l'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire). Dans cet espace, l'INCRA est chargé de structurer une maille foncière composée de lots de 100 ha, qu'il distribue aux milliers de petits producteurs affluant en Amazonie (Schmink & Wood, 2012). Ce programme de colonisation planifié a été relayé par une vague de migration spontanée à l'échelle nationale. Comme le souligne Ianni (1978) cité par Poccard-Chapuis *et al.* (2015b), ce mouvement de migration ne concerne pas que les seuls bovins. Les migrants ont importé avec eux la culture d'une société rurale traditionnelle au Brésil, celle des pionniers.

Encadré 1-1 : Les fronts pionniers

Les territoires issus de la colonisation agraire de l'Amazonie constituent des fronts pionniers. Ils peuvent être définis comme des espaces périphériques de transition annexés par une société humaine au détriment d'une autre, où s'opèrent de profondes transformations dans l'utilisation de l'espace ou des ressources naturelles, en tenant peu compte des héritages antérieurs. Ces espaces très dynamiques constituent une zone de contact entre le Brésil développé et le massif forestier amazonien. Ils passent par plusieurs étapes successives, avant d'être intégrés au reste du territoire, sur le plan économique, social, culturel et politique. Ils sont constitués par un « avant » où les processus de changement débutent et un « arrière », où ils sont proches de l'aboutissement (Albaladejo & Tulet, 1996 ; Poccard-Chapuis, 2004).

1.1.1.3 Les raisons du succès : une production adaptée aux caractéristiques très spécifiques des fronts pionniers

Malgré la diminution des incitations publiques à l'élevage, cette activité a continué de se développer et a même attiré dans les années 90 de nouveaux acteurs, les producteurs familiaux. Cette diffusion de l'élevage dans l'agriculture familiale est qualifiée par Veiga *et al.* (2004) de *pecuarização*[1]. Au-delà des subventions publiques, d'autres déterminants expliquent donc l'expansion de cette activité sur les fronts pionniers. Piketty *et al.* (2005) et Wood *et al.* (2015) analysent l'ensemble des facteurs biophysiques et technico-économiques qui ont favorisé son émergence.

[1] *Pecuária* signifie élevage en portugais.

1) Sécurité, épargne et liquidité : L'élevage génère des revenus faibles mais sûrs, les prix payés aux producteurs étant relativement stables dans le temps. De plus, sur les fronts pionniers, face au manque d'organisation des réseaux financiers et bancaires et à la précarité des services publics (de santé notamment), il constitue une épargne sur pied mobilisable dans des situations d'urgence ou de dépenses importantes. Mais cette sécurité n'est profitable que grâce à la bonne liquidité de cette activité. En effet, quelle que soit la localisation sur les fronts pionniers et à n'importe quel moment de l'année, les éleveurs peuvent facilement échanger et vendre leurs bovins. Contrairement aux produits périssables, les bovins sont adaptés aux conditions logistiques des territoires pionniers (précarité des routes, distances et isolement) (Figure 1-2) et peuvent se conserver ce qui donne plus de souplesse dans la date de commercialisation.

2) Marché et organisation de la filière viande : La hausse de la demande interne et internationale constitue un moteur important d'expansion de la production de viande bovine nationale et amazonienne (Walker *et al.*, 2009). Sur le marché mondial, la viande bovine brésilienne présente un très haut niveau de compétitivité due aux faibles coûts de production et à la dépréciation du réal brésilien par rapport au dollar américain (OCDE/FAO, 2015). Au niveau national, le coût de production du bœuf amazonien est de 30 à 40 % inférieur à la moyenne brésilienne ce qui le rend très compétitif comparé aux autres régions du Brésil, même en y ajoutant les coûts additionnels de transport de la viande, réfrigérée ou congelée, en carcasse ou désossée. L'organisation de la filière viande en Amazonie est aussi déterminante pour l'accès à ces marchés. L'existence d'un dense réseau de commercialisation en vif et l'implantation d'usines de transformation garantissent une bonne liquidité à l'élevage (Poccard-Chapuis *et al.*, 2005).

3) Appropriation et spéculation foncière : L'appropriation et la valorisation du foncier est au cœur des projets des colons qui migrent vers l'Amazonie que ce soit pour la vente ou la constitution d'un patrimoine à transmettre (Tourrand *et al.*, 2007). Jusque dans les années 90, les fronts pionniers amazoniens, notamment le Sud du Pará, ont été le théâtre de violents conflits fonciers opposant différents groupes sociaux se disputant la terre (Ianni, 1978 ; Schmink & Wood, 2012). Dans ce contexte, l'implantation de pâturage après défriche et brûlis de la forêt constituait la solution la plus efficace, la moins coûteuse et la moins pénible pour délimiter sa propriété en peu de temps et éviter les risques d'invasion dans la forêt (Veiga *et al.*, 2004). D'après Bowman *et al.* (2012), la spéculation foncière est même un déterminant majeur de la rentabilité de l'élevage extensif.

4) Conditions agroécologiques : Les facteurs climatiques, édaphiques et biologiques sont favorables à l'élevage bovin. Le climat tropical humide avec des conditions de précipitation, température et radiation élevées assure une production fourragère importante sur l'année, comparé à d'autres régions du Brésil plus sèches (Nordeste) ou plus froides (Sud). L'implantation de prairies permet également de valoriser des sols acides et peu fertiles contrairement aux cultures annuelles et pérennes qui sont beaucoup plus exigeantes,

notamment en termes d'herbicides après la première culture. Enfin, il existe relativement peu de graves risques parasitaires.

5) Efficacité des systèmes techniques : Les systèmes d'élevage allient troupeau de zébu de race *Nelore* (Figure 1-2) et le pâturage de graminées exotiques d'origine africaine, principalement du genre *Brachiaria*[1]. Agressives elles empêchent la repousse de recrus forestiers (Navegantes *et al.*, 2012a)Cette combinaison assure des niveaux de productivité raisonnables, de 0,8 à 1 UA/ha[2], avec un investissement minimum. De plus, ils sont facilement adoptables par tous.

6) Flexibilité et productivité du travail : L'élevage extensif se caractérise par une très grande flexibilité, tant au niveau de la conduite du pâturage que du troupeau. En cas de manque de ressources financières ou de main d'œuvre, il est ainsi possible de reporter certaines interventions telles que la fertilisation ou le désherbage des prairies sans que cela n'ait un impact majeur sur la productivité contrairement aux cultures annuelles. De par leur rusticité, les troupeaux zébu possèdent une forte tolérance aux maladies et nécessitent relativement peu de soins. De plus, ces systèmes demandent peu de main d'œuvre et de qualification. C'est un avantage notable sur les territoires pionniers où les ressources humaines sont limitées.

7) Tradition et expérience : Une partie des colons (grands et petits) est issue de régions traditionnelles d'élevage et a donc migré avec ce savoir-faire. Les agriculteurs familiaux ont aussi pu acquérir de l'expérience en étant salariés sur des exploitations d'élevage.

8) Opportunités offertes par la filière laitière : L'élevage laitier est aussi attractif pour les éleveurs familiaux car il permet de satisfaire l'autoconsommation de la famille et procurer une rente régulière. Dans les années 90, l'implantation de laiteries et le développement des réseaux de collecte ont favorisé l'essor de cette production.

9) Prestige social : La constitution d'un troupeau bovin est aussi le fruit d'un projet influencé par des facteurs sociaux-culturels. Dans la société rurale brésilienne, le mythe du *fazendeiro* est bien présent et représente le symbole d'une réussite sociale (Poccard-Chapuis, 2004).

[1] La thèse s'intéresse aux systèmes fourragers à base de prairies cultivées. Mais en Amazonie Légale, on trouve aussi des prairies naturelles dans les *várzeas*, plaines d'inondation qui s'étendent du Bas-Amazone à l'île de Marajó (terres d'élevage depuis plusieurs décennies, voire un à deux siècles), et sur les zones de *terra firme* dans les zones de savanes du *Cerrados* (notamment dans le Roraima, le Sud du Pará, le Tocantins).
[2] 1 UA correspond à 450 kg de poids vif

Figure 1-2 : L'élevage bovin extensif, un système technique efficace sur les fronts pionniers.

La photo 1 (Redenção, août 2015) illustre la faculté des bovins à se déplacer et donc à atténuer les contraintes de transport sur les fronts pionniers. La photo 2 (Paragominas, Février 2014) montre le couple technique qui a fait le succès de l'élevage extensif en Amazonie : un troupeau de zébu de race *Nelore* pâturant une graminée exotique d'origine africaine (Crédits photos : Sophie Plassin).

.

En l'espace de quelques décennies, l'élevage est devenu une composante incontournable du développement régional de l'Amazonie (Tourrand *et al.*, 2004). Alors que d'autres activités telles que le caoutchouc, l'or, ou le bois, ont suivi un cycle de type « *boom and bust* » marqué par une phase d'expansion puis de récession suite à un épuisement des ressources, l'élevage s'est imposé et a résisté aux différentes crises qui l'ont touché, telles que la dégradation des pâturages (1.1.2), l'instabilité économique du début des années 90, et les nouvelles exigences sanitaires qui ont empêché l'Amazonie d'accéder aux marchés du Sudeste et internationaux dans les années 2000 dues à la présence de fièvre aphteuse (Piketty *et al.*, 2015b). La capacité de mobilisation et d'innovation des pionniers, l'organisation et la structuration des filières ont joué un rôle déterminant pour le maintien de cette activité (Poccard-Chapuis, 2004).

1.1.2 Conséquences environnementales des pratiques d'élevage extensives

1.1.2.1 Occupation de l'espace et relation entre élevage et déforestation

S'étendant sur une surface de près de 8 millions km², la forêt amazonienne constitue la plus vaste surface rémanente de forêts tropicales mondiales. Avec 5,2 millions km², le Brésil abrite près de 65% du biome amazonien et représente 39% de la surface de forêt tropicale mondiale (FAO & ITTO, 2011). Toutefois, de la fin des années 90 et au début des années 2000, le pays a enregistré l'un des taux de déforestation les plus élevés (plus de 19 000 km² par an entre 1996 et 2006) et a été classé comme le plus gros contributeur à la déforestation des forêts tropicales mondiales (Hansen *et al.*, 2008). En 2016, d'après les données du PRODES (Projet d'observation de la déforestation en Amazonie légale par images satellites), l'Amazonie brésilienne a perdu une surface cumulée de 777 171 km² de forêt primaire par rapport à sa surface originelle (INPE, 2016). Ces déforestations se distribuent principalement selon un « arc de déforestation » qui enserre l'Amazonie par l'est et le sud (Figure 1-3). Trois Etats, le

Pará, le Mato Grosso et le Rondônia somment plus de 80% des déforestations cumulées (34%, 33,5% et 14% respectivement).

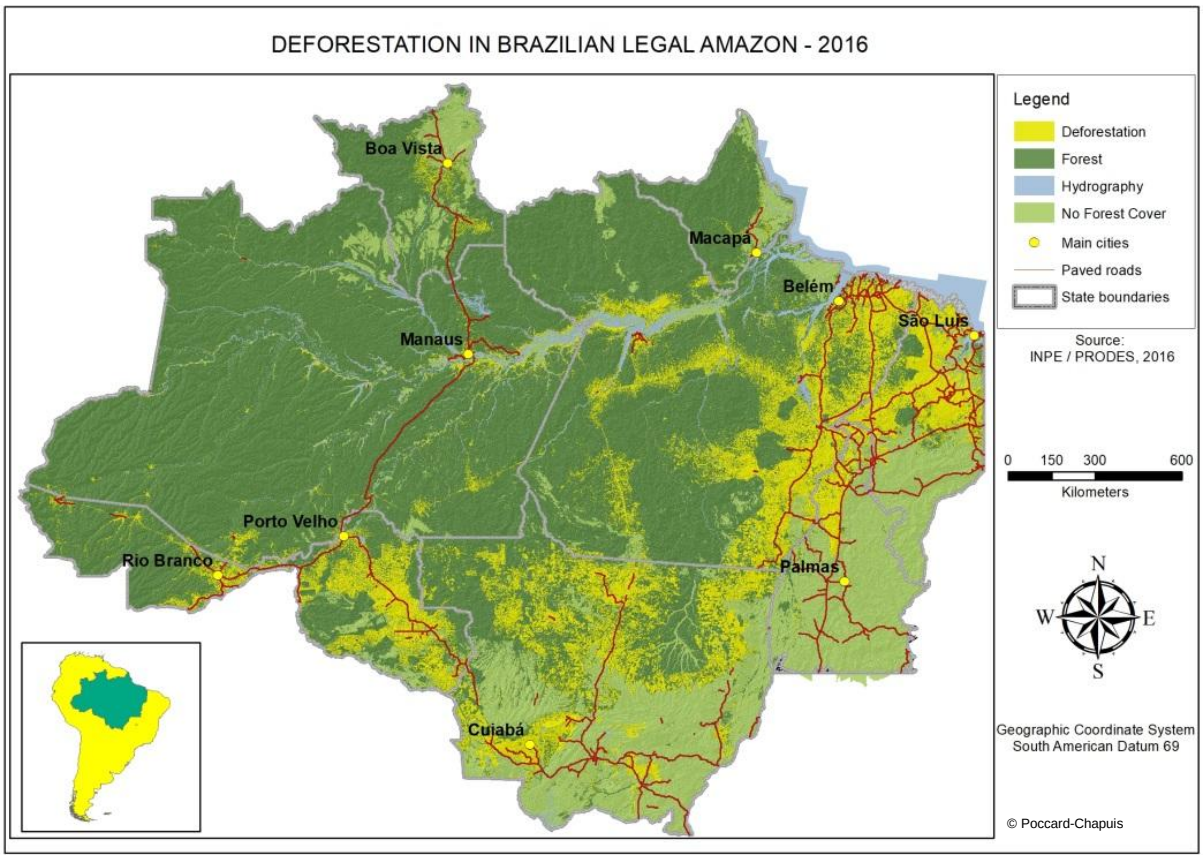


Figure 1-3 : Localisation des déforestations cumulées jusqu'en 2016 en Amazonie Légale.Source : Carte réalisée par R. Poccard-Chapuis avec les données PRODES (INPE, 2016)

Bien que les facteurs à l'origine de la déforestation sont multiples et souvent reliés, l'élevage bovin est considéré comme l'une des principales causes directes (Walker *et al.*, 2000 ; Mertens *et al.*, 2002 ; Margulis, 2004 ; Pacheco & Poccard-Chapuis, 2012). D'après les estimations du projet Terraclass (INPE & EMBRAPA, 2012), 59% des surfaces défrichées sont occupées par des prairies (442 400 km²) et 23% par des forêts secondaires, dont une large partie est issue de la dégradation des pâturages (172 190 km²). L'agriculture et la sylviculture n'occupent que 6% et 0,4% des surfaces défrichées mais ces activités ont connu un fort essor ces dernières années.

En Amazonie brésilienne, « les systèmes d'élevage peuvent être considérés comme révélateurs et organisateurs des espaces » (Caron & Hubert, 2000). En effet, l'expansion de l'élevage et dans une moindre mesure de l'agriculture a créé des mosaïques paysagères complexes associant des usages de sol agricole généralement mono-spécifiques (pâturage, cultures annuelles ou pérennes), et des fragments forestiers primaires et secondaires, de forme et de taille variables, plus ou moins morcelés, et avec des niveaux de dégradation variant significativement en fonction des perturbations passées (feu, exploitation forestière) (Tritsch *et al.*, 2016 ; Bourgoin *et al.*, 2018). La configuration de ces paysages diffère selon le type

d'acteurs qui les gèrent (grande propriété d'élevage ou de grains, exploitation familiale, exploitant forestier), le type de colonisation (spontanée ou planifiée) et la phase de transformation du front pionnier (avant, centre ou arrière) (Laques, 2003 ; Poccard-Chapuis, 2004 ; Dubreuil *et al.*, 2008 ; Oszwald *et al.*, 2011). L'ordre d'arrivée de ces acteurs a aussi fortement influencé le type de fragmentation du massif forestier (Arima *et al.*, 2015).

1.1.2.2 Dégradation des pâturages

Le processus de dégradation des pâturages concerne de vastes surfaces en Amazonie. D'après les données du projet TerraClass, près de 9,7 millions d'hectares seraient dégradés[1] en Amazonie légale, soit 22% de la surface en pâturage (INPE & EMBRAPA, 2012). Cette estimation est très proche des mesures réalisées par Aguiar *et al.* (2017) qui trouvent, sur la base de 262 observations, que 22,5% des pâturages seraient dégradés. Cette évaluation de l'ampleur du processus de dégradation n'inclut pas les 17,22 millions d'hectares de régénération forestière dont une large partie est aussi issue du processus de dégradation des pâturages (Fearnside, 1996 ; Müller *et al.*, 2004).

Dias-Filho (2011) distingue deux types de processus de dégradation des pâturages tropicaux. La dégradation biologique (ou écologique) correspond à une diminution de la capacité productive des sols aboutissant à une perte de vigueur des plantes fourragères, à la substitution du pâturage par des plantes peu exigeantes, et même à la mise à nu du sol. La dégradation écologique peut aussi déboucher sur la formation de termitière, la compaction et l'érosion des sols (Boddey *et al.*, 2004 ; de Oliveira *et al.*, 2004). La dégradation agronomique se caractérise par un changement de composition botanique des prairies et le développement de plantes invasives non appétées de type pionnière (Figure 1-4). Quel que soit le type de dégradation, la production fourragère et la capacité de charge des prairies décroissent.

Figure 1-4 : Différents types de dégradation (agronomique et biologique)

Sur la photo 1, nous distinguons quelques touffes de graminées fourragères encore vertes mais en perte de vigueur et des plantes invasives arbustives. Sur la photo 2, la prairie se caractérise par une proportion importante de sol nu et le développement d'une plante invasive peu exigeante (Crédits photos : Sophie Plassin).

[1] Les pâturages dégradés incluent pâturage sale (*pasto sujo*), régénérations (*regeneração com pasto*) et pâturage avec du sol nu (*pasto com solo exposto*).

Les facteurs conduisant à la dégradation des pâturages peuvent être dus aux conditions du milieu naturel et aux actions anthropiques (Aguiar *et al.*, 2017). Les causes naturelles incluent la présence de banques de semences riches en espèces forestières (Nepstad *et al.*, 1996 ; Miranda *et al.*, 2009), les attaques de parasites (insectes ou champignon) et les conditions climatiques (sécheresse) (Dias-Filho, 2011). Les facteurs anthropiques sont surtout liés à des pratiques extensives de gestion tant au moment de l'implantation des prairies, de leur entretien que de la conduite des bovins au pâturage (Veiga & Tourrand, 2001 ; Dias-Filho, 2011 ; Navegantes, 2011).

Concernant l'implantation des prairies, le choix de la parcelle est très important car des conditions topographiques, édaphiques et de drainage inadaptés (pente supérieure à 30% et sols très sableux ou mal drainé) peuvent être préjudiciables à la croissance du fourrage (Veiga & Tourrand, 2001). Or au moment de la colonisation, les stratégies d'occupation du sol, guidées par l'appropriation de foncier, correspondaient à des déforestations systématiques sans tenir compte des caractéristiques de relief, de sol et de drainage (Poccard-Chapuis *et al.*, 2014). La formation dense d'un couvert fourrager peut aussi être empêchée par une préparation sommaire du sol (sans retrait des souches, des racines, des troncs par manque d'équipement ou de main d'œuvre) et un semis de mauvaise qualité (faible densité de semis, semences avec un faible taux de germination et mal triées) (Veiga & Tourrand, 2001).

Le choix des espèces fourragères est aussi un point clé car certaines graminées fourragères sont plus sensibles au processus de dégradation que d'autres (Mitja & Miranda, 2010). Dans les années 70, dans un contexte où la disponibilité en semences et l'accès au marché étaient limités, la plupart des pâturages ont été ensemencés avec le capim colonião (*Panicum maximum* cv. Colonião), une espèce à haute valeur nutritive. Son port érigé en touffe et son exigence en éléments minéraux se sont cependant montrés incompatibles avec la conduite extensive des prairies et ont débouché sur un important processus de dégradation des pâturages et de régénération forestière. A la fin des années 70, une nouvelle alternative est testée, le quicuio-da amazônia (*Brachiaria humidicola*). Bien qu'elle présente une moins bonne valeur nutritive que le colonião, cette graminée au port prostré a une forte capacité de couvrir le sol (multiplication végétative par rhizomes et depuis les stolons et nœuds des tiges) et de dominer les adventices et recrus forestiers. Toutefois, son développement a été freiné du fait de sa sensibilité à la cigarrinha-das-pastagens (*Deois incompleta*). Au milieu des années 80, l'Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) sélectionne une autre graminée originaire d'Afrique, le braquiarão (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu). Cette graminée présente à la fois les avantages du genre *Brachiaria* (rusticité, vigueur au départ et croissance rapide, bonne capacité de couverture du sol et faculté à concurrencer les adventices) tout en présentant une valeur nutritive intéressante (bien qu'inférieure au colonião) et une meilleure tolérance à la cigarrinha que le quicuio. Fort de ses avantages, le braquiarão aurait occupé environ 90% des surfaces de prairies cultivées amazoniennes (Veiga & Tourrand, 2001 ; Piketty *et al.*, 2015b). Mais à partir du milieu des années 90, la recherche d'une amélioration des performances et la multiplication des cas de mort subite du braquiarão, causée par certains

champignons du sol dans des conditions particulières d'humidité de sol et de conduite (Teixeira *et al.,* 2000), ont conduit les éleveurs à se diversifier. Les éleveurs se sont tournés vers de nouveaux cultivars fourragers du genre *Panicum maximum* : le mombaça, le tanzânia et le tobiatã. Ces espèces fourragères peuvent être cultivées en monoculture ou en association avec du braquiarão. Elles assurent une production de matière sèche et un niveau de digestibilité satisfaisants. Néanmoins, leur niveau d'exigence en fertilité implique une gestion plus intensive que les graminées de genre *Brachiaria*, avec notamment l'application de fertilisants (Veiga & Tourrand, 2001).

Un autre facteur de dégradation des pâturages est lié à une conduite inadaptée des bovins au pâturage. Un temps de repos insuffisant et une pression de pâturage trop forte par rapport au potentiel des prairies des systèmes extensifs peuvent affecter la vigueur du fourrage et générer du surpâturage. De plus, le déficit de fertilisation périodique et l'usage excessif du feu pour nettoyer les pâturages peuvent amplifier le processus de dégradation.

Des études ont aussi cherché à comprendre comment évoluent les propriétés physiques et chimiques des sols après conversion par abattis-brûlis de la forêt en pâturage et si cela peut expliquer le processus de dégradation des pâturages. En Amazonie orientale, une large partie du bassin est majoritairement occupée par des sols ferralitiques (encore appelés Oxisols selon la classification de l'USDA ou Latossolos selon la classification de l'Embrapa) (Quesada *et al.*, 2011). Ces sols typiques des milieux tropicaux humides présentent de bonnes conditions physiques : profonds, bien drainés et dotés d'une structure finement grumeleuse. En revanche, les sols ferralitiques sont fortement altérés, pauvres chimiquement, et acides. Ils présentent une faible capacité d'échange cationique (CEC), une forte teneur en oxydes d'aluminium ou de fer et une forte capacité d'adsorption (rétention) du phosphore (IUSS Working Group WRB, 2015). Les études menées par Müller *et al.* (2004) ont montré que l'évolution des caractéristiques chimiques du sol semble ne pas avoir d'effet direct sur le processus de dégradation des prairies. Grâce au pouvoir alcalinisant des cendres, les caractéristiques chimiques des sols s'améliorent après brûlis de la forêt. Le pH devient moins acide, la somme des bases et le taux de saturation deviennent plus élevés (Grimaldi *et al.*, 2014). De plus, les teneurs en carbone organique et azote total des sols sous prairies restent similaires à celles des sols sous forêts et ce quel que soit leur niveau de dégradation. Seule la quantité de phosphore extractible diminue sous prairie mais il n'existe pas de différence significative entre pâturages propres et dégradés. En revanche, la densité apparente des sols augmente dans les horizons superficiels sous pâturages dégradés. Les sols pâturés peuvent se compacter en cas de piétinement du troupeau, d'exposition aux précipitations et de l'appauvrissement de la macrofaune du sol (lombrics, fourmis et termites) (Mathieu *et al.*, 2009).

La dégradation des pâturages est une problématique importante pour la durabilité de la production bovine en Amazonie. D'une part, ces pâturages dégradés ne sont pas efficients dans l'usage des ressources naturelles. D'autre part, le processus de dégradation pénalise les performances fourragères. D'après Strassburg *et al.* (2014), le niveau de productivité des

pâturages brésiliens cultivés n'atteint que 32 à 34% de leur potentiel. Aussi pour compenser cette perte de productivité, l'une des stratégies généralement mobilisée par les éleveurs a consisté à convertir de nouvelles surfaces forestières en pâturage. Les prairies dégradées sont abandonnées et sont éventuellement remises en production après brûlis des régénérations forestières (Poccard-Chapuis, 2004).

1.1.2.3 Impacts sur les services écosystémiques

L'Amazonie présente des conditions climatiques, pédologiques et morphologiques favorables à une forte production de biomasse fourragère. Pourtant, les systèmes d'élevage extensifs, faiblement productifs, ne mobilisent pas suffisamment ces processus écologiques (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b). De plus, la conversion de vastes surfaces d'écosystèmes naturels en espaces cultivés et le changement de structure des paysages peuvent affecter la production de services écosystémiques à l'échelle locale, régionale et globale, tels que la biodiversité, le stockage de carbone, le cycle de l'eau et la conservation des sols (Encadré 1-2).

Encadré 1-2 : Services Ecosystémiques

D'après le Millennium Ecosystem Assessment (2005), il s'agit des biens et services rendus par les écosystèmes et qui peuvent affecter directement ou indirectement les activités et le bien-être des humains. Le Millennium Ecosystem Assessment distinguent 4 types de services :

- **Services d'approvisionnement** : ensemble des biens issus de la production des écosystèmes (e.g., production alimentaire, fibres végétales, eau douce...).
- **Services de régulation** : ensemble des services régulant des phénomènes naturels (e.g., la purification de l'eau, la pollinisation, le contrôle de l'érosion des sols)
- **Services de support** : ensemble des services nécessaires au fonctionnement des écosystèmes (e.g., production primaire, formation des sols, photosynthèse, cycle biogéochimique).
- **Services culturels** : ensemble des bénéfices non matériels porteurs de valeurs récréatives, et spirituelles (loisirs en nature, écotourisme, patrimoine).

Il existe aussi des dis-services écosystémiques qui peuvent impacter négativement les activités et le bien-être des êtres humains. Dans les systèmes de production agricole, il s'agit par exemple du développement de bio-agresseurs, des adventices, etc. (Zhang *et al.*, 2007).

Zhang *et al.* (2007) ont ainsi distingué quatre échelles pertinentes pour la gestion des services et dis-services écosystémiques : la parcelle agricole, l'exploitation agricole, le paysage (qu'ils considèrent comme une unité spatiale supérieure à l'exploitation agricole et incluant des éléments naturels, semi-naturels, cultivés, urbanisés sur un espace continu et large, mais inférieure à celle d'une région) et la région/globe.

La forêt amazonienne constitue un « *hotspot* » de biodiversité dans le monde, et abrite au moins plus de 40 000 espèces de plantes terrestres, 427 mammifères, 1 294 oiseaux, 378 reptiles, 427 amphibiens et autour de 3 000 poissons (Silva *et al.*, 2005). Or, des études

menées dans des paysages anthropisés d'Amazonie orientale ont montré que la réduction des habitats forestiers, leur fragmentation et leur dégradation appauvrissent la biodiversité de cet écosystème naturel (Barlow *et al.*, 2016), notamment la biodiversité végétale, la richesse spécifique aviaire (Moura *et al.*, 2013), en mammifères (Lees & Peres, 2008) et la macrofaune du sol (Marichal *et al.*, 2014). Les changements d'usage des sols touchent aussi négativement la biote aquatique des écosystèmes d'eau douce du fait d'un changement des conditions d'habitat : augmentation substantielle de la température des cours d'eau suite à l'élimination de l'ombrage procuré par les forêts galeries et la conversion des zones de forêt en amont, élargissement et réduction de la profondeur du cours d'eau, réduction du volume de débris ligneux (Peres *et al.*, 2010 ; Castello & Macedo, 2016 ; Leal *et al.*, 2016).

Stockant environ 120 gigatonnes de carbone dans sa biomasse épigée (Malhi *et al.*, 2006), la forêt amazonienne peut accentuer ou atténuer les effets du réchauffement climatique. Dans les années 90, les émissions de CO_2 issues des déforestations étaient équivalentes à 0,5 gigatonne par an (de 0,3 à 1,1 selon les méthodologies et les données utilisées) (Ramankutty *et al.*, 2007). Par ailleurs, les forêts dégradées par le feu et celles gérées par l'exploitation forestière stockent en moyenne 40% de CO_2 en moins dans leur biomasse épigée que les forêts non perturbées (Berenguer *et al.*, 2014). Mais, selon Aguiar *et al.* (2016), l'Amazonie pourrait devenir un puit de CO_2 et atténuer les effets du changement climatique grâce à une réduction du taux de déforestation et de la dégradation forestière (autour de 1 000 km²/an), et à la préservation des forêts secondaires.

La déforestation a aussi un impact majeur sur les cycles de l'eau local, régional et global. Au niveau local et régional, après substitution de l'écosystème forestier naturel par des agrosystèmes tels que le pâturage ou les cultures, la capacité d'infiltration des sols diminue (Grimaldi *et al.*, 2014). L'eau de pluie a tendance à ruisseler vers les rivières au lieu de s'infiltrer et recharger la nappe phréatique. Sous les forêts primaires au contraire, l'activité biologique est très intense. En décomposant la matière organique, la macrofaune du sol améliore la macroporosité du sol favorable à l'infiltration de l'eau de pluie (Barros *et al.*, 2001). Cette eau, absorbée par les profondes racines du sol, est retransmise à l'atmosphère par évapotranspiration. A l'échelle du bassin amazonien, 25 à 50% des précipitations seraient générées par le recyclage de la vapeur d'eau issue de l'évapotranspiration de la végétation (Eltahir & Bras, 1994 ; Costa & Foley, 1999), le reste étant alimenté par des masses d'air humides atlantiques (Davidson *et al.*, 2012). Les pertes de couvertures forestières pourraient donc affecter les régimes de précipitation et intensifier les épisodes de sécheresse régionalement (Zemp *et al.*, 2017), ainsi que dans la région subtropicale du continent sud-américain (Arraut *et al.*, 2012).

Pour finir, comme cela a été souligné précédemment, les stratégies d'occupation de l'espace au moment de la colonisation visaient la mise en valeur des terres, sans nécessairement considérer les caractéristiques bio-physiques du paysage (relief, type de sol et humidité) (Poccard-Chapuis *et al.*, 2014). Cela a débouché sur l'implantation de pâturages extensifs par

abattis-brûlis sur des zones fragiles, telles que les fortes pentes, les bordures de cours d'eau ou encore les zones marécageuses, et ce bien qu'elles soient protégées par le code forestier brésilien. Ces changements d'usages des sols ont divers impacts à l'échelle des paysages : érosion des sols, réduction de la stabilité des berges, envasement et sédimentation des cours d'eau, altération de la qualité des cours d'eau (notamment du fait du transfert de solutés par ruissellement et de la réduction du pouvoir dénitrifiant des zones ripariennes humides) (Williams *et al.*, 1997 ; Castello & Macedo, 2016 ; Leal *et al.*, 2016).

1.2 La transition agraire : nouveau défi pour les systèmes d'élevage bovins amazoniens

Après quarante ans de déforestation continue, l'Amazonie brésilienne aborde aujourd'hui une phase de transition agraire, marquée par l'arrêt de la déforestation ou « déforestation zéro ». Un ensemble de politiques publiques et privées est la principale cause de ce renversement (détaillé dans 1.2.1). Gérant environ 80% de la SAU amazonienne dont plus de 60 millions d'hectares de pâturages, les éleveurs sont des acteurs incontournables de cette transition et doivent s'adapter (1.2.2).

1.2.1 Initiatives publiques et privées vers une « déforestation zéro »

En réponse à une combinaison de mesures coercitives définies par le gouvernement fédéral, d'évolutions des conditions de marché et de l'engagement des filières de soja et de la viande bovine (Pacheco & Poccard-Chapuis, 2012 ; Schwartzman *et al.*, 2012 ; Arima *et al.*, 2014 ; Nepstad *et al.*, 2014), le taux de déforestation annuel en Amazonie légale est passé d'une moyenne de 19.500 km² sur la période 1996-2005 à une moyenne de 6 000 km² sur la période 2009-2016, soit une baisse de 70% (Figure 1-5) (INPE, 2016). L'élevage qui occupe une large proportion des surfaces déforestées a constitué la cible privilégiée de ces politiques. Nous détaillons dans les paragraphes suivants ces différentes initiatives publiques et privées.

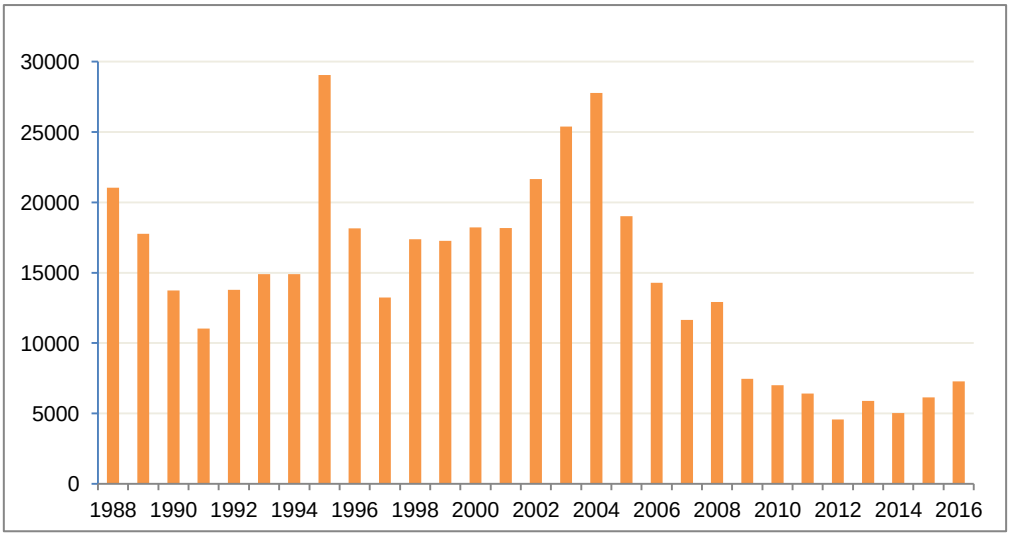


Figure 1-5 : Evolution du taux de déforestation annuel en Amazonie légale entre 1988 et 2016. Source : INPE (2016)

1.2.1.1 Politiques publiques de prévention et répression

En 2004, en réponse à l'enregistrement d'un pic de déforestation de plus de 27 000 km², le Ministère de l'Environnement a lancé le PPCDAm (Plan de Prévention et d'Action contre la Déforestation en Amazonie légale). Ce plan articule les actions de 14 ministères avec celles des Etats, des communes et d'autres organisations de la société civile autour de 4 axes : la planification de l'aménagement foncier et territorial, le suivi et le contrôle des usages des sols, la promotion de pratiques durables et plus récemment la création d'instruments économiques et normatifs (Annexe 1). Le PPCDAm en est aujourd'hui dans sa quatrième phase (2016-2020) (MMA, 2016b).

Le PPCDAm a consolidé les systèmes de détection des déforestations par télédétection. Depuis 1988, l'INPE (Institut national de recherches spatiales brésilien) assure le suivi annuel des déforestations à blanc en Amazonie brésilienne, à travers l'analyse d'images satellites Landsat. Ce système, le PRODES, pourvoit les données officielles de référence utilisées par les pouvoirs publics (Communes, États Fédérés, État fédéral) pour comptabiliser la déforestation annuelle à une résolution spatiale de 30 mètres. Avec le PPCDAm, naît un nouveau système, le DETER (Détection de la Déforestation en Temps Réel) qui est capable de détecter en temps réel toute coupe rase de forêt sur une surface supérieure à 25 ha. Le DETER analyse des images bihebdomadaires MODIS d'une résolution spatiale de 250 mètres (INPE, 2008), et émet des cartes d'alerte auprès de l'IBAMA (Institut National de l'Environnement et des Ressources Naturelles Renouvelables), chargé des contrôles sur le terrain (Poccard-Chapuis & Thales, 2011). Le système DETER est en cours d'amélioration afin de garantir un accès à des images satellites de plus haute résolution spatiale et détecter des zones déforestées sous nuage (MMA, 2016b).

Le contrôle des filières bois et bovines est également renforcé fin 2007. Un décret présidentiel (n°6.321 du 21 décembre 2007) établit une série d'actions de prévention et de contrôle de la déforestation parmi lesquelles l'obligation pour le MMA (Ministère de l'Environnement brésilien) d'établir annuellement une liste de « municipalités amazoniennes prioritaires » ayant de forts taux de déforestation[1] (Brasil, 2007). 36 municipalités intègrent la première « liste noire » éditée en janvier 2008 (Assuncao *et al.*, 2015). Dans ces communes, toutes les moyennes et grandes exploitations[2] voient leur titre foncier suspendu et sont contraintes de recadastrer leur propriété (Viana *et al.*, 2016). Ce décret rend aussi obligatoire la mise sous embargo des exploitations agricoles où sont observées des déforestations illégales avec interdiction pour ses exploitations de commercialiser ou/et de transformer leurs produits (Arima *et al.*, 2014). A l'aval, les industriels, commerçants ou distributeurs de produits illégaux sont aussi tenus coresponsables du crime commis (Poccard-Chapuis & Thales, 2011). De vastes opérations « coup de poing » sont également menées conjointement par l'IBAMA

[1] Les trois critères sont : la surface totale déforestée, la surface déforestée ces trois dernières années et l'augmentation du taux de déforestation ces 5 dernières années.
[2] Plus de 4 modules fiscaux.

et la police fédérale. L'opération Arc de Feu (*Arco de Fogo*) confisque les biens responsables de déforestation illégale (bovins, bois) et sanctionnent lourdement tous les maillons de la chaîne : producteurs, scieries, transporteurs... L'opération Bœuf Pirate (*Boi Pirata*) saisit les bovins élevés illégalement dans des aires protégées. Ces opérations sont très médiatisées, à l'instar de la saisie des 3.000 têtes de bœufs dans la station écologique de la *Terra do Meio* (MMA, 2008). Tollefson (2015) décrit ces opérations comme la « Lutte pour l'Amazonie » (*Battle for the Amazon*).

A partir du 1er juillet 2008, l'accès aux crédits agricoles subventionnés par le gouvernement fédéral devient aussi bloqué pour toutes les exploitations ne respectant pas les règles environnementales. En effet, la résolution n°3 545 de la Banque centrale du Brésil (*Conselho Monetario Nacional*, CMN) impose aux principales banques émettrices de ces crédits (*Banco do Brasil*, *Banco da Amazônia* S.A ou BASA) d'en conditionner l'octroi à la présentation du titre foncier (*Certificado de Cadastro de Imóvel Rural*, CCIR), et de preuves de légalité environnementale (absence d'embargos...). D'après Assunção *et al.* (2013), cette résolution aurait entraîné une baisse significative des crédits ruraux octroyés dans la région de l'ordre de 1,4 milliard de dollars entre 2008 et 2011. Les éleveurs bovins, grands et moyens, ont été les plus touchés par cette politique.

Parallèlement aux mesures de répression, le gouvernement fédéral étend les surfaces d'aires protégées en ciblant les zones de frontières agricoles actives (Schwartzman *et al.*, 2012). Entre 2002 et 2009, la surface croit de 709 000 km² en Amazonie brésilienne, soit une hausse de + 68%. Ces aires qui incluent les réserves strictement protégées, les réserves d'usage durable et de conservation, les terres indigènes et militaires, occupent 1,9 millions de km², soit plus de 45% du biome amazonien au Brésil[1] (Soares-Filho *et al.*, 2010).

Petit à petit, le Brésil fait également de la lutte contre la déforestation sa principale stratégie contre le changement climatique. Sur la scène internationale, le pays s'engage volontairement au cours de la conférence sur le climat de 2009 (COP15) à réduire ses émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) de 36,1% à 38,9% d'ici à 2020, ainsi que le taux de déforestation de 80% (pour atteindre un seuil de 3 900 km²/an) par rapport à la période de référence 1996-2005. Une loi fédérale sur le changement climatique (*Política Nacional sobre Mudança do Clima*, PNMC) est adoptée en décembre 2009 (Brasil, 2009). Le pays propose également un plan d'actions pour réduire les émissions de carbone du secteur agricole. Le Plan ABC

[1] D'après la classification de Soares-Filho *et al.* (2010), les réserves strictement protégées incluent : les stations écologiques (*estação ecológica*, ESEC), les réserves écologiques (reserva *ecológica*, RE), les réserves biologiques (reserva *biológica*, REBIO), les parcs nationaux et d'Etat (*parque nacional*, PARNA et *parque estadual*, PE). Les réserves d'usage durable et de conservation incluent : les réserves d'usage durable (*reserva de uso sustentável*, RDS ou RESEC), les réserves extractivistes (*reserva extrativista*, RESEX), les zones d'intérêt écologique significatif (*área de relevante interesse ecológico*, ARIE), les forêts d'Etat (*floresta estadual*, FLOTA ou FE), les forêts nationales (FLONA), les forêts explorées durablement (*floresta de rendimento sustentado*, FLORSU), et les forêts extractivistes (*floresta extrativista*, FLOREX). En revanche, les aires de protection environnementales (*áreas de proteção ambiental*, APAs) ne sont pas comptabilisées dans cette estimation puisqu'elles ne font pas parties du domaine public.

(*Agricultura Baixo Carbono*) est implémenté et s'articule autour de 6 axes majeurs : i) la récupération de 15 millions d'hectares de pâturages dégradés ; ii) la conversion de 4 millions d'hectares en système ILPF (Intégration Agriculture-Elevage-Forêt) ; iii) l'expansion du semis direct sur 8 millions d'hectares ; iv) la substitution des engrais azotés par usage de la fixation biologique d'azote sur 5,5 millions d'hectares de culture ; v) l'expansion des plantations sylvicoles sur 3 millions d'hectare ; vi) le développement de l'usage de technologies pour le traitement de 4,4 millions de m^3 de déjections animales (MAPA & MDA, 2012).

Pour finir, bien que le Brésil ne soit pas bénéficiaire du Programme ONU-REDD, il a mis en place plusieurs projets pilotes REDD (Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation forestière) depuis 2008 (Galford *et al.*, 2013) et a récemment élaboré une stratégie nationale REDD autour de trois axes : la lutte contre la déforestation, la récupération forestière et le développement durable (MMA, 2016a). Le principe de base du Programme ONU-REDD est qu'une compensation financière, versée par les pays développés, soit octroyée aux pays en voie de développement qui protègent leurs ressources forestières. Dans le cas du Brésil, cette initiative est majoritairement financée à travers le Fonds Amazonie et le Fonds National sur le Changement du Climat. Le pays reçoit également une aide de 50 à 70 millions de dollars de la Banque mondiale à travers le Programme d'Investissement pour la Forêt (FIP) (Aubertin, 2015).

1.2.1.2 Engagement des filières viande bovine et soja

En réponse à des pressions exercées par le gouvernement et des organisations non gouvernementales, les filières de soja et de viande bovine mettent en place une stratégie d'approvisionnement vers des matières premières agricoles exempts de déforestation (Boucher *et al.*, 2014 ; Nepstad *et al.*, 2014 ; Gibbs *et al.*, 2015b). Un premier pacte, le Moratoire du soja, est volontairement signé en 2006 par l'association brésilienne de l'industrie des huiles végétales (ABIOVE) et l'association brésilienne des exportateurs de céréales (ANEC) qui commercialisent une majorité du soja. Ces entreprises signataires s'engagent à ne plus acheter, financer ou commercialiser de soja provenant de surfaces déforestées dans le biome amazonien après juillet 2006 ou issu d'une ferme sous embargo (pour cause de non-respect de la réglementation environnementale ou de travail esclave) (Piketty *et al.*, 2015a).

En 2009, le secteur de la viande suit le pas et met en place deux nouveaux accords. En juillet 2009, le Ministère Public de l'Etat du Pará signe un accord, le « *Tac da Carne* » (Accord de régularisation de conduite), avec les industriels de la viande dans lequel ces derniers s'engagent à suspendre leurs achats auprès d'exploitations déforestant illégalement (Arima *et al.*, 2014 ; Piketty *et al.*, 2017). Révisé et étendu en 2013 à trois autres états d'Amazonie Légale (Amazonas, Mato Grosso et Rondônia), cet accord concernait fin 2013 deux tiers des abattoirs inspectés par les pouvoirs publics fédéraux en Amazonie Légale (Gibbs *et al.*,

2015a). En octobre 2009, un autre accord, le G4 est signé entre Greenpeace et les principaux abattoirs brésiliens (JBS, Mafrig et Minerva) (ibid). Le TAC et le G4 ont plusieurs points communs. Ils obligent les industriels à suspendre leurs achats auprès d'exploitations sous embargos, à exiger de leurs fournisseurs un cadastre environnemental rural (CAR) et une licence environnementale rurale (LAR) (1.2.1.4) ainsi que les limites géo-référencées de la propriété pour vérifier l'historique de déforestation (Boucher *et al.*, 2014 ; Piketty *et al.*, 2017). En conditionnant la vente de bovins à la présentation du CAR et du LAR, ces accords ont incité des changements de pratiques mais des améliorations restaient possibles, en particulier d'élargir le TAC à l'ensemble des abattoirs d'Amazonie Légale et à tous les éleveurs même ceux qui ne vendaient pas directement aux abattoirs (e.g., les naisseurs) ; dans la pratique, des bovins élevés de façon non légale peuvent être vendus à des exploitations conformes aux règles et blanchis avant d'être revendus aux abattoirs signataires (Gibbs *et al.*, 2015a). Afin de généraliser les contrôles aux différents maillons de la filière, y compris lors de vente entre éleveurs, l'Etat du Pará a publié en 2014 un nouveau décret (n°1.052 du 16 mai 2014) qui conditionne l'émission du GTA (Guide de Transport Animal) par l'ADEPARÁ à la présentation du CAR[1] (Pará, 2014a).

1.2.1.3 Un nouveau code forestier en 2012

La législation brésilienne fournit un cadre juridique en matière de protection des forêts natives et de leur exploitation durable. Cette préoccupation est relativement ancienne puisque le premier Code forestier, le décret n°23.793/1934 mis en place en 1934 sous la présidence de Getúlio Vargas, établissait déjà des règles d'exploitation forestière et des peines pour ceux qui les transgressaient. Les propriétaires étaient en particulier obligés de maintenir 25% de la couverture forestière native de l'exploitation (Brasil, 1934). En 1965, ce code forestier est actualisé à travers la loi n°4.771/1965 (Brasil, 1965). Les notions de Réserve Légale (ARL) et d'Aires de Protection Permanente (APP) apparaissent, obligeant les exploitations à maintenir une surface minimum de réserve forestière et à les localiser dans des unités de paysage fragiles (voir plus de détails dans l'Encadré 1-3). APP et ARL constituent aujourd'hui encore les deux piliers des règles environnementales à respecter sur les exploitations agricoles brésiliennes.

[1] La résolution PMV/COGES nº 17 du 11/06/2015 a été votée par le comité directeur du Programme Municipe Vert du Pará (PMV) reportant le délai d'application du décret. La présentation du CAR pour l'émission du GTA est obligatoire depuis le 31 juillet 2015 pour les troupeaux de plus de 1.000 têtes, depuis le 1er février 2016 pour les troupeaux de plus de 500 têtes, depuis le 31 juillet 2016 pour les troupeaux de plus de 100 têtes, et depuis le 1er février 2017 pour les troupeaux de moins de 100 têtes (Pará, 2015c).

Encadré 1-3 : Définition de APP et ARL

Les **APP (Aire de Protection Permanente)** correspondent à des zones naturellement fragiles où une couverture de végétation (native de préférence) doit être maintenue en permanence. Sont concernées : i) les zones présentant une proximité aux ressources hydriques (le long des cours d'eau, autour des sources, des lacs, lagons, retenues collinaires, mangroves, *veredas*, *restingas*…) et (ii) les reliefs (versant de collines, sommets de montagnes, bordures de plateaux tabulaires ou chapadas, forêts situées à plus de 1.800 mètres d'altitude…).

Les APP ont « *une fonction environnementale et sociale » consistant à « préserver les ressources hydriques, le paysage, la stabilité géologique, la biodiversité, les flux génétiques de faune et de flore, la protection du sol et assurer le bien être des populations humaines* » (Loi 12.651 du 25 mai 2012).

La dimension des APP est fonction du type de la zone à protéger, de sa taille et de son intérêt écologique. A titre d'exemple, pour les cours d'eau inférieurs à 10 m de large, les rives doivent être recouvertes de végétation sur 30 m de large au minimum.

L'**ARL (Aire de Réserve Légale)** est une aire localisée à l'intérieur d'une exploitation agricole qui doit être recouverte de forêt. Selon les régions et le type de biome, le pourcentage minimum de cette réserve varie. En Amazonie légale, il s'élève à 80 % en zone forestière, 35 % en zone de « *cerrado* » et 20 % en zone de « campo ». Dans le reste du Brésil, ce pourcentage est de 20 %.

Contrairement aux APP, une exploitation sélective est possible suivant un plan de gestion forestière durable. L'exploitant peut y réaliser des plantations, y extraire du bois et des produits forestiers non ligneux (fruits, semences, plantes médicinales...). En revanche, la coupe rase de végétation native est interdite à moins qu'elle n'ait fait l'objet d'une autorisation et qu'elle donne lieu à une recomposition ou compensation forestière. Des détails supplémentaires sont disponibles en Annexe 2.

Des années 80 aux années 2000, de nouvelles lois[1] se sont juxtaposées, durcissant toujours un peu plus les règles environnementales brésiliennes. Nous pouvons notamment citer l'apparition de la notion de « crimes environnementaux »[2], pour ceux qui ne respectent pas les règles de préservation du milieu ou encore l'obligation de passer de 50 à 80 % de réserve forestière en Amazonie Légale[3]. Même si les objectifs visés sont tout à fait légitimes, ces outils n'étaient pas adaptés aux réalités agraires des fronts pionniers amazoniens (Plassin, 2009). Face à cette situation, la profession agricole s'est largement mobilisée, plaidant pour un assouplissement du code. Après 4 années intenses de débats législatifs, un nouveau Code forestier, la loi n°12.651/2012 a été voté en 2012 (Brasil, 2012a) puis des ajustements dans la

[1] Il s'agit des lois n°6.938/81 (Brasil, 1981), n°7.754/89 (Brasil, 1989), n°9.393/96 (Brasil, 1996), n°11.428/2006 (Brasil, 2006b).
[2] La notion de crimes environnementaux a été définie dans la loi n°9.605/98 (Brasil, 1998).
[3] Cette obligation a été établie par la mesure provisoire n°2.166-67/2001 (Brasil, 2001).

loi n°12.727/2012 (Brasil, 2012b). Nous résumons ci-après les principales modifications qui peuvent avoir un impact important sur la gestion des paysages et des systèmes d'élevage.

- *Définition de la largeur du cours d'eau* : La dimension des APP à protéger le long des cours d'eau étant délimitée en fonction de la largeur des cours d'eau, les critères retenus pour mesurer les cours d'eau sont essentiels. Dans la version de 1965, la largeur du cours d'eau était mesurée en considérant le niveau le plus haut du cours d'eau[1]. Cette définition posait un problème majeur d'application. Premièrement, il n'était pas explicitement défini ce qu'était le niveau le plus haut. S'agissait-il du lit majeur (inondé seulement en cas de crue) ou du lit mineur (chenal où l'eau s'écoule toute l'année de façon ordinaire) ? Deuxièmement, dans l'hypothèse où l'on considérait le lit majeur, cela pouvait nettement élargir la zone d'APP en particulier dans les zones de plaines où le réseau hydrographique est peu encaissé. Malgré des désaccords entre environnementalistes et profession agricole, la version de 2012 a retenu le lit mineur. Ce critère permet toutefois de mesurer plus facilement la largeur du cours d'eau.

- *Réduction des APP et ARL dans les aires rurales consolidées* : L'un des reproches formulés par la profession agricole à la version de 1965 est que les aménagements dans les exploitations avaient été réalisés sans nécessairement respecter les surfaces d'APP et d'ARL promues en 1965, la législation ayant été jusqu'alors peu appliquée. La version de 2012 propose donc un compromis à travers le concept d'aire rurale consolidée. Il s'agit d'une zone de la propriété rurale présentant une occupation anthropique antérieure au 22 juillet 2008, tels que des bâtiments, des aménagements, ou des activités agro-sylvopastorales[2] (Article 3 de la loi n°12.651 du 25 mai 2012). Ces zones consolidées sont délimitées par le Zonage Ecologique et Economique (ZEE) de chaque Etat brésilien. La date de juillet 2008 correspond au moment où les contrôles de la réglementation environnementale se sont renforcés au Brésil et la législation relative aux APP et ARL a commencé à être appliquée en Amazonie.
Dans les aires rurales consolidées, le Code Forestier de 2012 apporte plus de flexibilité (pour les exploitations familiales en particulier) et offre la possibilité de réduire la surface d'APP et d'ARL :

- Pour les ARL, les exploitants sont autorisés à maintenir une surface de couverture forestière égale à celle présente au 22 juillet 2008 et au minimum de 50%[3]. Si après cette date, les exploitants ont supprimé de nouvelles surfaces de végétation native sans en avoir acquis l'autorisation, ils devront s'engager à recomposer la surface existante en 2008. De même si en 2008 la couverture forestière est inférieure à 50%, ils devront s'engager à recomposer pour atteindre une surface de réserve de 50%. Un assouplissement a toutefois été obtenu pour les exploitations familiales de moins de 4

[1] « seu nível mais alto em faixa marginal »
[2] área rural consolidada: área de imóvel rural com ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008, com edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris, admitida, neste último caso, a adoção do regime de pousio
[3] Deux autres cas autorisent la réduction du pourcentage de réserve légale à 50% : dans les municipes où les unités de conservation et/ou les réserves indigènes occupent plus de 50 % de la surface du municipe et dans les Etats où les unités de conservation et/ou les réserves indigènes occupent plus de 65 % du territoire.

modules fiscaux[1] exemptées d'avoir 50% de forêt mais tenues de maintenir la même surface qu'en 2008.

- Pour les APP, les surfaces varient selon le type et la taille de l'exploitation (Tableau 1-1). Par exemple, dans les exploitations de 1 à 2 modules fiscaux, la largeur des APP peut être réduite à 8 m de large. Les exploitations familiales bénéficient d'un assouplissement additionnel grâce à la définition d'un plafond. Lorsque le pourcentage en APP atteint 10% de la superficie totale des exploitations de moins de 2 modules fiscaux et 20% de la superficie des exploitations de 2 à 4 modules fiscaux, elles sont exemptées de recomposer davantage.

D'après Soares-Filho *et al.* (2014), ces nouvelles règles (changements des dimensions des APP et ARL, inclusion des APP dans le calcul de l'ARL) ont réduit de 58% les surfaces d'APP et d'ARL qui, sous l'ancien code forestier, aurait dû normalement être restaurées.

Tableau 1-1 : Largeur minimum de l'APP à recomposer dans les aires rurales consolidées

Type d'APP	Modules fiscaux	Largeur minimum à recomposer
Rive des cours d'eau (temporaire ou permanent)	0 à 1	5 m
	1 à 2	8 m
	2 à 4	15 m
	Supérieur à 4	De 20 à 100 m selon le PRA (Plan de Régularisation Environnementale)
Source d'eau	Indépendant de la taille	15 m
Lac et étang naturel	0 à 1	5 m
	1 à 2	8 m
	2 à 4	15 m
	Supérieur à 4	30 m
Veredas	0 à 4	30 m
	Supérieur à 30	50 m

- ***Dérogation sur les activités autorisées dans les APP*** : La version de 2012 apporte davantage de flexibilité pour les exploitations familiales dont la durabilité de l'exploitation peut dépendre. Parmi les activités autorisées, l'exploitation agroforestière et la gestion forestière durable à des fins économiques, sociales et environnementales sont possibles à condition de ne pas dénaturer la couverture végétale existante et le rôle de l'APP. Par ailleurs, la plantation de cultures temporaires et saisonnières à cycle court est autorisée sur les berges en période de décrue dès lors que cela n'implique pas de nouvelles suppressions de végétation native et que l'agriculteur met en place des méthodes de production respectueuse de l'environnement.

- ***Emplacement de la réserve Légale*** : Contrairement à la version de 1965, le nouveau code apporte une vision à une échelle plus large que celle de la propriété, puisque la localisation de

[1] La valeur d'un module fiscal (en nombre d'hectares), définie par l'instruction spéciale de l'INCRA n°541 du 26 août 1997 (Brasil, 1997), est variable selon les Etats et les communes. Dans l'Etat du Pará, elle varie de 5-7 ha dans les zones urbanisées (Belém et sa couronne) à 50-75 ha pour les communes plus rurales.

la Réserve Légale même si elle peut être choisie par l'agriculteur, devra être localisée en fonction : (i) du plan de gestion à l'échelle du bassin versant ; (ii) de la ZEE ; (iii) de la formation de couloirs écologiques avec d'autres Réserves Légales, des APP, des Unités de Conservation ou d'autres surfaces légalement protégées ; (iv) des aires de plus grande importance pour la conservation de la biodiversité ; (v) des zones de plus grande fragilité environnementale.

- ***Usage du feu*** : Dans cette nouvelle version du code, le recours au feu reste formellement interdit. Cependant, les exploitations pourront bénéficier d'une dérogation dans les cas suivants : au niveau des localités ou régions dont les spécificités justifient l'emploi du feu pour mener à bien des pratiques agropastorales (cultures sur brûlis) ou forestières, dans les Unités de Conservation en conformité avec le plan de gestion, et dans le cas de pratiques de subsistance exercées par des populations traditionnelles et indigènes.

1.2.1.4 De nouveaux outils de gestion des paysages à l'échelle de l'exploitation : CAR, Passif environnemental, et Régularisation Environnementale

Le Code Forestier de 2012 introduit de nouveaux instruments pour la gestion des paysages : (i) le CAR (Cadastre Environnemental Rural) premier outil spatialisé localisant les zones de réserve forestière et agricole (ii) le passif environnemental qui quantifie les irrégularités des exploitations vis-à-vis des APP et ARL sur la base du CAR ; (iii) le programme de régularisation environnementale qui définit les méthodes à suivre pour régulariser son passif.

Le CAR a été expérimenté dans les Etats du Mato Grosso, puis du Pará en 2008. L'expérience ayant été concluante, le Code Forestier de 2012 rend cet instrument obligatoire sur l'ensemble du territoire brésilien. Le CAR est un cadastre électronique de l'exploitation qui géo-référence les limites de l'exploitation, les surfaces protégées par le Code Forestier (APP et ARL) et les surfaces en production. Ce cadastre permet d'identifier les surfaces d'APP et d'ARL altérées que l'agriculteur doit s'engager à recomposer. En cartographiant l'ensemble des propriétés sur son territoire, le Brésil cherche ainsi à assurer un meilleur contrôle du respect des règles environnementales et notamment de la déforestation. Un CAR provisoire est élaboré par des entreprises d'assistance technique ou bureau d'étude agréés puis est validé (cela devient un CAR définitif) par l'organisme environnemental compétent du Sisnama, le SEMMA (Secrétariat Municipal de l'Environnement) ou le SEMA (Secrétariat de l'Etat de l'Environnement). Dans le cas des exploitations familiales de moins de 4 modules fiscaux, il est de la responsabilité du pouvoir public d'assurer une assistance technique et juridique et la gratuité de l'acte rendant l'élaboration du CAR à la charge du producteur facultative. A partir du moment où l'exploitation dispose du CAR, elle n'a plus l'obligation de procéder à l'enregistrement de la Réserve légale sur l'acte notarié et le registre foncier de l'exploitation. Même s'il ne remplace pas le titre de propriété, le CAR s'est imposé comme un document de référence, apportant un minimum de garantie face aux problèmes de régularisation foncière dans la région. Il est requis dans de nombreuses démarches comme pour accéder au crédit,

s'engager dans un processus de régularisation du passif environnemental, transporter des bovins ou encore commercialiser sa production. C'est aussi un document essentiel pour obtenir le LAR (Licence Environnementale Rurale)[1], une autorisation d'exploiter. Au 20/03/2018, l'Etat du Pará comptait 190.153 CAR et avait cadastré une surface de plus de 41 millions d'hectares, soit 74% de la surface cadastrable de l'Etat (Pará, 2018).

Second instrument créé par la nouvelle réglementation environnementale brésilienne : le passif environnemental. Les exploitations qui ont dégradé ou altéré les APP et/ou ARL sans autorisation et au-delà des dimensions autorisées se voient attribuer un passif environnemental. Pour régulariser ce passif environnemental, les exploitations doivent s'engager à isoler les zones altérées et à rétablir les surfaces en APP et ARL en adhérant au Programme de Régularisation Environnementale (PRA) et en signant le TCA (Terme de Compromis Environnemental). Dans le Pará, les méthodes utilisées et les délais octroyés pour la régularisation du passif ont été définies à travers le décret n°1379 du 3 septembre 2015 (Pará, 2015a). Pour les APP, ce délai est de 9 ans. Les méthodes de récupération autorisées sont : la régénération naturelle d'espèces natives (si l'APP possède une capacité naturelle de régénération), la plantation d'espèces natives, la plantation intercalaire d'espèces natives en association avec des espèces exotiques ligneuses (les exotiques ne devant pas dépasser plus de 50 % de la surface). Pour les ARL, le délai est de 20 ans et trois méthodes sont aussi possibles (Figure 1-6) : la régénération naturelle, la recomposition (restauration à travers la plantation d'espèces natives et si besoin exotiques) et la compensation. La compensation est un nouvel outil créé par le code forestier. Il consiste à cadastrer en ARL une surface de réserve équivalente couverte de végétation native, en régénération ou en recomposition, localisée sur une autre exploitation (mais circonscrite dans le biome amazonien). Les exploitants ont notamment trois possibilités : i) cadastrer une surface leur appartenant ou acquise à un tiers ; ii) louer une surface ; iii) acquérir un CRA (Quota de Réserve Environnementale), un nouvel instrument équivalent au crédit carbone qui peut être vendu par des exploitations ayant un excédent de Réserve Légale (primaire, secondaire âgée ou recomposée avec des espèces natives). Ces mesures de compensation ne peuvent pas être utilisées pour viabiliser la conversion de surface forestière en terres agricoles après le 22 juillet 2008. De plus, en cas de compensation de la Réserve Légale hors de l'Etat d'origine, le plan devra privilégier la récupération de surfaces dans des aires identifiées comme prioritaires par l'Union ou les Etats, comme par exemple dans des bassins hydrographiques très déforestés, pour créer des corridors écologiques, conserver de grandes surfaces protégées et conserver des écosystèmes ou espèces menacées (Pará, 2015a).

Les possibilités offertes par le Code Forestier pour régulariser le passif environnemental ont d'importantes implications sur les paysages. En effet, entre la régénération, la recomposition

[1] La licence environnementale rurale est un document émis par la SEMA qui établit les règles, les conditions et les restrictions liées à la mise en place d'une activité agricole ainsi que les mesures de contrôle. Sa durée de validité est de 5 ans. Pour obtenir le LAR, le producteur devra élaborer un projet technique (avec un technicien agréé) et fournir une liste de documents dont un titre de propriété (CCIR).

ou la compensation, les décisions pourront avoir un impact totalement différent sur l'organisation des usages des sols et ce à une échelle territoriale qui dépasse l'exploitation agricole. Ces nouvelles dispositions ont notamment ouvert un débat dans la communauté scientifique autour des organisations de paysage qui serait à privilégier en Amazonie telles que le « land-sparing » ou le « land-sharing » (Green *et al.*, 2005 ; Grau *et al.*, 2013 ; Walker, 2014). Le « land-sparing » privilégie des paysages binaires, qui conservent de larges zones de protection de la nature sans intervention humaine et des espaces agricoles intensifiés avec un haut niveau de production, alors que le « land-sharing » correspond à des paysages intégrés qui incluent la conservation d'habitats naturels, le maintien d'habitats semi-naturels exploités de manière extensive et de zones agricoles qui minimisent les externalités négatives des fertilisants et pesticides.

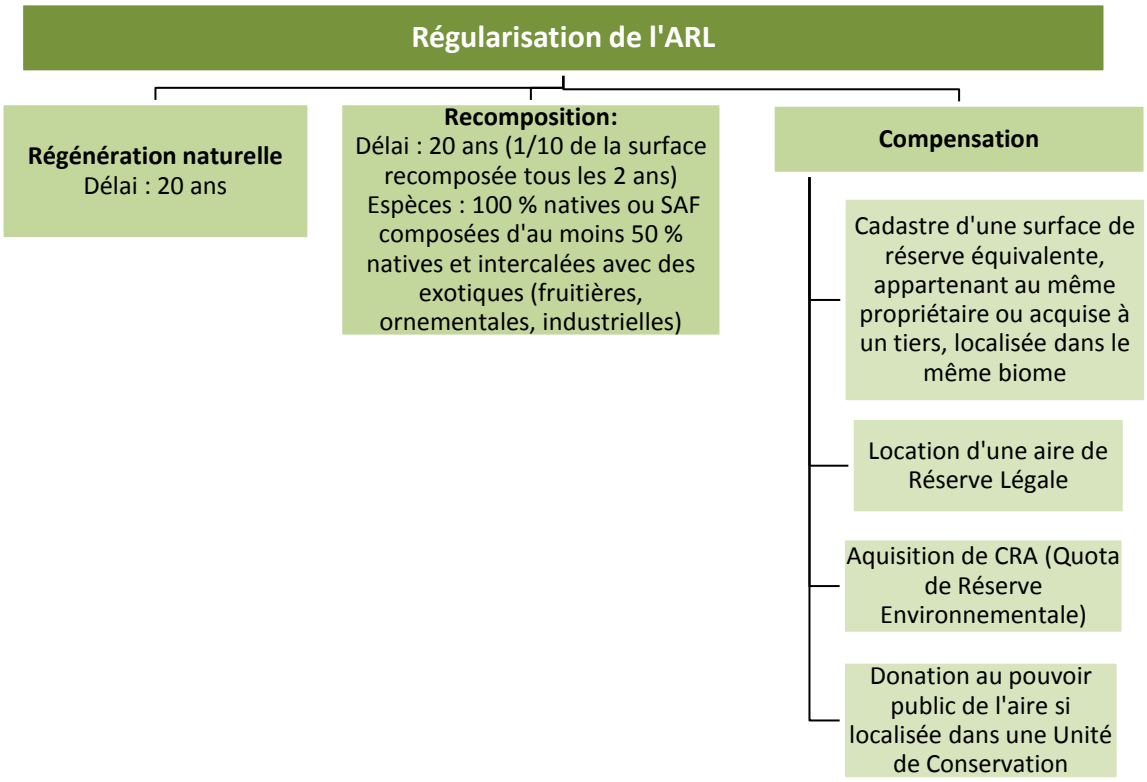


Figure 1-6 : Mesures existantes pour régulariser le passif environnemental dans la Réserve Légale

1.2.1.5 Régulation de la suppression des « juquiras » (forêts secondaires en régénération)

Les régénérations forestières qui couvrent plus de 20% de la SAU amazonienne (INPE & EMBRAPA, 2012) sont devenues une composante importante des paysages d'Amazonie orientale brésilienne. Se pose la question de la gestion de ces forêts secondaires en adéquation avec la législation environnementale. Le code forestier de 2012 apporte peu d'éléments au regard de leur définition ou des pratiques autorisées et interdites. D'après le code, les régénérations forestières peuvent être incorporées dans l'ARL à partir du moment où l'agriculteur s'engage à ne plus réaliser de coupe rase. En revanche, est-il possible pour les

agriculteurs de défricher ces régénérations forestières si elles ne sont pas incluses dans l'ARL et dans les APP ? Le code forestier n'était pas clair à ce sujet.

Pour pallier ce vide réglementaire, le Secrétariat de l'Environnement de l'Etat du Pará (SEMAS) adopte une première instruction normative en 2014 - n°02 du 26 février 2014 (Pará, 2014b), amendée par une seconde en 2015 - n°08 du 28 octobre 2015 (Pará, 2015b) afin d'établir la procédure administrative à suivre en cas de nettoyage ou suppression de végétation secondaire en phase initiale de régénération, localisée hors des APP et ARL. Cette nouvelle réglementation éclaircit également ce qu'est une forêt secondaire en état de régénération initiale. Il s'agit d'une végétation issue d'un processus de succession écologique postérieur à la suppression totale de végétation primaire par des actions anthropiques ou par des causes naturelles. Ce processus doit avoir été initié dans les 5 dernières années, ou il y a moins de 20 ans à condition que l'aire basale[1] totale de la surface à supprimer et que la couverture forestière primaire de la commune[2] soient inférieures à certains seuils (Tableau 1-2). La demande de suppression ou de nettoyage ne pourra être réalisée que sur des aires classées comme déforestées par le système de suivi du PRODES/INPE. Les régénérations forestières âgées de moins de 5 ans doivent faire l'objet d'une demande de déclaration auprès de l'organisme environnemental compétent, alors que les régénérations forestières âgées de 5 à 20 ans doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation. Exceptionnellement, les mosaïques de végétation secondaire contenant des arbres reliquats de végétation primaire pourront être supprimées à condition de demander une autorisation spécifique. Cette instruction normative établit enfin les règles pour le brûlis des résidus ligneux ou forestiers. Techniquement, ceux-ci doivent être amassés en ligne ou tas. Juridiquement, le brûlis doit aussi faire l'objet d'une autorisation à travers la demande de suppression de végétation et du LAR.

[1] L'aire basale est calculée à travers la somme des sections transversales de tous les arbres et palmiers natifs dont le diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m de haut depuis le sol) est supérieur à 10 cm. L'instruction normative fournit une méthode de calcul et d'échantillonnage pour mesurer l'aire basale.

[2] L'estimation du pourcentage de surface en forêt primaire de chaque commune est basée sur les données de l'INPE et devra être régulièrement actualisée par les organismes environnementaux compétents de façon à utiliser le pourcentage de l'année précédente.

Tableau 1-2 : Procédure pour la déclaration de nettoyage ou demande de suppression de la végétation secondaire initiale

Âge régénération	% forêt primaire de la commune	Aire Basale max. (m^2/ha)	Procédure	Documents requis et démarche
Egal ou inférieur à 5 ans			Déclaration de nettoyage auprès de l'organisme environnemental compétent	- CAR - Fichier SIG localisant la surface à nettoyer (hors APP et ARL) - Image satellite prouvant que la régénération est âgée de moins de 5 ans - Exploitation sans embargo - Visite de contrôle : facultative
Entre 5 et 20 ans	[50 ; 100 %]	10	Demande de licence environnementale pour autorisation de suppression de végétation auprès de l'organisme environnemental compétent	- CAR - Fichier SIG localisant la surface à nettoyer (hors APP et ARL) - Image satellite prouvant que la régénération est âgée de 5 à 20 ans et que la suppression a eu lieu avant le 22/07/2008 - Rapport technique avec mesure de l'aire basale de la surface à supprimer - Exploitation sans embargo - Validité maximum de l'autorisation : 1 an - Visite de contrôle : obligatoire
	[40 ; 50% [	9		
	[30 ; 40% [	8		
	[20 ; 30% [	7		
	[10 ; 20% [	6		
	[0 ; 10% [	5		

1.2.2 Nouvelle multifonctionnalité : vers un élevage plus productif et plus vert

La fermeture de la frontière agricole et l'impossibilité d'utiliser le feu pour reconstituer la fertilité des sols et nettoyer les pâturages remettent en question les pratiques d'élevage extensives communément utilisées en Amazonie (Pacheco & Poccard-Chapuis, 2012). L'Amazonie aborde une phase de transition agraire (Vaz *et al.*, 2012). La société définit de nouvelles fonctions à l'élevage basées sur quatre principes majeurs (Poccard-Chapuis *et al.*, 2010). La première priorité est celle d'une amélioration de la productivité de la terre, couplée à une valorisation plus durable des ressources naturelles des agroécosystèmes, telles que le sol (texture et structure), l'eau bleue (cours d'eau, source) et verte (humidité dans les sols et eau dans les plantes), la fertilité (carbone des sols), et le relief. La distribution spatiale de ces ressources étant hétérogène dans les paysages, des réflexions sur la localisation des activités deviennent également importantes pour optimiser la productivité et l'usage des ressources (Poccard-Chapuis *et al.*, 2014). La seconde priorité consiste à atténuer les impacts environnementaux et améliorer la production de services écosystémiques, comme par exemple la séquestration de carbone (Steinfeld & Gerber, 2010). L'adaptation de la conduite des pâturages vers des pratiques plus intégrées et la récupération de pâturages dégradés peuvent permettre d'accroître significativement les stocks de carbone dans les sols (Bustamante *et al.*, 2012 ; Strassburg *et al.*, 2014). Troisième fonction, les systèmes d'élevage plus intégrés permettent d'améliorer la valorisation du patrimoine, en prenant en compte - outre le foncier - de la structure et le niveau d'équipement de l'exploitation d'élevage (e.g., la présence d'arbres de valeur, le renouvellement de la fertilité des sols, la génétique du

troupeau, la qualité et le nombre de bâtiments, hangars, clôtures et abreuvoirs). Enfin l'évolution vers un élevage bovin amazonien plus vert et durable peut offrir à la filière une image plus positive et accroître son attractivité notamment pour attirer des jeunes, des investisseurs et consommateurs (Poccard-Chapuis *et al.*, 2010).

Les systèmes d'élevage bovins amazoniens présentent un fort potentiel pour remplir ces fonctions et inventer de nouveaux mécanismes de production. Premièrement, ils sont naturellement productifs, les conditions édaphiques, morphologiques et climatiques de la région étant très favorables à la production de biomasse. Deuxièmement, la société rurale qui a colonisé ces territoires est entreprenante et prête à innover. Nous observons effectivement l'émergence d'un mouvement d'adaptation des pratiques à l'initiative des acteurs locaux, en réponse à ces politiques « top-down » (Vaz *et al.*, 2012). Ce mouvement est marqué par un ensemble varié de pratiques d'intensification (voir Encadré 1-4), allant de la chimisation à la lutte biologique (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b) et de la parcelle au territoire (Cialdella *et al.*, 2015). Nous revenons ci-dessous sur quatre projets pilotes d'intensification qui sont devenus des références dans la région.

Encadré 1-4 : L'intensification

D'après la FAO (2004), l'intensification agricole peut être définie comme « une augmentation de la production par unité d'intrants ». Selon l'approche économique conventionnelle, ces unités d'intrants correspondent à de la main d'œuvre, surface agricole et capital (matériel, équipements, bâtiments). Bonny (2011) invite à considérer d'autres facteurs de production qui sont aussi capables d'améliorer la production à l'hectare : les fonctionnalités naturelles des écosystèmes, l'énergie (solaire via la photosynthèse, directe via le carburant et l'électricité, indirecte via la synthèse d'intrants), le savoir et les connaissances (e.g., des savoirs traditionnels ou des connaissances scientifiques et techniques sur les besoins des plantes et des animaux), l'information (connaissances permettant un suivi des productions au fil du temps).

En Amazonie, le mouvement d'intensification de l'élevage repose principalement sur un accroissement de la production agricole par unité de surface (Vaz *et al.*, 2012) et une utilisation plus intensive de capital et d'énergie (Clerc, 2011).

Le programme *Boas Práticas* (« bonnes pratiques ») lancé par l'Embrapa en 2002 dans le Mato Grosso do Sul vise à encourager l'adoption de pratiques augmentant la productivité et la rentabilité de l'élevage, favorisant le bien-être animal, et garantissant la durabilité environnementale et sociale du système de production. Avec l'aide des techniciens de l'Embrapa, les éleveurs identifient des voies d'amélioration possibles dans leur système de production et mettent en place des adaptations pour améliorer ces différents critères. Un

manuel fournissant des orientations sur 12 items[1] sert de références (Valle, 2011). En 2017, 95 exploitations étaient certifiées BPA dont trois dans l'Etat du Pará (Rosa & Alva, 2017).

Le projet *Pecuária Verde*[2] (« élevage vert ») s'est inspiré du programme précédent. Lancé en 2011 par le Syndicat des Producteurs Ruraux de Paragominas (SPRP) dans six fermes pilotes, il vise à augmenter la productivité et la rentabilité de l'élevage sur l'exploitation, améliorer le bien-être animal, améliorer les performances environnementales par la planification de l'usage des sols en fonction de leur potentiel agronomique, former et valoriser les employés des fazendas (Silva & Barreto, 2014). Au niveau productif, ce projet part du constat que la productivité animale par unité de surface est faible (autour de 0,7 UA/ha/an), alors que les prairies amazoniennes ont un potentiel qui peut atteindre 4 à 5 UA/ha/an. Les 6 fermes pilotes ont donc cherché à atteindre cette capacité de charge sur une surface représentant environ 10% de la surface de la SAU. Le projet d'intensification repose sur des apports fréquents et importants d'engrais de synthèse et d'amendements calcaires, l'utilisation de graminées très productives telles que le *Panicum maximum* cv Mombaça, et le recours au pâturage tournant. Cette dernière technique qui consiste à diviser la surface à intensifier en paddocks permettant 2-3 jours de pâturage chacun, génère un gradient de pousse et permet d'offrir aux animaux une herbe de qualité. Après chaque passage, les paddocks sont fertilisés. En 2013 (deuxième année d'implémentation du projet), les exploitants ont réussi à atteindre une productivité moyenne de 30,4 @/ha (456 kg carcasse/ha) et une marge nette (après déduction des charges de structures et autres frais) de R$ 674,50/ha (avec R$ 95/@) (SPRP, 2014). L'amélioration de la productivité sur les terres à fort potentiel agronomique offre ainsi la possibilité pour les éleveurs d'abandonner celles qui ont un moins bon potentiel. Ce niveau de performances reste toutefois difficilement extrapolable à une large échelle du fait du capital humain et financier qu'il nécessite et des risques agronomiques qui peuvent exister (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b).

L'intégration agriculture-élevage, voire forêt, connaît un intérêt croissant chez les éleveurs des fronts pionniers d'Amazonie au regard de ses performances agronomiques, écologiques et économiques (Piketty *et al.*, 2002 ; Bonaudo *et al.*, 2014 ; Bendahan, 2015). D'après Vaz *et al.* (2012), l'intégration culture-élevage-forêt peut avoir lieu à trois échelles. A l'échelle de la parcelle cultivée, les activités se succèdent pluriannuellement et on parle de Système Agro-Sylvo-Pastoral. Généralement, la ou les premières années, une culture annuelle est cultivée entre des lignes d'arbres plantés en ligne (Eucalyptus et Paricá sont les espèces les plus fréquemment plantées). Les arbres étant de faible portée, il y a peu de compétition entre arbres et cultures pour la lumière et les nutriments du sol. Lors de la fertilisation de la culture (30 à 40 jours après le semis), l'éleveur sème une graminée fourragère qui végète jusqu'à la

[1] Ces items sont : la gestion de l'exploitation rurale, la fonction sociale de l'exploitation, la gestion des ressources humaines, la gestion environnementale, les infrastructures, la gestion du troupeau avant abattage, le bien-être animal, la gestion des pâturages, la supplémentation alimentaire, l'identification et la traçabilité des bovins, le contrôle sanitaire et la gestion de la reproduction.

[2] Le projet *Pecuária Verde* est appuyé techniquement par deux ONG (Imazon et la TNC), deux universités (l'ESALQ-USP et l'UNESP) et financé par la Fondation Fundo Vale et Dow AgroSciences.

récolte de la culture. Après récolte de la culture annuelle, ce fourrage peut être pâturé (c'est ce qui est communément appelé la *safrinha do boi*). Selon la stratégie de l'éleveur, ce fourrage sert de plante de couverture avant semis d'une autre culture annuelle (semis direct sous couverture végétale) ou est maintenu de façon permanente en association avec les arbres qui continuent de se développer. A l'échelle de l'exploitation, l'agriculture est intégrée dans le système de production de façon à financer la réforme des prairies et éventuellement complémenter l'alimentation des bovins en saison sèche (ensilage par exemple). Généralement, les éleveurs implantent ces cultures annuelles derrière des prairies dégradées, sur des parcelles au bon potentiel agronomique (Bendahan *et al.*, 2013), mais il n'y a pas dans ce cas d'association culture-prairie à l'échelle de la parcelle. A l'échelle du territoire, il y a une réorganisation des usages des sols entre agriculture, pâturage et forêt, selon les capacités agronomiques des sols et les caractéristiques logistiques du territoire (Vaz *et al.*, 2012). Malgré ses fortes performances agro-écologiques et économiques, Bendahan (2015) montre que le développement des systèmes intégrés de type Culture-Elevage-Forêt à l'échelle de la parcelle reste timide, un certain nombre de conditions sociales, logistiques, foncières n'étant pas réunies en Amazonie (précarité des infrastructures routières, des services de santé et d'éducation, manque d'appui technique et en gestion, manque de main d'œuvre spécialisée, situation foncière non régularisée) et l'augmentation de la complexité constituant une contrainte importante.

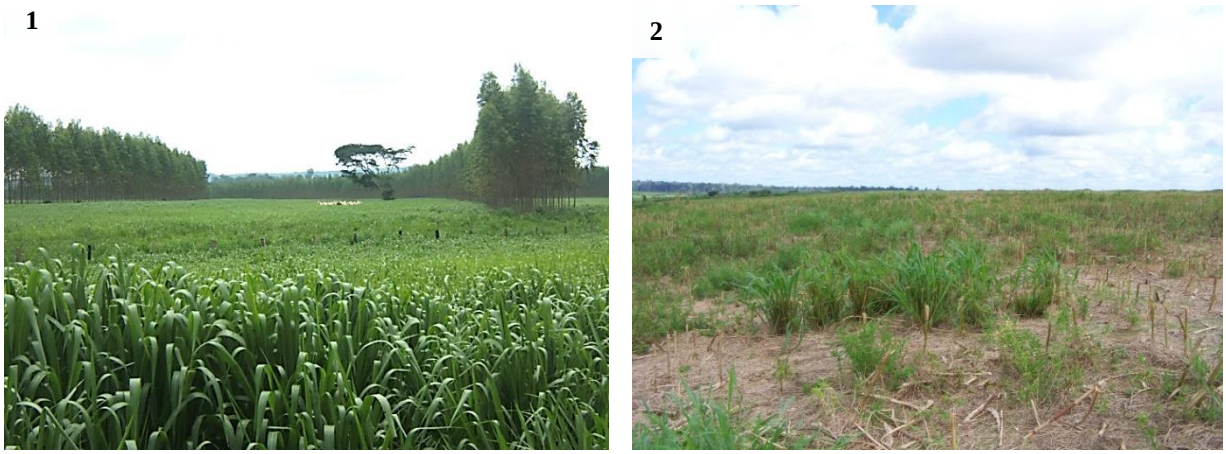


Figure 1-7 : Différentes formes d'intégration : Agriculture-Elevage-Forêt (1) et Agriculture-Elevage (2)

La photo 1 montre un Système Sylvo-Pastoral associant une plantation en ligne d'Eucalyptus et une graminée fourragère pâturée (photo prise en décembre 2013, le long de la BR010-Belém Brasília, dans le Tocantins). La photo 2 correspond à une *safrinha do boi*, où l'on distingue une graminée fourragère se développant dans des résidus d'une culture de maïs. Selon la stratégie de l'éleveur, ce fourrage sera ensilé ou pâturé (Crédits photos : Sophie Plassin).

La dernière initiative sur laquelle nous souhaitons revenir est celle du *Município Verde* (« Municipe Vert »), inventée là encore sur la commune de Paragominas en 2008 et devenue une référence pour la région amazonienne. Paragominas autrefois connue pour son niveau important de criminalités, d'activités forestières illégales et de déforestation, a lancé cette initiative en réaction à la publication par le Ministère Public Fédéral de la liste noire des communes déforestant le plus, dont elle faisait partie. Voyant que ce modèle prédateur de

ressources naturelles était à bout de souffle, la commune a souhaité évoluer vers un territoire vert pour améliorer son image et devenir plus attractive pour les investisseurs. Devenir Municipe Vert nécessite de respecter deux critères : réduire le taux de déforestation à moins de 40 km²/an et géo-référencer au moins 80 % du foncier en CAR. En l'espace de deux ans, Paragominas a été la première commune à sortir de la liste noire (Viana *et al.*, 2016). Trois étapes importantes a permis ce succès. La mairie, appuyée par l'élite rurale locale, a réussi à convaincre un ensemble d'organisations de production et de la société civile à signer un pacte « Zéro Déforestation » et « Zéro Feu », plus ambitieux que les objectifs nationaux (*ibid*). De plus, la commune a mobilisé l'appui technique de deux ONG (IMAZON et TNC) pour le géo-référencement des CAR (Piketty *et al.*, 2015a). Enfin, Paragominas a doté la SEMMA (Secrétariat Municipal de l'Environnement) de plus amples ressources financières et humaines, l'équipe et la forme pour prévenir et fiscaliser les déforestations, réaliser plus d'actions de communication et de sensibilisation (Vaz *et al.*, 2012). Ces actions ont reçu un appui financier conséquent de la fondation Fundo Vale, créé par l'entreprise minière Vale. Fort de ce succès, l'Etat du Pará s'est appuyé sur cette initiative et a lancé le programme des Municipes Verts en 2011 (Annexe 2) afin de répliquer cet exemple aux autres communes (Guimarães *et al.*, 2011). En mars 2018, 85% des municipalités de l'Etat du Pará (121 sur 143) avaient adhéré à ce programme (Programa Municípios Verdes - PMV, 2018).

1.3 Concilier élevage et forêt dans des paysages plus éco-efficients

1.3.1 Limites du mouvement basé sur l'intensification et la déforestation zéro

La capacité des politiques de déforestations zéro et du mouvement d'intensification en cours à améliorer la durabilité des systèmes d'élevage est questionnée pour plusieurs raisons.

Premièrement, la portée du mouvement d'intensification est limitée à quelques élevages voire reste du domaine de la recherche. Les modèles d'intensification promus et présentés ci-dessus montrent certes leur capacité à accroître la productivité de l'élevage. Cependant, ces avancées techniques restent assez peu opérantes sur le terrain, et ont jusqu'à présent été peu appliquées et adoptées par les éleveurs dans leur ensemble (Piketty *et al.*, 2015a). Cette non-appropriation est due à la fois à la faible adaptation de ces techniques à la diversité de profils socio-techniques existants en Amazonie. Comme le montre Bendahan (2015) sur les systèmes agro-sylvo-pastoraux, les modèles de production très exigeants en capital, en main d'œuvre et en savoir technique, se révèlent en effet peu adaptés aux systèmes d'exploitation extensifs, gérant de larges surfaces avec peu de main d'œuvre ou aux exploitations familiales peu capitalisées. De plus, ces modèles de production nécessitent le concours d'acteurs et d'institutions qui dépassent l'échelle de l'exploitation (assistance technique, banques) et donc une mobilisation à l'échelle territoriale (Bendahan, 2015). Mais, excepté quelques programmes pilotes tels que le plan ABC et les projets REDD+, il existe peu de cadres incitatifs légaux pour promouvoir une intensification durable des usages en prairie et cultures.

Les mécanismes incitatifs mis en place se focalisent principalement sur un type d'usage des sols, la forêt.

Le modèle d'intensification dominant (agriculture conventionnelle) est basé sur l'artificialisation de l'agroécosystème et la consommation intensive de ressources naturelles non renouvelables (Encadré 1-5). Ce modèle de production valorise peu les processus écologiques et est responsable d'externalités négatives telles que la pollution des eaux de surfaces, des nappes phréatiques et de l'air, érosion des sols, dégradation de la fertilité des sols, perte de biodiversité et émissions de GES (Tilman *et al.*, 2002 ; Tilman *et al.*, 2011). L'agriculture conventionnelle présente de nombreuses limites pour répondre aux nouveaux enjeux de l'agriculture (Cassman, 1999), à savoir accroître la production agricole de 70 à 100 % d'ici à 2050 pour satisfaire la demande alimentaire croissante des 9 milliards d'êtres humains, couplés à des changements d'habitudes alimentaires (Tilman *et al.*, 2002 ; World Bank, 2008 ; Godfray *et al.*, 2010) et optimiser la production de services écosystémiques dans un contexte de raréfaction des ressources naturelles et de changements sociaux, économiques, politiques et environnementaux continus (Tilman, 1999 ; Pretty *et al.*, 2010 ; Doré *et al.*, 2011). Accompagner la transition des systèmes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne vers un meilleur compromis entre agriculture et environnement est urgent pour éviter une trajectoire déforestation-dégradation-pollution. De plus, sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale brésilienne, les marges de manœuvre existantes pour améliorer le ratio entre production fourragère et utilisation des ressources naturelles à partir d'une meilleure mobilisation des processus écologiques sont importantes compte tenu du potentiel élevé de production de biomasse qu'offre le climat de tropique humide, et le caractère entrepreneur et pionnier de la société rurale issue de la colonisation (Tourrand *et al.*, 2013).

Les politiques de lutte contre la déforestation ont permis de réduire significativement la déforestation à l'échelle globale. En revanche, elles ont été inefficaces pour encourager un changement de pratiques dans les zones d'agriculture familiale, en particulier dans les régions isolées (Godar *et al.*, 2014 ; Piketty *et al.*, 2015a). Les agriculteurs familiaux ont continué d'utiliser l'abattis-brûlis, par manque d'autres alternatives productives viables (absence de débouchés commerciaux ou d'infrastructures logistiques), de capacités techniques (Schneider *et al.*, 2015). Des options techniques et politiques incitatives spécifiques à l'agriculture familiale sont nécessaires pour éviter que cette transition agraire ne s'accompagne d'un échec social important (Piketty *et al.*, 2015a).

Si d'un côté les politiques de lutte contre la déforestation ont permis de réduire la déforestation, de l'autre c'est principalement l'objectif d'amélioration des performances économiques qui a constitué un moteur-clé dans le processus d'intensification. Toutefois, les liens entre déforestation et intensification sont complexes. Une hypothèse soutenue par Borlaug postule qu'au niveau macro (global), une augmentation des rendements sur les surfaces existantes permettrait de réduire les besoins en surfaces cultivées et donc de réduire la pression sur les forêts, épargnant ainsi des terres pour la conservation de zones naturelles

(« *land saving* »). Martha *et al.* (2012) montrent ainsi qu'à l'échelle du Brésil, sans les gains de productivité réalisés entre 1950 et 2006, 525 millions d'hectares supplémentaires de prairies auraient été nécessaires pour satisfaire les niveaux de production actuels. D'autres auteurs tels que Barretto *et al.* (2013) montrent que cette relation entre intensification et déforestation varie dans l'espace, entre zones consolidées et zone de frontière agricole. Si dans les zones consolidées ces auteurs vérifient cette hypothèse, ils montrent en revanche que le processus d'intensification peut encourager un processus de déforestation en zone de frontière. Qualifié d'« effet boomerang », ce processus peut s'expliquer par le fait que les nouvelles technologies vont assurer des profits plus élevés à l'activité d'élevage, attirant ainsi plus de main d'œuvre et de capital vers cette production et pouvant générer à terme une hausse de la demande en terres et plus de pressions sur les forêts (Kaimowitz & Angelsen, 2008 ; Arima *et al.*, 2011 ; Lambin & Meyfroidt, 2011). Plusieurs auteurs argumentent que le processus d'intensification de l'élevage doit être couplé à la mise en place d'une gouvernance environnementale et le maintien de politiques de lutte et contrôle contre la déforestation pour réduire effectivement les pressions sur les forêts (Barretto *et al.*, 2013 ; Ceddia *et al.*, 2014 ; Cohn *et al.*, 2014).

Encadré 1-5 : Agroécosystème, processus écologiques, ressources naturelles

Agroécosystème : Il s'agit d'un écosystème transformé par des humains à des fins de production agricole (alimentaire, énergétique, en fibres, etc.). Cette notion découle directement du concept d'écosystème qui correspond à un ensemble formé d'organismes vivants (biocénose) en interaction avec un milieu physico-chimique (biotope). Pour les agronomes, l'agroécosystème est constitué de quatre compartiments majeurs : le sol et l'atmosphère qui forment le biotope, le peuplement végétal cultivé et l'ensemble des autres organismes vivants avec ce peuplement dans le sol ou l'atmosphère et qui forment la biocénose (Roger-Estrade *et al.*, 2006). Récemment, des auteurs ont proposé d'élargir la dimension productive des agroécosystèmes aux fonctions de distribution et de consommation (Cabell & Oelofse, 2012 ; Duru & Therond, 2014). Ils argumentent que les limites des agroécosystèmes ne se situent pas seulement au niveau de l'espace physique productif mais incluent aussi les ressources, les infrastructures, le marché, les institutions, les producteurs, les transfromateurs, et distributeurs personnes. Dans cette étude, nous focalisons sur la dimension productive de l'agroécosystème.

Processus écologiques : ce sont l'ensemble des processus biologiques, chimiques et physiques qui lient les organismes entre eux et avec leur milieu dans un écosystème (Frontier *et al.*, 2008).

Ressources naturelles : L'agriculture utilise un nombre important et divers de ressources naturelles soit directement dans le processus de production, soit indirectement via la fabrication d'intrants par exemple. Parmi les principales ressources consommées en agriculture, on peut citer l'eau, l'énergie (fossile et renouvelable), les sols, les macronutriments (azote, phosphore). Nesme *et al.* (2016) proposent une typologie des ressources naturelles en quatre classes :

- les ressources dissipées lors du processus de production, non-renouvelables : cette classe désigne les ressources non renouvelables à l'échelle humaine (plusieurs siècles), telles que les énergies fossiles (gaz et pétrole), mais également les eaux extraites d'aquifères profonds ou les sols fortement érodés (leur temps de reconstitution peut être très long).
- les ressources dissipées lors du processus de production, renouvelables : il s'agit de ressources qui peuvent être renouvelés en quelques années. Par exemple, les eaux de surface ou souterraines, les sols moyennement érodés ou la biomasse agricole.
- les ressources dissipées lors du processus de production, mais donnant lieu à un produit recyclable : cette classe regroupe les ressources qui génèrent un produit ou sous-produit qui peut ensuite être recyclé comme ressource pour d'autres processus de production. Par exemple, les légumineuses qui fixent l'azote de l'air produisent une biomasse riche en azote qui est dissipée lors de la consommation par les animaux d'élevage mais peut donner lieu à la production d'effluents d'élevage qui peuvent être recyclés comme fertilisants.
- les ressources non dissipées lors du processus de production : il s'agit par exemple des sols (bien gérés, non érodés, ni compactés, ni pollués) et de la biodiversité fonctionnelle.

1.3.2 Application du concept d'éco-efficience aux paysages d'Amazonie orientale

Récemment, plusieurs cadres de pensée ont émergé proposant de nouvelles alternatives à l'agriculture conventionnelle : l'agriculture durable, l'agriculture biologique, l'agriculture bas niveau d'intrants, l'agroécologie, l'éco-agriculture, l'agriculture écologiquement intensive, l'intensification durable, l'agriculture intégrée, l'agriculture de conservation, l'agriculture climato-intelligente... (Bonny, 2011 ; Chappell & LaValle, 2011 ; Griffon, 2013 ; Pretty & Bharucha, 2014). Ces formes d'agriculture se distinguent de l'agriculture conventionnelle par une mobilisation plus importante des processus écologiques au sein des agroécosystèmes et par le changement des pratiques basées sur la réduction voire l'élimination de l'usage des pesticides, des fertilisants inorganiques et de la mécanisation (Chappell & LaValle, 2011). Toutefois, les objectifs, les méthodes de production et les biens et services produits peuvent différer entre concepts[1] (Pretty & Bharucha, 2014).

La transition des systèmes de production vers une meilleure mobilisation des processus écologiques requiert certes un changement des pratiques au sein des agroécosystèmes mais également une optimisation de l'organisation spatiale de ces pratiques dans les paysages (Bommarco *et al.*, 2013 ; Öborn *et al.*, 2014). Par exemple, l'agencement spatial des usages des sols a un rôle critique sur le cycle de l'eau (Gordon *et al.*, 2010) et la qualité de l'eau (Chaplin-Kramer *et al.*, 2016), le recyclage et les flux des nutriments (Sane *et al.*, 2016), le stockage de carbone (Gilroy *et al.*, 2014 ; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015), la biodiversité (Sabatier *et al.*, 2014 ; Steckel *et al.*, 2014), le contrôle des nuisibles (Tscharntke *et al.*, 2005 ; Médiène *et al.*, 2011). La dimension spatiale des pratiques est d'autant plus fondamentale dans les systèmes d'élevage bovins amazoniens que les prairies conduites de manière extensive occupent de très vastes surfaces.

Dans les systèmes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne, il existe d'importantes marges de manoeuvre pour encourager un mouvement d'intensification qui se fasse en adéquation avec la localisation des ressources naturelles et optimisent davantage les processus écologiques. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, les éleveurs ont mis en valeur des terres pour des objectifs fonciers, sans nécessairement considérer la distribution spatiale des ressources naturelles dans ces paysages. Aussi, pour mener cette réflexion, nous nous sommes appuyés sur le concept de paysages éco-efficients.

L'origine de l'éco-efficience date du début des années 70 lorsque dans son rapport intitulé *The Limits to Growth* (Halte à la croissance), le « club de Rome » prône la nécessité de mieux gérer les ressources naturelles de la planète tout en maintenant un même niveau de produits économiques. Mais, le concept d'éco-efficience ne sera formulé pour la première fois qu'en 1991 par Stephan Schmidheiny et le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), dans le livre *Changing Course*. Dans cet ouvrage, l'éco-efficience

[1] Les lecteurs intéressés pourront se référer à l'ouvrage de Griffon (2013).

est définie comme un compromis entre performances environnementales et économiques (World Business Council for Sustainable Development, 2000). La déclinaison de ce concept dans le secteur agricole est plus tardive et son utilisation va principalement se disséminer à la suite de la parution du plan stratégique 2010-2012 du CIAT (International Center for Tropical Agriculture), « *Eco-Efficient Agriculture for the Poor* » (CIAT, 2009), puis du plan stratégique 2014-2020 « *Building an eco-efficient future* » (CIAT, 2014). Les définitions sont toutefois variables. Pour le CIAT, outre les performances économiques et environnementales, la dimension sociale est importante : « *Eco-efficient agriculture increases productivity while reducing negative environmental impacts. Eco-efficient agriculture meets economic, social, environmental needs of the rural poor by beeing profitable, competitive, sustainable and resilient* » (CIAT, 2009). Pour d'autres auteurs, la définition se restreint aux dimensions économiques et environnementales. Il s'agit de « l'efficience avec laquelle un ensemble de produits agricoles (évalués en termes de quantité ou qualité) est obtenu à partir d'un ensemble de ressources naturelles (terre, eau, nutriments, énergie, diversité biologique) tout en minimisant la production d'externalités environnementales négatives (e.g., pollution des eaux et des sols, émissions de GES, perte de biodiversité) » (Keating *et al.*, 2010 ; Keating *et al.*, 2013).

L'éco-efficience est un concept à la fois multidimensionnel et multi-scalaire (Keating *et al.*, 2010). D'après ces auteurs, la notion d'éco-efficience peut s'appliquer à l'échelle cellulaire (métabolisme photosynthétique des plantes), de la parcelle, de l'exploitation, d'une région et même à l'échelle globale. Plusieurs indicateurs s'avèrent nécessaires pour caractériser les éco-efficiences d'une production agricole et selon le contexte, ils sont susceptibles d'être ajustés en fonction des ressources biophysiques, économiques et humaines les plus limitantes (Park *et al.*, 2010). Par ailleurs, il n'existe pas une seule solution pour augmenter l'éco-efficience de l'agriculture (Mateo & Ortiz Rios, 2013). Même si ce concept est basé sur le rapport « plus avec moins », d'après Keating *et al.* (2013), au moins quatre scénarios existent pour améliorer les éco-efficiences :

- produire plus de produits agricoles ou moins d'externalités environnementales négatives avec moins de ressources naturelles (e.g., réduire l'usage de fertilisants, ou les volumes d'eau d'irrigation) ;
- produire beaucoup plus de produits agricoles avec un petit peu plus de ressources naturelles (utiliser par exemple la fertirrigation) ;
- produire plus de produits agricoles avec la même quantité de ressources naturelles (mieux organiser l'usage des sols dans l'espace, améliorer l'usage des ressources dans le temps grâce à l'usage de prévisions saisonnières) ;
- produire moins avec beaucoup moins (arrêter de produire sur des surfaces où les ressources naturelles ne peuvent pas être utilisées de façon efficiente pour des raisons climatiques ou édaphiques par exemple).

La notion de *trade-off* (compromis) entre performances agricoles et environnementales est un élément-clé à considérer pour améliorer les éco-efficiences. Pour évaluer le meilleur

compromis entre production et externalité environnementales, Keating *et al.* (2013) proposent d'appliquer le concept de frontière d'efficience (Figure 1-8).

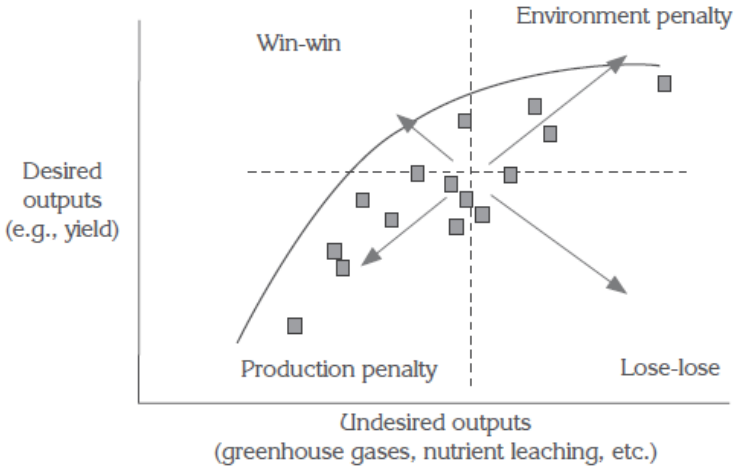


Figure 1-8 : Exemple d'une relation de *trade-off* entre produits souhaités (desired outputs) et externalités négatives (undesired outputs) (Keating *et al.*, 2013). La frontière d'efficience (courbe tracée à partir des points situés en périphérie) représente le niveau maximum d'output (produits) qui peuvent être obtenus moyennant un niveau déterminé d'externalités négatives. La différence entre la frontière et le point correspond aux marges de manœuvre possibles.

Le concept de paysage éco-efficient (« *eco-efficient landscape* ») a été formalisé dans le cadre du projet DURAMAZ (Gond *et al.*, 2012 ; Poccard-Chapuis *et al.*, 2014 ; Lavelle *et al.*, 2016). Un paysage éco-efficient est un paysage qui produit des biens et des services écosystémiques et qui présente un équilibre entre performances économiques et environnementales. Appliqué aux systèmes d'élevage amazoniens, cela consiste à adopter des pratiques agricoles permettant une mobilisation forte des processus écologiques dans les agroécosystèmes et à localiser ces pratiques en adéquation avec la distribution spatiale des ressources naturelles de façon à permettre un usage efficient de ces ressources et à optimiser la production de biens et de services écosystémiques. A ce jour, il n'existe ni cahier des charges ni label « paysage éco-efficient ». Dans la thèse, nous abordons la construction des paysages éco-efficients comme une transition, un horizon vers lequel tendre plutôt qu'un état statique. De plus, il n'existe pas de solution unique selon le contexte social, environnemental, économique, politique et l'état de départ.

Le recours au concept de paysage éco-efficient nous semble pertinent à plus d'un titre. Premièrement, ce concept nous semble suffisamment flexible par rapport à la diversité de situations agraires, de trajectoires et de projets productifs existant en Amazonie orientale brésilienne. Rappelons que certains systèmes fourragers se basent encore sur le modèle d'agriculture itinérante (usage du feu, mobilisant mal les processus écologiques et peu productifs), alors que d'autres se basent sur des modèles productivistes (utilisation des dernières technologies de pointe, recherche d'une forte productivité à l'hectare). Par ailleurs, il nous permet d'appréhender la dimension spatiale de l'agroécosystème. Enfin, il nous

permet de considérer des processus écologiques ayant lieu à une échelle dépassant la parcelle agricole (cycles de l'eau et du carbone, érosion des sols, biodiversité).

1.3.3 Intensification de l'élevage et espace : caractériser et comprendre les nouvelles dynamiques

Dans les territoires d'Amazonie brésilienne engagés dans un processus d'intensification, des changements d'usage des sols et de leur organisation spatiale ont déjà été détectés au cours des dernières années (Arvor *et al.*, 2013 ; Piketty *et al.*, 2015a ; Pimentel, 2016). Comprendre les processus à l'origine de l'organisation spatiale des pratiques est important pour guider des politiques d'aménagements des paysages permettant une meilleure adéquation avec la localisation des ressources naturelles et optimisant les processus écologiques. Cela nécessite de comprendre comment les personnes prennent des décisions d'usage des sols et quels facteurs influencent ces décisions (Geist *et al.*, 2006).

Lambin *et al.* (2003) distinguent deux types de causes des changements d'usages des sols : les causes directes (*proximate causes*) et les causes indirectes ou sous-jacentes (*underlying causes*). Les causes directes sont définies comme ayant un lien cause-conséquence immédiat et se réfèrent aux activités humaines ayant lieu à un niveau local (exploitations agricoles, foyers, communautés). Les causes indirectes impliquent une combinaison complexe de facteurs sociaux, politiques, économiques, démographiques, technologiques, culturels et biophysiques régionaux et globaux qui peuvent interagir de façon distincte selon les régions du monde, générant des similitudes et divergences entre régions (Plieninger *et al.*, 2016).

De nombreuses études ont été menées en Amazonie brésilienne afin de caractériser les dynamiques de développement de l'élevage et de déforestation sur le plan spatial et d'en expliquer les causes (Mertens *et al.*, 2002 ; Walker *et al.*, 2002 ; Walker, 2003 ; Aldrich *et al.*, 2006 ; Arima *et al.*, 2011 ; Van Vliet *et al.*, 2013 ; Richards *et al.*, 2014). En revanche, et malgré l'importance des enjeux environnementaux, le processus d'intensification de l'élevage en cours dans la région est encore mal compris, en particulier ses causes directes et ses conséquences sur le plan spatial. Une révision de la littérature sur les déterminants de l'organisation spatiale dans les changements d'usage des sols montre que contrairement à d'autres régions du monde (Annexe 3), en Amazonie brésilienne, il existe encore peu de connaissances empiriques sur les facteurs déterminants la localisation des pratiques d'intensification et en particulier sur le système de décisions des éleveurs. Or comme l'ont montré plusieurs auteurs tels que Van Vliet *et al.* (2015) ou Valbuena *et al.* (2010b), les projets des agriculteurs et les caractéristiques structurelles de ces exploitations influencent significativement les changements des usages des sols et leur diversité peut générer une hétérogénéité de trajectoires.

1.4 Question de recherche, hypothèses et objectifs de la thèse

Pour résumer la problématique développée dans le Chapitre 1, depuis les 50 dernières années, la colonisation de l'Amazonie brésilienne orientale a été marquée par l'expansion de l'élevage bovin extensif. Plusieurs déterminants ont favorisé cette activité, comme par exemple, l'accès non contraint au foncier et à la fertilité forestière, la flexibilité et la productivité du travail ou encore les marchés et l'organisation de la filière viande dans des territoires marqués par la précarité des services publics et des réseaux de communication caractéristiques. Efficaces dans ce contexte, l'élevage a été en contrepartie l'un des principaux moteurs de déforestation et de dégradation des sols, générant d'immenses surfaces de prairies peu productives. La fermeture de la frontière agricole, résultant de la mise en place de mesures de lutte contre la déforestation, remet en cause ces systèmes extensifs. En réponse, un mouvement d'intensification et de diversification des usages des sols a émergé. Il s'oriente vers de meilleures productivités à l'hectare, chemin privilégié pour retrouver des performances économiques satisfaisantes. Au-delà des objectifs de la déforestation zéro, favoriser une transition vers des pratiques d'élevage qui valorisent mieux les ressources naturelles et les processus écologiques et qui puissent être adaptées par une large diversité de profil d'éleveurs est devenue un enjeu clé pour tendre vers une intensification plus durable de l'élevage bovin.

En Amazonie, notre équipe de recherche a exploré la notion de paysage éco-efficient pour raisonner les pistes d'intensification. Les paysages éco-efficients sont appréhendés comme des paysages où les pratiques et leur localisation permettent une mobilisation forte des processus écologiques, et une utilisation efficiente des ressources naturelles en adéquation avec la distribution spatiale de ces ressources. Comprendre les logiques spatiales d'intensification des usages des sols à l'échelle des exploitations devient alors crucial. Pourtant, à notre connaissance, il existe peu de connaissances empiriques à ce sujet. Il en est de même pour les dynamiques et impacts sur les ressources naturelles, dont la spatialité a été peu investiguée. Notre étude s'inscrit dans une perspective de combler ces lacunes. La question de recherche qui en découle est :

Comment les éleveurs des fronts post-pionniers d'Amazonie orientale brésilienne adaptent leurs pratiques et l'organisation spatiale de ces pratiques, pour reconstruire des paysages plus éco-efficients, c'est à dire qui utilisent de façon plus efficiente les ressources naturelles pour leur système d'élevage?

Deux hypothèses guideront la recherche :

- Le processus d'intensification de l'élevage conduit à une reconfiguration des paysages à l'échelle des exploitations agricoles, pour mieux profiter de la distribution spatialement hétérogène des ressources naturelles.
- La modélisation spatio-temporelle aide à raisonner l'éco-efficience des paysages.

A travers la première hypothèse, nous voulons tester si face à l'impossibilité de continuer à exploiter les ressources naturelles sous un mode pionnier et à étendre leur espace fourrager, les éleveurs adaptent leurs pratiques et l'organisation spatiale de ces pratiques, en se basant sur une meilleure mobilisation des ressources naturelles présentes sur leur territoire d'exploitation. Nous sommes notamment intéressés de savoir si les éleveurs prennent davantage en considération la distribution spatialement hétérogène des ressources naturelles dans le paysage et si cela se traduit par de nouvelles logiques de localisation des usages des sols. Plusieurs questions nous guident pour tester cette hypothèse : Est-ce que l'intensification fait partie des projets et si oui quelles sont les adaptations apportées au système de production et à l'arrangement spatial des pratiques dans l'exploitation ? Quelles sont les perceptions des éleveurs les ressources naturelles ? Cherchent-ils à être plus éco-efficients ? Quels sont les principaux déterminants de la localisation des pratiques, notamment d'intensification ? Existe-t-il des différences entre situations agraires et selon le degré d'intensification ?

A travers la seconde hypothèse, nous voulons analyser si les projections spatio-temporelles peuvent servir d'aide à la réflexion et même d'outils d'accompagnement du processus d'intensification vers la construction de paysages plus éco-efficients. Même si les éleveurs tiennent davantage compte des ressources naturelles et des paysages dans leurs décisions de localisation, c'est une nouveauté pour beaucoup et les connaissances des effets des pratiques et de leur localisation sur les processus écologiques sont limitées. Une réflexion prospective, même avec un outil simple, pourrait nous permettre d'explorer ce qui pourrait se passer et nous aider à tester une hypothèse dans des dimensions spatiales et temporelles qu'il serait impossible de vérifier avec des expérimentations in situ (Gaucherel & Houet, 2009). Deux questions sont adressées : Comment les ressources naturelles évoluent dans les paysages selon le type de pratiques et leur localisation (est-ce que les ressources naturelles s'améliorent ou se dégradent) ? Peut-on identifier des *trade-offs* entre éco-efficiences et la mobilisation d'autres ressources (travail, capital, terre) ?

La thèse a trois objectifs.

- Produire des connaissances sur les systèmes de décision des éleveurs afin de mieux comprendre, dans l'actuelle dynamique d'intensification de l'élevage, les processus de construction des paysages et leurs causes ;
- Analyser le rôle des pratiques dans l'éco-efficience des systèmes d'élevage et des paysages ;
- Construire un modèle multi-agents représentant la diversité des stratégies d'intensification et l'hétérogénéité des paysages et de leurs ressources, dans le but d'évaluer les impacts et interactions entre ces composants et analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies à l'échelle de l'exploitation.

Les résultats de la thèse pourront ainsi servir à proposer des voies d'amélioration pour concevoir des paysages plus éco-efficients.

Chapitre 2. Cadre théorique et méthode

Présentation du chapitre

Ce chapitre décrit le cadre théorique et la méthodologie adoptée pour analyser les stratégies d'intensification des éleveurs et les liens avec l'éco-efficience des paysages. Nous avons construit un dispositif de recherche visant à caractériser, comprendre et modéliser les liens complexes entre les décisions des agriculteurs, l'organisation spatiale des paysages et l'efficience dans l'usage des ressources naturelles.

Ce chapitre est divisé en trois parties :

- Dans la première partie, nous exposerons le cadre conceptuel qui a été mobilisé autour du triptyque : paysage, système de décision, et dynamiques spatio-temporelles (trajectoire, modélisation multi-agents). Le concept de paysage est mobilisé pour sa capacité à catalyser les interactions entre systèmes de décision, ressources naturelles et processus écologiques dans l'espace. L'approche systémique vise à appréhender les décisions des éleveurs liées à l'intensification de l'usage des sols dans un contexte plus global, celui du fonctionnement de l'exploitation agricole. Enfin, les trajectoires et la modélisation multi-agents permettent d'étudier ces interactions de façon dynamique, et de les interpréter en lien avec d'autres facteurs internes ou externes à l'exploitation, de type politique et institutionnels, économiques, culturels, technologiques, biophysiques (climat, topographie, qualité des sols, configuration spatiale).
- Dans la deuxième partie, nous présenterons les caractéristiques des deux zones d'étude analysées dans cette recherche. Nous avons sélectionné Paragominas et Redenção deux communes de l'Etat du Pará présentant des dynamiques d'intensification de l'élevage contrastées.
- La troisième partie décrit la démarche méthodologique suivie. Nous détaillerons les méthodes mobilisées pour analyser les systèmes de décisions et les pratiques en lien avec les dynamiques de paysages : entretiens, analyses de paysages et trajectoires d'exploitations. Nous présenterons également les outils que nous avons employés pour évaluer les éco-efficiences par rapport aux ressources hydriques, pédologiques et à l'énergie. Nous expliquerons enfin la démarche employée pour la construction du modèle multi-agents.

2.1 Un cadre d'analyse intégrant paysage, système de décision et trajectoires

2.1.1 Introduction : Cadre d'analyse général

Notre cadre d'analyse (Figure 2-1) formalise les relations dynamiques qui lient les paysages, les systèmes de décision, la situation agraire des exploitations et les facteurs externes globaux.

1. **Les paysages** : comme nous le verrons dans le 2.1.2, les paysages sont la résultante d'interactions entre des ressources naturelles, des pratiques agricoles et des processus écologiques. Nous avons identifié cinq **ressources naturelles** clés pour le fonctionnement des systèmes d'élevage amazoniens : (i) l'eau bleue qui correspond à l'eau naturellement présente dans les écoulements de surface (rivière, fleuve, lac, ruissellement) ou l'eau souterraine (aquifère) et qui est issue des précipitations (Falkenmark & Rockström, 2006) ; (ii) l'eau verte qui est la fraction d'eau qui est retenue dans la couche superficielle des sols et dans la végétation et qui finit par être évaporée ou transpirée. Contrairement à l'eau bleue, elle ne s'écoule pas en surface et ne percole pas vers les nappes phréatiques souterraines (*ibid*) ; (iii) les sols (type de sol, capacité de drainage, présence de pierres) ; (iv) la topographie ; (v) l'énergie. Les **pratiques agricoles** qui façonnent le paysage correspondent principalement aux pratiques de gestion du système fourrager et d'usages des sols. Ces pratiques impactent les **processus écologiques** qui dégradent ou améliorent les ressources naturelles. En fonction de l'état de ces ressources, les éleveurs peuvent adapter leurs pratiques agricoles.
2. **Les systèmes de décision** : Les décisions sont variables d'un éleveur à un autre car comme cela sera abordé dans le 2.1.3, elles sont prises en cohérence avec le projet de l'exploitation, mais aussi en fonction des valeurs de l'éleveur, des savoirs et connaissances, des représentations. Les perceptions des éleveurs sur les paysages vont influencer leurs décisions qui modifient en retour les paysages à travers les pratiques. Nous avons donc accordé une importance particulière au projet de l'exploitation mais aussi aux perceptions des éleveurs sur les ressources naturelles.
3. **La situation agraire** : Au-delà des conditions internes aux exploitations, les décisions et les paysages sont influencés par la situation agraire de l'exploitation. La situation agraire correspond à la situation géographique et à l'inclusion sociale et économique locale de l'exploitation. Plus précisément, il s'agit de l'insertion de l'exploitation dans les réseaux locaux, de sa situation sociale (types d'agriculture familiale *vs* types de fazenda[1] vont fortement déterminer l'accès au capital, à la main d'œuvre et à la terre), l'année de colonisation, le type de communauté (dans ou hors du périmètre de la réforme agraire), la distance et l'accessibilité à la ville.
4. **Les facteurs externes régionaux et globaux :** Ces facteurs peuvent avoir un effet sur la situation agraire de l'exploitation ou les systèmes de décision de l'exploitation qui vont dans le prolongement faire évoluer les paysages. Ces facteurs sont économiques

[1] En Amazonie, il existe une diversité d'agricultures familiales. Des typologies ont déjà été établies par Ferreira (2001) et Bonaudo (2005) pour les colons des fronts pionniers de la Transamazonienne. Dans les fazendas, Poccard-Chapuis (2004) et Piketty *et al.* (2015b) soulignent également l'hétérogénéité des types de fazendas.

(prix des marchandises agricoles, croissances des marchés…), culturels (démographie, croyances, valeurs, attitudes…), technologiques (modernisation…), politiques et institutionnels (politique agricole, de conservation de la nature, droits de propriété…), environnementaux, etc.

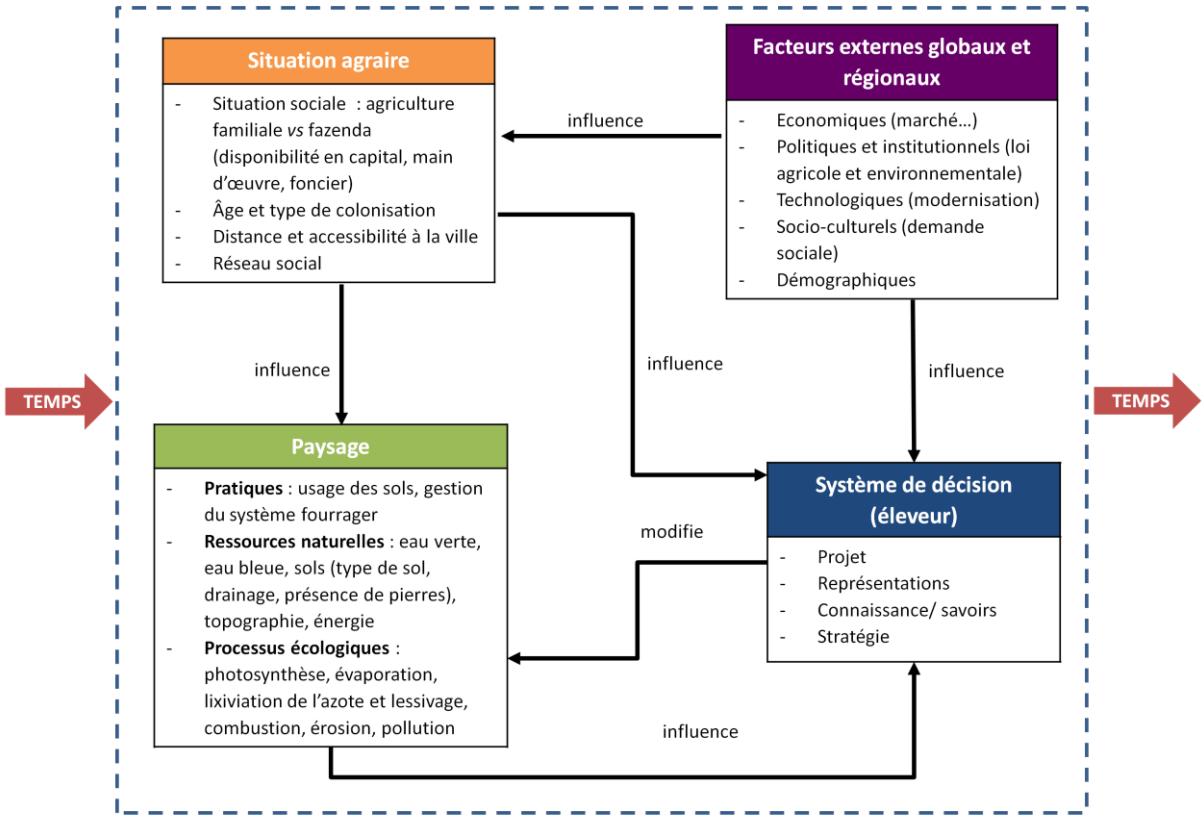


Figure 2-1 : Cadre d'analyse des interactions entre paysages, systèmes de décisions et les facteurs influençant ces relations dans le temps : la situation agraire et les facteurs externes régionaux et globaux.

Dans les paragraphes suivants, nous décrirons les approches utilisées pour étudier ces relations :

- Dans la section 2.1.2, nous présenterons les éléments théoriques issus de trois champs disciplinaires (géographie, écologie du paysage et géo-agronomie) sur lesquels nous nous sommes appuyés pour formaliser notre approche par le paysage.
- La section 2.1.3 développera les théories utilisées pour analyser les décisions des éleveurs, en particulier les concepts de système socio-écologique, de rationalité limitée et de pratiques agricoles. Nous présenterons aussi quelques spécificités dans le fonctionnement des exploitations agricoles amazoniennes.
- Dans la section 2.1.4, nous présenterons les deux cadres que nous avons mobilisés pour analyser les dynamiques entre système de décision et paysage. Les trajectoires nous permettent de reconstruire a posteriori les transformations des paysages des exploitations et d'en comprendre les causes. Les Systèmes Multi-Agents, un outil informatique de modélisation individu-centrée issu de l'Intelligence Artificielle

Distribuée, sont privilégiés pour leur capacité à considérer des interactions entre des individus et processus situés dans l'espace.

2.1.2 Approche par le paysage : un cadre pour l'analyse spatiale des interactions entre pratiques, processus écologiques et ressources naturelles localisées dans l'espace

2.1.2.1 Le paysage, un concept polysémique

Le paysage connaît un intérêt accru et divers dans la sphère scientifique et au niveau des politiques publiques. Sur le plan des politiques, nous pouvons citer la mise en place de la Convention Européenne du Paysage (CEP) en 2000, premier texte de droit international entièrement consacré au paysage et qui a été signé par 40 États membres du Conseil de l'Europe. Sur le plan scientifique, nous pouvons citer le lancement par le CIFOR d'une plateforme d'échanges spécifique sur ce thème, le *Global Landscapes Forum* (CIFOR, 2016), ainsi que de nombreux travaux scientifiques autour de la conception de paysages climato-intelligents (Minang *et al.*, 2014b), de paysages productifs (Chavez-Tafur & Zagt, 2014) et de paysages plus durables (Antrop, 2006 ; Wu, 2013).

Mais qu'est-ce qu'un paysage ? Ce terme polysémique a fait l'objet de nombreuses définitions (Antrop, 2000), avec des interprétations divergentes, entre des approches plutôt naturalistes ou humanistes, entre sujet et objet (Bertrand, 1978). Pour les écoles de pensée qui considèrent le paysage comme une nature-sujet, il n'existe que par l'intermédiaire d'un processus passant de la formation de l'image à son interprétation sociale (à travers l'art, la peinture, la littérature par exemple). Le paysage est défini comme un phénomène culturel et présente une dimension immatérielle, subjective et sensible et renvoie à des émotions, des symboles, des valeurs. Pour les écoles de pensée qui l'abordent comme une nature-objet, le paysage est une réalité qui existe indépendamment du sujet (de l'observation et de l'observateur) et qui correspond à une portion d'espace. Le paysage est appréhendé sous sa dimension matérielle dans une visée objective. Il peut être vu comme un « système » (*ibid*). Dans la conception anglophone, le paysage est issu d'un assemblage de deux mots : *land* qui correspond à une portion délimitée de territoire et *scape* qui est un assemblage d'objets similaires, donnant le terme « *landscape* » (Burel & Baudry, 1999). Il est intéressant de souligner que le terme « *landscape* » peut aussi être utilisé par la communauté scientifique anglo-saxonne pour traduire le terme territoire. Dans la thèse, paysage et territoire[1] ont deux sens bien distincts.

Ce qu'il est important de retenir c'est que d'un concept purement esthétique, la notion de paysage a connu d'importantes évolutions de significations et est aujourd'hui mobilisée par de nombreuses disciplines : géographie, écologie, géologie, agronomie, sociologie, etc. (Burel &

[1] Caron (2005) qui s'inspire de Brunet *et al.* (1992) définit le territoire comme : « *(i) un espace borné, aux limites plus ou moins précises, et approprié par un groupe social ; (ii) un sentiment ou une conscience d'appartenance de la part de ses habitants ; (iii) l'existence de formes d'autorité politique et de règles d'organisation et de fonctionnement* ».

Baudry, 1999). Le paysage, qui intègre fortement des composants étudiés par des disciplines distinctes, fournit un cadre d'analyse commun aux recherches interdisciplinaires sur des unités spatiales (Matthews & Selman, 2006).

2.1.2.2 Une approche croisant trois disciplines

Notre approche du paysage intègre des éléments théoriques de trois champs disciplinaires : géographie, écologie du paysage et géo-agronomie. Dans les paragraphes suivants, nous développerons les corpus théoriques correspondants.

2.1.2.2.1 Un espace visible (Géographie)

Nous avons emprunté à la géographie plusieurs éléments clés pour conceptualiser le paysage, introduits notamment par Georges Bertrand et Roger Brunet. Selon Bertrand (1968), le paysage est « *sur une certaine portion d'espace, le résultat de la combinaison dynamique, donc instable, d'éléments physiques, biologiques et anthropiques qui en réagissant dialectiquement les uns sur les autres font du paysage un ensemble unique et indissociable en perpétuelle évolution* ». Brunet (1974) définit le paysage comme « *très précisément et tout simplement ce qui se voit* ». Ce géographe insiste sur le fait qu'il peut exister indépendamment de nous, qu'il peut être vécu et senti par ces usagers mais qu'il peut aussi être le fruit de représentations et de jugements de valeurs. De ces deux approches, nous retenons que le paysage est un espace géographique, visible, dynamique, résultat d'interactions entre processus sociaux et écologiques.

Les géographes ont également proposé des méthodes d'analyse des paysages pour décrire et expliquer les structures spatiales de ces paysages. Sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale brésilienne, la méthode d'analyse des paysages par les indicateurs spatiaux (Laques, 2003) a notamment été mobilisée pour analyser le processus de colonisation et de déforestation. La démarche se décompose en deux étapes. Premièrement, il s'agit d'identifier des indicateurs paysagers qui permettent de caractériser les processus de colonisation sous-jacents. Ces indicateurs sont des éléments constitutifs des paysages dont la nature, leur mode d'agencement spatial, leur forme et leur fréquence définissent un modèle paysager, c'est-à-dire un « *archétype représentatif d'une portion d'espace homogène et cohérente tant sur le plan physionomique que sur celui de l'usage socio-économique à l'origine de sa production* » (Béringuier *et al.*, 1999). Ces modèles paysagers sont reconnus à partir d'observation de paysages, d'analyse d'images satellites et d'entretiens avec les acteurs. Deuxièmement, l'espace est découpé en portions homogènes et classé en fonction de leur degré de ressemblance avec l'un ou l'autre des modèles. Cette approche, utilisée sur la Transamazonienne (Venturieri, 2003), dans le sud du Pará (Mertens *et al.*, 2002 ; Thales *et al.*, 2003 ; Poccard-Chapuis, 2004), ainsi que dans le Mato Grosso (Dubreuil *et al.*, 2008), a permis d'établir des relations étroites entre les types d'acteurs et des faciès paysagers. L'utilisation d'indicateurs paysagers a aussi permis de réaliser une cartographie de stades de colonisation des fronts pionniers (de la pré-colonisation à l'intensification), dans l'état du

Mato Grosso (Arvor, 2009 ; Arvor *et al.*, 2013) et du Pará (Thalês & Poccard-Chapuis, 2014), en fonction notamment de l'occupation des sols dans les paysages.

2.1.2.2.2 Une organisation spatiale structurée et fonctionnelle (Ecologie du paysage)

Le terme d'écologie du paysage a été introduit par le biogéographe allemand, Troll en 1939, quelques années après que Tansley ait créé celui d'écosystème en 1935. En créant ce concept à l'interface entre géographie et écologie, Troll voulait dépasser les limites de l'écologie des systèmes qui ne tenait pas compte de l'espace et de son hétérogénéité.

Pour les écologues du paysage, le paysage peut être défini comme « une portion de territoire hétérogène, composée d'ensembles d'écosystèmes en interaction dont l'agencement se répète de manière similaire dans l'espace » (Forman & Godron, 1986). Il s'agit d'« un niveau d'organisation des systèmes écologiques supérieur à l'écosystème » et qui « existe indépendamment de la perception » (Burel & Baudry, 1999).

Un des axes de recherche de l'écologie du paysage et qui nous intéresse dans cette thèse concerne les relations réciproques entre la structure des paysages (*patterns*) et le fonctionnement des écosystèmes (processus écologiques). L'objectif pour les écologues est de comprendre comment les structures spatio-temporelles de paysage influencent les flux d'organismes, de matière ou d'énergie, et les répartitions spatiales d'espèces ou de peuplements, et réciproquement comment les processus écologiques déterminent les structures de paysage (Forman, 1995).

L'écologie du paysage a proposé un langage servant à décrire les structures paysagères : matrice, tâche (*patch*), corridor, lisière, mosaïque (Encadré 2-1). L'arrangement spatial de ces différents éléments forme le patron paysager (*landscape pattern*) (Burel & Baudry, 1999 ; Metzger, 2001b). L'écologie du paysage a aussi introduit de nouveaux concepts servant à expliquer les fonctionnalités des écosystèmes tels que la fragmentation, la connectivité, et l'hétérogénéité (Encadré 2-1). Ces trois processus inter-reliés ont de forts impacts sur la biodiversité notamment.

L'écologie du paysage a proposé des méthodes d'analyse et des indicateurs paysagers visant à décrire et analyser spatialement les structures paysagères. Alors que plus d'une centaine de métriques paysagères ont été répertoriées par Cushman *et al.* (2008), ces auteurs ont réussi à isoler une quinzaine de métriques qui permettent de décrire de manière universelle et fiable les structures des paysages. Il s'agit par exemple de la dispersion spatiale des tâches dans les paysages (basée sur la variabilité des distances au plus proche voisin), de la variabilité des formes des tâches (relation entre le périmètre et la surface), de la diversité (diversité et régularité des types de tâches mesurées à travers par exemple l'indice de *Shannon*), ou la dominance de grandes tâches.

Sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale brésilienne, de récents travaux ont mobilisé des métriques paysagères pour caractériser la dynamique spatio-temporelle des paysages et rendre compte de leurs fonctions. A partir du calcul de neuf métriques paysagères rendant compte de la composition des usages des sols (aire totale) et de la structure des paysages (e.g., densité de lisière, richesse paysagère en patch, indice d'irrégularité) et de leur dynamique temporelle (1990-2007), Oszwald *et al.* (2011) ont proposé un indicateur paysager synthétique visant à renseigner quantitativement et qualitativement l'état de la mosaïque paysagère de 27 fermes (Transamazonienne et sud du Pará) et comparer leur degré d'anthropisation. Dans la zone bragantine (nordeste du Pará) où prédomine l'usage de l'abattis-brûlis, Metzger (2002) a utilisé des métriques paysagères (composition et hétérogénéité des paysages, fragmentation et isolement des forêts primaires et secondaires, densité des lisières) afin d'analyser les effets d'un raccourcissement de la période de jachère sur la dynamique et la stabilité des paysages (comparaison entre 6 sites de 250 ha). Le même auteur s'est aussi appuyé sur les métriques paysagères (taille moyenne des tâches, nombre de patch...) pour modéliser le meilleur compromis (*trade-offs*) entre conservation des forêts et usages agricoles via l'abattis-brûlis dans un paysage de 500 ha (Metzger, 2001a).

Encadré 2-1 : Langage structural et fonctionnalités en écologie du paysage

Metzger (2001b) dans « *O que é écologie de paisagens ?* » propose une synthèse des principaux termes utilisés pour décrire la structure des paysages en écologie du paysage.

Matrice : C'est l'élément dominant, englobant ou qui a le plus fort degré de connexion qui contrôle la dynamique de paysage. La matrice abrite des taches et des corridors.

Tache : Aire homogène (à une échelle déterminée) d'une unité de paysage, qui se distingue des unités voisines et qui présente des dimensions spatiales réduites et non linéaires.

Corridor : Aire homogène (à une échelle déterminée) d'une unité de paysage, qui se distingue des unités voisines et qui présente une disposition spatiale linéaire.

Lisière : Aire de transition entre deux composants du paysage.

Mosaïque : C'est l'ensemble des tâches, corridors et matrices (ou au moins deux de ces éléments).

La structure des paysages influence les fonctionnalités des écosystèmes et notamment (Burel & Baudry, 1999) :

La fragmentation d'un habitat : ce processus est généré soit par la réduction de la quantité totale des taches qu'un organisme peut utiliser, soit par leur morcellement en fragments plus petits et éloignés.

La connectivité : c'est la capacité du paysage à faciliter les flux biologiques entre taches. La connectivité dépend fortement de la proximité des éléments de l'habitat, de la densité en corridors, et de la perméabilité de la matrice.

L'hétérogénéité : elle est liée à la fois à la diversité des éléments (taches) et à la complexité de leurs relations spatiales (éléments plus ou moins fragmentés et connectés). Un paysage est d'autant plus hétérogène que le nombre d'éléments augmente et que ces éléments sont fragmentés dans l'espace.

2.1.2.2.3 Des pratiques agricoles localisées (Géo-agronomie)

Notre approche du paysage s'appuie enfin sur le courant de recherche de la géo-agronomie, un courant de recherche hybride entre géographie et agronomie qui considère le paysage comme le « support, facteur et produit des pratiques observées » (Landais *et al.*, 1988 ; Deffontaines, 1997). Ce courant propose d'analyser les relations entre localisation des pratiques agricoles et *patterns* paysagers. Plus précisément il s'agit de : i) comprendre dans quelles mesures les caractéristiques biophysiques des paysages et la configuration spatiale des parcelles agricoles influencent les décisions de localisation des exploitants agricoles (Thenail & Baudry, 2004 ; Mottet *et al.*, 2006 ; Andrieu *et al.*, 2007a) ; ii) d'étudier comment les pratiques agricoles façonnent la structure et la dynamique des paysages (Primdahl & Kristensen, 2011).

Dans cette approche, le paysage est appréhendé comme un agroécosystème spatialisé. Toutefois, cette approche n'exclut pas que d'autres activités (non agricoles) puissent faire partie des paysages et utilise pour cela une large définition. « Le paysage est une portion de territoire vue par un observateur. Y sont inscrits des faits naturels et humains, actuels ou passés, dont certains aspects sont visibles à un moment donné » (Deffontaines *et al.*, 2006). S'inspirant de la géo-agronomie, récemment, a été proposé le concept d'agronomie des paysages (Benoit *et al.*, 2012 ; Rizzo *et al.*, 2013). Outre les relations entre pratiques agricoles et *patterns* paysagers, cette approche introduit un troisième pôle, celui de ressources naturelles. Ce cadre conceptuel considère que le choix de pratiques et leur localisation sont conditionnées par les perceptions qu'ont les agriculteurs de leurs paysages et des ressources naturelles et que les transformations des paysages sont les résultats intentionnels ou non intentionnels des interactions entre pratiques agricoles et dynamiques des ressources naturelles.

L'un des principaux apports de cette approche a été de montrer que l'hétérogénéité des paysages influence les décisions de localisation des agriculteurs et que ces derniers considèrent une multitude de facteurs dans leur stratégie d'organisation spatiale (Morlon, 2005 ; Thenail *et al.*, 2009)

- les contraintes biophysiques : la topographie, l'altitude, le type de sols, la capacité de drainage et la profondeur, l'inondation en saison humide, le climat, la présence d'un point d'eau, d'un ruisseau ;
- les caractéristiques topologiques telles que la distance au siège de l'exploitation, aux bâtiments d'élevage, les obstacles naturels ou anthropiques aux déplacements des animaux, l'accessibilité aux véhicules (voies d'accès), la dispersion des parcelles, la taille et forme des parcelles ;
- les caractéristiques socio-économiques de l'exploitation : la structure de l'exploitation (type de ferme, taille), les caractéristiques de l'exploitant (âge, genre, éducation), du foyer (pluriactivité, disponibilité de main d'œuvre) l'âge de l'exploitation, l'orientation productive ;

- les caractéristiques culturelles de l'exploitation : tradition, objectifs individuels et collectifs ;
- les caractéristiques techniques liées à l'équipement des parcelles (réseau d'irrigation, de drainages), aux variétés, aux lots d'animaux, etc. Par exemple, les parcelles les plus éloignées sont préférentiellement utilisées pour les femelles en gestation, les plus proches pour les mises bas (meilleure surveillance) ou pour les vaches traites (facilite les déplacements à la salle de traite).

L'approche paysagère constitue enfin une entrée privilégiée pour étudier les dynamiques agraires et en particulier d'intensification et d'extensification de l'élevage (Sheeren *et al.*, 2015). En effet, le paysage étant révélateur des usages des sols et des pratiques agricoles, l'analyse de leurs transformations spatio-temporelles peut permettre de caractériser et de comprendre ces dynamiques.

2.1.2.3 Echelle spatiale et temporelle

2.1.2.3.1 Paysage, un concept multi-scalaire et multiniveaux

Le paysage peut être étudié à de multiples échelles (Sayer *et al.*, 2013), spatiales et temporelles. L'échelle spatiale est caractérisée à la fois par l'étendue de la zone représentée et le degré de résolution, c'est-à-dire le niveau de grain de l'information représentée. L'échelle temporelle est fonction de la durée de l'étude et du pas de temps entre deux observations. Le choix des échelles temporelle et spatiale a une grande importance du fait du phénomène de dépendance d'échelle. Une variation de l'extension et de la résolution, mais aussi du pas de temps et de la durée peut faire grandement varier le phénomène observé (Burel & Baudry, 1999). Van Noordwijk (2002) a montré par exemple que l'échelle spatiale (étendue de la zone) peut faire fluctuer par deux les *trade-offs* entre les stocks de carbone et la productivité des cultures.

D'après les écologues du paysage Burel & Baudry (1999), l'échelle spatiale doit correspondre à celle de la perception humaine située au-dessus de l'écosystème mais en-dessous de la région et du continent. Elle peut aller de quelques hectares jusqu'à quelques centaines de km². La délimitation du paysage va finalement dépendre de l'objet d'étude et de l'objectif. Pour ce qui est des processus biophysiques, le bassin versant constitue un périmètre d'analyse pertinent pour étudier les flux de matières et de nutriments entraînant des phénomènes d'érosion ou de pollution de l'eau (Joannon *et al.*, 2006 ; Chaplin-Kramer *et al.*, 2016), alors que les études sur la biodiversité sont menées à des échelles qui vont de la matrice (Cousins & Aggemyr, 2008 ; Steckel *et al.*, 2014), à l'échelle d'un ensemble de bassins versants ou d'une région afin de pouvoir intégrer notamment les effets de connectivité et de voisinage dans les paysages (Gama *et al.*, 2013 ; Tambosi & Metzger, 2013). Pour l'étude de processus sociaux, outre le temps et l'espace, il convient de considérer, les structures sociales (structures individuelles et organisations) et les institutions c'est-à-dire les règles, les lois, les politiques, les normes culturelles (Minang *et al.*, 2014a). Le choix de l'échelle peut donc correspondre à

un niveau hiérarchique d'action ou de décision, individuel ou collectif, telles qu'une exploitation agricole, une communauté, une commune, une petite région.

L'approche d'un paysage comme un système socio-écologique où interagissent processus biophysiques et sociaux rend la délimitation de l'échelle spatiale encore plus délicate. En effet, les échelles spatiales pertinentes pour approcher un processus écologique ne coïncident pas nécessairement avec les unités de gestion des paysages où sont prises les décisions. Cette inadéquation d'échelles entre processus écologiques et de décision décrite par Cumming *et al.* (2006) comme un « *spatial scale mismatch* » peut affecter les fonctions des systèmes socio-écologiques et générer des inefficiences. Par exemple, les risques d'érosion hydrique nécessitent une coordination des actions à l'échelle du bassin versant (Souchère *et al.*, 2010), alors que le choix des types de travail des sols, des cultures et de leur localisation est généralement effectué individuellement par l'agriculteur. Autre exemple, la biodiversité sera favorisée par la connectivité des paysages sur de larges étendues. Or, la décision de conserver ou pas des corridors écologiques telles que les ripisylves ou les haies se fait au niveau d'une multitude d'exploitations agricoles (Thenail & Baudry, 2004).

Le paysage peut enfin être considéré comme un système hiérarchisé constitué de niveaux inférieurs (parcelles, organismes), interagissant avec des paysages voisins et emboîtés dans une succession de niveaux supérieurs (éco-régions, continent, planète) (Minang *et al.*, 2014a). Cette théorie de la hiérarchie suppose qu'il existe une corrélation entre échelle d'espace et de temps (les phénomènes intervenant à des niveaux englobants sont beaucoup plus lents que ceux des niveaux inférieurs) (Burel & Baudry, 1999).

2.1.2.3.2 Focaliser l'exploitation agricole et les évolutions depuis l'installation

Dans la thèse, nous avons choisi de délimiter notre analyse des paysages au niveau d'organisation de l'exploitation agricole, c'est-à-dire un paysage géré par un système de décision (l'agriculteur/l'exploitation agricole). Plusieurs raisons nous ont poussés à faire ce choix.

- A cette échelle, les connaissances font défaut dans la région.
- Par le choix des usages des sols et la structuration du territoire de l'exploitation, les paysages sont fortement façonnés par les agriculteurs (Deffontaines *et al.*, 1995 ; Kristensen *et al.*, 2004 ; Gibon, 2005).
- Sur les fronts pionniers et post-pionniers d'Amazonie, l'exploitation agricole constitue le niveau principal de prise de décision concernant la gestion de l'espace fourrager et des paysages. En effet, dans ces territoires, les comportements des colons sont plus individualistes et les niveaux supérieurs d'organisation collective (que ce soit les organisations collectives comme les communautés ou les territoires administratifs comme les municipalités) ont encore peu d'influence sur les décisions dans les systèmes d'exploitation et la coordination dans la gestion des ressources. Toutefois, les paysages des exploitations sont emboîtés dans des étendues spatiales plus larges et nous

n'occultons pas le fait que leur dynamique peut résulter de processus ayant lieu à une plus large échelle et d'interactions avec d'autres acteurs et paysages : par exemple la propagation de feu d'une exploitation à une autre (Cammelli, 2013), la régénération forestière par la dispersion de graines d'une surface forestière à proximité (Cassiano *et al.*, 2013).

- La structure des territoires d'exploitation dans notre terrain d'étude présente des spécificités. Les parcelles des exploitations agricoles sont contiguës et forment un espace continu. De plus, les exploitations, même familiales occupent de très larges surfaces, jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'hectares dans les fazendas.
- En nous positionnant à l'échelle de l'exploitation, nous pouvons étudier les paysages à une fine résolution et ainsi tenir compte de la diversité des caractéristiques paysagères (sur le plan topographique, pédologique et des usages de sol intra et inter parcelles) dans l'étude de l'organisation spatiale des paysages de l'exploitation.

La délimitation de l'échelle spatiale ne se fait pas indépendamment de l'échelle temporelle (Martin *et al.*, 2006). Nous avons ici défini une échelle de temps qui nous permette de tester l'hypothèse selon laquelle il existe dans cette phase de transition agraire de nouvelles interactions entre système d'élevage et ressources naturelles. Ceci implique d'étudier ces relations à deux périodes clés : dans un contexte de déforestation et un contexte post-déforestation. Plutôt que de définir une date et une durée précise, nous avons préféré étudier ces relations depuis la date d'arrivée des colons sur l'exploitation et donc nous intéresser à l'ensemble du cycle de vie de l'exploitation.

2.1.2.4 Synthèse

Afin d'analyser l'éco-efficience des paysages dans le processus d'intensification des systèmes d'élevage en Amazonie orientale brésilienne, nous proposons dans la thèse une approche par le paysage qui s'appuie sur des apports conceptuels de trois disciplines : géographie, écologie du paysage et agronomie (Figure 2-2). Le paysage est conceptualisé comme un agroécosystème spatialisé où interagissent des pratiques agricoles (pilotées par un ou plusieurs systèmes de décision), des processus écologiques et des ressources naturelles qui ont une localisation bien précise (Figure 2-3). Le paysage est l'expression visible de cet arrangement spatial. Dans ce cadre conceptuel, le choix et la localisation des pratiques agricoles sont influencées à la fois par les perceptions qu'ont les agriculteurs sur les ressources naturelles et par d'autres déterminants socio-économiques et topologiques tels que la forme des parcelles, la distance, leur accessibilité. Ce qui nous intéresse particulièrement ici c'est la façon dont le paysage est piloté pour l'intensification de l'élevage.

En analysant les interactions spatiales entre pratiques agricoles, ressources naturelles et processus écologiques, le paysage offre un cadre pour raisonner dans l'espace des équilibres entre production agricole et conservation de la forêt et faire ainsi des propositions pour la construction de paysages éco-efficients. Multi-scalaire, le paysage peut être mobilisé à

différentes échelles. Nous avons choisi de délimiter leur analyse à l'échelle de l'exploitation agricole.

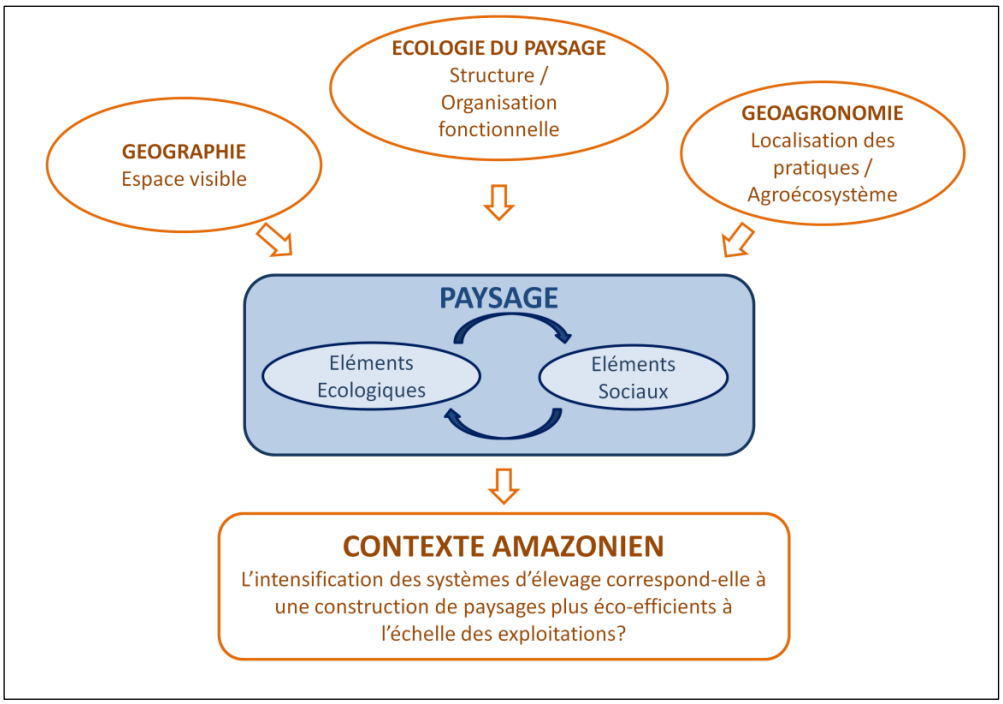


Figure 2-2 : Cadre conceptuel mobilisé pour analyser l'éco-efficience des paysages en Amazonie orientale. Notre approche s'appuie sur les apports théoriques de la géographie, la géo-agronomie et l'écologie du paysage.

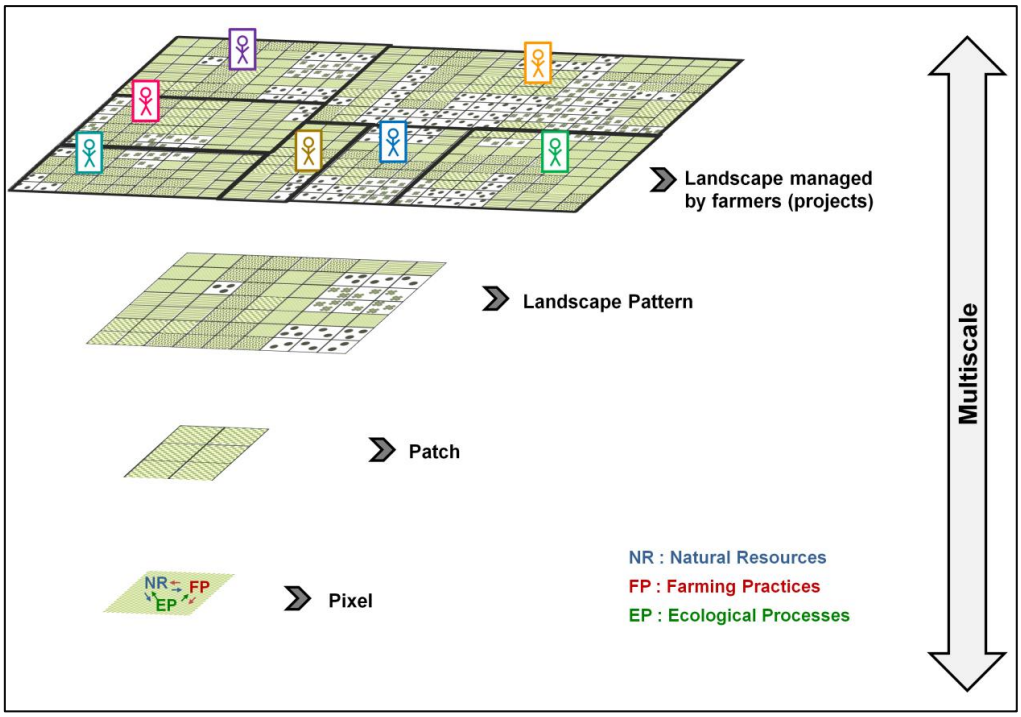


Figure 2-3 : Le Paysage dans la thèse : un agroécosystème spatialisé. Le paysage est conceptualisé comme un agroécosystème spatialisé où interagissent des pratiques agricoles pilotées par un ou plusieurs systèmes de décision, des processus écologiques et des ressources naturelles qui ont une localisation bien précise. Il constitue un espace visible, résultat d'interactions entre un projet agricole et des dynamiques écologiques.

2.1.3 Approche systémique de l'exploitation agricole pour comprendre les décisions d'intensification d'usage des sols

2.1.3.1 L'exploitation agricole, un système socio-écologique ouvert et piloté

Pour comprendre les décisions des éleveurs, nous avons eu recours à une approche systémique de l'exploitation agricole. Cette approche permet d'identifier les causes directes des changements des usages des sols et de les interpréter en référence aux moteurs sous-jacents (Mottet *et al.*, 2006). Même si notre focus concernait l'usage des sols et le système d'élevage, la compréhension de ces décisions nécessite une approche globale de l'exploitation afin de tenir compte des interactions et possibles rétroactions entre les différents composants de l'exploitation, ses finalités et son environnement.

Encadré 2-2 : Approche systémique

Proposée par Ludwig Von Bertalanffy au milieu du XX^{ème} siècle, l'approche systémique sert à éclairer le fonctionnement des objets complexes. Le système est vu comme « un complexe d'éléments en interactions » (Von Bertalanffy, 1968) qui « dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique » (Le Moigne, 1977). Quatre grands principes régissent leur fonctionnement (Donnadieu *et al.*, 2003) :

- **Complexité** : cela renvoie aux difficultés de compréhension. Le système est flou, incertain, imprévisible.
- **Interaction** : il existe un rapport d'influence ou d'échange entre les constituants du système et ces relations concernent des flux de matière, d'énergie, et d'information.
- **Globalité et émergence** : le système est un tout dont ses propriétés ne se réduisent pas à celles de ses parties. Les éléments sont interdépendants. Ce principe amène à analyser les propriétés émergentes au niveau global qui ne seraient pas observables au niveau des éléments constitutifs ni au niveau des interactions élémentaires (Le Moigne, 1977).
- **L'auto-organisation** : désigne la capacité pour les éléments constitutifs du système de produire une structure qui est généralement hiérarchisée.

La théorie des systèmes (Encadré 2-2) a été appliquée à l'exploitation agricole à partir des années 1970-80, notamment par Gilbert *et al.* (1980), chercheurs à l'origine du concept de « *farming system* » (**système d'exploitation**), et par plusieurs agronomes français (Osty, 1978 ; Landais *et al.*, 1988 ; Bonneviale *et al.*, 1989 ; Brossier *et al.*, 1989). Ce courant de recherche considère l'exploitation agricole (l'unité de production) et le foyer rural ou famille (unité de consommation) dans leur globalité (Gilbert *et al.*, 1980). « L'exploitation agricole n'est pas la simple juxtaposition d'ateliers de production ni l'addition de moyens et de techniques de production » (Brossier, 1987). Il s'agit d' « un tout organisé qui ne répond pas à des critères simples et uniformes d'optimisation » (Osty, 1978), mais qui est piloté en fonction des projets des exploitants et des contraintes (humaines, foncière, de capital) pour réaliser ces projets (Gilbert *et al.*, 1980).

Dans ce courant, le système d'exploitation est ouvert et emboîté dans une structure hiérarchique complexe, multi-domaines et multiscalaire, i.e. les systèmes alimentaires. Ces dimensions économiques, sociales et écologiques interagissent dans le temps et à différents niveaux d'échelles spatiales (locale, régionale, nationale et internationale) (Darnhofer *et al.*, 2010b ; Duru & Therond, 2014). Les systèmes d'exploitation et les exploitants jouent un rôle crucial dans cette hiérarchie puisqu'ils constituent une unité décisionnelle fondamentale dans le fonctionnement des agroécosystèmes (Darnhofer *et al.*, 2010b).

Dans l'approche systémique, le système d'exploitation est ainsi souvent représenté sous la forme de deux sous-systèmes fonctionnant de manière interdépendante (Landais *et al.*, 1988 ; Brossier *et al.*, 1989 ; Gibon *et al.*, 1999 ; Keating & McCown, 2001) (Figure 2-4) :

i) Le **système de décision** englobe les personnes, valeurs, objectifs, connaissances de l'exploitation (Keating & McCown, 2001). C'est là où sont exprimées les finalités (le projet porté par l'exploitation) et où est définie la stratégie en vue d'orienter et d'assurer le pilotage du sous-système de production. Les finalités présentent une certaine permanence dans le temps (Brossier *et al.*, 1989), alors que la stratégie de conduite définit la façon flexible d'organiser les activités préconisées et un ensemble d'ajustement à faire en réponse à certains évènements possibles (Martin-Clouaire *et al.*, 2016).

ii) Le **système de production** correspond aux processus productifs (tels que la croissance des plantes, des animaux) ayant lieu à l'échelle de la parcelle agricole et du troupeau. Le système de production fonctionne sur la base d'interactions entre éléments physiques et biologiques (plantes, sol, climat) (Le Gal *et al.*, 2010). Il est généralement décomposé en :

- **Système de culture** : d'après Sebillotte (1990), il se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession ainsi que les itinéraires techniques dont ces cultures font l'objet.

- **Système d'élevage :** concept introduit par Lhoste (1984), il est schématiquement représenté comme un système à trois pôles, piloté par « l'éleveur », en interaction avec « le troupeau » et « le territoire ». Landais (1992) a plus tard proposé une légère variante à ce schéma tripolaire en remplaçant « troupeau » et « territoire » par « animal » et « ressources ». Pour cet auteur, une caractéristique importante à considérer chez les animaux est leur mobilité. Cela joue sur le fonctionnement et la conduite des troupeaux (Landais, 1992) mais aussi sur la distribution spatiale et la localisation des activités dans l'espace.

- **Système fourrager** : mobilisé dans les exploitations d'élevages de ruminants, ce concept décrit « l'ensemble des moyens de production, des techniques et des processus qui, sur un territoire, ont pour fonction d'assurer la correspondance entre le ou les systèmes de culture et le ou les systèmes d'élevage » (Attonaty, 1980). Cette « correspondance » se caractérise par l'agencement dans le temps et dans l'espace des différentes ressources végétales destinées à l'alimentation des ruminants et visant un équilibre entre offre fourragère et besoins des animaux (Lemaire *et al.*, 2003). Même si l'une des principales fonctions remplies par le système fourrager est alimentaire, il

présente aussi un caractère multifonctionnel (protection de la biodiversité, constitution d'un patrimoine foncier...). Trois types de ressources végétales font parties du système fourrager : la ressource pâturée (surfaces en prairies permanente, temporaire et naturelle), la ressource fourragère stockée issue de prairies ou de surfaces cultivées (foin, ensilages...), et la ressource complémentaire de concentrés issus de surfaces cultivées (céréales, oléoprotéagineux) (Lemaire *et al.*, 2003).

iii) Système de décision et système de production **interagissent** via des flux, qualifiés de cybernétiques par Keating & McCown (2001). En effet, les décisions des agriculteurs influencent le sous-système de production qui à son tour sert d'indicateurs pour le système de décision (Le Gal *et al.*, 2010). Les opérations peuvent différer des stratégies qui ont été préconisées, dans la mesure où elles sont réalisées en fonction de la disponibilité en ressources de l'exploitation (terre, capital, main d'œuvre) et de l'environnement à l'instant t (Martin-Clouaire *et al.*, 2016).

Récemment, plusieurs travaux de recherche ont extrapolé le cadre conceptuel des systèmes socio-écologiques (SES) aux systèmes d'exploitation (Fairweather, 2010 ; Feola & Binder, 2010 ; Milestad *et al.*, 2012 ; Rueff *et al.*, 2012). Le Système Socio-Ecologique (*Socio-Ecological System*)[1] est défini comme un système constitué d'un sous-système sociétal (composante humaine) et d'un sous-système écologique (biophysique) en interaction mutuelle (Gallopin, 1991). Les écosystèmes sont en effet influencés par les humains qui fournissent en retour des services écosystémiques (e.g., aliments, fibres, énergie et eau potable) essentiels au bien-être des sociétés (Berkes & Folke, 1998 ; Folke *et al.*, 2010). Les SESs sont des systèmes complexes et très dynamiques co-évoluant en réponse aux processus rétroactifs et aux changements perpétuels de l'environnement (Darnhofer *et al.*, 2010a). Multiniveaux, les SESs sont emboîtés dans une structure hiérarchique (Holling, 2001). Les interactions entre processus écologiques et sociaux ont lieu à de multiples échelles spatiales et temporelles (Liu *et al.*, 2015) ce qui peut générer des effets inter-échelles descendants ou ascendants[2] (Holling, 2001). Les dynamiques au sein des SESs ne sont pas linéaires et des comportements imprévisibles peuvent émerger au niveau global du fait des décalages temporels qui peuvent exister entre les interactions Nature-Société (Gallopín, 2006 ; Liu *et al.*, 2007 ; Darnhofer *et al.*, 2010b). Les SESs possèdent une capacité d'adaptation et d'apprentissage avec l'expérience (Holling, 2001). Les humains présentent en effet la capacité de se rappeler et d'apprendre du passé, mais aussi de percevoir les états actuels et futurs de leur environnement biophysique et social (Matthews & Selman, 2006).

Ces différentes caractéristiques font des systèmes socio-écologiques un cadre pertinent pour approcher le système d'exploitation et analyser les interactions entre système de décision et paysage. Le système d'exploitation est composé d'un système social, associé aux composantes humaines de l'exploitation, c'est-à-dire à l'exploitant agricole avec sa famille

[1] D'autres auteurs préfèrent le concept de « Coupled Human-Natural System » ou de « Socio-Environmental System » (Turner Ii *et al.*, 2016).
[2] Ce phénomène a été décrit comme la panarchie (Holling, 2001).

(dans le cas d'une exploitation familiale), ses projets, valeurs, savoirs, perceptions, ressources humaines, financières et matérielles, et d'un système écologique représentant l'agroécosystème.

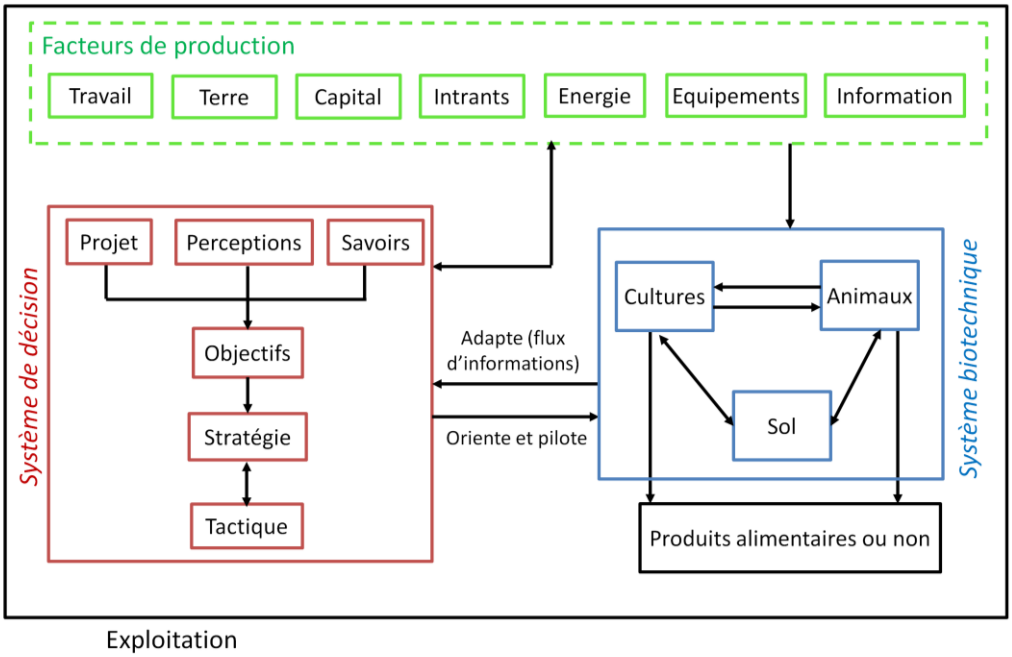


Figure 2-4 : Schéma conceptuel du système d'exploitation.Adapté de Bonneviale *et al.* (1989) et Keating & McCown (2001)

2.1.3.2 Des décisions guidées par un projet

Pour étudier les décisions des agriculteurs, nous nous sommes appuyés sur les théories suivantes.

- Les agriculteurs font des choix leur paraissant satisfaisants plutôt qu'optimum. Cette théorie de la rationalité limitée proposée par Herbert Simon (Simon, 1959) considère que les agents économiques disposent d'une quantité d'information et de capacités cognitives limitées leur empêchant d'optimiser leur choix.
- Les décisions ne sont pas toujours basées sur des choix rationnels, des informations scientifiques, ou des évaluations objectives de faits, mais sur des informations filtrées selon leur perception et leurs modèles mentaux (construits cognitifs) (Darnhofer *et al.*, 2010a). De récentes études ont montré que les modèles mentaux des agriculteurs sur les services écosystémiques (Meyfroidt, 2013 ; Lamarque *et al.*, 2014) et les paysages (Vuillot *et al.*, 2016) influencent leurs pratiques d'usage des sols.
- Les décisions des agriculteurs sont cohérentes avec leurs projets (ensemble d'objectifs plus ou moins conscients, hiérarchisés et contradictoires), et compte tenu de la perception qu'ils ont de leur situation et des finalités fixées à l'exploitation. « Les agriculteurs ont des raisons de faire ce qu'ils font » (Bonneviale *et al.*, 1989) et leurs décisions ne répondent pas à la seule logique de maximisation du profit, de la productivité ou d'une fonction objectif (Landais *et al.*, 1988 ; Dent *et al.*, 1995 ; Papy,

2000 ; Edwards-Jones, 2007 ; Karali *et al.*, 2013). D'après Petit *et al.* (1975), ces décisions s'ajustent dans le temps du fait de l'existence d'un double processus d'adaptation entre situation et objectifs. La situation dépend des objectifs et les objectifs évoluent en fonction de la situation de l'exploitation (Chia *et al.*, 2014) et des opportunités apparaissant dans l'environnement (Milestad *et al.*, 2012). Parmi les principaux facteurs internes pouvant influencer les décisions sur les choix des pratiques agricoles, on note les caractéristiques sociodémographiques de l'agriculteur, du foyer agricole (étape dans le cycle de vie, pluriactivité) et la structure de l'exploitation agricole (taille, type, situation financière) (Edwards-Jones, 2007).

Les décisions des agriculteurs peuvent viser différents horizons temporels : le temps long (plusieurs années) ou le temps rond (temps des pratiques journalières et saisonnières). Les types de décisions sont étroitement liés à cette temporalité. Les décisions d'ordre stratégiques qui concernent le choix des productions, des équipements, de main d'œuvre, ou d'amélioration génétique renvoient au temps long. Les décisions d'ordre tactique concernant l'organisation des processus productifs (par exemple choix des pâturages à réformer, des parcs à diviser, des surfaces de cultures à implanter) mettent en jeu l'horizon temporel annuel voire pluriannuel. Les décisions d'ordre opérationnelle (semis, nettoyage des pâturages, entretien des clôtures) concernent un horizon de temps infra-annuel, au jour le jour ou à une échelle très proche. L'ensemble de ces décisions interagit de manière descendante et ascendante : les décisions tactiques dépendent des décisions stratégiques qui peuvent en retour les influencer (Aubry & Michel-Dounias, 2006).

Les décisions d'intensification étudiées ici portent sur les types d'usage des sols et leur localisation ainsi que sur la conduite du troupeau. Les décisions qui nous intéressent sont à la fois d'ordre stratégique (quelles sont les adaptations dans le système de production, et la structure de l'exploitation ?) et tactique (quels sont les choix de cultures, les surfaces implantées et la configuration spatiale des usages des sols ?).

2.1.3.3 Spécificités des systèmes de décision dans les exploitations d'élevage d'Amazonie brésilienne

Alors que les systèmes d'exploitation d'Amazonie orientale brésilienne ont classiquement tendance à être divisés en deux groupes, les exploitations familiales[1] et les *fazendas* (ranchs), il existe en réalité plus de variantes. Nous distinguerons au moins trois types, chacun présentant des spécificités dans le fonctionnement du système de décision. La définition de cette typologie simplifiée n'exclut pas que des types hybrides puissent exister.

[1] La loi n°11.326 (Brasil, 2006a) définit les exploitations familiales comme des entités gérées par l'agriculteur familial et sa famille, exploitées majoritairement par une la main d'œuvre venant de la propre famille. La taille de l'exploitation est inférieure à quatre modules fiscaux et le revenu familial est principalement généré par l'activité de cet établissement agricole.

Dans les systèmes exploitation-famille (**exploitation familiale** de moins de 500 ha en général), les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles sont prises par les chefs d'exploitations et assimilés. Ces décisions sont guidées par le projet familial. La main d'œuvre salariée (minoritaire dans la force de travail) n'est généralement pas associée aux prises de décisions.

Dans les **fazendas**, les frontières entre décideur stratégique, tactique et opérationnel peuvent varier. Les ranchs sont la propriété de personnes physiques ou morales (sociétés) qui fixent les orientations/finalités du ranch. Parmi ces propriétaires, on trouve des entrepreneurs de type « éleveurs » issus de familles avec une forte tradition dans l'élevage et ayant migré dans la région attirés par les opportunités foncières (amélioration du patrimoine) et des entrepreneurs de type « investisseurs » venant du secteur primaire (salariés des filières agricoles, techniciens), secondaire ou tertiaire (industriels, médecins, avocats...), pour lesquels l'élevage constitue une activité secondaire (Piketty *et al.*, 2015b).
Ces propriétaires emploient généralement un gérant et plusieurs ouvriers agricoles. Le gérant gère au quotidien la fazenda et selon l'ampleur des activités développées dans le ranch et le nombre de salariés, il dirige soit directement l'ensemble des salariés et opérations, soit indirectement en responsabilisant des chefs par atelier (machines, comptabilité, administration, fourrage, troupeau). Gérants et chefs d'ateliers constituent donc des unités décisionnelles supplémentaires par rapport au système exploitation-famille. Dans les fazendas, les processus de décision peuvent donc impliquer une pluralité de personnes.

Dans les **fazendas de taille moyenne** pour la région (moins de 2 000 ha), le propriétaire fixe les finalités du ranch et prend les décisions tactiques annuelles. Le gérant ne fait que les appliquer. Ce dernier prend en revanche les décisions opérationnelles quotidiennes voire les délègue aux chefs d'ateliers.

Dans les **grandes fazendas** (plus de 2 000 ha), les décisions stratégiques sont fixées par le fazendeiro. En revanche, le fazendeiro se concerte avec le gérant pour prendre les décisions tactiques voir les lui délègue. Les décisions opérationnelles quotidiennes sont généralement prises par les chefs d'ateliers.

2.1.3.4 Les pratiques à l'interface entre décisions et paysages

Les pratiques sont un objet d'étude central dans la thèse. Elles sont à la fois l'interface entre le système de décision et les paysages mais ont aussi des impacts directs ou indirects sur les ressources naturelles et donc sur les éco-efficiences. Les pratiques constituent en effet une entrée privilégiée pour remonter aux décisions des éleveurs et à leur projet (Landais *et al.*, 1988). Les pratiques correspondent « aux manières concrètes de faire des agriculteurs » (Teissier, 1979) et sont directement observables (Milleville, 1987), contrairement aux décisions qui sont implicites et qui ne sont pas toujours faciles à saisir pour un observateur extérieur (Landais *et al.*, 1988). Les pratiques constituent également une entrée privilégiée

pour analyser les paysages et pour étudier les éco-efficiences. En effet, selon leur localisation spatiale les pratiques vont avoir un effet positif ou négatif sur les ressources naturelles.

Le concept de pratique se distingue de celui de technique sur le point suivant : la pratique relève de l'action et est dépendante de l'agriculteur et des conditions dans lesquelles il la met en œuvre alors que la technique est indépendante de l'agriculteur (Teissier, 1979). Les pratiques sont le résultat de choix à un moment donné en fonction de l'information et de la connaissance technique dont les éleveurs disposent et des orientations stratégiques fixées pour atteindre des objectifs (Caron & Hubert, 2000). L'analyse des pratiques permet de « rendre compte synthétiquement des décisions prises pour gérer l'incertain au sein de l'environnement complexe (biologique, économique, sociologique,….) dans lequel ils agissent » (Darré & Hubert, 1993). L'étude des pratiques ne permet pas de reconstituer le processus décisionnel des éleveurs. Toutefois, plusieurs travaux (Hostiou, 2003 ; Girard *et al.*, 2008 ; Cialdella *et al.*, 2010) montrent que leur combinaison permet de rendre intelligible a posteriori une certaine cohérence d'ensemble correspondant à une « stratégie réalisée ».

L'étude des pratiques peut se faire de trois manières (Landais *et al.*, 1988):

- par les modalités, c'est-à-dire par la description « externe » des pratiques : Que fait l'agriculteur ? Comment le fait-il ?
- par l'efficacité, c'est-à-dire par l'analyse des effets et des conséquences des pratiques : Quels sont les résultats de son action (sur la productivité, les éco-efficiences) ?
- par les opportunités, c'est-à-dire par la formalisation des déterminants des pratiques : Pourquoi fait-il cela et en fonction de quels critères de décision ?

Il existe une grande diversité de modalités de pratiques d'élevage. Il est possible de les regrouper en deux types (Tableau 2-1) : les pratiques de gestion des animaux et des produits animaux (Landais *et al.*, 1987) et les pratiques de gestion de l'espace aussi qualifiées de pratiques territoriales (Caron & Hubert, 2000 ; Naïtlho *et al.*, 2003 ; Girard *et al.*, 2008). « L'espace devient territoire grâce à l'action organisatrice de l'éleveur » (Caron & Hubert, 2000).

Les pratiques de gestion des animaux et des produits animaux incluent les pratiques d'agrégation c'est-à-dire d'organisation du cheptel en sous-unités (troupeaux et lots). Les pratiques de conduite regroupent l'ensemble des pratiques visant à assurer l'entretien des animaux, leur alimentation et leur reproduction. Les pratiques d'exploitation font référence aux pratiques où l'éleveur exerce un prélèvement (traite pour le lait, tonte pour la laine...). Les pratiques de valorisation correspondent à l'ensemble des pratiques de transformation et de valorisation des produits animaux (Landais *et al.*, 1987).

Les pratiques de gestion spatio-temporelle du territoire nous permettent de nous informer sur les stratégies spatiales des éleveurs. Elles peuvent elles-mêmes être subdivisées en six types. Les opérations foncières incluent les opérations qui modifient le territoire de l'exploitation

telles que les achats, ventes et location de terres. Les modes d'usages des sols englobent les différentes surfaces cultivées (cultures de céréales, oléagineux) les prairies, la sylviculture, et les surfaces naturelles de forêt (primaire, secondaire, etc.). La gestion des couverts végétaux inclue les pratiques liées à la conduite des cultures et prairies (défriche, préparation du sol, semis, entretien, récolte). La gestion du pâturage fait référence aux différents modes de pâturage (continu, tournant, rationné ou au fil, zéro pâturage). Les aménagements regroupent l'ensemble des bâtis, chemins, clôtures, points d'eau (pour le bétail), infrastructures d'irrigation. La gestion spatiale de l'allotement correspond au mode d'allocation des lots d'animaux dans les parcs. La configuration spatiale des usages des sols reflète l'organisation spatiale des usages dans le parcellaire de l'exploitation.

Même si notre approche par le paysage nous a conduit à nous intéresser davantage aux pratiques spatialisées d'intensification de l'élevage, il est important de souligner que ces pratiques sont mises en place dans un système d'exploitation et qu'elles sont donc réfléchies en concordance avec la gestion des animaux. Par exemple, pour la gestion spatiale de l'allotement, l'éleveur peut décider de privilégier certains espaces de l'exploitation aux animaux ayant la meilleure génétique.

Tableau 2-1 : Typologie des pratiques étudiées dans les exploitations d'élevage

Groupe	**Pratiques**
Gestion des animaux et produits animaux	**Agrégation** des lots : allotement
	Conduite : entretien, reproduction, alimentation
	Exploitation : prélèvement sur les animaux (traite, tonte, gestion des fumiers…)
	Valorisation : transformation, commercialisation
Gestion spatio-temporelle du territoire	**Opérations foncières** : achat, vente, location de terres
	Mode d'usage des sols : agriculture, prairies temporaires et permanentes, forêt, friche...
	Gestion des couverts végétaux : défriche (changement d'usage), préparation du sol, semis, entretien (fertilisation, désherbage), récolte
	Gestion du pâturage : continu, tournant, rationné ou au fil, zéro pâturage
	Gestion spatiale de l'allotement
	Aménagement du territoire de l'exploitation : bâti, chemins, clôtures, point d'eau, irrigation
	Configuration spatiale des usages du sol (incluant les éléments semi-naturels et naturels)

Adapté de Landais & Lhoste (1987) ; Caron & Hubert (2000) ; Naïtlho *et al.* (2003) ; Girard *et al.* (2008)

La combinaison de ces différents types de pratiques doit nous permettre de caractériser des stratégies :

- d'intensification *vs* extensification : augmentation ou maintien de la productivité par unité de surface et animale ;

- de spécialisation *vs* diversification ;
- de mobilisation des mécanismes des agroécosystèmes : traditionnel (feu) vs bas niveau d'intrants vs chimique.

2.1.4 Modéliser les changements socio-techniques et les dynamiques de paysage : Trajectoires des exploitations et Modélisation Multi-Agents

2.1.4.1 Trajectoires des exploitations

Les exploitations agricoles évoluent dans des situations sociales, économiques, environnementales, politiques, et commerciales très changeantes et incertaines (Lemery *et al.*, 2005). La vitesse, l'échelle et la direction des changements des systèmes agricoles est difficile à prévoir (Thompson & Scoones, 2009), du fait notamment de rétroactions entre échelles spatiales, temporelles et entre domaines biophysiques et socio-économiques (Liu *et al.*, 2007 ; Darnhofer *et al.*, 2010a). Cette imprévisibilité est d'autant plus importante que certains évènements favorables aux changements peuvent être rapides et conjoncturels (e.g., un accident climatique, la spéculation sur un marché) et d'autres plus lents et structurels (e.g., la baisse tendancielle du taux de matière organique dans les sols, le changement climatique) (Darnhofer *et al.*, 2010b). Pour s'adapter[1], les exploitations agricoles peuvent faire évoluer la structure et les projets de l'exploitation pour répondre aux évolutions de l'environnement (on parle de flexibilité stratégique), mais aussi ajuster les compétences ou modifier les méthodes pour répondre à des variations non anticipées (on parle de flexibilité opérationnelle) (Lemery *et al.*, 2005).

Nous avons mobilisé le cadre d'analyse des trajectoires afin d'analyser les processus de changements des exploitations (Malderieux *et al.*, 2002) et rationaliser a posteriori les stratégies d'adaptation dans les exploitations (Capillon, 1993 ; Lemery *et al.*, 2005), sur le plan socio-technique et spatial, en lien avec les évolutions de l'environnement. Combinées à des typologies de comportements individuels, l'étude des trajectoires sert notamment à décrire l'hétérogénéité sociale et le caractère adaptatif des comportements sociaux (Gibon *et al.*, 2010). Ce cadre a été mobilisé par exemple pour investiguer la diversité de stratégies d'adaptations d'exploitations d'élevage dans des zones défavorisées (Cialdella *et al.*, 2009 ; Rueff *et al.*, 2012 ; Ryschawy *et al.*, 2013 ; Manoli *et al.*, 2014), et les stratégies d'alimentation des ruminants (Coulibaly *et al.*, 2007). Sur notre terrain d'étude amazonien, cette approche a notamment été éprouvée pour analyser le processus de dégradation des pâturages (Navegantes *et al.*, 2012b), de diversification laitière (Carvalho, 2010) et d'adoption de pratiques agroécologiques (Sanchez & Navegantes, 2016). Mais l'étude des trajectoires peut aussi être facilement couplée à une analyse des dynamiques spatiales de l'exploitation afin de mieux comprendre les évolutions de paysage (Mottet *et al.*, 2006) et d'organisation du

[1] L'adaptabilité est apprécié par l'aptitude du système d'exploitation à continuer de fonctionner au regard de conditions futures incertaines, de l'occurrence imprévisible de perturbations et d'un changement d'objectifs au fil du temps pour des motifs endogènes ou exogènes au système (Milestad *et al.*, 2012).

territoire d'exploitation (Caron & Hubert, 2000 ; Bonin & Lardon, 2002 ; Cialdella *et al.*, 2009), au regard des évolutions de l'exploitation. C'est ce qui nous intéresse ici.

Conceptuellement, une trajectoire peut être définie comme une succession d'étapes parcourues par une exploitation et délimitées par des changements structurels et/ou organisationnels de l'exploitation (Capillon, 1993 ; Moulin *et al.*, 2008). Retracer cette séquence d'évolution permet de distinguer des processus de changements progressifs (phase de cohérence) ou exceptionnels (phase de rupture) (Moulin *et al.*, 2008). Les phases de cohérence correspondent à des changements graduels et mineurs dans l'organisation et la conduite des activités qui n'affectent pas les décisions stratégiques des exploitants ni la cohérence globale du système. L'exploitation poursuit sa trajectoire routinière dans « une forme d'équilibre dynamique » (Castella, 2007). Dans les phases de rupture, le système connaît des transformations majeures sur un pas de temps plus ou moins long, conduisant à une remise en cause des décisions stratégiques et à un changement de cohérence. Ces phases de rupture sont occasionnées par un évènement déclencheur qui empêche le système de se reproduire à l'identique. Il peut s'agir d'un évènement ou d'une série d'évènements. Ces évènements correspondent soit à des opportunités (par exemple accès au foncier, programme de subventions) ou des « impératifs » (fluctuation des prix, nouvelle régulation, contrainte financière) (Sutherland *et al.*, 2012). Ces évènements peuvent être internes au système (le propre projet, l'histoire de la famille, l'évolution des facteurs de production), ou externes et concerner l'échelle locale (les activités économiques locales, le foncier, l'urbanisation, les réseaux d'acteurs, la logistique) ou globale (les politiques publiques agricoles et environnementales, les marchés, les filières, les crises sanitaires, la démographie, le climat). Le changement peut concerner aussi bien la dimension matérielle de l'exploitation (par exemple changement technologique, de marché) que sociale (changement de perceptions, de valeurs, de préférences) (Milestad *et al.*, 2012).

L'étude des trajectoires se fait généralement sur la base de données issues de bases statistiques ou d'enquêtes rétrospectives (récits de vie) et interprétées à travers des traitements manuels (graphique) et/ou statistiques (ACP, ACM…). L'intérêt des enquêtes rétrospectives est de pouvoir reconstruire de façon détaillée les chroniques des exploitations combinées aux évolutions de l'environnement et d'identifier, à partir des justifications données par les enquêtés, les évènements déclencheurs (techniques, sociaux, économiques, politiques et écologiques), les éléments sur lesquels ont porté les changements et les liens logiques entre évènements et changements (Moulin *et al.*, 2008). Les résultats de ces analyses sont généralement présentés sous la forme de typologies de trajectoires, définies à partir d'une séquence de différents types de stratégies choisis par l'exploitation au cours de sa trajectoire (Cialdella *et al.*, 2009) ou de l'analyse statistique de variables quantitatives ou qualitatives, d'état et de changement (Garcia-Martinez *et al.*, 2009 ; Rueff *et al.*, 2012 ; Ryschawy *et al.*, 2013).

2.1.4.2 Modélisation multi-agents des interactions entre système de décision et paysages

Outre l'utilisation des trajectoires pour comprendre les dynamiques d'adaptation dans le passé, nous avons eu recours à la modélisation multi-agents pour explorer les impacts de différents projets d'intensification des usages des sols (système de décision) sur les ressources naturelles et l'organisation spatiale des usages des sols (paysage) à l'échelle d'exploitation d'élevage.

2.1.4.2.1 Une approche *bottom-up*

Deux courants de modélisation complémentaires sont généralement mobilisés pour identifier et représenter les dynamiques des paysages : le courant *pattern-oriented* (aussi appelé *from pattern to process*) et le courant *process-oriented* (aussi appelé *from process to pattern*) (Verburg & Veldkamp, 2005 ; Verburg *et al.*, 2006 ; Castella & Verburg, 2007 ; Overmars *et al.*, 2007).

Le courant *pattern-oriented* est une approche descendante (*top-down*) qui permet d'établir des corrélations statistiques entre l'organisation des paysages (*patterns*) et les variables potentiellement explicatives (*processes*). Le raisonnement est déductif et s'appuie sur des modèles empiriques, spatialement explicites, construits à partir de données spatialisées (satellites ou photointerprétation). Cette approche est intéressante car elle est facilement et rapidement reproductible, à condition que les données soient disponibles (Overmars *et al.*, 2007). Toutefois, dans cette approche, le processus de décision est implicite et n'est pas analysé (Hersperger *et al.*, 2010). De plus, toutes les pratiques d'intensification n'ont pas d'impacts visibles dans le paysage et dans les images satellites (recours à l'achat de concentrés hors du territoire d'étude, fertilisation des parcelles) (Sheeren *et al.*, 2015) nécessitant le recours à d'autres données en particulier sur les systèmes de production agricoles. En Amazonie brésilienne, la disponibilité de données précises des recensements agricoles est limitée.

Le courant *process-oriented* est une approche ascendante (*bottom-up*) qui focalise la compréhension des processus (*processes*) à l'origine de l'organisation des paysages (*patterns*). Le raisonnement est inductif et utilise la construction de modèles théoriques de décisions pour simuler les impacts sur les paysages. Dans cette approche, les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont souvent utilisés (Castella & Verburg, 2007 ; Valbuena *et al.*, 2010a ; Valbuena *et al.*, 2010b). Les données sont généralement acquises sur la base d'observations, d'enquêtes et d'inventaires d'une diversité d'études de cas (Overmars *et al.*, 2007) afin de comprendre l'hétérogénéité des comportements des gestionnaires des paysages, puis sont extrapolées à un niveau d'organisation supérieur sur la base de typologies (Valbuena *et al.*, 2008). Le principal intérêt de cette approche est de pouvoir identifier les relations de cause à effet entre les décisions des acteurs et l'organisation des paysages et d'explorer les dynamiques sur le long terme. Cependant, étant basée sur un important travail de collecte de

données, cette approche est difficilement reproductible et le changement d'échelle à un niveau d'organisation supérieur pose certains défis, notamment comment représenter les interactions entre un plus grand nombre d'acteurs (Janssen & Ostrom, 2006).

Nous avons ici opté pour une approche ascendante pour la raison suivante. L'intensification des usages des sols étant une dynamique récente en Amazonie brésilienne, peu de données statistiques et de connaissances d'experts sont disponibles et les stratégies des éleveurs sont peu connues. Caractériser la diversité de stratégies individuelles constitue une première étape dans la compréhension des systèmes agricoles locaux et de leur dynamique et l'élaboration de plan de gestion des usages des sols (Girard, 2006). Parmi les approches *bottom-up*, nous avons choisi la modélisation multi-agents.

2.1.4.2.2 Systèmes Multi-Agents

Ces dernières années, la modélisation à base d'agents, issue initialement des recherches en Intelligence Artificielle Distribuée et en robotique, a été reconnue comme une approche prometteuse pour modéliser et simuler des systèmes complexes (Morales-Grosskopf, 2007), et en particulier pour comprendre des interactions entre des activités humaines et des dynamiques écologiques (Bousquet & Le Page, 2004) et explorer des scénarios prospectifs dans les socio-écosystèmes (Parker *et al.*, 2003 ; Bommel, 2009 ; Schulze *et al.*, 2017).

Les SMA (Système Multi-Agents) font partis de la catégorie des modèles individus-centrés. Contrairement aux modèles mathématiques, classiquement écrits sous forme d'équations et basés sur l'hypothèse d'interchangeabilité et d'équivalence des individus, les modèles individus-centrés représentent les comportements individuels d'agents ou de cellules, affectés par les conditions environnementales qui se trouvent dans le voisinage mais aussi par le réseau social (Bommel, 2009). Le comportement d'un individu et ses interactions avec les autres sont à l'origine du comportement global du système (Bousquet & Le Page, 2004). Les modèles individus-centrés peuvent donc être classés dans les approches constructivistes. Ces approches étudient le comportement global du système à partir du comportement des individus, par opposition à l'approche analytique qui étudie séparément les éléments d'un système ou de l'approche holistique qui s'intéresse au comportement global du système (Bommel, 2009).

Les SMA ont été développés dans les années 1990, à la suite des travaux réalisés sur les automates cellulaires et initiés par J. von Neumann et S. Ulam dans les années 1940 (Janssen & Ostrom, 2006). Les automates cellulaires correspondent à une grille de cellules uniformes présentant chacune un état défini parmi un ensemble possible d'états (forêt ou terres agricoles par exemple). Les cellules changent d'état de manière déterministe et synchrone en fonction de l'historique de la cellule et des états de ses voisines. Les automates cellulaires sont devenus populaires à partir des années 70 avec la création du « jeu de la vie » par J. Conway (Gardner, 1970), jeu qui illustre comment à partir de simples règles d'interactions locales sur la vie et la mort, il est possible de voir émerger des comportements complexes. Plus tard, Thomas

Schelling a développé un modèle de ségrégation qui montre que malgré un fort taux de tolérance à certains types de voisins (couleur de peau ou classe sociale différente), des blocs communautaires ségrégés émergent après un nombre important d'itérations. Ce modèle permet de mieux comprendre le phénomène de ségrégation raciale spatiale (Schelling, 1971) et a été précurseur au développement des SMA.

Un Système Multi-Agents (Figure 2-5) est défini comme un ensemble d'entités computationnelles, des agents qui évoluent, perçoivent, et agissent dans un environnement de manière relativement autonome et indépendante. Ces agents peuvent correspondre soit à des entités « réelles » (humains, communautés, villages, animaux, objets) soit à des entités « abstraites », telles que des organisations d'individus. D'après Ferber (1995), l'agent est une « entité capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui réagit à ses transformations et qui possède une représentation partielle de cet environnement ». Leur comportement est le résultat des connaissances dont ils disposent, des interactions avec les autres agents avec qui ils sont capables de communiquer, et des objectifs qu'ils poursuivent (Ferber, 1995). Leurs représentations sont construites à la fois socialement à travers les interactions entre agents et avec leur environnement physique (Becu *et al.*, 2005). Outre les agents et leur environnement, un SMA se caractérise par des objets passifs le tout appréhendé par un observateur extérieur. Les interactions entre ces différentes entités artificielles sont rythmées dans le temps et peuvent donner lieu à des mécanismes d'auto-organisation (Ferber, 1995). Les SMA se distinguent des automates cellulaires par la diversité des agents modélisés et la capacité à analyser cette hétérogénéité au-delà de l'historique et de la location spécifique des agents (Janssen & Ostrom, 2006).

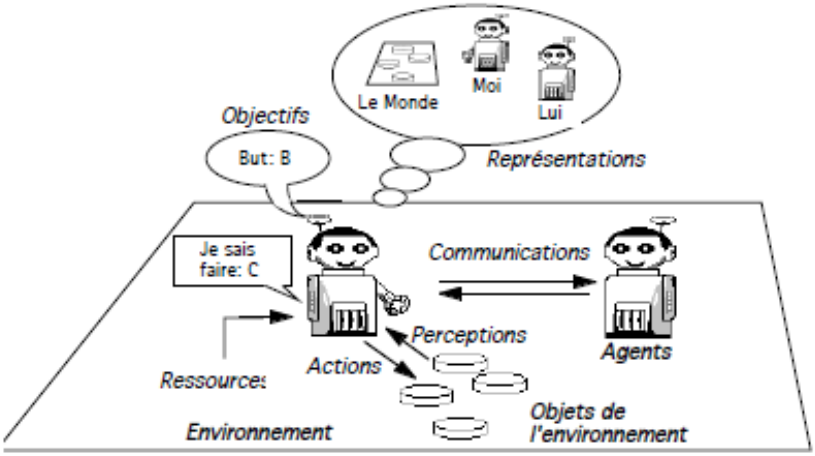


Figure 2-5 : Représentation imagée d'un Système Multi-Agents(Ferber, 1995)

Il existe une grande diversité de SMA. On distingue des SMA théoriques et des SMA empiriques (Janssen & Ostrom, 2006). Certains SMA sont uniquement communicants, sans environnement et objets passifs et d'autres sont au contraire composés uniquement d'agents non-cognitifs sans capacité de représentation (Bommel, 2009). Les domaines d'applications sont également très variés. Au niveau rural et agricole, les SMA ont par exemple été mobilisés

pour étudier les changements de couverture et d'usage des sols (Parker *et al.*, 2003 ; Matthews *et al.*, 2007 ; Bakker & van Doorn, 2009 ; Gibon *et al.*, 2010), la gestion d'un pool commun de ressources (Le Page *et al.*, 2016) ou l'adaptation de gestion agricole ou forestière face à de nouveaux enjeux écologiques, sociaux, politiques ou économiques (Dieguez Cameroni *et al.*, 2014 ; Spies *et al.*, 2017). Le SMA constitue une approche privilégiée pour sa capacité à considérer une diversité d'individus et d'interactions entre des individus et des processus situés dans l'espace.

2.1.4.2.3 Intérêts de la Modélisation Multi-Agents

Nous avons choisi de mobiliser les SMA pour modéliser les stratégies d'intensification de différents types d'éleveurs (décisions en termes de pratiques et de leur localisation) et leurs interactions avec les dynamiques de paysage (dynamiques des ressources naturelles et de végétation dans un agroécosystème spatialisé) à l'échelle de l'exploitation.

L'un des points clés qui nous intéressait dans les SMA est leur capacité à rendre compte du processus de décision individuel de l'agent. Cette capacité offre la possibilité d'intégrer des processus cognitifs plus complexes que la seule théorie de la maximisation d'objectifs (Matthews & Selman, 2006). De plus, la modélisation multi-agents se combine parfaitement avec notre approche par le paysage. Les SMA sont effectivement bien adaptés pour modéliser les dynamiques des socio-écosystèmes dans un cadre spatialisé. Ils permettent également de représenter l'hétérogénéité spatiale des paysages. Les SMA constituent enfin des outils utiles pour comprendre et améliorer notre connaissance sur les interactions ressources-sociétés, ainsi que pour explorer et discuter de scénarios possibles d'évolution (Bommel, 2009). Ils peuvent être utilisés pour évaluer des politiques et accompagner leur conception. En revanche ce n'est pas un outil prédictif (Matthews & Selman, 2006).

Le choix de se tourner vers la modélisation multi-agents dépasse le cadre de la thèse et a aussi été raisonné à l'échelle d'une équipe. Nous avons préféré construire un modèle SMA plutôt que de recourir à un autre type de modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation de façon à apporter une continuité avec les précédents travaux de modélisation réalisés par l'équipe du DP Amazonie, faciliter les interactions entre chercheurs de l'équipe et mobiliser les savoir-faire disponibles dans cette équipe. Cela a été possible à travers la mise en place d'une formation par compagnonnage avec les modélisateurs de l'UPR GREEN et l'affectation d'un modélisateur de cette UPR au Brésil (Pierre Bommel, puis Christophe Le Page).

Toutefois, en focalisant les comportements individuels des éleveurs, nous n'avons pas exploité tout le potentiel des SMA, à savoir de modéliser les interactions entre différents types d'acteurs et à différents niveaux d'organisation (exploitation, communauté, territoire par exemple).

Notre recherche appliquée avait surtout une portée exploratoire et visait à explorer de possibles scénarios d'évolution des dynamiques dans les agroécosystèmes d'Amazonie.

Néanmoins, il convient de noter que les recherches fondamentales sur les SMA sont très actives et questionnent actuellement quatre grands sujets théoriques et méthodologiques : la formalisation des processus de prise de décision humaine des agents (An, 2012 ; Smajgl & Barreteau, 2017), la représentation des interactions entre agents (Janssen & Ostrom, 2006 ; Bolte *et al.*, 2007), l'environnement spatial des agents (Barnaud *et al.*, 2013) et la validation des modèles (Bommel, 2009 ; Augusiak *et al.*, 2014).

2.1.4.2.4 Représentation des décisions humaines dans les SMA

La représentation des décisions humaines est au cœur des réflexions dans la modélisation des systèmes socio-écologiques, ces décisions ayant un impact sur la structure et les fonctions de nombreux systèmes écologiques, qui en retour influencent les décisions des humains (Bolte *et al.*, 2007). Comment représenter la relation entre les objectifs, les perceptions, les représentations, et les actions des agents ? Comment tenir compte des adaptations et des relations sociales ? Il existe plusieurs architectures permettant de rendre compte du processus de décision des agents. La structure de raisonnement des agents peut être simple et heuristique, il s'agit d'agents réactifs. Les agents peuvent être dotés d'une structure beaucoup plus complexe, il s'agit dans ce cas d'agents cognitifs.

Dans une revue des approches utilisées pour modéliser les décisions et les comportements des humains dans les systèmes socio-écologiques (155 articles), An (2012) identifie 9 types de modèles de décision. Nous avions le choix entre des :

- **Modèles micro-économiques** : Les agents prennent leurs décisions de façon à maximiser des fonctions d'utilité ou de profit.
- **Modèles basés sur des théories spatiales** : La théorie de l'espace absolu postule que les individus prennent leurs décisions en fonction d'une distance absolue entre deux points (distance euclidienne). Le modèle en cercles concentriques de Von Thünen (1966) utilisé pour expliquer la localisation des activités agricoles en fonction de la distance au marché repose sur cette théorie (Von Thünen, 1966). La théorie de l'espace relatif postule que les choix des individus sont influencés par les caractéristiques de l'espace (par exemple la pente) et l'attractivité de cet espace par rapport à d'autres.
- **Modèles cognitifs et psychosociaux** : Les agents prennent leur décision selon leurs modèles mentaux, leurs aptitudes (mémoire, apprentissage, innovation), leurs croyances ou intentions, leurs aspirations, les réseaux sociaux et les normes sociales. Il s'agit par exemple de l'architecture BDI (*Belief-Desire-Intentions*), approche cognitive où les agents choisissent et exécutent un plan d'actions, en fonction de leurs buts et de leurs croyances stockés dans leur base de connaissance (mémoire) et régulièrement actualisés.
- **Modèles basés sur les institutions** : Cette théorie postule que les agents dans le même environnement adoptent le même comportement car ils sont obligés de le faire (régulation gouvernementale) ou ils gagnent en légitimité à le faire.
- **Modèles basés sur l'expérience ou la préférence** : Ces approches modélisent des stratégies issues de la vie réelle, identifiées sur la base de données empiriques (quantitatives ou qualitatives), d'observations, d'approches ethnographiques (récits de vie) ou de faits stylisés.

- **Modèles basés sur des approches participatives** : Les acteurs sont engagés dans un processus itératif où ils sont sollicités à prendre des décisions et concevoir des scénarios (souvent à travers des jeux de rôle). Cette approche permet d'inclure les décisions locales de « réelles » personnes.
- **Modèles à base de règles heuristiques** : Les règles de décision des agents sont basées sur des données empiriques ou des observations et sont modélisées à travers les réseaux de neurones artificiels et les arbres de décision. Pour définir ces règles, les modélisateurs doivent compiler des données relativement complexes basées ou pas sur des analyses statistiques et éventuellement selon une approche stochastique (probabilité).
- **Modèles à base de programmation évolutionnaire** : Les agents possèdent un certain nombre de caractéristiques et de stratégies qui les rendent susceptibles d'avoir différents comportements. Ces individus sont dotés d'une capacité d'apprentissage et d'adaptation.
- **Modèles basés sur des hypothèses ou du calibrage** : Des règles hypothétiques peuvent être utilisées en cas d'absence de données ou de théorie adéquate ; les résultats de différents modèles de décision sont comparés avec les données observées.

Accroître la complexité dans la représentation des décisions humaines et du modèle n'est pas sans poser de difficultés. Les partisans d'une approche KISS (*Keep It Simple and Stupid*) préfèrent opter pour des modèles simples et partir d'hypothèses minimalistes, quitte à complexifier le modèle au fur et à mesure. D'autres préfèrent une approche de type KIDS (*Keep It Descriptive and Stupid*) (Edmonds & Moss, 2005), approche où ils incorporent toutes les informations disponibles sur le système étudié, quitte à éliminer après analyse des résultats les informations s'avérant superflues (Bommel, 2009).

Le modèle construit dans cette thèse reste relativement simple. La représentation des décisions sur la base de modèles de décision simples (agents réactifs) nous permet déjà d'obtenir un comportement qualifié d'intelligent (Bommel, 2009). En outre, l'implémentation d'une structure comportementale complexe qui ne repose pas nécessairement sur de robustes connaissances scientifiques issues des neurosciences et de la psychologie n'améliore pas la fiabilité du modèle (Deffuant *et al.*, 2003). Comme cela sera développé dans le chapitre sur le modèle (4.1.3), nous nous sommes appuyés sur deux types de modèles de décision : à base de théorie spatiales et à base de règles heuristiques.

2.1.4.2.5 Vérification et évaluation du modèle

L'une des principales faiblesses des Systèmes Multi-Agents est liée à leur validation. Il n'est pas possible de prouver les caractéristiques des SMA. De plus, les possibilités de faire apparaître des biais et des erreurs de calcul ou de programmation sont nombreuses, ce qui peut nuire à la fiabilité des résultats (Bommel, 2009). D'après Bommel (*ibid*), cette notion de validation est même dangereuse car le processus de modélisation n'est pas neutre. Le modèle est le produit de nos représentations. Il propose donc de distinguer la « validation forte » où la confrontation des résultats avec le système réel révèle peu d'écart et la « validation faible » qui propose une explication juste et recevable mais sans certitude absolue. « Il est préférable

de considérer qu'à l'instar des théories, tout modèle est intrinsèquement faux. (...) on ne peut jamais affirmer qu'un modèle est définitivement validé (dans le sens d'une validation forte), même s'il a surmonté victorieusement des tests rigoureux ».

La réplication complète d'un SMA par d'autres personnes est un moyen de vérifier les résultats et de s'assurer de leur fiabilité. Pour ce faire, des outils existent. Un groupe d'écologues a notamment proposé un protocole de présentation du modèle, l'ODD (*Overview-Design concepts-Details*), visant à rendre transparent et à harmoniser la description des modèles individus centrés et des SMA (Grimm *et al.*, 2006). Ce protocole a été actualisé en 2010 (Grimm *et al.*, 2010), puis complété par Müller *et al.* (2013) pour mieux décrire les SMA faisant intervenir des décisions humaines, à travers l'ODD + D (*Overview-Design concepts-Details+Decision*). Cette méthode standardisée est décomposée en sept parties (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Les sept parties du protocole ODD (Grimm *et al.*, 2006 ; Grimm *et al.*, 2010 ; Müller *et al.*, 2013)

Vue d'ensemble (*Overview*)	Objectif du modèle
	Entités, structure du modèle et échelle
	Vue d'ensemble des processus et de leur ordonnancement
Les Grands Concepts (*Design concepts*)	Les Grands Concepts - *Cadre théorique et empirique* - *Processus de décision individuelle* - *Apprentissage* - *Perception individuelle* - *Prédiction individuelle* - *Interaction* - *Collectifs* - *Hétérogénéité* - *Stochasticité* - *Observation*
Détails (*Details*)	Détails d'implémentation
	L'initialisation
	Les variables d'entrée (inputs)
	Les sous-modèles

Outre ce protocole de description du modèle, Augusiak *et al.* (2014) ont proposé une stratégie de vérification et d'évaluation du modèle, « *l'évaludation* », qui permet également de s'assurer de la crédibilité et qualité du modèle SMA. « *L'évaludation* » comprend 5 étapes :

i) 'l'évaluation des données' utilisées pour développer et tester le modèle afin de s'assurer de leur qualité ;
ii) 'l'évaluation du modèle conceptuel' pour analyser les hypothèses simplificatrices utilisées dans le design du modèle ;
iii) 'la vérification de l'exécution' afin de vérifier l'implémentation du simulateur informatique (qualité de la programmation) ;
iv) 'la vérification des sorties du modèle' pour comparer les sorties du modèle aux données qui ont été utilisées pour le concevoir et le calibrer ;

v) ‘l’analyse du modèle’ pour explorer la sensibilité du modèle à des changements de paramètres et de formulation des processus et vérifier que les résultats sont liés au comportements et non aux valeurs ;
vi) la ‘corroboration des sorties du modèle’ afin de comparer les sorties du modèle à de nouvelles données qui n’ont pas été utilisées dans le développement et le paramétrage.

2.1.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les différents référentiels théoriques mobilisés dans la thèse pour étudier les décisions relatives à l’intensification des systèmes fourragers en lien avec une gestion plus éco-efficiente des ressources naturelles dans les paysages, et l’évolution de ces relations dans le temps.

Notre approche est centrée sur le concept de paysage. Le paysage, défini comme un agroécosystème spatialisé, dynamique et piloté par un ou plusieurs systèmes de décisions fournit un cadre pertinent pour l’analyse conjointe des dynamiques de production économique et de gestion des ressources naturelles et raisonner la construction de paysages plus éco-efficients. Bien que les approches par le paysage invitent à appréhender des niveaux d’organisation incluant de multiples acteurs et dépassant le périmètre de l’exploitation agricole, nous avons choisi de limiter l’étude à l’échelle de l’exploitation agricole du fait notamment du manque de connaissances empiriques sur les perceptions et les décisions des éleveurs façonnant les paysages à ce niveau.

Pour comprendre les décisions des éleveurs de gestion des ressources naturelles dans les paysages, nous appréhendons l’exploitation agricole comme un système socio-écologique, adaptatif, dynamique, emboîté dans et interagissant avec un environnement complexe, changeant et imprévisible. Les décisions des éleveurs sont influencées par une pluralité de facteurs externes à l’exploitation et sont prises dans un cadre de rationalité limitée et en cohérence avec les projets des agriculteurs (ensemble d’objectifs plus ou moins conscients, hiérarchisés et contradictoires) compte tenu de la perception qu’ils ont de leur situation et des finalités fixées à l’exploitation. Ces décisions se traduisent dans les paysages par des pratiques d’usage des sols et de gestion des systèmes fourragers.

Paysage et système de décision évoluent de façon non linéaire et s’adaptent au cours du temps du fait notamment d’interactions et de rétroactions entre échelles spatiales, temporelles et entre processus biophysiques et socio-économiques. Les variables de changement peuvent concerner différentes vitesses rendant d’autant plus imprévisibles les comportements. Le recours au cadre d’analyse des trajectoires nous permet d’analyser ces processus de changements sur le temps long et de rationaliser *a posteriori* les stratégies d’adaptation des exploitations en lien avec la situation agraire de l’exploitation et les déterminants régionaux et globaux. En outre, la modélisation multi-agents nous permet de projeter ces trajectoires et

d'imaginer des scénarios possibles. Les Systèmes Multi-Agents constituent un outil privilégié pour représenter et différentier les systèmes de décision des éleveurs, mieux comprendre les liens complexes entre ces décisions et des processus écologiques et appréhender l'hétérogénéité spatiale. Dans la thèse, nous avons choisi cette approche pour explorer des scénarios prospectifs d'intensification d'usage des sols et appréhender leurs impacts sur l'éco-efficience des paysages.

2.2 Zones d'étude

2.2.1 Paragominas et Redenção, deux communes de front post-pionniers aux dynamiques contrastées

Nous avons choisi de mener cette étude dans deux pôles d'élevage d'Amazonie orientale aux dynamiques contrastées : Paragominas, dans le nord-est du Pará et Redenção dans le sud du Pará. La comparaison de deux cas d'études est intéressante car elle nous permet d'étendre la gamme de situations et de mettre en évidence les facteurs de réussite et d'échec mis en place localement pour favoriser l'intensification de l'élevage et la construction de paysages plus éco-efficients.

Ces deux sites ont été choisis car ils sont représentatifs de la diversité biophysique, démographique, socio-économique, politique, et agricole des territoires colonisés à partir des années 60, comme l'illustreront les paragraphes suivants (Tableau 2-3). Il nous semblait important de tenir compte de cette diversité, d'autant plus que de par notre approche ascendante, nous donnons beaucoup d'importance à la diversité des cas. En outre, de récents travaux du DP Amazonie ont révélé l'existence de dynamiques territoriales contrastées dans ces deux territoires d'Amazonie orientale (Thalês & Poccard-Chapuis, 2014 ; Polge *et al.*, 2015), ainsi que l'émergence de pratiques d'intensification différentiées (Vaz *et al.*, 2012). Paragominas est déjà bien engagé dans une dynamique d'intensification (Bendahan *et al.*, 2013) contrairement au Sud du Pará. Ces deux communes constituent également deux laboratoires d'étude pour le DP Amazonie avec deux projets en cours pendant la thèse (ECOTERA et TERRACERT) et une large banque de données et connaissances issue des travaux initiés dès les années 90 offrant ainsi une vision rétrospective.

Tableau 2-3 : Caractéristiques géographiques et socio-économiques des communes de Paragominas et Redenção

Commune	**Surface (km²)**	**Densité habitants (hab/km²)[1]**	**% déforestation 2015[2]**	**Caractéristiques de l'élevage[3]**		**Municipe Vert[4]**	**Front pionnier[5]**
				Fazenda	Familiale		
Paragominas	19341	5,06	44,5	Intensification intégration	Marginalisée	2010	Intensification
Redenção	3823	19,75	70	Traditionnelle	Lait	2016	Consolidation

1- IBGE (2010) ; 2 - INPE (2016) ; 3 – Vaz *et al.* (2012) ; 4 - Programa Municípios Verdes - PMV (2018) ; 5 - Thalês & Poccard-Chapuis (2014)

2.2.2 Localisation géographique et données socio-économiques

Paragominas se situe entre les parallèles 2º 24’ S et 3º 50’ S et les méridiens 46º 25’ W et 48º 53’ W. Cette commune est bordée par le fleuve Capim à l’ouest et Gurupi à l’est. Ce territoire immense occupe 19.341 km², soit l’équivalent de 2/3 de la surface de la Belgique. Redenção (3.823 km²) est localisée entre les parallèles 07º 42' S et 08º 24' S et les méridiens 49º 49' W et 50º 36' W. La commune est située entre deux grands fleuves régionaux Xingu et Araguaia mais aucun grand fleuve ne la traverse (Figure 2-6).

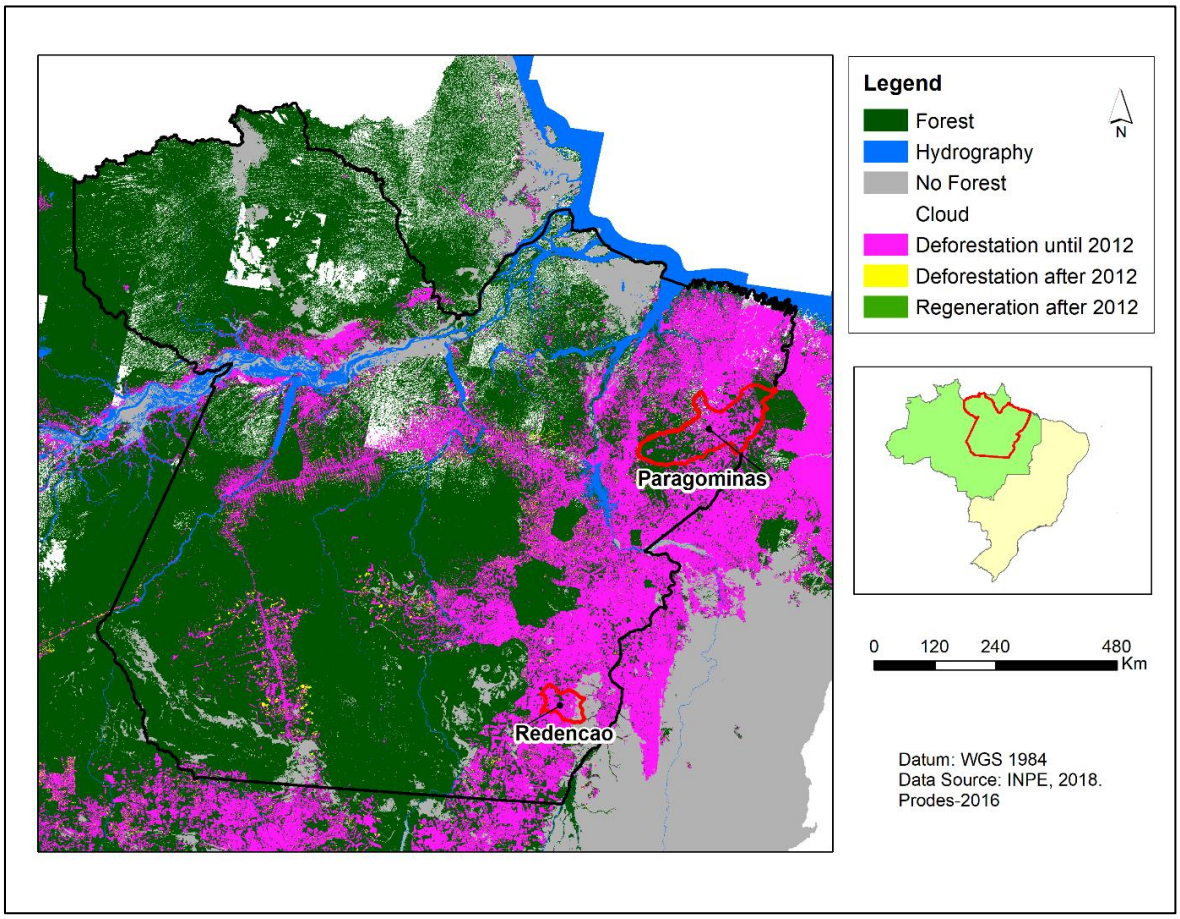


Figure 2-6 : Localisation géographique de Paragominas et Redenção

Paragominas et Redenção ont été fondées respectivement en 1965 et 1969, au moment des grands programmes de colonisation d’Amazonie et suite à la construction de la route fédérale BR-010 (Belém-Brasília). La construction des routes aura joué un rôle prépondérant dans l’émergence et la structuration de ces deux communes. Paragominas a une position géographique stratégique dans l’est du Pará. Traversée par la BR-010, elle se situe à mi-chemin entre deux autres pôles régionaux, Castanhal au nord et Marabá et Imperatriz au sud. Redenção est le centre "urbain" d’un pôle régional comprenant plusieurs municipes tels que Santa Maria das Barreiras, Santana do Araguaia, Pau D’Arco, Cumaru do Norte et bien sûr Redenção. Ce municipe se situe au croisement entre la BR-155 reliant Marabá à l’Etat du Mato Grosso et la PA-287 qui relie ce pôle régional à Conceição do Araguaia. Ces deux communes présentent une faible densité de routes goudronnées. Seuls les principaux axes

routiers, c'est-à-dire la BR-010 et la PA-256 à Paragominas, et la BR-155 et la PA-287 à Redenção ont été goudronnées.

Paragominas et Redenção présentent un important dynamisme économique avec les 11ème et 15ème plus forts PIB du Pará (sur 144 communes en 2013). Même si le secteur agricole[1] ne représente que respectivement 10% et 7% du PIB de Paragominas et Redenção (Tableau 2-4), il assure une importante création de richesse dont les activités tertiaires en dépendent.

Tableau 2-4 : Indicateurs de développement socio-économique des communes étudiées.

	PIB 2013 (mil reais)	**Classement dans le Pará**	**PIB 2013 par habitant (mil reais)[1]**	**Participation au PIB 2013**		
				Agriculture et élevage[1]	**Industrie[2]**	**Service[3]**
Paragominas	1 820 117	11	17 539	10%	34%	42%
Redenção	1 100 883	15	13 933	7%	12%	62%
Moyenne Pará			11 276			
Moyenne Brésil			26 445			

Source des données : IBGE (2013b)

1 - Incluant l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière ; la pêche et l'aquaculture. 2 - Incluant l'industrie minière ; l'industrie manufacturière ; la production et la distribution d'électricité et de gaz ; les services d'eau et d'assainissement, et de propreté urbaine ; le secteur du bâtiment. 3 – Incluant le commerce ; l'entretien et réparation de véhicules ; les services d'hébergement et alimentation ; les transports, stockage, poste ; les services d'information ; finances et assurances ; activités immobilières ; activités scientifiques et techniques, administratives ; l'administration, la santé et l'éducation publique et privée, la protection et l'assistance sociale ; les arts, culture, sport, activités de loisirs, services à domicile.

2.2.3 Des conditions biophysiques favorables à la production fourragère

Tant à Paragominas qu'à Redenção, les conditions naturelles sont très favorables à l'élevage, avec un climat chaud et humide, un dense réseau hydrographique, des sols peu fertiles mais de bonne texture.

Selon la classification de Köppen, le climat prédominant est de type Aw (tropical humide). Les températures sont constantes et élevées (moyenne annuelle de 26°C) avec une forte humidité de l'air (en moyenne 80%) (Pinto *et al.*, 2009). Les précipitations sont importantes. D'après les données TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), il a plu en moyenne près de 2.000 mm par an entre 2000 et 2014 à Paragominas. Néanmoins, ces précipitations sont inégalement réparties dans l'année avec une saison sèche de 6 mois bien marquée (Laurent *et al.*, 2017). Ces conditions climatiques sont favorables à la présence de forêts ombrophiles denses de basse altitude. Redenção se caractérise par un gradient progressif de savanes arborées (*cerrados*) et de forêts ombrophiles (IBGE, 2004).

Les caractéristiques géomorphologiques et pédologiques des deux zones sont différentes. L'histoire géologique de Paragominas a donné lieu à un modelé régulier d'alternance de vallées et plateaux, issu d'un processus d'érosion et de dissection du relief à l'Oligocène

[1] Dans sa méthode de calcul du PIB issu du secteur agricole, l'IBGE inclut l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière, la pêche et l'aquaculture.

supérieur (Figure 2-7). La texture des sols (95% de Ferralsols) est étroitement liée à cette organisation géomorphologique et à la nature géologique du matériel parental (Figure 2-8) (Laurent *et al.*, 2017) :

- Dans les fonds de vallées et sur les bas de pente on retrouve des Ferralsols sablo-argileux pauvres issus de dépôts de grès kaolinitique, où s'écoule le réseau hydrographique actuel.
- Sur les pentes, s'est déposée une couche irrégulière d'argiles tachetées de 10 à 30 mètres riches en kaolinite.
- Une cuirasse latéritique constitue les points hauts des topo-séquences. Elle affleure sur les hauts de pente des vallées sous la forme de dalles massives ou de gravillons. Elle se compose principalement de bauxite, et est résistante à l'érosion. Cette croûte latéritique s'est formée au Paléogène, lors de l'alternance de climats à saisons sèches et humides.
- Sur les plateaux qui atteignent 160 à 190 m d'altitude, des argiles se sont déposés sur 10 m d'épaisseur en moyenne. Ces argiles de Belterra contiennent une proportion élevée de kaolinite (70-80%) et une structure en micro-aggrégats conférant une bonne porosité et perméabilité. De plus, la concentration des bases échangeables[1] est relativement élevée assurant une bonne rétention des éléments fertilisants.

Redenção se localise sur des affleurements de bouclier granitique. Le modelé est moins régulier. On retrouve des pénéplaines semées de chaînons (*Serras*) et d'inselbergs (colline ou un petit massif isolé qui domine significativement une plaine ou un plateau subhorizontal). De même qu'à Paragominas, les Ferralsols (latosols) sont dominants, suivis des Plinthosols (sols de zone alluviale riche en fer), de Gleysols (sols hydromorphes) et de Néosols (sols constitués d'une faible épaisseur de matière minérale et organique) au niveau des affleurements rocheux (Figure 2-9).

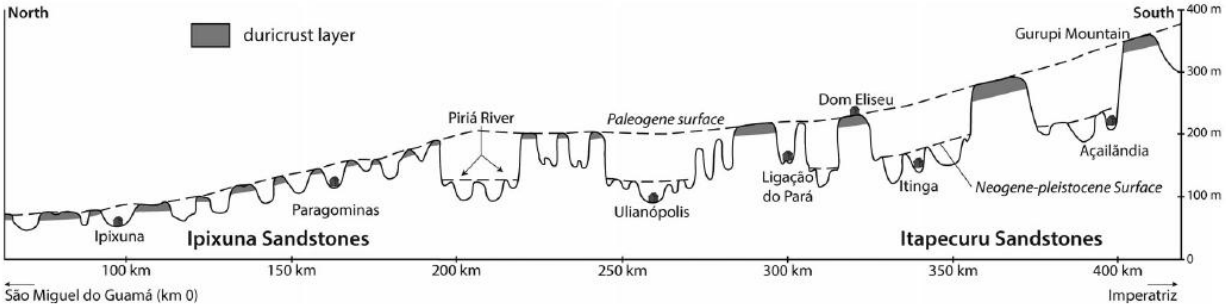


Figure 2-7 : Schéma topographique dans la région de Paragominas
(Kotschoubey *et al.*, 2005 ; Laurent *et al.*, 2017)

[1] Elle correspond à la somme des cations (essentiellement Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} et NH^{4+}) absorbés sur les colloïdes du sol (les argiles et acides humides qui ont une charge négative) et qui sont susceptibles d'être libérés par échange de cations de la solution du sol.

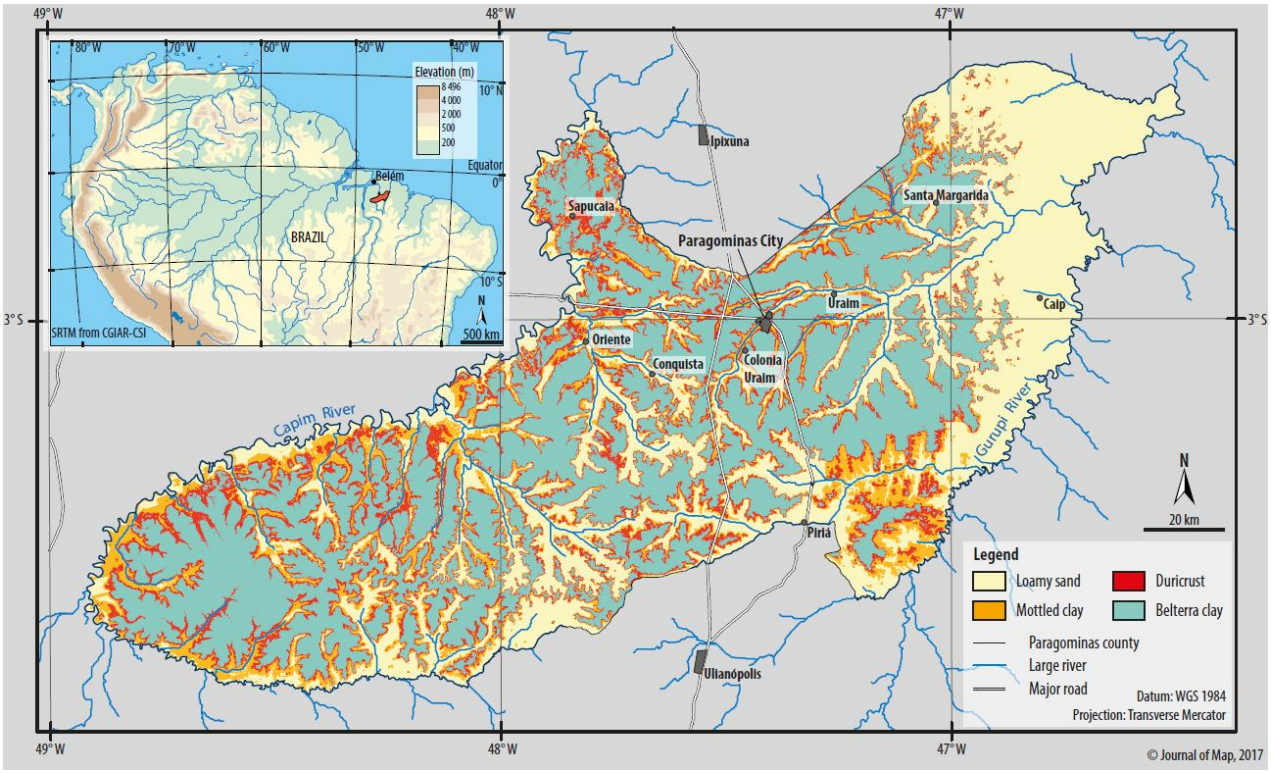


Figure 2-8 : Texture des sols à Paragominas obtenue à partir de l'interpolation spatiale de la cuirasse latéritique formée au Paléogène.Source : Laurent *et al.* (2017)

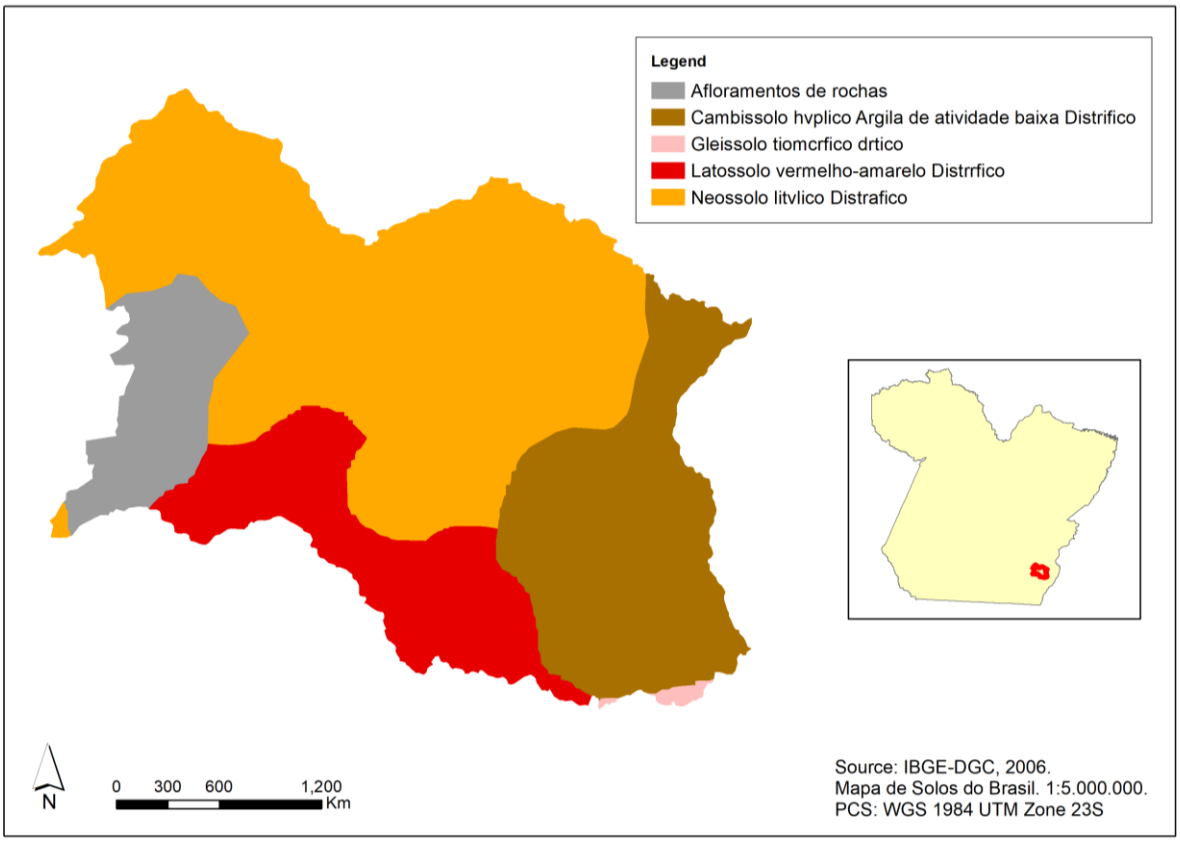


Figure 2-9 : Texture des sols à Redenção.Source des données : IBGE (2006)

Les conditions édaphiques et topographiques des zones d'études offrent un bon potentiel agricole, à condition de corriger l'acidité des sols par des amendements calcaires ou magnésiens pour accroître la saturation des bases et réduire le risque de toxicité de l'aluminium, d'appliquer du phosphore pour corriger les faibles teneurs, et de minimiser le travail de sol compte tenu des risques d'érosion hydriques et de la rapide minéralisation de la matière organique en surface (Rodrigues *et al.*, 2003).

2.2.4 Histoire de la colonisation : une succession de cycles économiques

Les trajectoires d'évolution de Paragominas et Redenção se caractérisent par une succession de cycles.

- ***Avant la colonisation officielle***

Jusque dans les années 1950 et le début de la colonisation officielle, ces deux régions étaient encore peu peuplées et l'agriculture quasiment inexistante. Les usages des sols à cette époque étaient donc essentiellement constitués de forêts primaires. On note que dans le Sud du Pará, la découverte d'une zone très riche d'un arbre à latex, le *caucho* (*Castilla eslastica*), avait favorisé l'essor démographique et économique de la région entre 1890 et 1920. Mais depuis, la région était dans une phase de récession suite à la baisse des prix et la concurrence du marché Sud-Asiatique (Ianni, 1978). A Paragominas, les seules occupations que l'on rapporte sont celles de communautés *caboclas* qui s'étaient installées le long des principaux cours d'eau et en particulier du Rio Capim (Vaz *et al.*, 2012).

- ***Le cycle de l'or (années 60-80)***

Dans le Sud du Pará, la construction de la BR-010 et de la PA-150 a coïncidé avec la découverte de l'est de Redenção, notamment sur les rives droites du Rio Branco, dans l'actuel municipe de Cumaru do Norte, et au nord au niveau de la Serra Pelada dans les années 80. Cela va générer un afflux massif de dizaines de milliers de personnes et d'argent qui a profondément transformé la taille et la structure de l'économie régionale. Cette course à l'or a connu son apogée dans les années 80, avant de péricliter du fait de l'épuisement des ressources (Tourrand *et al.*, 2004).

- ***Le cycle de l'élevage des années 60 à aujourd'hui :***

L'élevage bovin extensif démarre au début des années 1960 et s'est développé progressivement jusqu'aux années 90. La proximité de Belém a fait de Paragominas une place de choix pour l'élevage. A Redenção, l'implantation de ranchs a été encouragé dès 1967 par l'octroi de programmes d'incitations fiscales de la Sudam et de la Basa à des chefs d'entreprise du sud et sud-est du Brésil (Tourrand *et al.*, 2007). Outre l'attribution officielle de lots, à partir des années 70, des éleveurs venant de bassins d'élevage du Sud, Sudeste et Centre-Ouest du Brésil (Minas Gerais, Goiás, Bahia, São Paulo) ont migré spontanément et ont occupé ou racheté des propriétés abandonnées par des investisseurs (Vaz *et al.*, 2012). En trois décennies, Paragominas et Redenção sont devenues les « capitales du bœuf » avec les

plus grands cheptels de l'Etat du Pará (1er et 4ème), l'implantation d'industries frigorifiques et même de laiteries à Redenção. Depuis les années 90, le nombre de bovins tend à diminuer (Figure 2-10). Trois facteurs peuvent expliquer cette évolution : le Plan real en 1994, les nouvelles exigences sanitaires (notamment liées à la fièvre aphteuse) et la dégradation des pâturages. Malgré cette décapitalisation, la productivité par hectare s'est maintenue du fait d'une augmentation des poids carcasse et du taux d'abattage (Hurand, 2015).

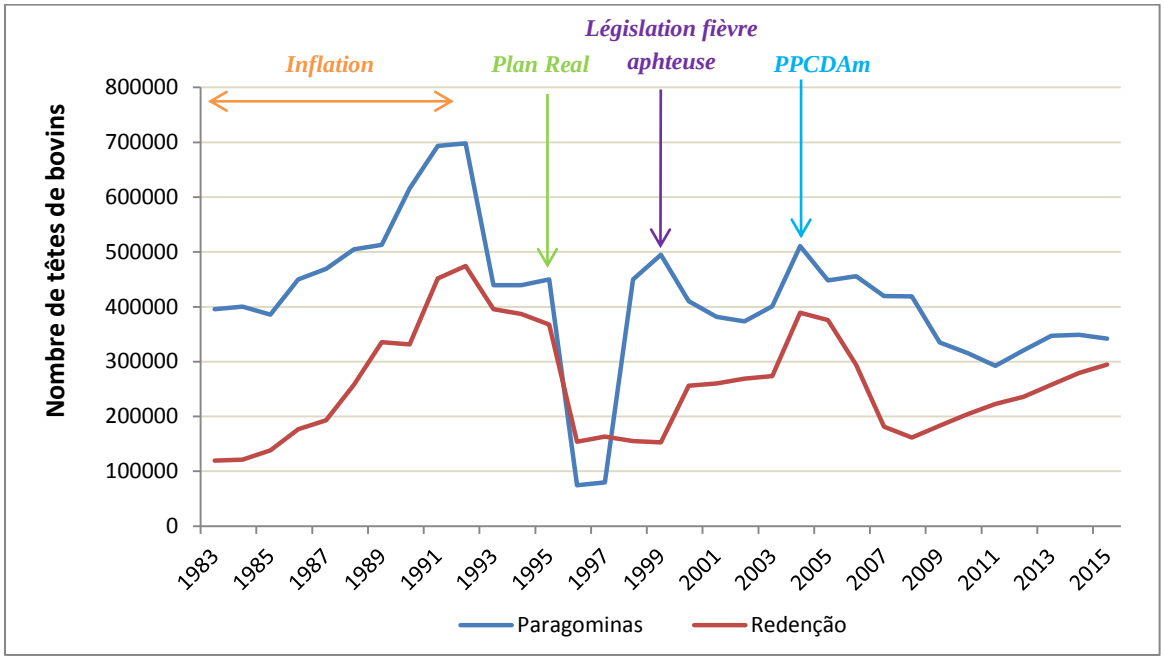


Figure 2-10 : Evolution du cheptel de bovins entre 1983 et 2015 à Paragominas et Redenção.Source des données : IBGE (2016a). La chute et la hausse brutale des effectifs au milieu des années 90 pourraient être dues à une anomalie des données IBGE.

- ***Le cycle du bois natif des années 1970 à 2000, puis de la sylviculture :***

A partir des années 70, Paragominas et Redenção ont également été deux principaux pôles d'extraction de bois natifs d'Amazonie orientale, du fait de la richesse en bois précieux, principalement d'acajou (*Switenia macrophylla*) à Redenção. Paragominas a enregistré jusqu'à près de 200 scieries à la fin des années 90 (Vaz *et al.*, 2012). Les éleveurs étaient largement impliqués dans cette activité, soit par la vente de droits d'exploitation à des forestiers, soit par l'exploitation du bois par leurs propres moyens (Almeida & Uhl, 1998). Mais gérée de façon minière et illégale, la ressource en bois a rapidement diminué dans ces deux communes. Au moment de l'Arc de feu, la plupart des scieries de Paragominas ont été fermées. A partir des années 2000, tant à Paragominas que dans le sud du Pará, une diversification s'est opérée vers la plantation d'espèces à croissance rapide (Eucalyptus et Paricá à Paragomminas, Teck dans le sud du Pará) impulsée par des investissements privés (DP Amazonie, 2013).

- ***Le cycle de l'agriculture depuis la fin des années 90 :***

A Paragominas, le cycle du grain a été initié chez les moyens et grands éleveurs pour récupérer les pâturages dégradés. L'intégration entre agriculture et élevage permet de financer

le coût de la réforme (Bendahan *et al.*, 2013). Les éleveurs forestiers se sont plus facilement diversifiés dans la production de grains, ayant l'habitude de gérer du matériel. Les éleveurs qui n'avaient pas d'équipements, ont fait appel aux agriculteurs du Sud du Brésil en leur louant des terres à bas prix, à charge d'en récupérer les pâturages. La croissance des volumes produits en maïs et soja a été notable depuis la fin des années 90. Alors que la production de soja était quasiment inexistante dans le municipe en 2000, elle a atteint près de 72 000 tonnes en 2010 et 275 500 tonnes en 2015, faisant de Paragominas le plus gros producteur de soja de l'Etat du Pará (IBGE, 2016b). De même, la production de maïs a triplé entre 2000 et 2015, passant de 46 200 tonnes à 121 000 tonnes (Figure 2-11). A Redenção, le mouvement de diversification est encore timide, mais la croissance récente de l'agriculture dans des communes voisines, notamment Santana do Araguaia, laisse présager un développement similaire.

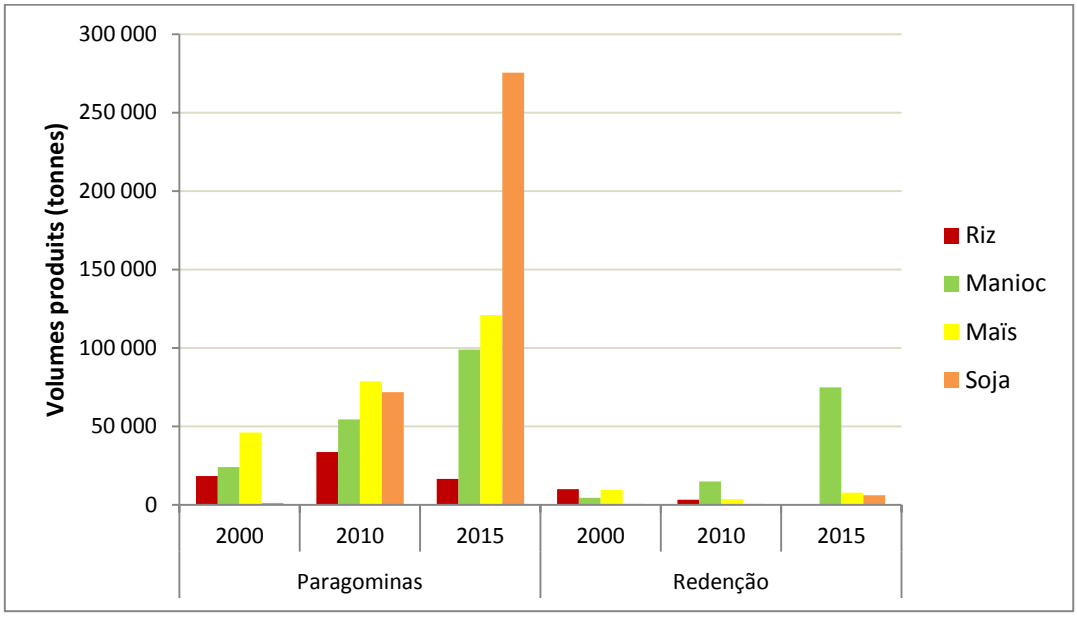


Figure 2-11 : Evolution de la production en maïs, soja, riz et manioc entre 2000 et 2015 à Paragominas et Redenção.Source des données : IBGE (2016b)

2.2.5 Structure foncière

Au début de la colonisation (années 60), les deux municipes ont été occupés selon un modèle latifundiaire. Des lots unitaires d'environ 4.300 ha ont été découpés et attribués à des entreprises publiques ou privés et des familles d'éleveurs d'un niveau social aisé venant des régions Sud, Sudeste, Centre, et Nordeste du Brésil attirées par les exonérations fiscales et la possibilité de se constituer un patrimoine foncier. Plus tard (années 80), l'Etat a lancé des programmes de réforme agraire pour installer de nouveaux migrants sur des lots de 50 à 100 ha sur des terres abandonnées ou vendues à l'État par leurs propriétaires. Outre cette occupation planifiée, une vague d'invasions de terres publiques et privées a suivi (Tourrand *et al.*, 2007).

Aujourd'hui, les fazendas occupent la majorité de l'espace de ces deux municipes. Seulement 5% de la superficie de Paragominas et 7% de Redenção sont inclues dans les périmètres de la réforme agraire sous la responsabilité de l'INCRA (INCRA, 2011)[1]. Au sein des périmètres de la réforme agraire, les lots travaillés par la même famille mesurent théoriquement moins de 4 modules fiscaux, mais il peut exister un processus de concentration foncière avec vente et rachat de lots entre colons.

Ce mode d'occupation bipolaire du foncier a laissé des marques dans les paysages. Les zones d'agriculture familiale sont composées de mosaïques de petites parcelles agricoles et les patches de forêts sont petits et morcelés. Les zones occupées par les fazendas se composent de larges parcelles de pâturage ou cultures et de grandes tâches de forêts (Figure 2-12).

Figure 2-12 : Vue aérienne d'une communauté d'agriculture familiale (Luiz Inacio, Paragominas) entourée de fazendas

2.2.6 Mouvement d'intensification de l'élevage : deux situations contrastées

Le mouvement d'intensification de l'élevage allaitant est contrasté entre Paragominas et Redenção. A Redenção, l'élevage allaitant est resté traditionnel pour des raisons culturelles, économiques (l'intensification requiert un fort investissement), le manque d'assistance technique et de recherche (Vaz *et al.*, 2012). A Paragominas, les acteurs ont commencé à chercher des solutions à l'épuisement de la fertilité des sols et à la dégradation écologique des

[1] Calcul réalisé en divisant la surface des périmètres de la réforme agraire sous la responsabilité de l'INCRA (données INCRA) par la surface des municipes (données IBGE). Ce calcul n'inclut pas les communautés d'agriculteurs familiaux en dehors des périmètres.

pâturages dès les années 90. Diverses méthodes ont été appliquées : la diversification des espèces fourragères, la division des pâturages, l'amélioration génétique du troupeau, l'intégration agriculture-élevage voire agriculture-élevage-sylviculture à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou du territoire (Vaz *et al.*, 2012). En 2004, cette dynamique est reconnue par l'Etat du Pará et Paragominas accueille un « groupe de bonnes pratiques d'élevage », un programme de l'Embrapa accompagnant les éleveurs sur la mise en adéquation environnementale de la propriété, l'intensification des pâturages, le bien-être animal. S'inspirant de cette initiative, en 2011, six éleveurs de ce groupe lancent un autre programme d'intensification, le modèle « Pecuária Verde » (Elevage Vert) (SPRP, 2014). Ces modèles techniques sont devenus des références pour les fazendas en Amazonie (Vaz *et al.*, 2012).

En ce qui concerne l'élevage laitier, un mouvement d'intensification s'est mis en place dans les exploitations familiales de Redenção. Les laiteries ont joué un rôle majeur en accompagnant les éleveurs dans la mise en place d'innovations techniques telles que le refroidissement du lait, la complémentation des rations et l'amélioration génétique. Ce mouvement a été appuyé par une politique industrielle de paiement du lait en fonction de la qualité et de nouvelles réglementations sanitaires. Les difficultés d'accès aux intrants et à l'assistance technique persistent néanmoins (Vaz *et al.*, 2012).

2.2.7 Dynamique des usages des sols

Ce mouvement d'intensification a donné lieu à des dynamiques d'usages des sols différentes entre Paragominas et Redenção (Figure 2-14). Nous présentons ci-dessous quelques tendances à partir d'analyse d'images Landsat de 2015 (Pimentel, 2016) et des données Terraclass (INPE & EMBRAPA, 2012).

Les forêts (primaires et secondaires âgées) occupent encore 57% du territoire de Paragominas et 12% à Rendenção. De récentes études menées à Paragominas montrent néanmoins qu'elles présentent un état avancé de dégradation (Tritsch *et al.*, 2016 ; Bourgoin *et al.*, 2018).

Les pâturages représentent 15% des usages des sols à Paragominas et 42% à Redenção. A Paragominas, leur surface est relativement stable depuis 2001 (+8%). Toutefois, leur distribution spatiale a changé. 55% des surfaces implantées en 2001 ont changé d'usage (dégradation, conversion en grandes cultures et sylviculture). Ces pertes ont été compensées par de nouvelles conversions de forêt (33%), et régénérations forestières (25%) dans les vallées et plaines à l'est du municipe (Pimentel, 2016). La préférence pour les vallées s'explique par la proximité des rivières pour l'abreuvement du bétail.

Les grandes cultures (soja et maïs) et la sylviculture (eucalyptus et paricá) ont fortement progressé sur la commune de Paragominas (+1500% de grandes cultures et + 4000% de plantations forestières entre 2001 et 2015). Ces deux types d'usages des sols représentent

aujourd'hui 8,5% des surfaces contre 0,5% en 2001. Les grandes cultures se sont majoritairement étendues au niveau des plateaux (63% sur les plateaux, 37% dans les vallées) (Pimentel, 2016) du fait de conditions édaphiques et topographiques très propices à l'agriculture mécanisée (Laurent *et al.*, 2017). Les conversions ont touché les surfaces forestières (50%), les pâturages (32%), et les régénérations forestières (14%) (Pimentel, 2016). A Redenção, les surfaces sont encore anecdotiques (à peine 45 ha en 2012).

Autre élément devenu incontournable dans ces paysages post-pionniers : les régénérations forestières. A Paragominas, ces surfaces ont été multipliées par 1,6, passant de 7,7% à 12,4% des usages des sols entre 2001 et 2015. Elles sont majoritairement localisées sur les unités de vallées et les plaines (80%) plutôt que sur les plateaux (20%) et sont essentiellement issues de pâturages dégradés. A Redenção, les forêts secondaires occupent 11% des surfaces.

Les plantations de poivre (*pimenta-do-Reino*) se sont multipliées dans les exploitations familiales de Paragominas, suite à une hausse du cours mondial. Ce changement d'usage des sols, récent, n'est pas observé avec les données statistiques et Landsat.

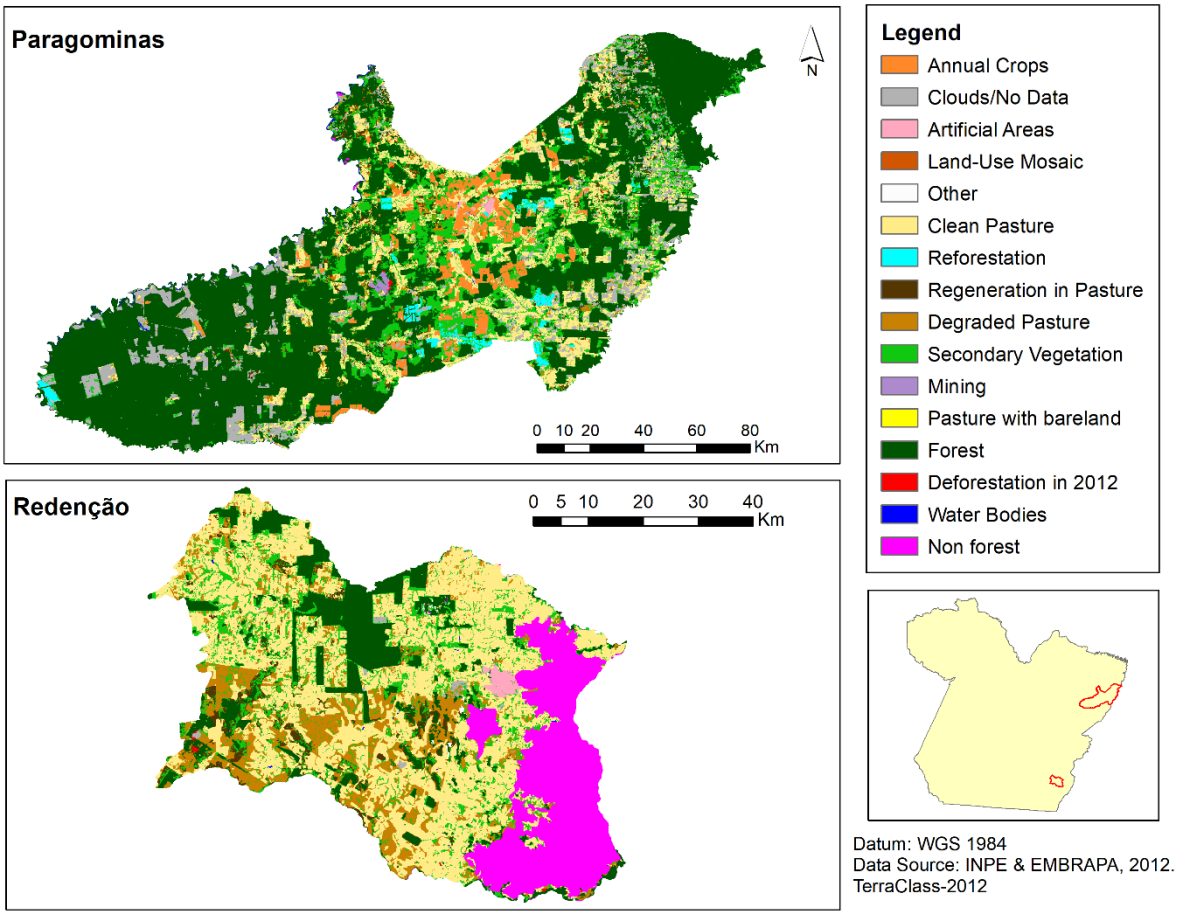


Figure 2-13 : Carte des usages des sols de Paragominas et Redenção

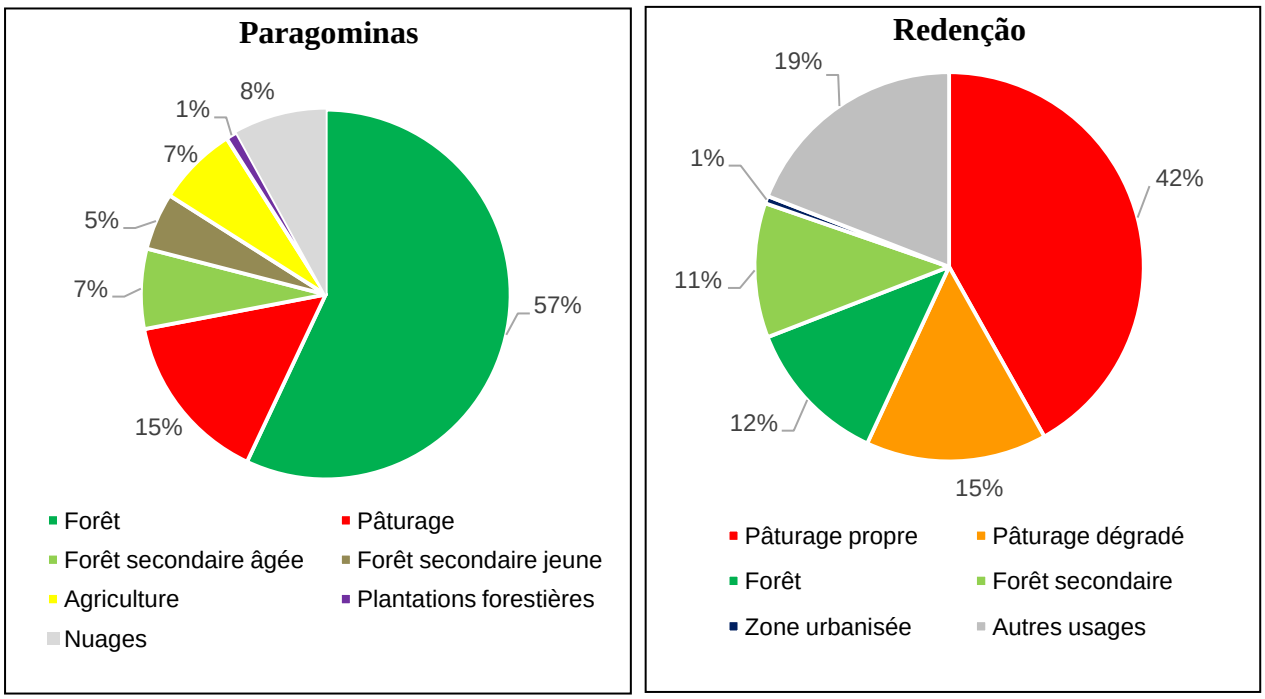


Figure 2-14 : Usage des sols à Paragominas et Redenção.Source des données de Paragominas : Pimentel (2016) à partir des images Landsat 8 de 2015. Sources des données de Redenção : INPE & EMBRAPA (2012)

2.2.8 Décentralisation de la gestion environnementale

Suite à la mise en place de politiques de prévention et de répression contre la déforestation, puis au lancement de l'initiative « Municipe Vert », les taux annuels de déforestation ont fléchi tant à Paragominas qu'à Redenção (Figure 2-15). Cependant, les avancées n'auront pas été aussi rapides et soutenues à Redenção.

Après être devenu le premier municipe vert, Paragominas a acquis une certaine crédibilité et confiance vis-à-vis du gouvernement fédéral et de l'Etat du Pará. Depuis 2010, le SEMA a délégué au SEMMA plusieurs compétences : les émissions de licences environnementales telles que le LAR (Licence Environnemental Rurale), la fiscalisation des zones déforestées illégalement et repérées grâce à un système d'alerte mensuel, l'accompagnement et l'audit des LAR, les émissions de licence pour la gestion forestière et les abattoirs (Vedoveto *et al.*, 2014). L'autonomie qu'a gagné la commune lui a permis d'introduire une réglementation environnementale à l'échelle municipale en 2014 rendant possible les mécanismes de compensation forestière entre exploitations agricoles de la commune sans titre foncier définitif et formel. Cette initiative a permis d'opérationnaliser le mécanisme de compensation forestière offert par le Code Forestier (Piketty *et al.*, 2015a).

Bien que Redenção ait adhéré au programme du Municipe Vert juste après sa création, la commune n'aura réussi à atteindre l'objectif des 80% de surface cadastrée et à obtenir le label qu'en juin 2016. Le processus de décentralisation de la gestion environnementale est donc beaucoup moins avancé (Tableau 2-5). Le SEMMA de Redenção ne dispose pas encore des

ressources financières, des équipements et des compétences suffisantes pour être habilité dans l'émission des LAR par exemple. Seul l'Etat est habilité, ce qui laisse moins de souplesse et peut ralentir les processus d'autorisation par rapport à des communes habilitées et autonomes. A Paragominas par exemple, le SEMMA a mis en place un système d'émission des LAR rapide et transparent via des audiences publiques. Dans les 20 jours après le dépôt de la demande, une audience publique est convoquée réunissant du côté du SEMMA le secrétaire, le coordinateur juridique et l'ingénieur technique, et du côté du producteur le responsable technique et le représentant légal. Si l'analyse technique et juridique ne révèle aucune incohérence, l'audience ne fait qu'approuver la licence. Dans le cas contraire, il est demandé de faire les adaptations nécessaires. Un audit ne sera réalisé sur le terrain qu'en cas de nécessité (Vedoveto *et al.*, 2014).

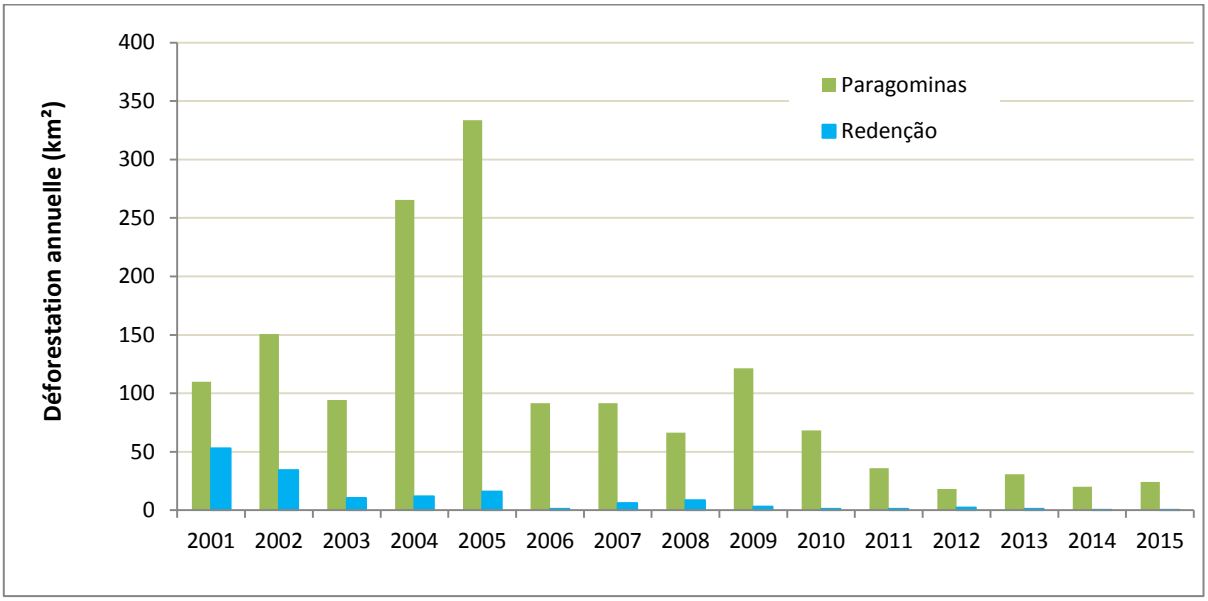


Figure 2-15 : Evolution de la surface annuelle déforestée (km²) à Paragominas et Redenção entre 2001 et 2015. Source des données : INPE (2016)

Tableau 2-5 : Décentralisation de la gestion environnementale à Paragominas et Redenção

	CMMA [1]	FMMA [2]	SEMMA structurée	Nombres de salariés	Habilitée pour les LAR	Pacte contre la déforestation	Groupe de combat contre la déforestation	Surface CAR cadastrée	MV [3]
Paragominas	Oui	Oui	Oui	13	Oui	11/03/2010	Oui	92,80%	2010
Redenção	Oui	Oui	Oui	10	Non	29/03/2011	Oui	81,61%	2016

1 – CMMA : Conseil Municipal sur l'Environnement ; 2 – FMMA : Fonds Municipal sur l'Environnement ; 3 – Municipe Vert
Source : Programa Municípios Verdes - PMV (2018)

Malgré les avancées obtenues grâce à l'initiative du « Municipe Vert », plusieurs objectifs n'ont pas encore été atteints et en particulier : la réduction de la déforestation dans les petites exploitations face au manque d'alternatives opérationnelles à l'agriculture sur brûlis, la régularisation foncière, la valorisation économique des avancées environnementales (à travers un label ou une certification « verte »), l'intensification de la production à grande échelle et la

restauration forestière du fait notamment de l'absence de titres fonciers pouvant être exigés par les institutions bancaires et du manque d'incitations financières (Piketty *et al.*, 2015a).

2.3 Méthode

Afin d'analyser les relations entre les stratégies d'intensification, la gestion des ressources naturelles et l'éco-efficience des paysages, notre démarche méthodologique se décompose en cinq étapes (Figure 2-16).

- La première partie expose la démarche suivie pour appréhender de façon générale les dynamiques agraires et les politiques environnementales dans la région (2.3.1).
- Dans un deuxième temps, nous présenterons notre méthode d'échantillonnage des exploitations : après avoir réalisé un zonage territorial et des entretiens exploratoires, nous avons sélectionné six exploitations constituant des cas d'étude pertinents par rapport à nos hypothèses (2.3.2).
- Dans un troisième temps, nous expliquerons notre méthode de collecte des données basée sur des entretiens semi-directifs et l'analyse de paysage (2.3.3).
- Nous exposerons ensuite notre démarche de traitement et d'analyse des données : nous avons analysé les trajectoires d'exploitation en lien avec l'évolution des modèles paysagers pour caractériser les pratiques d'intensification d'usages des sols et des systèmes fourragers et identifier les principaux déterminants paysagers ou non paysagers guidant les décisions de localisation des usages des sols (2.3.4).
- Puis nous montrerons comment nous avons couplé une approche quantitative (bilan énergétique) à une approche qualitative pour évaluer les impacts des différentes stratégies d'intensification sur les ressources naturelles (eau, fertilité, énergie, sols) malgré le manque de données (2.3.5).
- Pour finir, nous présenterons la démarche suivie pour construire le modèle multi-agents, utilisé pour explorer et simuler les décisions d'intensification des systèmes fourragers, et leurs impacts sur les ressources naturelles et l'organisation spatiale des paysages (2.3.6).

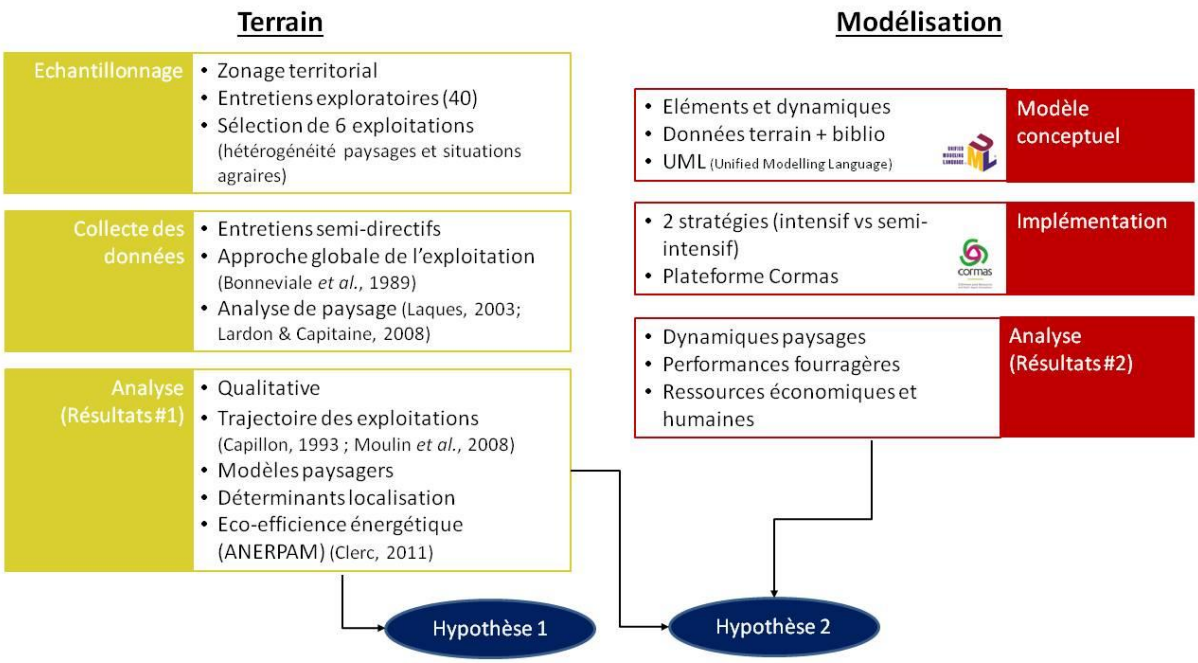


Figure 2-16 : Démarche méthodologique

2.3.1 Entretiens avec des acteurs clés et réunions locales

Avant de passer à l'étude des systèmes de décision des éleveurs, nous avons mené des entrevues avec des informateurs-clés dans le but d'avoir une lecture plus fine du processus d'intensification et des principales transformations agraires ayant lieu à Paragominas et Redenção. Les objectifs étaient multiples :

- Mieux comprendre les changements en cours ;
- Identifier des facteurs externes locaux ayant pu induire des changements dans les stratégies des éleveurs ;
- Éclairer les opinions des différents acteurs sur le processus d''intensification de l'élevage ainsi que sur les politiques environnementales ;
- Discuter les points forts et faibles des mesures opérationnelles mises en œuvre en Amazonie qui favorisent l'intensification tout en contribuant à la construction de paysages éco-efficients.

Nous avons interviewé des leaders de syndicats et associations de producteurs (fazendas et agriculture familiale), des représentants institutionnels, des chercheurs, ingénieurs et techniciens. Au total nous avons rencontré 15 institutions différentes sur Paragominas, Redenção et Belém (Annexe 5). Le guide d'entretien a été ajusté en fonction de l'interviewé (Annexe 6) mais globalement les informations collectées s'articulaient autour de trois thèmes : les changements dans la conduite technique des systèmes d'élevage, leurs opinions sur l'efficacité des politiques rurales d'accompagnement au processus d'intensification et des

politiques rurales et environnementales (notamment le code forestier), leurs perceptions sur les freins à l'intensification et les actions à mener. Ces entretiens duraient entre 1 et 3 heures.

Nous avons également assisté à 11 réunions sur l'élevage et l'agriculture, la mécanisation et les politiques environnementales liées à notre thème de recherche, organisées par les associations des communautés et les syndicats des producteurs ruraux etc. et nous permettant de compléter au fur et à mesure ces informations (Annexe 7).

2.3.2 Echantillonnage des exploitations

2.3.2.1 Zonage territorial : Sélection de situations agraires

L'adoption d'une démarche de type *bottom-up* suppose de sélectionner des cas d'étude. Nous avons opté pour une méthode d'échantillonnage par choix raisonné (empirique) (Berthier, 2006) afin d'inclure une diversité de situations agraires plutôt que de rechercher une représentativité statistique de l'ensemble des systèmes d'exploitation. Contrairement aux échantillonnages aléatoires, cette technique permet de se focaliser sur les cas les plus pertinents pour comprendre la diversité des stratégies d'intensification et leur lien avec l'écoefficience des paysages.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord réalisé un zonage territorial sur la base de quatre critères :

1) La distribution spatiale des ressources naturelles : nous voulions sélectionner des paysages hétérogènes d'un point de vue géomorphologique, pédologique, hydrographique et d'usage des sols ;
2) La situation socio-économique : agriculture familial *vs* fazenda, disponibilité en facteurs de production (terre, main d'œuvre, capital) ;
3) L'inclusion économique et sociale : accessibilité / distance au marché et aux services, insertion dans des filières ou réseaux sociaux ;
4) Le niveau d'intensification : nous voulions que les exploitations étudiées se situent sur un gradient d'intensification avec à l'extrême des éleveurs traditionnels (feu, déforestations, dégradations, faibles charges, etc.) et à l'autre des éleveurs intensifiés (réforme des pâturages, intrants chimiques, intégration agriculture-élevage) pour pouvoir comparer entre ces cas les niveaux de perception et de gestion des ressources naturelles.

La réalisation de ce zonage a reposé à la fois sur des transects paysagers, des études menées précédemment dans la région (Vaz *et al.*, 2012 ; DP Amazonie, 2013), et les avis d'experts locaux. Les transects paysagers ont été réalisés en suivant le réseau routier au cours de missions menées dans le cadre des projets ECOTERA et TERRACERT. Ces missions ont été réalisées en saison humide et en saison sèche en 2014 au sein d'une équipe pluridisciplinaire. Les objectifs étaient d'observer et de cartographier différents éléments paysagers sur les pôles

de Paragominas et Redenção : la texture de sols et leur position dans la topo-séquence (Laurent *et al.,* 2017), l'écoefficience hydrique des pâturages (Laurent *et al.,* In review)[1] et les usages des sols[2]. En croisant les regards de différents domaines, ces observations ont permis de réaliser une lecture interdisciplinaire des paysages et de tenir compte à la fois des aspects hydrologiques, pédologiques, topographiques et agronomiques.

Dans un second temps, ces observations de paysages ont été croisées aux données socio-économiques, géographiques et historiques générées par le groupe pluridisciplinaire du DP Amazonie sur Paragominas et Redenção. Nous avons ainsi identifié huit zones potentiellement intéressantes pour y sélectionner des exploitations. La Figure 2-17 montre les zones identifiées et le Tableau 2-6 les principales caractéristiques.

[1] L'objectif de cette mission était de définir une méthode d'évaluation de la sensibilité des pâturages à la sécheresse à partir de l'indicateur EVI (Enhanced Vegetation Index), obtenus à partir des images satellites MODIS.

[2] Cette mission visait à collecter des données d'observation sur les usages des sols sur les pôles de Paragominas (Paragominas, Ipixuna, Ulianopolis, Dom Eliseu) et Redenção (Redenção, Conceição de Araguaia, Cumaru do Norte, Santa Maria das Barreiras et Santana do Araguaia). Plus de 350 points GPS ont été récoltés. Couplés à l'utilisation d'images de télédétections Landsat générées à la même période, ce travail de terrain visait à différencier les usages qui peuvent être facilement confondus tels que les pâturages très sales *vs* les régénérations basses, les régénérations denses *vs* les forêts secondaires âgées et à pouvoir ainsi améliorer la classification.

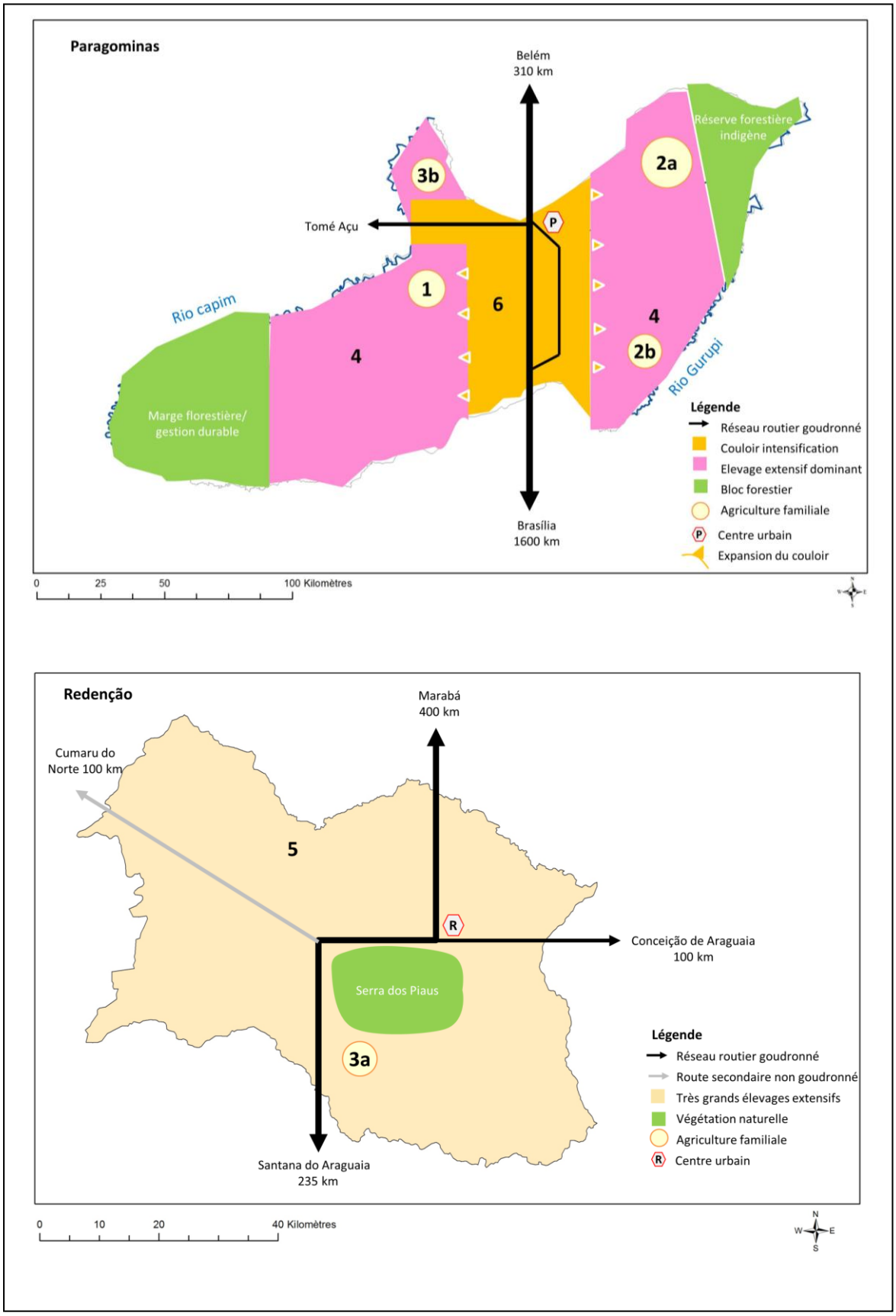


Figure 2-17 : Localisation des différentes situations agraires à Paragominas et Redenção

Tableau 2-6 : Caractéristiques des huit situations agraires identifiées

Zone	Situation Agraire	Structure foncière	Taille (ha)	Unité géomorphologique	Colonisation	Gestion des pâturages	Etat des forêts	Accessibilité marché et services	Processus d'intensification
1	Front pionnier, agriculture itinérante sur brûlis	*Colonia* Oriente : occupation non régularisée	50	Plateaux du Centre Est/vallée du Rio Capim	2000 : Occupation pâturages dégradés et réserve forestière	Productifs mais sujet à enfrichement	++	++	Agriculture sur brûlis, diversification (poivre)
2a	Agriculture familiale extensive consolidée en périphérie	*Assentamento* Luiz Inacio	50-100	Plateaux du Centre Est / vallée du Rio Gurupi	1999 : Occupation réserve forestière	Productifs mais sujet à enfrichement	++	+	Agriculture sur brûlis, diversification (poivre)
2b		Colonia Três Lagoas	25	Dépression du Rio Gurupi	2000 : Occupation pâturages dégradés	Peu productifs (surpâturage, feu)	+	++	Agriculture sur brûlis, diversification (lait)
3a	Agriculture familiale se spécialisant dans le lait	*Assentamento* Arraiaporã	25-100	Pénéplaine / chaînon	1988 : Occupation réserve forestière	Peu productifs (surpâturage, feu)	+	+++	Intensification, lait
3b		*Assentamento* Mandacaru	25	Vallée du Rio Capim	1999 : Occupation réserve forestière	Peu productifs (surpâturage, feu)	+	++	Subsistance, mécanisation, lait
4	Elevage extensif en périphérie – déforestation zéro	Agriculture patronale	500 – 2500	Dépression du Rio Gurupi	1970-80 : Elevage extensif et extraction forestière	Peu productifs (surpâturage, feu)	++	+	Intensification économes en intrants, diversification (plantations forestières, grains)
5	Très grandes fazendas spécialisées dans l'élevage viande	Agriculture patronale	> 4500	Pénéplaine	1960 : Elevage extensif et extraction forestière	Peu productifs (surpâturage, feu)	+	++	Intensification économes en intrants
6	Couloir d'intensification	Agriculture patronale	500 – 2500	Plateaux du Centre Est/vallée du Rio Gurupi	1960 : Elevage extensif et extraction forestière	Productifs	+	+++	Intensification haut niveau d'intrants

2.3.2.2 Entretiens exploratoires

Une fois ces huit zones identifiées, nous avons exploré la diversité des cas d'études possibles à travers des entretiens exploratoires semi-directifs. Compte tenu de notre démarche centrée sur la compréhension des stratégies des éleveurs, ce type d'entretiens nous semblait plus approprié que l'application de questionnaires fermés. Il permet à l'interlocuteur de s'exprimer plus librement avec les mots et en suivant l'ordre qu'il préfère (Van Campenhoudt & Quivy, 2011) et peut ainsi déboucher sur la collecte d'informations qui n'avaient pas été anticipées dans le questionnaire, ou dont l'importance avait pu être sous-estimée (Wood, 2015). Conduire ce type d'entrevue nécessite néanmoins plusieurs conditions. Pour rendre l'entretien interactif, l'interviewer doit jouer un rôle actif en suggérant des orientations et liens entre divers aspects. Il doit également chercher à provoquer un environnement discursif propice à la production d'informations sans pour autant dire à l'interviewé ce qu'il aimerait qu'il réponde. L'interviewer doit ainsi mettre de côté ses préconçus et veiller à ce que ses connaissances n'intimident pas l'interviewé (Wood, 2015).

Les éleveurs ont été sélectionnés de façon empirique non aléatoire, en utilisant les connaissances et bases de données du DP Amazonie et la méthode d'échantillonnage « boule de neige », méthode qui consiste à demander aux acteurs locaux enquêtés d'indiquer d'autres acteurs « clés » (Berthier, 2006). Contrairement aux enquêtes par questionnaire où le nombre d'interviewés est basé sur un objectif quantitatif préétabli à atteindre, le nombre d'entretiens semi-directifs à réaliser est déterminé sur la base du concept de redondance. Le nombre d'interviews a été répété jusqu'à ce que les acteurs interviewés n'apportent plus de nouvelles informations (Wood, 2015). Au total, nous avons mené 40 entretiens.

Deux types de questions ont été posés pendant ces enquêtes : des questions d'investigation, visant à recueillir des informations factuelles et des questions de compréhension pour explorer la diversité des déterminants guidant l'organisation spatiale des usages des sols. La liste des sujets qui nous a servi de guide d'entretien (Annexe 8) est la suivante :

- Données générales sur l'exploitation : localisation, taille, famille, statut foncier, date d'installation ;
- Usages des sols : surface, affectation des parcelles ;
- Troupeau : race, effectif, reproduction ;
- Conduite du système fourrager: mode d'implantation des pâturages, espèces fourragères, gestion des adventices, mode de pâturage, réforme, fertilisation, division des pâturages
- Facteurs influençant l'organisation spatiale des pratiques ;
- Gestion des APP (ripisylves) : Accès du troupeau à l'eau, état de la végétation, clôture ;
- Projets de l'exploitation.

Pour faciliter le dialogue, nous nous sommes appuyés sur une représentation spatiale de l'exploitation, en utilisant un support cartographique déjà existant ou un croquis dessiné avec

l'exploitant. Nous réalisions aussi une visite des parcelles de l'exploitation pour pouvoir observer les paysages et compléter les données de l'entretien. Les prises de notes étaient réalisées au cours de l'entretien et complétées de suite après. Les entretiens ont été intégralement récapitulés dans la foulée pour éviter de perdre des détails ou des subtilités. Ces comptes rendus comprenaient aussi une première analyse des données : typologies de pratiques, déterminants des règles de décision.

2.3.2.3 Sélection de six exploitations

A partir de ces entretiens exploratoires, nous avons retenu six exploitations correspondant chacune à une situation agraire. Ces fermes peuvent être classées selon un gradient d'intensification (Tableau 2-7). Dans chacune de ces exploitations, même si l'élevage génère peu de revenu, c'est une composante essentielle des projets.

Par rapport au zonage territorial initial, nous avons éliminé deux situations agraires : les communautés familiales de *Três Lagoas* et *Mandacaru* (2b et 3b). *Mandacaru* avait été sélectionnée pour l'existence d'un circuit de collecte de lait et sa proximité au goudron mais les entretiens exploratoires nous ont montré que le processus d'intensification en cours était marginal dans les exploitations familiales. Nous avons préféré retenir la communauté d'*Arraiaporã* à Redenção où la dynamique d'intensification et de diversification laitière est plus avancée. Dans la communauté de *Três Lagoas*, les conditions biophysiques relativement homogènes sur des lots de 25 ha rendaient moins intéressant notre étude et sa situation agraire était relativement proche de celle de *Luiz Inacio* (éloignement, usage du feu).

Tableau 2-7 : Caractéristiques des exploitations sélectionnées

Cas d'étude (Exploitation agricole)	Gradient intensification (1-5)	Surface (ha)	Main d'œuvre	Accès - distance marchés	Date colonisation	% surfaces ouvertes
Type 1 : Pionnier (familiale)	1	44	0,3	=	2001	35
Type 2 : Extensive consolidée sans feu (familiale)	2	135	1,5	-	2004	91
Type 3 : Intensive en intrants, lait (familiale)	4	127	2	+	1996	65
Type 4 : Extensive sans feu (fazenda)	3	9 955	6	-	1988	49
Type 5 : Ecologiquement intensive	4	38 913	60	+	1962	40
Type 6 : Intensive en intrants, viande (fazenda)	5	1 090	6	+	1970	53

2.3.3 Collecte des données

Notre objectif était de recueillir des informations factuelles et compréhensives nous permettant de : i) caractériser le fonctionnement des exploitations et en particulier l'organisation du système fourrager ; (ii) comprendre les stratégies d'organisation spatiale des usages des sols ; (iii) analyser de façon diachronique les changements techniques et les dynamiques spatiales ; (iv) explorer les points de vue des éleveurs, leurs perceptions des ressources naturelles et des paysages.

2.3.3.1 Enquêtes par immersion

Notre démarche compréhensive implique une caractérisation du fonctionnement global de l'exploitation. Cela nécessite donc une connaissance fine du système et d'interroger différentes personnes dans les exploitations, les décisions liées à la gestion du système fourrager et des ressources naturelles n'étant pas uniquement prises par le chef d'exploitation. Dans les six exploitations sélectionnées, nous avons eu recours à une approche de type immersion inspirée des approches ethnographiques (Vayssieres *et al.*, 2007). Entre avril 2014 et décembre 2016, nous avons réalisé plusieurs entretiens semi-directifs combinés à de l'observation participante, comme Jakovac *et al.* (2016). L'observation participante consiste à s'insérer dans la vie de l'exploitation et à observer de l'intérieur les pratiques des agriculteurs. La collecte des données a eu lieu de façon itérative, alternant phase de terrain et phases d'interprétations des données, permettant entre chaque visite de synthétiser les données collectées, de repérer les incohérences et de valider les conclusions d'une session d'enquêtes à la suivante. Le nombre de visites par exploitation varie selon la complexité du système et la taille de l'exploitation. En échelonnant dans le temps la collecte, nous avons aussi pu actualiser les entretiens à la lumière de nouveaux évènements. De plus, les visites régulières ont permis l'établissement d'un climat de confiance enrichissant dotant plus la qualité des informations collectées. Au fur et à mesure de la collecte, nous avons individualisé les guides d'entretiens.

La première session d'enquête s'est focalisée sur le fonctionnement de l'exploitation et le système d'élevage. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur l'Approche Globale de l'Exploitation Agricole (Bonneviale *et al.*, 1989). Pour étudier les changements et reconstituer les trajectoires, nous avons eu recours à des techniques d'enquêtes rétrospectives (Navegantes *et al.*, 2012a). Il s'agissait d'identifier aux dires des éleveurs les principaux évènements inhérents à la famille, au système de production et à l'environnement ayant eu des impacts sur l'exploitation et notamment la conduite du système d'élevage. Nous avons demandé aux éleveurs de nous présenter le contexte de l'installation (usages des sols, aménagements, famille, etc.) puis les évolutions depuis l'installation. Pour identifier les facteurs d'évolution, nous avons vérifié au cours des entretiens l'importance des possibles facteurs externes identifiés par les experts et la révision bibliographique et repéré grâce aux questions ouvertes

les autres facteurs ayant induit des changements. Nous avons aussi demandé aux producteurs de se projeter à moyen terme.

Une deuxième session d'entretien de synthèse a été menée afin de caractériser et mieux comprendre les perceptions des éleveurs sur les ressources naturelles (eau verte et bleu, fertilité des sols, texture et structure des sols, géomorphologie, topographie) et leurs opinions sur les pratiques permettant d'améliorer leur gestion, pour vérifier si elles sont aujourd'hui devenues déterminantes dans les processus de décision. Nous en avons aussi profité pour combler les données manquantes, et clarifier éventuellement les incohérences.

Les informations collectées s'articulent autour de neuf thèmes et de 31 sous-thèmes (Tableau 2-8). Les guides d'entretien comportaient de nombreuses questions, principalement ouvertes. Certaines questions visaient à recueillir des données descriptives sur la gestion (« Combien de paddocks avez-vous ? » « Que faites-vous pour limiter l'enfrichement des pâturages ? »). D'autres visaient à comprendre les pratiques et l'organisation des usages des sols (« Pourquoi avez-vous laissé régénérer les forêts ripariennes ? « Que pensez-vous des systèmes sylvo-pastoraux ? »).

Tableau 2-8 : Type de données collectées

Thème	Sous-thème
Le système d'exploitation agricole dans sa globalité	Données générales sur l'exploitation : famille, statut foncier
	Moyens de production : terres, matériel, bâtiments, main d'œuvre
	Environnement socio-économique et écologique
	Histoire : évènements familiaux et de l'environnement ; état successif du système de production (parcellaire, bâti, matériel, productions animales et végétales, l'organisation spatiale)
Conduite du système de culture	Espèces cultivées
	Itinéraire technique, rotation des cultures, performances techniques
	Commercialisation
Conduite du système d'élevage bovin	Effectifs, Race, allotement
	Reproduction
	Pratiques sanitaires
	Performances techniques
	Commercialisation
Système fourrager	Alimentation : fourrage, concentrés, minéraux
	Conduite technique des parcs, ilôts : implantation, entretien, réforme (fertilisation et gestion des adventices), mode de pâturage (tournant, alterné), abreuvement
	Chargement / ha
Gestion environnementale	Respect APP
	ARL : évolution surface et localisation, valorisation du bois et des produits non forestiers
	Documentation environnementale : CAR, LAR
Perception des différentes ressources dans les paysages	Eau verte : capacité de rétention, exposition au vent
	Eau bleu : qualité eau rivière, eau pour consommation humaine, processus d'érosion
	Fertilité : processus dégradation fertilité des pâturages, choix des parcelles pour l'implantation (types de végétation)
	Structure des sols : processus de dégradation des sols
Gestion des ressources naturelles	Eau verte: choix des espèces fourragères, plantations d'arbres et régénération, irrigation, gestion différenciée selon les parcs
	Eau bleu : gestion des ripisylves, abreuvement, usages de pesticides
	Fertilité : types d'engrais utilisé, valorisation des déjections animales, compost, utilisation de légumineuses, usage du feu, gestion différenciée selon les parcs
	Structure des sols : type de travail du sol, gestion de la charge, de la couverture du sol, localisation des différents usages
Organisation spatiale des usages et pratiques	Caractéristiques du parcellaire : surface, pente, qualité des sols, accessibilité, distance au siège et au corral, aménagement (subdivision, abreuvoir, irrigation)
	Déterminants : les ressources naturelles, critères topologiques, critères socio-économiques (main d'œuvre, statut foncier….)
Projets	Intensification du système d'élevage : où et comment ?
	Diversification : où et comment ?
	Abandon de surfaces : où et pourquoi ?

2.3.3.2 Analyse de paysage

En parallèle aux enquêtes par immersion, nous avons collecté des données sur la localisation des pratiques et des aménagements afin d'étudier les dynamiques spatiales de façon diachronique et expliciter les déterminants relatifs à l'organisation du territoire d'exploitation.

Nous nous sommes appuyés sur l'Approche Spatiale de l'Exploitation Agricole (Naïtlho *et al.*, 2003).

Plusieurs techniques ont été couplées. Lors de la première interview, nous avons demandé aux éleveurs familiaux de dessiner sur la base de leur carte mentale des croquis représentant la localisation des usages des sols et l'organisation territoriale de l'exploitation (Figure 2-18). Sur ces croquis nous avons demandé aux exploitants de localiser :

- Le siège de l'exploitation ;
- Les bâtiments (étable, hangar...) ;
- Les usages des sols (cultures, types de pâturages, forêt, régénérations forestières) ;
- Les paddocks ;
- Les aménagements (corral, abreuvoirs, couloir d'alimentation, système d'irrigation, etc) ;
- Le réseau hydrographique.

Lors de cette première visite, nous avons aussi réalisé des observations de paysage et collecté des points GPS sur le relief, le réseau hydrographique, l'état des pâturages, des forêts, des régénérations forestières, les aménagements et les limites foncières de l'exploitation (lorsque l'exploitation n'avait pas encore réalisé de CAR).

De retour au laboratoire, nous avons collecté d'autres données secondaires que nous avons croisées à l'aide d'un logiciel SIG (ArcGis 10.1) pour cartographier l'évolution de la végétation, le relief, les types de sol, le réseau hydrographique. Pour ce faire, nous avons utilisé des images satellites historiques Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 et Rapid'Eyes révélant la couverture des sols à différentes dates (avant l'installation, pendant le cycle d'installation, et actuellement), le CAR des exploitations (les limites foncières, les zones environnementales et le réseau hydrographique), les données de relief du SRTM (Valeriano & Rossetti, 2012) et de types de sol (Laurent *et al.*, 2017).

Lors d'une seconde visite, nous avons montré ces cartes aux exploitants et nous y avons positionné les éléments préalablement identifiés avec la carte mentale. Lors de cette visite, nous avons également demandé aux exploitants d'expliciter et de projeter (oralement) leur projet d'intensification dans l'espace de leur exploitation. Pour ce faire, nous leur avons posé des questions telles que : *Avez-vous prévu de diviser des paddocks ; si oui quels sont ceux que vous choisiriez en priorité ? Avez-vous prévu de vous diversifier dans des cultures annuelles ou pérennes ; si oui où les implanteriez vous ? Avez-vous prévu d'investir dans un système d'irrigation ; Si oui où l'installeriez vous ?*

De retour au laboratoire, nous avons produits des représentations graphiques en 3D retraçant les évolutions des paysages à différentes périodes (types d'usages des sols et organisation spatiale, réseau hydrographique, principaux aménagements, contraintes physiques). Nous

avons également produit un schéma visualisant le projet d'intensification préféré par l'éleveur.

Lors d'une ultime visite, nous avons restitué aux agriculteurs ces représentations graphiques. Nous avons demandé aux enquêtés de confirmer les dynamiques spatio-temporelles et les projets d'intensification ou de les infirmer et d'en expliquer les raisons.

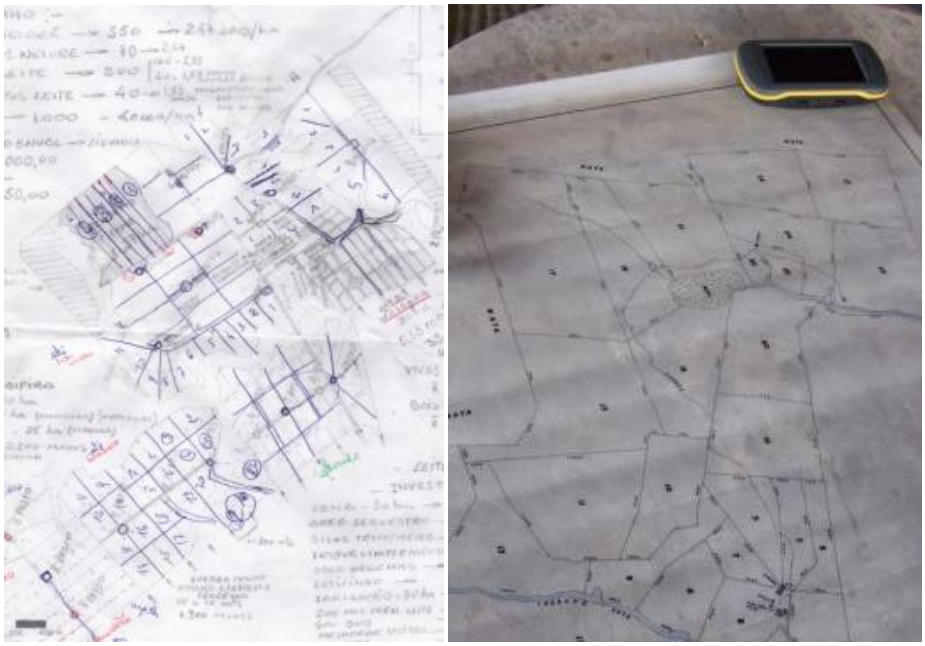


Figure 2-18 : Exemple de croquis représentant les usages des sols et l'organisation territoriale des exploitations.

2.3.4 Méthode d'analyse des systèmes de décision et des paysages

2.3.4.1 Analyse globale du système d'exploitation

L'ensemble des informations collectées a été synthétisé sous la forme de monographies articulées autour de cinq thèmes : l'exploitation dans son environnement naturel et socio-économique, atouts et freins ; la gestion de l'élevage et des fourrages (itinéraires techniques et successions, dynamique des usage des sols, entretien et réforme des pâturages, mode de pâturage…) ; les pratiques mises en place pour mieux gérer les ressources naturelles ; le respect de la législation environnementale ; les perspectives d'avenir.

Pour caractériser les pratiques de gestion des fourrages, nous avons utilisé la typologie proposée par Poccard-Chapuis *et al.* (2015b) qui classe les pratiques selon 5 grands types de gestion :

- La gestion extensive / traditionnelle : implantation après brûlis, nettoyage manuel ou avec feu, faible charge à l'hectare ;

- La gestion « bonnes pratiques » basée sur une faible à moyenne consommation d'intrants chimiques : division des pâturages, nettoyage régulier, pâturage tournant, légère fertilisation au semis ;
- La gestion intensive basée sur une forte consommation d'intrants chimiques : fertilisation fréquente, usage d'herbicides, pâturage tournant intensif, nouvelles graminées, irrigation ;
- La gestion intégrée (intégration agriculture-élevage) ;
- La gestion écologiquement intensive : usage de système agro-sylvopastoral, introduction de légumineuses, gestion intégrée des ravageurs.

En ce qui concerne les pratiques de gestion du troupeau, nous avons comparé les exploitations selon la gestion de l'alimentation (uniquement à l'herbe, complémentation via la production d'ensilage ou l'achat d'aliment du commerce), de la reproduction et de la génétique (de la monte naturelle non contrôlée à l'insémination artificielle) et des allotements.

En ce qui concerne les pratiques de gestion de la réserve forestière et des APP, nous avons distingué les exploitations selon l'état de la couverture végétale (déforestée, régénérée, préservée).

Pour formaliser le discours des éleveurs sur leurs perceptions et leurs motivations (les déterminants des pratiques), et trouver un vocabulaire commun entre les enquêtés, nous avons procédé à une analyse thématique. A partir des réponses des enquêtés, nous avons extrait les principales idées que nous avons regroupées ou dissociées selon leur degré de similitude ou de distinction. Ce classement nous a permis d'obtenir des catégories de réponses (Berthier, 2006).

2.3.4.2 Analyse des trajectoires

Les informations collectées par enquêtes rétrospectives ont été systématisées en suivant la méthode de traitement proposée par Moulin *et al.* (2008). Nous avons retranscrit manuellement l'ensemble des événements majeurs de l'exploitation et de son environnement socio-économique sur une frise chronologique, puis décomposé les chroniques des exploitations en un ensemble de phases de cohérence successives (liées aux objectifs de production et aux pratiques) et de phases de transformations (Figure 2-19).

La construction graphique des trajectoires s'est faite en deux temps. Nous avons tout d'abord représenté sur la frise un ensemble d'indicateurs nous permettant d'analyser le processus d'intensification et la gestion des ressources. Ces indicateurs quantitatifs et qualitatifs ont été classés en quatre catégories principales : les facteurs de production (famille, foncier, main d'œuvre et équipements), la gestion du système d'élevage, les innovations et la gestion des paysages. Puis nous avons retenu les indicateurs les plus discriminants nous permettant de rendre compte des différences d'évolution entre exploitations.

L'analyse des trajectoires des exploitations s'est aussi opérée en deux étapes. Nous avons tout d'abord réalisé une analyse diachronique afin de mettre en évidence les principaux changements socio-techniques et paysagers qui ont eu lieu dans chaque exploitation et différentier des phases de cohérence. Nous avons ensuite procédé à une analyse synchronique comparative dans le but de distinguer les similarités et différences entre exploitations face à un même évènement (e.g. comment réagissent-elles face aux politiques de lutte contre la déforestation ?) ou dans une même phase de cohérence (e.g., où les exploitations localisent-elles les usages des sols intensifs ?).

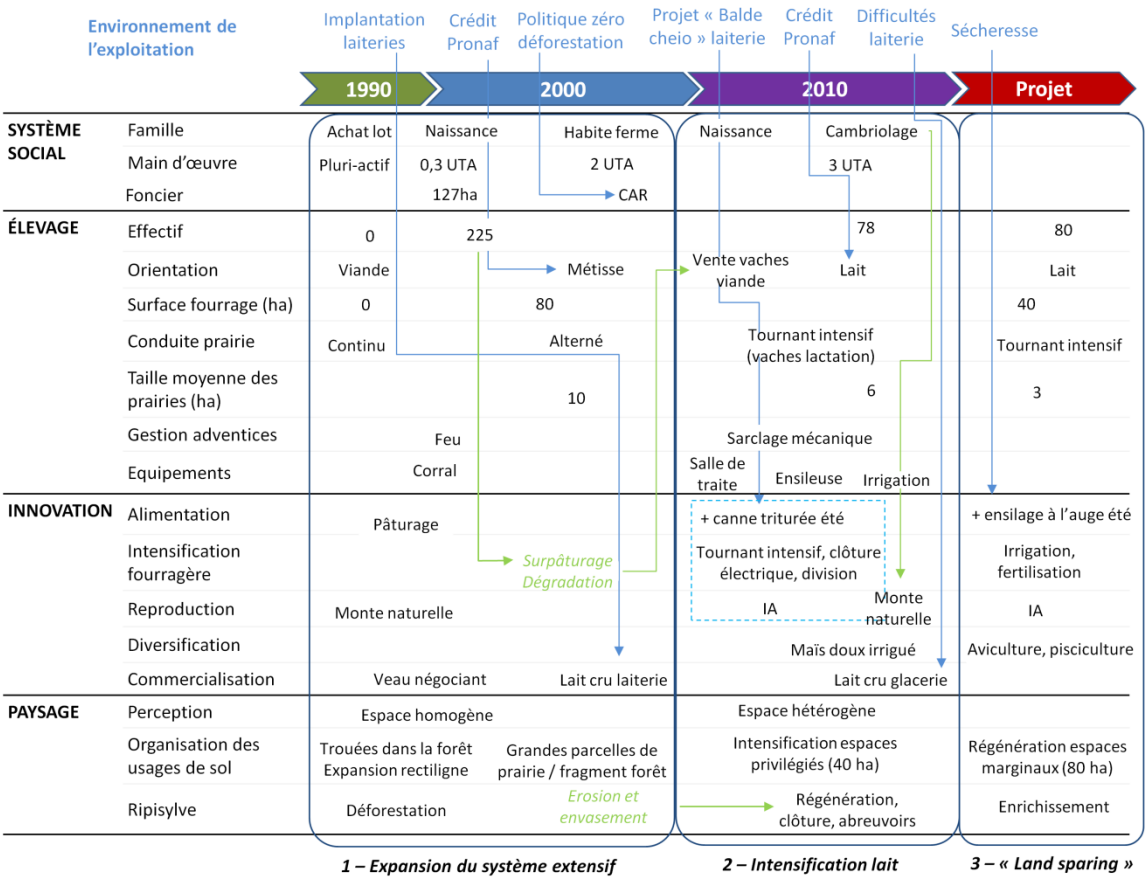


Figure 2-19 : Exemple de chronique d'une exploitation enquêtée

2.3.4.3 Modélisation graphique

Pour chaque phase de cohérence identifiée à travers l'analyse des trajectoires des exploitations et sur la base des données collectées dans l'analyse de paysage (2.3.3.2), nous avons élaboré les modèles paysagers correspondants. Notre démarche s'inspire de la chorématique (Brunet, 1986) et de la méthode d'analyse par les indicateurs paysagers (Laques, 2003). Les chorèmes sont des symboles graphiques qui visent à représenter une structure spatiale élémentaire ou un processus spatial. Ces chorèmes, une fois combinés sur un même fond, permettent d'éclairer le fonctionnement du système spatial étudié et d'en déduire des traits d'organisation. Les intérêts des chorèmes sont multiples : ils permettent de

découvrir, de représenter et de hiérarchiser les dynamiques au sein d'un territoire mais aussi de comprendre les mécanismes majeurs d'organisation spatiale. Cette approche graphique présente aussi l'avantage d'intégrer différents niveaux d'organisation et de prendre en compte différentes temporalités. Initialement utilisés dans les travaux de géographie, les chorèmes ont été mobilisés pour modéliser le fonctionnement de territoires d'exploitation (Lardon & Capitaine, 2008 ; Bonin & Houdart, 2012). L'usage de la chorématique nécessite de recourir à un alphabet graphique (symboles) représentant les modules élémentaires du fonctionnement spatial de l'exploitation agricole. Il est possible de créer son propre alphabet ou de recourir à un alphabet déjà existant tel que l'alphabet général de Brunet (1986), ou à des alphabets spécifiques aux activités agricoles (Cheylan *et al.*, 1990 ; Piveteau & Lardon, 2002).

Pour représenter ces modèles paysagers, nous avons d'abord recherché les formes élémentaires qui les structurent tant sur le plan écologique que social ainsi que les dynamiques. Les symboles utilisés représentent les structures et processus biophysiques du paysage (réseau hydrographique, topographie, type de sols, dynamiques des ressources naturelles) et anthropiques (usages des sols, pratiques de gestion du système fourrager et aménagements réalisés sur l'exploitation). La formalisation de modèles paysagers nous permet de comparer les situations d'exploitation de façon synchronique, et d'analyser leurs dynamiques spatiales de façon diachronique.

Les trajectoires des modèles paysagers ont ensuite été caractérisées sur la base d'indicateurs paysagers et de conduite du système fourrager. La définition de ces indicateurs s'est appuyée sur plusieurs travaux menés dans la région (Laques, 2003 ; Venturieri, 2003 ; Poccard-Chapuis, 2004 ; Oszwald *et al.*, 2011). Cinq dimensions se sont révélées pertinentes pour analyser le processus d'intensification en lien avec l'éco-efficience des paysages (Tableau 2-9) :

- **La nature des éléments qui composent le paysage** : Les types d'usages des sols (Encadré 2-3), le type de conduite des pâturages et le linéaire de clôture sont des indicateurs du niveau d'intensification d'une exploitation.
- **La proportion des éléments** : reflète le niveau de spécialisation, et la capacité à intensifier.
- **La distribution spatiale des éléments dans les paysages** : reflète les stratégies d'organisation spatiale des exploitations en lien avec la gestion des ressources naturelles et humaines. Les unités géomorphologiques choisies et la distance aux aménagements nous montrent quels sont les déterminants qui guident les décisions de localisation des éleveurs.
- **La forme de ces éléments** : La fragmentation des forêts (bloc ou fragmenté), la connectivité (conservation de ripisylves) et l'hétérogénéité (mosaïques d'usages des sols) sont des métriques pertinentes pour caractériser l'écoefficience des paysages.
- **Les dynamiques temporelles de ces composants** : L'expansion agricole (surface annuelle défrichée) renseigne sur la logique d'occupation du producteur et la capacité

à investir, les successions des usages sur la gestion de la fertilité avec l'arrêt de l'usage du feu.

La combinaison de ces indicateurs spatiaux nous a permis d'identifier des archétypes paysagers représentatifs des interactions entre système d'élevage et ressources naturelles dans les paysages.

Tableau 2-9 : Indicateurs utilisés pour caractériser les archétypes paysagers

Type	**Indicateurs**	**Modalités**
Nature des composants	Type d'usages des sols	Cultures annuelles/pluriannuelles, cultures pérennes, pâturage propre, pâturage sale, régénération jeune, régénération âgée, Forêt primaire ou secondaire âgée
	Type de conduite de pâturage	Extensif, bonnes pratiques, intensif, écologiquement intensif, intégré, irrigué
	Clôture	Linéaire (km)
Proportion des composants	Pourcentage des usages des sols	Surface usage sols/ surface totale
	Densité de parcs	Nombre de parcs / Surface des parcs
Distribution spatiale des composants	Localisation des usages des sols sur les unités géomorphologiques	Plateaux, rebord convexe des plateaux, fond de vallée, versants découpés par le réseau, versants peu ondulés (glacis), colline, bas-fond, bordure du réseau hydrographique
	Distance des usages des sols aux aménagements	Distance au corral, au siège de l'exploitation, à la salle de traite
Forme des composants	Fragmentation des forêts	Bloc, fragmenté
	Connectivité	Linéaire ripisylves conservés
	Hétérogénéité	Mosaïques d'usages, forme régulière ou irrégulière
Dynamique temporelle des composants (chronoséquence)	Expansion agricole	Surface défrichée (ha/an)
	Succession des usages	- Expansion pionnière : Forêt / agriculture / pâturage ; Forêt / pâturage. - Réhabilitation de surfaces productives : Régénération / agriculture / pâturage ; Régénération / pâturage - Intégration : agriculture / élevage

Encadré 2-3 : Différenciation des usages des sols

Culture annuelle/pluriannuelle : culture qui complète son cycle en une ou deux années. Exemple : soja, maïs, manioc, riz, légumes.
Culture pérenne : culture permanente qui a un cycle de végétation de plusieurs années. Exemple : poivre, arbres fruitiers, plantations forestières.
Pâturage propre : Moins de 30% de recrus forestiers ou d'adventices herbacées.
Pâturage sale : Plus de 30% de recrus forestiers ou d'adventices herbacées.
Régénération jeune : Composée d'arbustes et de petits arbres (hauteur maximum de 3 mètres). Le couvert de graminées est en voie de disparition.
Régénération âgée : Composée essentiellement d'arbres ou palmiers plus que d'arbustes (hauteur minimum = 3 à 4 mètres).
Forêt secondaire âgée ou primaire : Forêt qui n'a jamais été déforestée ou il y a plus de 20 ans. Peut être dégradée.

2.3.4.4 Formalisation des règles de décisions de localisation des pratiques

L'analyse globale des exploitations, des trajectoires des exploitations et des modèles paysagers nous a servi à expliciter les variables décisionnelles et les critères de décision sous-tendant la localisation des pratiques dans les paysages. Ce travail de formalisation a été effectué pour les pratiques suivantes :

- Localisation des usages des sols (cultures annuelles et pérennes, pâturage, forêt…)
- L'implantation et la réforme des pâturages
- L'entretien des pâturages (gestion de la fertilité, des adventices, de la charge animale)
- L'aménagement des paddocks (division des parcelles, installation de système d'irrigation, d'abreuvoirs...)
- La gestion des forêts (réserve forestière, ripisylve).

Pour expliciter les déterminants sous-tendant la localisation des pratiques, nous avons testé pour chaque exploitation les variables et critères de décision inventoriés dans la littérature et à travers les entretiens exploratoires. De plus, notre méthode d'entretien semi-directive nous a permis de voir émerger de nouveaux déterminants. Les variables décisionnelles et les critères de décision que nous avons testés sont détaillés dans la Figure 2-20. Ces variables sont liées aux caractéristiques biophysiques (unités géomorphologiques, végétation, sols), topologiques et socio-économiques (distance, forme des parcelles, accessibilité).

Le rôle de ces variables a été analysé à l'échelle des parcelles pour les exploitations familiales et de blocs de parcelles pour les fazendas de grande taille compte tenu du nombre élevé de parcelles. La comparaison entre exploitations nous a permis d'identifier des similarités et les spécificités de chaque exploitation. Puis nous avons établi des règles de décision en vue de la conceptualisation et de l'implémentation du modèle SMA (2.3.6), en suivant le formalisme de type « SI…. ALORS… » et « SI…. ALORS…. SINON… ».

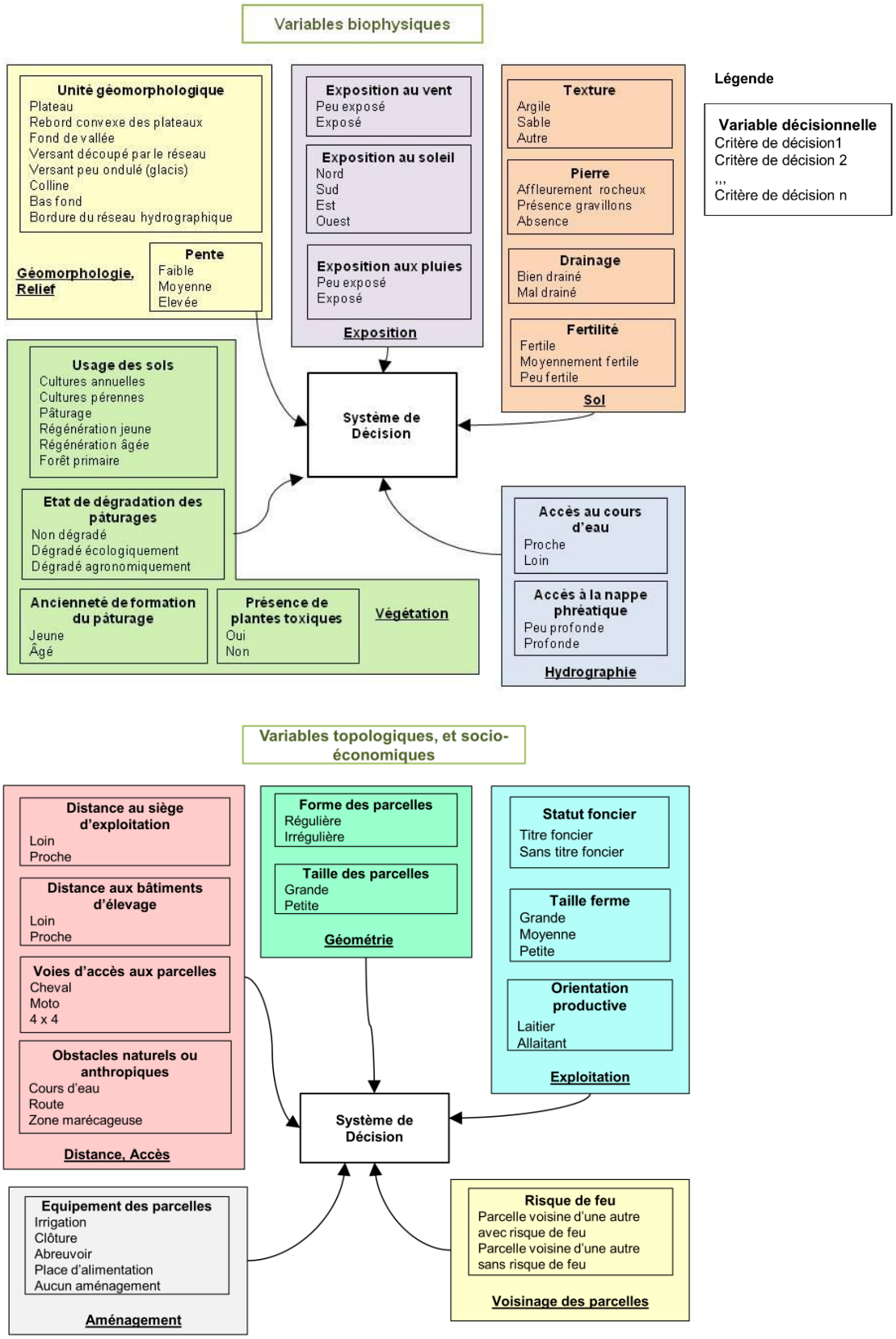


Figure 2-20 : Liste des variables décisionnelles et des critères de décision potentiellement déterminants dans la localisation des pratiques et testés au cours des enquêtes

2.3.5 Evaluation quantitative et qualitative des éco-efficiences

Les indicateurs d'éco-efficience sont utilisés dans des évaluations agro-environnementales pour mesurer la durabilité environnementale de systèmes de production agricole. Il s'agit d'un rapport numérique entre la valeur d'un bien produit (quantitativement ou qualitativement) en numérateur et l'utilisation de ressources naturelles en dénominateur. L'évaluation des éco-efficiences dans les six exploitations enquêtées vise à réaliser un diagnostic de la situation actuelle et à alimenter les sorties du modèle de simulation SMA.

2.3.5.1 Indicateurs retenus dans ECOTERA

Deux méthodes complètes d'évaluation des éco-efficiences des systèmes de production animales ont déjà été élaborées et testées à l'échelle de l'exploitation agricole : le DEA (Data Envelopment Analysis) (Berre *et al.*, 2015), les ACV (Analyse du cycle de vie) (Basset-Mens *et al.*, 2009) ou la combinaison de ces deux méthodologies (Jan *et al.*, 2012 ; Soteriades *et al.*, 2016). Ces deux méthodes reposent sur la production d'un indicateur synthétique, agrégeant différentes composantes. Dans le cadre du projet ECOTERA, de nouvelles méthodes d'évaluation des éco-efficiences ont été mobilisées. Les mesures sont à la fois multi-critères (mesure des éco-efficiences par rapport à différentes ressources naturelles) et spatialisées ce qui permet d'identifier les *trade-offs* pouvant exister entre les différentes ressources et de combiner à plusieurs échelles (parcelle, exploitation agricole et territoire) les éco-efficiences des systèmes de production. Les indicateurs retenus à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation concernent des ressources naturelles qui sont stratégiques dans les systèmes de production agricoles amazoniens face à la transition agraire :

- A l'échelle de la parcelle : l'éco-efficience relative à la ressource hydrique dans les pâturages et à la fertilité des sols dans les systèmes de cultures annuelles. L'eau est une ressource limitante dans ces systèmes d'alimentation basés à l'herbe. La baisse de la ressource hydrique en saison sèche génère une chute significative de l'offre fourragère. Avec l'interdiction de recourir au feu, la fertilité du sol devient aussi une ressource clé à gérer principalement dans les systèmes de cultures annuelles sans feu.
- A l'échelle de l'exploitation : l'éco-efficience énergétique et l'empreinte carbonée. L'énergie est loin d'être une ressource limitante en Amazonie (les radiations solaires permettant une forte activité photosynthétique), toutefois les émissions de gaz à effet de serre par les systèmes d'élevage et la déforestation sont fortement décriées. De plus, le processus d'intensification peut amener à une augmentation de l'usage d'énergies fossiles qui peuvent impacter négativement le bilan énergétique.

2.3.5.2 Echelle de l'exploitation : Mesure de l'éco-efficience énergétique et des émissions de gaz à effet de serre

Nous avons utilisé l'outil de diagnostic ANERPAAM (Analyse énergétique des propriétés agricoles d'Amazonie), une adaptation de l'outil PLANETE[1] aux systèmes d'élevage tropicaux brésiliens (Clerc, 2011). Ce diagnostic, basé sur l'Analyse du Cycle de Vie, mesure les impacts environnementaux d'un produit sur le plan énergétique, de l'extraction de la matière première jusqu'à son élimination. Cet outil comprend deux indicateurs : le bilan énergétique et les émissions de gaz à effet de serre, à l'échelle de l'exploitation agricole.

- **Le bilan énergétique**

Le bilan énergétique consiste à évaluer la quantité d'énergie non renouvelable qui a été utilisée par unité de biens produits (par litre de lait, kilo de viande, kilo de grains). Le principe est simple : il suffit de faire la différence entre l'énergie non renouvelable qui entre dans le système de production et l'énergie brute qui en sort. Ces bilans sont dressés en Joule (J). Les entrées d'énergie non renouvelables sont de deux types : l'énergie directe (qui correspond aux carburants, à l'électricité et à l'eau) et l'énergie indirecte (qui correspond à l'énergie utilisée pour produire les intrants agricoles, les équipements et les bâtiments depuis l'extraction des matières premières jusqu'au transport vers l'exploitation). Les sorties d'énergie brutes sont de trois types : les produits animaux, végétaux, les co-produits et les sous-produits (Figure 2-21). Entre entrées et sorties, le système de production est vu comme une « boîte noire ». Les flux entre les composants à l'intérieur du système ne sont pas pris en compte (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015a).

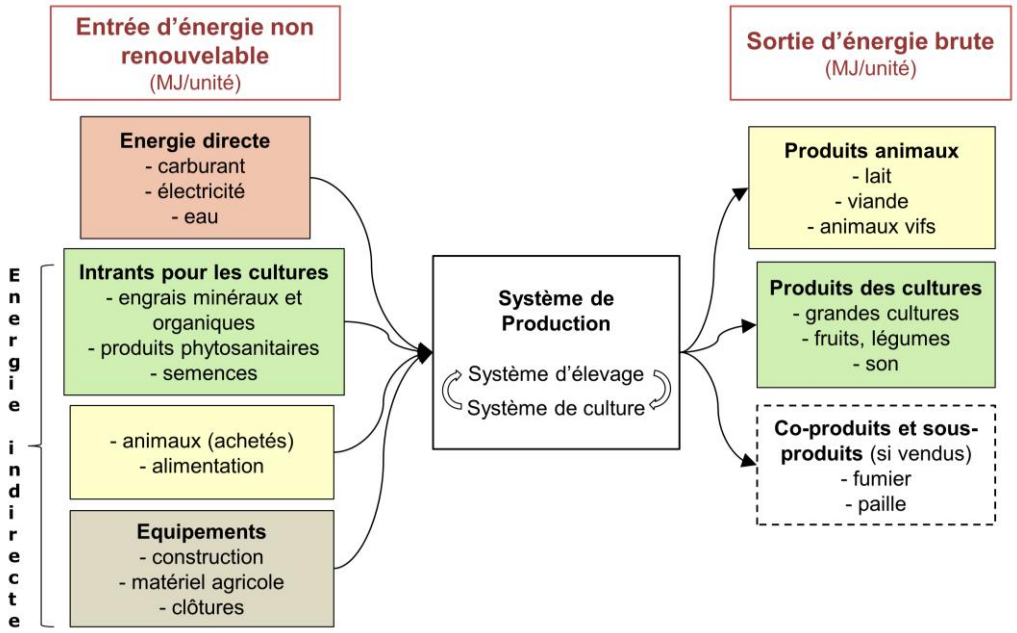


Figure 2-21 : Flux entrants et sortants dans le calcul du bilan énergétique (Clerc, 2011)

[1] PLANETE a été développé en France par divers organismes dont Solagro et l'ADEME.

- **Les émissions de GES**

ANERPAAM évalue les émissions en équivalent carbone de trois gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde d'azote (NO_2). On distingue deux types d'émissions :

- Les émissions directes : Il s'agit des émissions entériques (principalement du méthane) émises par les ruminants lors du processus de fermentation au niveau du rumen, des émissions issues des déjections animales au pâturage (méthane et oxyde d'azote), du stockage et de leur gestion, des émissions émises par les sols agricoles en réponse à l'application de fertilisants (minéraux ou organiques) dues aux processus bactériens de nitrification et dénitrification, des émissions dues à la consommation de carburants et par l'usage du feu (déforestation et entretien de surfaces). En ce qui concerne l'usage du feu, nous avons considéré dans l'inventaire les émissions de gaz par la déforestation uniquement si la défriche a eu lieu il y a moins de 20 ans c'est-à-dire postérieurement à 1995. Ces émissions ont été amorties sur 20 ans.
- Les émissions indirectes : dues à la fabrication et au transport des intrants et des équipements.

ANERPAAM ne prend pas en compte la fixation des gaz à effet de serre.

- **Collecte et analyse des données**

Au cours des entretiens réalisés dans les six études de cas, nous avons réalisé un inventaire précis de toutes les entrées ainsi que des sorties d'énergie. Pour les cas où nous manquions de données précises sur les effectifs et les poids des animaux, nous avons procédé à des estimations. Les données ont été traitées et analysées à l'aide du tableur ANERPAAM. Les résultats de nos analyses ont été comparés avec les résultats de précédents diagnostics conduits à Paragominas sur 35 exploitations : 6 fazendas intensives ayant adopté le programme des « Bonnes Pratiques Agricoles », 7 fazendas extensives, 2 fazendas intensives laitières et 20 établissements familiaux (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015a).

2.3.5.3 Echelle de la parcelle : une approche qualitative des impacts des pratiques

Les mesures des éco-efficiences relatives aux ressources hydriques et à la fertilité des sols réalisées dans le cadre du projet ECOTERA n'étant pas finalisées au moment de l'implémentation du modèle SMA, nous avons décidé de qualifier l'impact de pratiques et de systèmes de production sur ces deux types de ressources à partir d'avis à dire d'experts. Nous avons réalisé le même travail pour la structure des sols car au fil des enquêtes, nous nous sommes aperçus que cette ressource avait beaucoup d'importance pour les éleveurs. Notre démarche s'est décomposée en trois temps :

- Identifier les principaux processus naturels de dégradation de ces ressources (à partir des avis d'experts et de la révision de la littérature) ;

- Identifier les pratiques mises en place par les éleveurs pouvant amplifier les processus de dégradation ou au contraire les réduire voire améliorer le capital en ressources ;
- Croiser ces données au sein d'un tableau avec en colonne les processus de dégradation des ressources naturelles et en ligne les pratiques pouvant amplifier ou réduire ces processus. Ce tableau inclut une évaluation qualitative de ces amplifications ou réductions.

2.3.6 Modélisation multi-agents des interactions entre système de décision, paysage et ressources naturelles

Les données issues de l'analyse des systèmes de décision et des éco-efficiences ont été intégrées dans un modèle de type SMA (Systèmes Multi-Agents) développé à l'échelle de l'exploitation.

2.3.6.1 Une démarche de modélisation itérative et exposée

Notre démarche de modélisation s'est faite de manière itérative, avec une alternance de phases de conception du modèle conceptuel suivies de phases de simulation et d'exploration du modèle, comme proposé par Jakeman *et al.* (2006) (Figure 2-22). Au regard des sorties du simulateur informatique, nous avons ajusté le modèle conceptuel pour avoir une meilleure représentation des dynamiques du système.

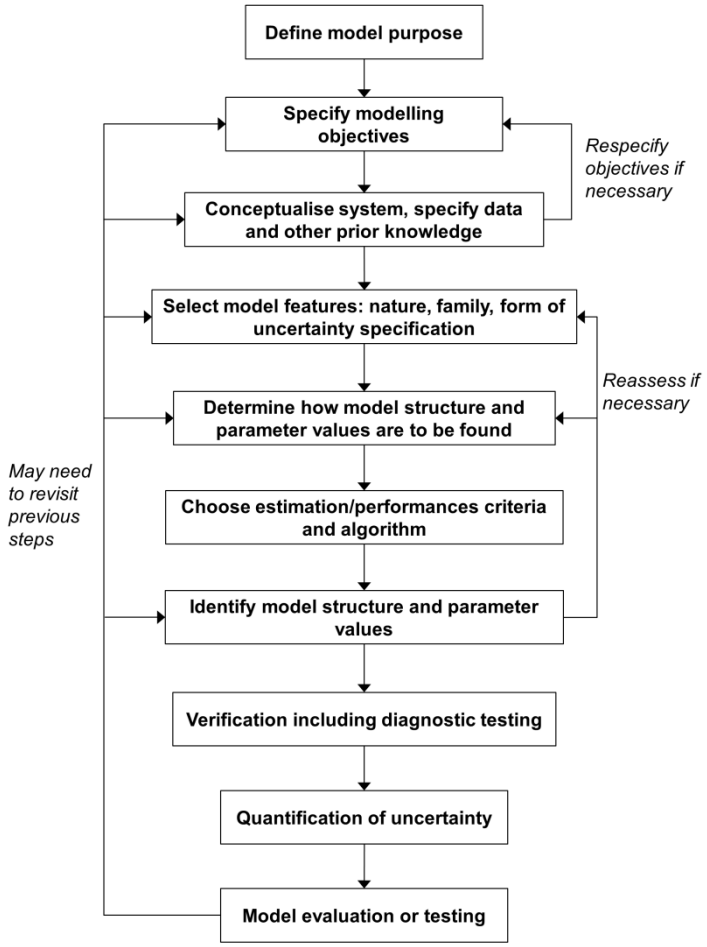


Figure 2-22 : Dix étapes itératives dans le développement et l'évaluation de modèles environnementaux (Jakeman et al., 2006)

Face à l'impossibilité de prouver mathématiquement les propriétés des SMA, il est nécessaire de suivre quelques grands principes afin d'en améliorer la crédibilité et la fiabilité. Pour l'élaboration du modèle conceptuel et son implémentation informatique, nous avons cherché à suivre les propositions de Bommel (2009) :

- La première étape fondamentale a consisté à expliciter la question. Le modèle ne peut pas être une représentation mimétique de la réalité. Plus la question est large et le modèle complexe, plus on augmente les sources d'erreurs et de biais, moins il sera facile de contrôler les simulations et d'en expliquer les résultats. Il était donc nécessaire de formuler précisément la question dès le départ afin de fixer les objectifs du modèle et restreindre le champ de l'étude même si le processus de modélisation peut amener à faire évoluer cette question. Réfléchir aux types de résultats que l'on souhaite obtenir a été un moyen de nous aider à définir cette question.
- Dans un second temps, nous avons procédé à une description de notre modèle conceptuel (c'est-à-dire de sa structure et des comportements des agents) en diagrammes UML (Unified Modeling Language). Ce langage graphique, simple, formel et normalisé est fréquemment utilisé dans la programmation orientée objet.

Ses atouts sont nombreux. Facile à comprendre, il permet de rendre lisible un modèle à des non-informaticiens. De plus, il est très adapté aux démarches de modélisation participative, au sein d'équipes interdisciplinaires ou avec des acteurs locaux, puisque cette présentation transparente du modèle SMA permet de mieux discuter, d'expliquer mais aussi de critiquer les choix opérés. Cette discussion est très importante sachant qu'un modèle n'est pas neutre et que sa construction repose nécessairement sur une représentation subjective. De plus, l'usage de diagrammes UML permet à d'autres personnes de pouvoir répliquer le simulateur.

- La troisième phase a consisté à explorer les résultats du simulateur et à vérifier la robustesse du modèle. Cette étape est très importante pour améliorer la compréhension du modèle, repérer d'éventuels disfonctionnements et s'assurer que les résultats découlent uniquement des mécanismes du modèle et non d'artefacts liés à la programmation et au paramétrage. La fiabilité du simulateur offre davantage de crédibilité au modèle.
- Du fait que notre approche soit basée sur un petit nombre de cas d'étude, il existait un risque de construire un modèle *Ad'hoc*, c'est-à-dire un modèle très descriptif dont le domaine d'application se limite juste au jeu de données collectées. Ce type de modèle ne fournit aucune hypothèse falsifiable, aucune valeur informative et aucune connaissance supplémentaire. Même si notre modèle est très descriptif, nous avons cherché à représenter des agents qui soient simples et stylisés par rapport à la réalité locale.

2.3.6.2 Données pour le paramétrage du modèle

Les données qui nous ont servi à paramétrer le modèle et notamment le comportement des agents sont issues de trois sources :

- Les informations que nous avons collectées à partir de nos enquêtes par immersion et des analyses de paysage et interprétées à travers l'approche systémique, l'analyse des trajectoires et la modélisation graphique ;
- Les trois modèles précédemment construits par l'équipe du DP Amazonie dans la région d'Amazonie orientale :
  - *Transamazon* qui analyse les dynamiques d'utilisation des sols et leurs déterminants dans un contexte pionnier (Bonaudo, 2005 ; Bommel *et al.*, 2010).
  - *Floagri* qui compare les effets environnementaux et économiques de pratiques alternatives aux techniques d'abattis-brûlis (agriculture de conservation et gestion durable de la réserve légale) (Bommel *et al.*, 2014).
  - *Amaz* qui évalue les impacts de différentes stratégies d'usages des sols sur les services écosystémiques et les performances économiques (Bommel *et al.*, 2012). Notre modèle s'en est particulièrement inspiré pour décrire les processus de dégradation des pâturages, l'évolution de la végétation, la reproduction du troupeau, la hiérarchisation des actions, etc.

- Des données à dire d'experts, issues de la bibliographie et des précédents travaux de recherche de l'équipe du DP Amazonie utilisées pour affiner la conceptualisation des comportements des agents et la dynamique des ressources naturelles et paramétrer le modèle (Hostiou, 2003 ; Poccard-Chapuis, 2004 ; Tourrand *et al.*, 2004 ; Veiga *et al.*, 2004 ; Piketty *et al.*, 2005 ; Tourrand *et al.*, 2013).

2.3.6.3 Stratégies d'intensification des éleveurs et sorties du modèle

Afin de faciliter l'implémentation du modèle, nous avons mis en évidence les similitudes de comportement et les spécificités des six archétypes d'éleveurs identifiés dans la thèse. Deux principaux types de logiques existent vis-à-vis de l'intensification des usages des sols : un type intensif ayant recours à un haut niveau d'intrants et un type intensif ayant recours à un faible niveau d'intrants. Avec quelques variantes, ces logiques peuvent se décliner pour toutes les tailles d'exploitation (les exploitations familiales, les fazendas de moyenne taille, les grandes fazendas).

Ces dynamiques anthropiques (décisions de gestion des systèmes fourragers et usages des sols des éleveurs) sont croisées avec des dynamiques naturelles (évolution naturelle de la végétation et de trois types de ressources naturelles, l'eau verte, la fertilité et la structure des sols). Divers indicateurs biophysiques et socio-économiques sont mesurés afin de caractériser les trajectoires d'intensification et les dynamiques des paysages : la proportion des différents types d'usages des sols et leur distribution spatiale, le processus de division des pâturages, leur dynamique de dégradation, la récupération des réserves forestières et ripisylves, la productivité fourragère (capacité de charge des parcs et de l'exploitation) et animale (démographie), l'aggradation ou la dégradation des ressources naturelles, et le revenu de l'exploitation. Plusieurs de ces indicateurs sont spatialement explicites.

2.3.6.4 Simulation et scénarios

La simulation est une phase importante dans la modélisation car en déroulant le temps elle permet de faire interagir les entités et de voir émerger les propriétés globales du système qui ne sont pas nécessairement évidentes et prévisibles. Le recours aux simulations a d'autant plus d'intérêt dans notre analyse que certaines pratiques peuvent avoir des effets rétroactifs sur les ressources naturelles. De plus, la simulation permet de tester divers scénarios et ainsi de comparer les conséquences de changements sur le système. Les SMA se montrent particulièrement bien adaptés aux scénarios exploratoires, c'est-à-dire à des scénarios qui cherchent à savoir ce qu'il pourrait éventuellement se produire suite à des changements de décisions stratégiques prises par les agents ou suite à des évènements externes (politiques, économiques, climatiques, par exemple) qui vont générer de nouvelles opportunités ou contraintes sur les décisions (Börjeson *et al.*, 2006).

Le modèle multi-agent a été implémenté sur la plateforme de simulation libre de droits Cormas (*Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems*), version 2015, développée par l'UPR GREEN (CIRAD), http://cormas.cirad.fr (Le Page *et al.*, 2012). La programmation est basée sur langage orienté-objet *SmallTalk*. Cormas produit deux types de variables de sorties :

- un rendu virtuel spatialisé des paysages observable à différentes échelles spatiales (au niveau du pixel ou d'unités agrégées) ;
- des indicateurs non spatialisés (sondes) observables soit au niveau global (plusieurs entités) soit au niveau individuel (une entité).

En l'état actuel de développement, le modèle ne simule que le scénario de base (*business as usual*) qui correspond au projet d'intensification des éleveurs intensifs consommant un haut niveau d'intrants (forte intensification) *vs* les éleveurs intensifs utilisant un faible niveau d'intrants (faible intensification) pour une taille moyenne d'exploitations (1000 ha dans la région).

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté les cadres théorique et méthodologique employés pour analyser les décisions relatives à l'intensification des systèmes fourragers en lien avec l'éco-efficience des paysages.

Sur le plan théorique, le paysage, défini comme un agroécosystème spatialisé, dynamique et piloté par un ou plusieurs systèmes de décisions fournit un cadre pertinent pour l'analyse conjointe des dynamiques de production économique et de gestion des ressources naturelles et raisonner la construction de paysages plus éco-efficients. Le paysage, géré par de nombreux acteurs, est majoritairement façonné par les éleveurs bovins sur les fronts pionniers d'Amazonie brésilienne orientale. Cette unité décisionnelle étant la principale entité de gestion des paysages, c'est donc à cette échelle que nous avons focalisé notre analyse spatiale du processus d'intensification. Nous sommes partis de la compréhension des décisions des éleveurs à l'origine des pratiques d'intensification et de l'organisation de ces pratiques dans les paysages. Pour ce faire, l'exploitation agricole est conceptualisée comme un système socio-écologique, adaptatif et dynamique, interagissant avec un environnement complexe et changeant. Pour appréhender les adaptations et les dynamiques dans ces systèmes, nous nous sommes appuyés sur le cadre des trajectoires et la modélisation multi-agents.

Sur le plan méthodologique, les systèmes d'exploitation étant complexes et la compréhension des décisions nécessitant un important travail de terrain, nous proposons d'étudier un petit échantillon d'exploitations agricoles représentatives de la diversité des systèmes d'élevage face à la transition agraire, sélectionnées empiriquement sur la base d'un zonage territorial, de connaissance d'experts, et d'entretiens exploratoires. Notre méthode de collecte des données dans ces exploitations repose sur des enquêtes par immersion qui visent à décrire le fonctionnement de l'exploitation, les pratiques d'usages des sols, de gestion de systèmes fourragers et des ressources naturelles. L'analyse des données est basée sur la formalisation des trajectoires d'exploitation et de modèles paysagers. Ceci permet d'identifier les principaux déterminants de la localisation des pratiques dans les paysages, mais aussi les facteurs externes à l'exploitation qui ont favorisé le processus d'intensification. Le rôle des pratiques dans les éco-efficiences a été apprécié à partir d'une approche qualitative (via un tableau qualifiant l'impact des pratiques sur les ressources) et quantitative (via un bilan énergétique mesuré avec l'outil de diagnostic ANERPAAM). L'ensemble de ces données couplées à des connaissances d'experts de notre équipe et à des données bibliographiques sont enfin utilisées pour conceptualiser un système multi-agents représentant les stratégies d'usages des sols et de gestion du système fourrager d'une diversité de profil d'éleveurs et simulant les impacts de ces stratégies sur les paysages. Ce modèle a été implémenté via la plateforme Cormas.

Chapitre 3. Intensification des systèmes d'élevage, reconfiguration des paysages et valorisation des ressources naturelles : études de cas dans six exploitations d’élevage

Présentation du chapitre

Ce chapitre a pour objectifs d'expliquer les projets d'intensification des éleveurs (choix des pratiques et organisation spatiale de ces pratiques) et d'analyser les interactions entre les pratiques, les ressources naturelles et les processus écologiques en nous appuyant sur le cadre théorique et méthodologique présenté dans le chapitre 2. Ces résultats nous serviront ultérieurement de données d'entrée pour le développement du modèle SMA (Chapitre 4).

Les questions qui ont guidé notre recherche sont les suivantes :

- Est-ce que l'intensification fait partie des projets et si oui quelles sont les adaptations apportées au système de production et à l'arrangement spatial des pratiques dans l'exploitation ?
- Quelles perceptions ont les éleveurs des ressources naturelles ?
- Cherchent-ils à être plus éco-efficients ?
- Quels sont les principaux déterminants de la localisation des pratiques, notamment d'intensification ?
- Existe-t-il des différences entre situations agraires et selon le degré d'intensification ?
- Quels moteurs ont été favorables à l'intensification des systèmes d'élevage ?
- Quels sont les effets des pratiques d'élevage sur les processus écologiques et l'évolution des ressources naturelles ?

Ce chapitre est divisé en cinq sections :

- Dans la section 3.1, nous décrirons les systèmes d'exploitations étudiés afin d'apporter des éléments de compréhension sur la cohérence globale des exploitations et leur fonctionnement. Dans un second temps, nous comparerons les pratiques de gestion du système fourrager de ces différentes situations d'intensification. Ces connaissances sont utiles pour remonter aux décisions des éleveurs et analyser les effets de ces décisions sur les ressources naturelles.
- Dans la section 3.2, nous analyserons l'impact des pratiques agricoles et de leur localisation dans les paysages sur les processus écologiques. Nous évaluerons également les effets des pratiques sur le bilan énergétique et les émissions de gaz à effet de serre de chaque exploitation.
- Dans la section 3.3, nous mettrons en évidence les adaptations et les principaux déterminants de l'organisation spatiale des usages des sols et des pratiques, et mettrons l'accent sur les rétroactions entre le choix de pratiques agricoles et les perceptions sur les ressources naturelles (l'eau, la fertilité, le relief et la structure du sol). Ces résultats nous permettront de lister les principaux critères biophysiques et topologiques qui guident les décisions d'organisation spatiale des usages des sols et des pratiques.
- Dans la section 0, nous reviendrons sur les principaux moteurs de changement qui ont encouragé l'intensification et mis en évidence grâce à l'analyse des trajectoires.

- Dans la section 3.5, nous discuterons les résultats obtenus par rapport aux autres travaux menés en Amazonie brésilienne et dans le monde. Nous reviendrons aussi sur les liens entre intensification, pâturages dégradés et préservation de la forêt.

3.1 Caractérisation des six systèmes d'exploitation étudiés

3.1.1 Fonctionnement général des exploitations

Le tableau suivant dresse un panorama des principales caractéristiques des exploitations étudiées. La Figure 3-1 montre les usages de sols de chaque exploitation et la Figure 3-2 leur localisation.

Tableau 3-1 : Caractéristiques des exploitations étudiées

Cas d'étude (Exploitation agricole)	Gradient intensification (1-5)	Surface (ha)	% de surface en fourrage	Charge bovins UA/ha	Situation et processus agraire
Type 1 : Pionnier (familiale)	1	44	18%	1,02	Agriculture peu capitalisée et peu mécanisée, pluriactivité, expansion de la surface cultivée, pâturages productifs
Type 2 : Extensive consolidée sans feu (familiale)	2	135	91%	0,61	Agriculture peu capitalisée et peu mécanisée, fin de la réserve forestière, pâturages dégradés
Type 3 : Intensive en intrants, lait (familiale)	4	127	65%	0,86	Agriculture moyennement capitalisée et mécanisée, milieu naturel contraignant pour la mécanisation, fin de la réserve forestière, pâturages dégradés, intensification
Type 4 : Extensive sans feu (fazenda)	3	9 955	49%	0,52	Agriculture capitalisée et mécanisée, peu de main d'œuvre, pluriactivité, arrêt de la déforestation, réforme progressive des pâturages dégradés
Type 5 : Ecologiquement intensive	4	38 913	45%	0,74	Agriculture capitalisée et mécanisée, réforme progressive des pâturages dégradés, régénération naturelle d'arbres dans les pâturages
Type 6 : Intensive en intrants, viande (fazenda)	5	1 090	53%	1,29	Agriculture capitalisée, mécanisée et péri-urbaine, intégration agriculture-élevage, innovations

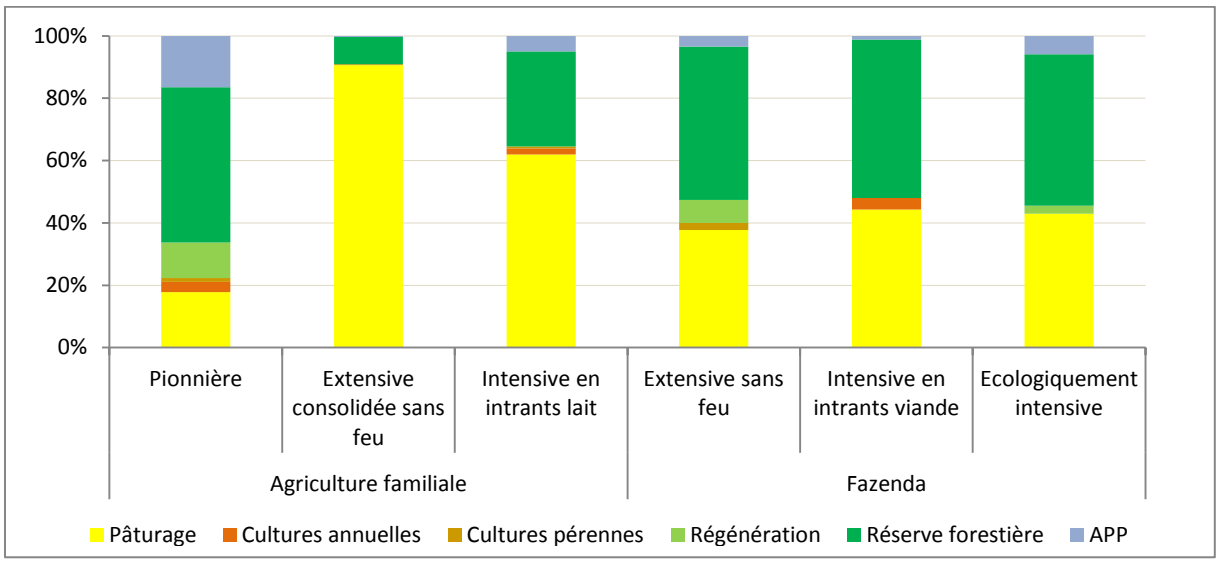
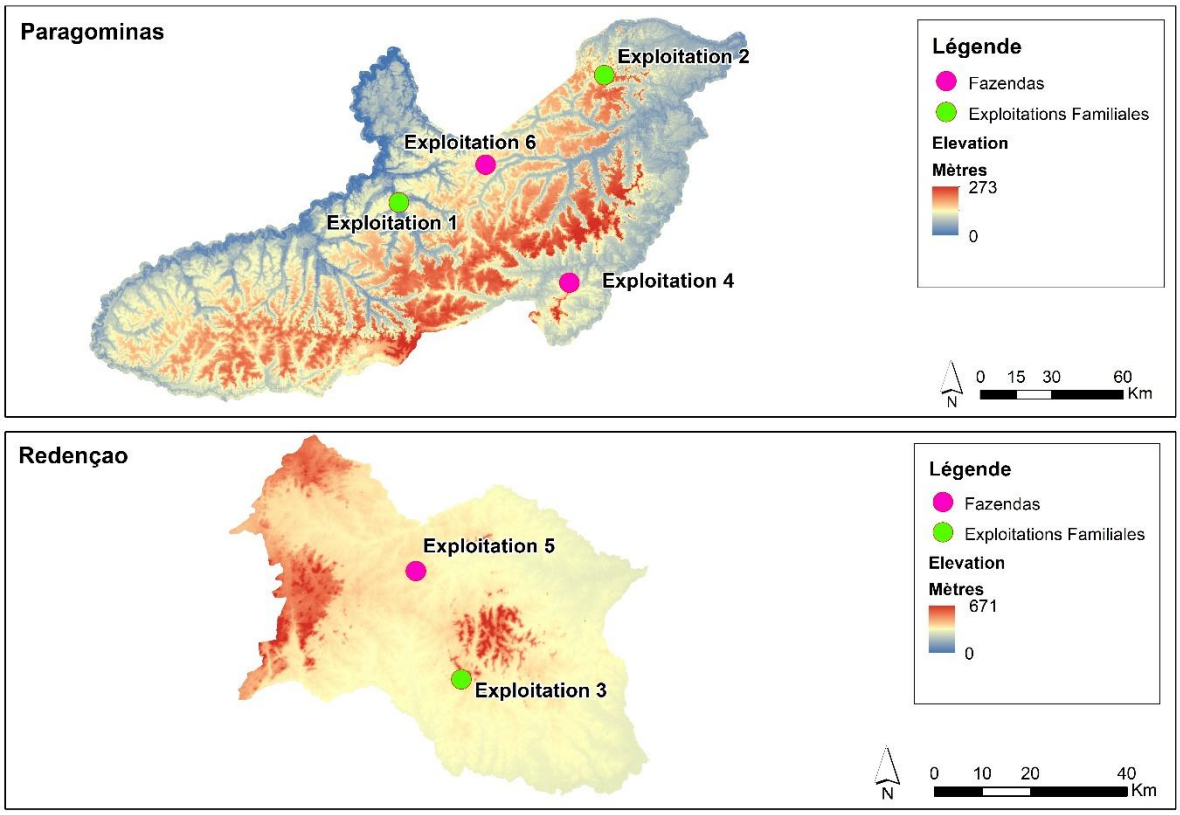


Figure 3-1 : Usages des sols dans les six cas d'étude



Datum: WGS 1984; Data Source: Topodata, Valeriano & Rossetti, 2012, SRTM, 30 arc resolution

Figure 3-2 : Localisation des exploitations

Dans les paragraphes suivants, nous synthétisons les points clés de chaque exploitation. Une description détaillée de chaque exploitation est disponible en Annexe 9.

3.1.1.1 Type 1 : Pionnier (familial)

Rappel des points clés de la situation agraire

La première exploitation reflète la situation agraire n°1 « Front pionnier, agriculture itinérante sur brûlis ». Il s'agit d'une communauté d'agriculteurs familiaux, Oriente, située à 60 km au sud-ouest de Paragominas. Les paysages de cette situation agraire se caractérisent par :

- Une unité géomorphologique dominante de type vallée (la communauté étant traversée par le Rio Potiritá), une forte densité d'APP, des versants avec une pente variant de 3 à 20 % et des plateaux argileux ;
- Des sols peu à moyennement fertiles dans le fond de la vallée et bas de versant, et fertiles sur les plateaux.
- Des usages des sols différenciés selon le type de relief. Dans les vallées du Rio Capim, il y a une dominance de forêt primaire ou secondaire de plus de 20 ans et de régénération forestière. Les cultures annuelles et pérennes sont dominantes sur les plateaux. Les forêts sont dans un état de dégradation avancée (prélèvements de bois pour la vente de grumes, la production de charbon ou incendies).
- Une structure foncière majoritairement dominée par des exploitations familiales de 50 ha.

D'un point de vue historique, la communauté d'Oriente est relativement récente. Créée en 2001, elle est le fruit d'une invasion par des agriculteurs sans terre d'une fazenda abandonnée. Le fazendeiro se revendiquant toujours propriétaire, il existe un litige bloquant l'officialisation de la communauté. Par conséquent, les agriculteurs ne peuvent bénéficier d'aucune assistance technique publique venant de l'INCRA. De même, ils ne peuvent accéder à des prêts bancaires du fait de l'absence de garantie foncière pour les banques. Cette situation a jusqu'alors limité le potentiel de développement de la communauté. N'ayant pas d'autres alternatives, les agriculteurs continuent d'utiliser majoritairement l'abattis-brûlis. Relativement enclavée du fait de la mauvaise qualité de la piste pour accéder à la communauté, la situation s'est améliorée suite à des négociations entre la communauté et la Vale do Rio Doce. L'entreprise qui explore une source de bauxite au sud-est de la communauté, a rénové les pistes au moment de la construction du pipeline qui traverse la communauté et qui transporte du bauxite sur 244 km jusqu'au port de Barcarena, au sud de Belém.

D'après l'association, 220 familles sont actuellement installées à Oriente. On trouve majoritairement des agriculteurs familiaux détenant un lot de 50 ha. Malgré les incertitudes liées au titre foncier, il existe une dynamique foncière importante et des investisseurs, principalement des habitants du centre urbain de Paragominas, achètent des lots aux exploitants familiaux pour former de petites fazendas et détenir une résidence secondaire pour leur week-end. Ces investissements externes ont généré une nouvelle dynamique, puisque certains agriculteurs de la communauté sont employés sur ces exploitations.

Jusqu'en 2008, la production de cultures vivrières (riz, maïs, haricot), l'élevage de monogastriques (poulets, porcs), la production de manioc et de charbon étaient les principales activités d'Oriente. Grâce à l'amélioration des routes, les agriculteurs ont pu se diversifier dans des productions à plus forte valeur ajoutée tels que les fruits et épices (fruits de la passion, poivre), et l'élevage laitier (d'après l'association, 20% des familles ont un troupeau laitier). Les cultures vivrières sont en perte de vitesse. Les petites fazendas se sont également diversifiées dans la culture de soja.

Points clés de l'exploitation

L'exploitation que nous avons sélectionnée est gérée par un jeune couple d'une trentaine d'années qui élève une fille (2 ans en 2015). La superficie s'élève à 44 ha. Elle est délimitée à l'ouest par le Rio Potiritá, au nord par un lot de colons et au sud et à l'est par deux fazendas. L'exploitation se situe à 10 km du centre de la communauté mais l'accès en véhicule motorisé nécessite d'emprunter une piste sur plus de 15 km. Ce lot isolé n'a pas accès à l'électricité.

Le système de production comprend l'élevage d'une dizaine de têtes de bovins alimentés au pâturage et la production de cultures vivrières (maïs et manioc) sur abattis-brûlis. Le capital humain et financier des agriculteurs étant limité, ils ont défriché à peine 34% du lot, soit en

moyenne 1 ha par an depuis leur installation en 2001/2002. Le système de production extensif est peu consommateur d'intrants mais produit peu. Les pâturages récemment implantés sont productifs car ils bénéficient de la fertilité naturelle des sols forestiers. L'exploitation est dans une phase de capitalisation. Son objectif est d'accroître la taille du troupeau et de pâturage. Aussi, le revenu restant, après être subvenu aux besoins de la famille, est principalement réinvesti dans l'élevage. Compte tenu de la précarité des conditions de vie sur le lot et de la distance aux services, les exploitants ont fait le choix de s'installer dans le centre de la communauté d'Oriente. L'éleveur travaille à la journée dans les petites fazendas locales, ce qui permet de dégager un revenu régulier. Cependant cela limite à moins de deux jours par semaine en moyenne le temps de travail sur le lot familial. Le projet de la famille est de revenir vivre sur ce lot, d'accroître la surface agricole et de développer de nouvelles activités (lait, fruit de la passion) dès que le lot aura accès à l'électricité et sera mieux desservi. Le Tableau 3-2 résume les principaux atouts et contraintes de cette exploitation pour l'intensification de l'élevage.

Tableau 3-2 : Atouts et contraintes du type 1 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Bon drainage - Relief mécanisable - Accès à l'eau de surface (irrigation)	- Sols pauvres - Faible capacité de rétention en eau
Caractéristiques socio-économiques	- Possibilité de vente de main d'œuvre (capitaux extérieurs) - Accès et échange d'informations / innovations (travail à l'extérieur, membre actif de l'association) - Proximité du goudron (15 km)	- Peu de main d'œuvre (0,3 UTH) - Peu de capital et d'équipements - Ferme difficile d'accès et sans électricité - Pas d'accès au crédit (problème foncier) - Peu d'accompagnement technique - Eloignement des services - Peu d'organisation collective dans la communauté (hormis pour le foncier)

3.1.1.2 Type 2 : Extensive consolidée sans feu (familiale)

Rappel des points clés de la situation agraire

La deuxième exploitation est caractéristique de la situation agraire n°2 « Agriculture familiale extensive consolidée en périphérie ». Il s'agit d'une communauté d'agriculteurs familiaux, Cacimbão (*assentamento* de Luiz Inacio), située à 100 km au nord-est du centre urbain de Paragominas. Les paysages de cette situation agraire sont diversifiés :

- Au niveau géomorphologique et pédologique, on retrouve les fonds de vallées constituées de sols sablo-argileux bien drainés où s'écoule le réseau hydrographique, des versants moyennement à fortement escarpés et des plateaux argileux ;
- Les usages des sols sont diversifiés. Les plateaux sont majoritairement couverts de forêts et font l'objet de conversion en plantation de poivriers. Dans les fonds de vallées et sur les versants, on retrouve davantage des pâturages, cultures annuelles sur brûlis et régénération forestière.
- Une structure foncière constituée de lots de 50 à 100 ha.

Les premiers agriculteurs se sont installés dès 2001. Il s'agissait de la réserve forestière d'une ancienne fazenda d'élevage viande extensive créée en 1973 et située 40 km plus au sud, la CAIP. Après la fermeture de sa scierie, cette fazenda a été reconvertie en *assentamento* en 1998 et les anciens salariés des scieries ont pu y obtenir un lot. Mais les terres de la CAIP, essentiellement composées d'anciens pâturages dégradés et de sols sableux de faible fertilité, présentaient un faible potentiel pour l'agriculture sur brûlis. C'est pourquoi, une partie des *assentados* de la CAIP ont envahi les terres forestières de Luiz Inacio en 2000. Mais ces terres riches en bois d'œuvre étaient également convoitées par des fazendeiros. Après avoir été expulsés une première fois, avant de pouvoir récolter leur première récolte de manioc, les *assentados* sont revenus et ont résisté jusqu'à ce que l'*assentamento* de Luiz Inacio soit officiellement créé en 2006.

Malgré son éloignement du centre urbain de Paragominas, l'*assentamento* de Luiz Inacio présente plusieurs conditions favorables à la consolidation de l'agriculture familiale. La proximité de la commune de Nova Esperança do Piria (20 km) facilite l'écoulement des produits agricoles. Les facteurs naturels permettent une diversité de production. Les organisations associatives de l'*assentamento* sont dynamiques et ont obtenu plusieurs améliorations pour les *assentados* (agriculteurs de l'*assentamento*) : équipement en machine agricoles pour le travail du sol et le transport (tracteur, disques, planteuse de pommes de terre, débroussailleuse tractée, remorque). Si le recours à l'abattis-brûlis est encore largement utilisé pour défricher de nouvelles parcelles de forêt primaire ou de régénération, ces équipements offrent tout de même des alternatives pour nettoyer des pâturages sans feu ou implanter des cultures sur des parcelles dessouchées. Les principales productions de l'*assentamento* restent relativement traditionnelles pour la région : farine de manioc, maïs, élevage mixte (viande et lait), poivre, élevage de monogastriques (poulets, porcs). Mais on note une diversification en açai, pisciculture, cacao, cajou et d'autres pérennes.

L'*assentamento* est accompagné techniquement par un organisme spécialisé dans l'assistance technique contractualisé par l'INCRA. Cet accompagnement a permis aux agriculteurs de l'*assentamento* de bénéficier de certaines améliorations. Toutefois, il reste épisodique du fait de difficultés politiques et financières au sein de l'INCRA. Ainsi les limites cadastrales de nombreux lots n'ont pas encore été démarqués ce qui empêche les exploitations d'accéder au crédit.

Points clés de l'exploitation

L'exploitation sélectionnée est gérée par un couple d'éleveurs de 56 ans originaire de Sergipe. Elle s'étend sur 135 ha en limite du *patrimonio* (terres de la communauté). L'exploitation est bordée à l'ouest par une rivière avec un faible débit d'étiage (il peut parfois s'assécher en été). Un puit leur permet d'avoir accès à l'eau souterraine.

Le système de production extensif est basé sur l'élevage viande de type naisseur. Comme les exploitants se sont installés avec du capital, la ferme s'est développée rapidement, avec

l'implantation de 10 ha de pâturage par an en moyenne entre 2004 et 2015. L'exploitation a eu recours au système d'implantation classique : abattis-brûlis de jeunes régénérations forestières, cultures vivrières puis pâturage. Etant déjà arrivée au bout de sa surface (il reste à peine 11 ha de forêt sur 135 ha), l'exploitation n'a plus de surfaces régénérées disponibles pour produire des cultures vivrières. L'exploitation a déjà atteint son rythme de croisière. Le troupeau comprend 83 bovins allaitants et 20 bovins laitiers (le lait est en partie autoconsommé et en partie vendu à des habitants de la communauté en direct). Le troupeau est alimenté à l'herbe toute l'année sur 122 ha, ce qui donne une charge de 0,61 UA/ha. Les techniques de gestion des pâturages sont traditionnelles (désherbage manuel, aucun intrant, grands parcs). Les prairies sont âgées de 2 à 10 ans. Les plus récentes bénéficient encore de la fertilité résiduelle des sols forestiers. Cependant, récemment, toutes les parcelles ont été touchées par des attaques de *lagarta* (une chenille) et les pâturages se sont fortement dégradés (sol mis à nu, développement d'adventices), nécessitant de devoir à terme les réformer. Fin 2015, attirée par des cours élevés, l'exploitation a planté 500 pieds de poivrier. Toutefois, comme les exploitants sont proches de la retraite, et qu'aucune reprise familiale n'est prévue (leurs deux enfants vivent dans leur Etat natal du Sergipe), le couple a pour projet de réduire progressivement son activité. Les atouts et contraintes de cette exploitation pour s'engager dans un processus d'intensification sont synthétisés dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Atouts et contraintes du type 2 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Plateau argileux - Bon drainage - Relief mécanisable (90%) - Accès à l'eau de surface et souterraine (irrigation)	- Sols de vallée pauvres et avec faible capacité de rétention en eau
Caractéristiques socio-économiques	- Possibilité de diversification (poivre) - Association active	- Peu d'équipements motorisés et difficultés d'en louer - Peu de main d'œuvre (1 UTH pour 122 ha) - Pas de titre foncier - Pas de CAR - Accompagnement technique sporadique - Eloignement des services et du goudron - Risque de feu

3.1.1.3 Type 3 : Intensive en intrants, lait (familiale)

Rappel des points clés de la situation agraire

Ce cas d'étude a été sélectionné dans la situation agraire n°3 « Agriculture familiale se spécialisant dans le lait », dans la communauté d'Arraiporã I à 40 km du centre urbain de Redenção. Les paysages de cette situation agraire se caractérisent par :

- Une pénéplaine avec peu de pente, des sols peu fertiles (latossol rouge-jaune dystrophique) et jonchés d'affleurements rocheux, au pied d'une *Serra* aux versants escarpés non mécanisables ;
- Des zones humides en bordure des cours d'eau ;

- Des usages de sol dominés sur la pénéplaine par des pâturages propres et dégradés, et des régénérations forestières, et sur la Serra par des forêts de type *cerrado*[1] (primaires ou régénérées).
- Une structure foncière majoritairement dominée par des exploitations familiales possédant des lots de taille variable.

Les *assentamentos* d'Arraiporã I et II ont été créés dans les années 90, au moment des importants conflits fonciers qui ont touché le Sud du Pará. Il s'agit de deux anciens lots fonciers qui ont été expropriés et qui totalisent près de 9 000 ha. Contrairement aux deux cas types étudiés sur Paragominas, l'agriculture familiale de cet *assentamento* est intégrée à l'aval. Une filière lait s'est structurée dans les années 2000, suite à l'implantation d'une laiterie à Conceição do Araguaia (à 100 km de Redenção), qui collecte le lait des exploitations familiales de l'*assentamento* et de la région pour l'exporter vers les autres Etats du Brésil. Malgré les difficultés financières rencontrées par cette laiterie avec de nombreux changements de propriétaires depuis 2005 (Leite Bom, puis LBR, puis Lanos, puis Nobre), elle assure un débouché fixe et régulier à l'agriculture familiale de la région, a contribué à sa consolidation et a encouragé les éleveurs à investir dans l'élevage. L'*assentamento* bénéficie aussi d'une facilité d'accès : proximité du centre urbain de Redenção (entre 20 et 40 km selon la localisation dans l'*assentamento*) et pistes de bonne qualité praticables toute l'année, quel que soit le moyen de locomotion facilitant l'écoulement de la production mais aussi l'accès aux services et aux intrants.

Les exploitations familiales de cet *assentamento* (et globalement de la région de Redenção) sont spécialisées dans l'élevage laitier et cela a un impact substantiel au niveau des usages des sols. Alors que la production de cultures vivrières et l'usage de l'abattis-brûlis constituent une caractéristique forte des paysages des deux autres communautés étudiées à Paragominas, les pâturages dominent largement les usages agricoles des sols dans cet *assentamento*. Bon nombre d'*assentados* ont abandonné la production de cultures vivrières du fait des faibles rendements permis avec le système d'abattis-brûlis dans ces paysages (derrière une jeune régénération de savane arborée de type cerrado et sur ces latossols de faible potentiel).

Points clés de l'exploitation

L'exploitation s'étend sur 127 ha. Elle est gérée par un couple d'une quarantaine d'années qui ont deux enfants (16 et 7 ans). Le système d'élevage est caractéristique des exploitations en front post-pionnier ayant déjà exploité une large partie de leur réserve forestière, et dont les ressources fourragères et les sols se sont dégradés par surpâturage et excès de l'usage du feu. Après une expansion du système d'élevage allaitant, l'exploitation a trouvé une voie de sortie en se reconvertissant dans l'élevage laitier intensif et la vente directe. Cette exploitation est considérée comme innovatrice dans sa communauté et par les techniciens locaux. Elle a mis

[1] Comme nous l'avions vu dans la présentation des sites d'étude, Redenção se situe dans une écorégion de transition entre les forêts ombrophiles tropicales amazoniennes et les forêts tropicales sèches à feuilles caduques du *Cerrado*.

en place plusieurs innovations au niveau du système d'élevage (pâturage tournant intensif, ensilage en doubles cultures, insémination artificielle) mais aussi de la mécanisation (investissement dans du matériel en commun avec un autre agriculteur). Contrairement aux deux cas précédents, la situation foncière de l'exploitation est régularisée. Elle a déjà accédé à deux crédits PRONAF (Programme National d'Appui à l'Agriculture Familiale) de type A et Mais Alimentos, lui permettant d'acquérir des vaches laitières ayant un meilleur potentiel que les vaches métisses. En termes de main d'œuvre, le couple emploie une personne en plus de l'aide familiale apportée par le fils aîné. Les enfants projettent de reprendre l'exploitation ce qui encourage d'autant plus le couple à investir dans l'élevage.

Le troupeau compte aujourd'hui 100 têtes pour 80 ha de pâturage, soit un chargement de 0,86 UA/ha. L'objectif des éleveurs est de continuer à accroître la productivité par animal et par unité de surface. De plus, ils souhaitent réduire la surface productive sur une surface équivalente à 30% de la taille de l'exploitation et accroître leur réserve forestière sur une surface équivalente à 70%. Les atouts et contraintes pour intensifier l'élevage sont résumés dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Atouts et contraintes du type 3 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Bon drainage - Accès à l'eau superficielle (irrigation)	- Sols difficilement mécanisables (relief, affleurements rocheux) - Sols peu fertiles - Faible capacité de rétention en eau
Caractéristiques socio-économiques	- Main d'œuvre familiale - Equipements motorisés - Proximité ville et services - Accès au crédit possible (CAR, titre)	- Peu d'organisation collective dans la communauté - Difficulté d'accès à des équipements spécialisés (tracteur à chenille) - Accompagnement technique sporadique

3.1.1.4 Type 4 : Extensive sans feu (fazenda)

Rappel des points clés de la situation agraire

Ce cas d'étude a été sélectionné dans la situation agraire n°4 « Elevage extensif en périphérie – déforestation zéro », à 60 km au sud-est du centre urbain de Paragominas. Les paysages de cette situation agraire, localisés dans la Dépression du Rio Gurupi, se caractérisent par :

- Des reliefs plats à légèrement ondulés avec une forte densité de cours d'eau peu encaissés ;
- Des sols majoritairement sableux peu fertiles ;
- Une dominance de prairies (50% des surfaces observées par satellite en 2015 dans cette zone[1]) et de forêts et régénérations forestières (25% chacun). On observe également la croissance de surfaces agricoles mécanisées malgré les contraintes du

[1] Dans cette zone, 1/3 des surfaces n'ont pu être observées par satellite en 2015, étant obstruées par les nuages.

milieu (sable, faible capacité de ressuyage des sols en saison humide), et de plantations forestières (Eucalyptus, Paricá) (Pimentel, 2016).

- Une dominance de larges fazendas.

Sur le plan logistique, l'accès à la PA-125 est relativement distant (50 km au maximum) et les pistes d'assez bonne qualité.

Points clés de l'exploitation

Il s'agit d'un groupe de quatre fazendas limitrophes totalisant 9 955 ha et qui sont spécialisées dans l'élevage allaitant de race zébu *Nelore*. Le propriétaire a hérité de ces fazendas en 2005. Après en avoir hérité, il a décapitalisé une partie du troupeau pour créer une entreprise dans le secteur tertiaire à Belém. Cet investissement hors de l'exploitation vise un retour sur investissement à court terme plus élevé que l'élevage extensif.

Le système d'élevage est de type naisseur, éleveur, engraisseur. Chaque fazenda est spécialisée dans une étape du cycle : vêlage, élevage, engraissement de jeunes taurillons. Le groupe élève autour de 2 000 UA, soit une charge de 0,52 UA à l'hectare. Le fonctionnement des fazendas s'appuie sur un minimum de main d'œuvre (7 UTH pour près de 4 000 ha de pâturage), de matériels et d'investissement. Le propriétaire réalise une visite hebdomadaire ou bimensuelle des fazendas et délègue la gestion quotidienne au gérant.

Ce cas est caractéristique des exploitations de grande échelle en début d'intensification. Face à la baisse de la fertilité des sols et à la dégradation des pâturages, le père de l'actuel propriétaire a commencé à réformer les pâturages dès la fin des années 90, début des années 2000. Compte tenu de l'immensité des surfaces à réformer et des besoins importants en capital, équipement et main d'œuvre que cela implique, la réforme se fait progressivement. La fazenda a également cherché à se diversifier et a implanté 242 ha de Paricá sur d'anciens pâturages dégradés. Le projet de l'exploitant est de continuer à intensifier progressivement le système d'élevage tout en prenant le moins de risques possibles sur le plan technique et financier. « Je préfère apprendre petit à petit. Je ne suis pas un pionnier, je laisse faire les autres en premiers » explique-t-il. Les atouts et contraintes pour s'engager dans un processus d'intensification sont synthétisés dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 : Atouts et contraintes du type 4 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Relief mécanisable - Réseau hydrographique dense	- Sols de vallée peu fertiles et avec une faible capacité de ressuyage - Sécheresse intense
Caractéristiques socio-économiques	- Titre foncier et accès au crédit - Proximité relative au goudron (jusqu'à 50 km)	- Large surface à intensifier - Peu de main d'œuvre - Peu d'équipements

3.1.1.5 Type 5 : Intensification écologique (fazenda)

Rappel des points clés de la situation agraire

Ce cas d'étude a été sélectionné dans la situation agraire n°5 « très grandes fazendas spécialisées dans l'élevage allaitant », à l'ouest de la commune de Redenção. Les paysages de cette situation agraire se caractérisent par :

- Des pénéplaines avec des reliefs plats ou légèrement ondulés ;
- Une dominance des pâturages avec une faible surface de réserve forestière, et très peu de diversification dans d'autres usages des sols ;
- De très grandes fazendas capitalisées, spécialisées dans l'élevage viande.

Sur le plan logistique, les routes goudronnées sont d'assez médiocre qualité dans cette zone.

Dans cette situation agraire, nous avons choisi une exploitation pour la spécificité de son projet d'intensification intégrant une forte dimension écologique.

Points clés de l'exploitation

L'exploitation se compose de deux fazendas (distantes de 100 km) gérées conjointement et totalisant 38 914 ha de foncier. L'actuel propriétaire en a hérité de son père. Un ingénieur zootechnicien en assure la gérance globale et plusieurs responsables vachers gèrent la conduite du troupeau. Il y a au total 60 UTA. Le système d'élevage allaitant est de type naisseur, éleveur, engraisseur. Le cheptel compte 13 000 UA de race pure zébu *Nelore* ou croisées avec des races européennes pour leur conformation et le GMQ (Gain Moyen Quotidien). Les bovins sont alimentés au pâturage toute l'année sur 17 706 ha. La charge moyenne est de 0,7 UA/ha (charge instantanée de 1,16 têtes/ha). La fazenda a aussi développé une activité laitière (127 vaches laitières). Aujourd'hui, la production est uniquement utilisée pour l'autoconsommation de la fazenda (salariés et familles).

La fazenda s'est engagée dans un processus d'intensification bien avant les opérations de répression contre la déforestation. Des six exploitations étudiées, c'est l'exploitation la plus engagée dans un processus d'intensification écologique : régénération naturelle d'arbres, implantation de légumineuses, adaptation des usages des sols aux caractéristiques des paysages. Le recours aux fertilisants et herbicides n'est pas systématique mais adapté en fonction de l'état du pâturage. Pour les mêmes raisons que la fazenda précédente (grande échelle, coût élevé des investissements), la réforme des pâturages est progressive et concerne en priorité les pâturages les plus dégradés. Parallèlement aux améliorations dans la conduite des pâturages, la fazenda a également investi dans l'amélioration génétique de son troupeau et le suivi individuel des animaux.

Les projets de la fazenda sont d'augmenter de 50 % la taille du troupeau allaitant, d'accroître le GMQ, de développer la production laitière (objectif 200 vaches laitières) et d'investir dans la vente directe. Contrairement à l'effervescence existant à Paragominas, le développement du grain est plus timide dans la région de Redenção et bien que la fazenda possède un large

potentiel pour l'agriculture, le propriétaire n'est pour l'instant pas intéressé par une telle diversification qui nécessite de plus lourds investissements en matériel agricole, mais aussi en cellules de stockage. Le Tableau 3-6 synthétise les principaux atouts et difficultés rencontrés pour mettre en œuvre son projet d'intensification.

Tableau 3-6 : Atouts et contraintes du type 5 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Relief mécanisable - Zone de versant bien drainé (pâturage hiver), zone de bas-fond humide (pâturage été) - Réseau hydrographique dense - Forte densité d'arbres dans les pâturages	- Sols acides - Sécheresse intense
Caractéristiques socio-économiques	- Titre foncier et accès au crédit - Proximité du goudron (1 km) - Main d'œuvre bien formée, peu de *turn over* - Accompagnement technique - Bien équipé en matériels agricoles	- Risque de feu - Large surface à intensifier (coût élevé de la réforme, investissement)

3.1.1.6 Type 6 : Intensive en intrants, viande (fazenda)

Rappel des points clés de la situation agraire

Ce cas d'étude a été sélectionné dans la situation agraire n°6 « couloir d'intensification », à 8 km du centre urbain de la commune de Paragominas. Les paysages de cette situation agraire sont diversifiés :

- Au niveau géomorphologique et pédologique, on retrouve des vallées ondulées peu fertiles où s'écoule le réseau hydrographique, des versants moyennement à fortement escarpés et des plateaux argileux ;
- Une importante dynamique d'usage des sols avec une forte croissance depuis les années 2000 des surfaces en cultures annuelles sur les plateaux au détriment des surfaces en forêt, pâturages et régénérations forestières (Pimentel, 2016).
- Une structure foncière dominée par des fazendas.

Sur le plan logistique, la proximité de la BR-010 facilite l'écoulement et l'exportation des productions.

Points clés de l'exploitation

La fazenda retenue s'étend sur 1 080 ha. De type naisseur, elle compte 675 UA de race zébu *Nelore* de haute qualité génétique. La fazenda appartient à la même famille depuis 1972. Elle est gérée par père et fils. Cette exploitation est représentative des fazendas de taille moyenne (< 1500 ha) engagées dans un processus d'intensification sur la base d'une consommation élevée d'intrants. Pour accroître la productivité fourragère et « *évoluer d'une activité extractiviste à un élevage moderne* » comme le souligne le chef d'exploitation, l'exploitation a investi dans de nombreuses innovations technologiques : mécanisation, fertilisation, intégration agriculture-élevage à l'échelle de la parcelle (pour réformer les pâturages

dégradés) et de l'exploitation (fabrication de la ration), division des pâturages et recours au pâturage tournant intensif. Elle a aussi participé à plusieurs projets d'intensification pilotes sur la commune tels que BPA (Bonnes Pratiques Agricoles) et *Pecuária Verde* (Elevage Vert).

Le projet d'intensification de l'exploitation est de continuer à accroître la capacité de charge de l'exploitation pour atteindre 2 UA/ha et de diversifier ses activités vers une plus forte valeur ajoutée : élevage laitier, engraissement de bœufs. Toutefois, l'exploitation ne prévoit pas d'intensifier à outrance. « *Notre objectif est d'améliorer l'usage de la surface en pâturage en saison humide qui est sous-utilisée. Toutefois, je ne veux pas intensifier plus que cela, car cela va devenir plus stressant. Je ne veux pas être très riche, seulement gagner le suffisant* » explique le chef d'exploitation. Le Tableau 3-7 synthétise les principaux atouts et difficultés rencontrés pour mettre en œuvre son projet d'intensification.

Tableau 3-7 : Atouts et contraintes du type 6 pour l'intensification de l'élevage

	Atouts	**Contraintes**
Milieu naturel	- Plateaux argileux - Relief mécanisable - Accès cours d'eau (irrigation)	- Haute densité de ripisylves - Faible capacité de ressuyage des sols dans les vallées en saison humide - Sols peu fertiles
Caractéristiques socio-économiques	- Proximité ville et goudron - Accompagnement technique (public et privé) - Bien équipé en matériels agricoles	- Accès au crédit bloqué - Besoin supplémentaire en main d'œuvre (x 3)

3.1.2 Pratiques d'usages des sols et de gestion du système fourrager

La connaissance des pratiques d'usages des sols et de gestion du système fourrager est essentielle pour remonter aux stratégies des éleveurs. Compte tenu de la diversité des systèmes d'exploitation retenus, nous mettrons en avant les similitudes et les différences existantes entre les six types étudiés.

3.1.2.1 Pâturage, complémentation et abreuvement

Dans tous les types, le pâturage constitue la base de l'alimentation des bovins.

Mode d'exploitation des pâturages

- **Le pâturage continu** : Il est pratiqué dans les exploitations familiales pionnière et extensive (type 1 et 2). Ces exploitations peuvent regrouper les parcs en saison sèche (ouverture des clôtures) soit car l'offre fourragère diminue soit car certaines retenues artificielles s'assèchent.
- **Le pâturage alterné** : Il est pratiqué dans toutes les exploitations. Ce mode de pâturage se caractérise par un temps d'occupation des animaux égal au temps de repos. Les éleveurs changent les animaux de parcs en fonction de la hauteur de l'herbe ce qui permet d'adapter l'offre fourragère à la demande.

- **Le pâturage tournant** : Il est pratiqué dans les exploitations intensives en intrants (types 3 et 6). Les parcs sont divisés en petites parcelles de façon à ce que le troupeau effectue une rotation sur chacune d'elles au moment où l'herbe est au stade idéal de pâture en quantité et en qualité. Généralement le temps d'occupation est de 3 jours pour un repos de 3 semaines. Lorsque les paddocks sont fertilisés après le passage des animaux, on parle de pâturage tournant intensif. Cette conduite permet d'optimiser la pousse et de réduire les risques de sous-pâturage ou surpâturage. Mais exigeante en main d'œuvre et en intrants, elle est généralement réservée aux animaux aux plus forts besoins (vaches en lactation par exemple).

Complémentation

Elle est pratiquée par l'exploitation familiale intensive en intrants (type 3) et les fazendas (types 4, 5 et 6).

- **Ration à base de maïs, de tourteaux de soja et de minéraux (calcaire, phosphore)** : En saison sèche, les exploitations intensives en intrants (types 3 et 6) et intensification écologique (type 5) fabriquent et distribuent cette ration aux animaux ayant les plus fortes exigences (vaches en lactation et bœufs d'engraissement).
- **Ensilage de maïs ou de canne** : En saison sèche, l'exploitation familiale intensive (type 3) complémente également la ration des vaches en lactation avec 30 kg par vache et par jour d'ensilage.
- **Complément protéiné acheté dans le commerce** : la fazenda extensive viande (type 4) en distribue lors de la phase d'engraissement (les derniers 6 mois avant la commercialisation des taurillons).
- **Aucune complémentation** : Les exploitations familiales de type pionnier et extensive viande n'ont pas recours à la complémentation même si cela serait utile en saison sèche à cause du coût élevé.

Abreuvement

- **Abreuvoirs** : Les deux exploitations de type intensives en intrants (types 3 et 6) ont installé des abreuvoirs dans les parcs de pâturage tournant. Les avantages sont multiples : pouvoir assurer l'abreuvement du troupeau dans chaque petite parcelle, réduire les déplacements et donc améliorer les gains de poids des bovins, fournir une eau de qualité au troupeau (cela est particulièrement important pour la production laitière).
- **Cours d'eau et retenues artificielles** : Dans les autres exploitations (types 1, 2, 4 et 5), le bétail s'abreuve au niveau des cours d'eau ou dans des retenues artificielles creusées par l'éleveur lorsque le parc n'a pas d'accès à un cours d'eau. Malgré les avantages des abreuvoirs, les fazendas de grande échelle et les éleveurs familiaux peu capitalisés n'ont ni les conditions financières ni les infrastructures (accès à l'électricité) d'installer des abreuvoirs dans chaque parc. La fazenda de type intensification écologique compte plus de 330 parcs par exemple.

3.1.2.2 Implantation et réforme des pâturages

Formation initiale des pâturages

Quel que soit le type d'éleveurs, la formation des pâturages au moment de la phase de colonisation a suivi le même itinéraire. Ils ont été implantés après abattis-brûlis de la forêt, éventuellement précédés d'une à deux années de cultures vivrières.

Choix variétal

- **Les classiques** : On retrouve systématiquement deux types de graminées fourragères dans les exploitations, en monoculture ou en association : le *Brachiaria Brizantha* cv Marandu ou MG5 et le *Panicum Maximum* cv Mombaça. Contrairement au Mombaça, le *Brachiaria Brizantha* est peu exigeante en éléments nutritifs mais très rustique. Elles sont considérées par les éleveurs comme les graminées les plus adaptées aux conditions tropicales humides d'Amazonie. En moindre proportion, les fazendas ont aussi implanté d'autres graminées telles que le Quicuio, Massaï, Tioneiros et Andropogon.
- **Les nouvelles** : Seules les exploitations les plus avancées dans leur démarche d'intensification (types 3, 5 et 6) ont testé ou ont prévu d'essayer de nouvelles variétés fourragères plus riches en énergie ou en protéines (par exemple Aruana, Tifton).

Réforme des pâturages

Seules les exploitations suffisamment capitalisées (types 3, 4, 5 et 6) ont déjà commencé à réformer des pâturages dégradés. La technique de réforme est adaptée selon le niveau de dégradation des pâturages et les ressources humaines et financières disponibles. Quatre types de réforme ont été suivis par les éleveurs :

- **L'intégration agriculture-élevage à l'échelle de la parcelle agricole** : Ce type de réforme consiste à défricher les régénérations forestières (tracteur à chenille), travailler le sol (passages de disques, rouleau), puis semer une culture annuelle (généralement du maïs) en association avec une graminée fourragère. La graminée fourragère (souvent du Mombaça du fait de sa capacité à germiner sans être enfouie) est semée à la volée au moment de l'apport de la fumure de couverture sur la culture annuelle. Le pâturage reste dormant et se développe après la récolte de la culture. Certains agriculteurs peuvent aussi semer une culture annuelle sans association en première année. Dans ce type de réforme, l'acidité du sol est corrigée (amendement calcaire) et des fertilisants azotés et phosphorés sont apportés pour le développement de la culture. L'un des avantages majeurs de cette pratique est que la rotation des prairies permanentes avec une culture annuelle permet de rompre le cycle des adventices et de laisser la terre amendée et fertilisée. Aux dires des éleveurs qui y ont eu recours, ce type de réforme offre aussi les meilleurs résultats technico-économiques (la vente du grain permet de financer la réforme). Cette pratique ne peut cependant être adoptée sur les parcelles non mécanisables c'est-à-dire les parcelles présentant une forte déclivité, une forme irrégulière ou une faible surface. Deux fazendas (types 4 et 6) ont appliqué cette technique et cela fait partie des projets de la fazenda de

type 5. Du fait du niveau de technicité et d'équipements spécifiques nécessaires, cette pratique est moins facilement accessible aux exploitations familiales.

- **Semis avec apport chimique :** Ce type de réforme consiste à défricher les régénérations forestières, travailler le sol, faire un semis direct du pâturage, puis fertiliser. Ce type de réforme est généralement choisi quand le pâturage et la fertilité du sol sont dégradés mais que le recours à l'agriculture n'est pas possible ou non choisi par l'éleveur. Ce type a été utilisé par les exploitations les plus avancées dans le processus d'intensification (types 3, 5 et 6).
- **Semis sans apport externe :** Ce type de réforme consiste à défricher les régénérations forestières, travailler le sol, et semer le pâturage. Les exploitations des types 4 et 5 y ont eu recours.
- **Défriche et sur-semis si nécessaire**. Les agriculteurs ne mécanisent pas le travail du sol ce qui permet de limiter les coûts. Seule la fazenda extensive (type 4) utilise encore cette technique.

Légumineuses fourragères

- **Implantation volontaire** : Deux exploitations seulement ont déjà implanté des légumineuses. La fazenda de type intensification écologique (type 5) a volontairement semé il y a plusieurs années une espèce de légumineuse, la puerária (*Pueraria phaseoloides*), au niveau des places d'alimentation, afin de couvrir le sol mis à nu par les piétinements du troupeau aux abords des mangeoires. La fazenda intensive en intrants, viande (type 6) participe également à un programme d'essai pilote.
- **Présence naturelle** : Certaines légumineuses se développent naturellement dans les prairies d'Amazonie. Mais, la gestion du pâturage suivie par les exploitants ne cherche pas à favoriser leur développement, exceptée dans l'exploitation de type intensification écologique (type 5). Cet éleveur interdit aux employés d'épandre des herbicides dans les paddocks où elles se développent.

Systèmes Sylvopastoraux (SSP)

- **Régénération naturelle d'arbres** : Seule l'exploitation de type intensification écologique (type 5) présente une forte densité d'arbres et d'arbustes dans les pâturages.
- **Implantation d'arbres** : La fazenda type 4 a implanté des arbres en bordure extérieure de certaines prairies pour produire de l'ombre tout en évitant le risque de piétinement.
- **Peu ou pas d'arbres** : Les exploitations de type 1, 2, 3, et 6 ont peu ou pas d'arbres dans leurs prairies. Quatre principales raisons expliquent le fait que les exploitations ne régénèrent ni n'implantent d'arbres dans les prairies : l'obligation de passer la débroussailleuse de manière non sélective, le coût d'investissement, le risque d'incendie et de piétinement des animaux.

3.1.2.3 Entretien des pâturages

Gestion de la fertilité

A l'époque de la colonisation et de l'expansion des surfaces agricoles, toutes les exploitations ont géré la fertilité des sols à travers l'abattis-brûlis de forêts primaires ou de forêts régénérés. La fermeture de la frontière a conduit à des adaptations. Nous distinguons désormais trois sortes de gestion de la fertilité, chaque exploitation pouvant recourir à plusieurs conduites :

- **Apports de fertilisants chimiques :** Les exploitations de type 3, 4, 5 et 6 ont recours à cette méthode. Les apports sont différents selon le type de parcs. Les pâturages tournants intensifs reçoivent un apport de fertilisant chimique d'entretien (N, P, K) après chaque pâturage en saison humide (types 3 et 6). Lors de leur réforme, les pâturages alternés (via ou pas l'intégration agriculture-élevage) sont corrigés et fertilisés au semis (amendement calcaire, phosphore) si le sol est dégradé (types 3, 4, 5 et 6).
- **Apports de matières organiques :** Les exploitations de type 3 et 6 épandent des déjections animales (venant du corral et de la salle de traite) et des composts dans les paddocks où les besoins sont élevés (en intégration avec l'agriculture par exemple).
- **Stimuler la production de matière organique pour minimiser les apports externes** : Dans la fazenda de type intensification écologique (type 5), la hauteur d'herbe est gérée de façon à recycler au mieux la matière organique. L'éleveur cherche à maintenir une couverture de graminées la plus étendue possible dans l'espace et la plus continue possible dans le temps. Cela permet de maximiser la photosynthèse et de produire une abondante biomasse végétale. De plus, l'éleveur régule la charge animale de façon à restituer une partie de la biomasse au sol et éviter de ne tout exporter. La biomasse restituée au sol recharge le sol en humus et nourrit la faune du sol qui va en retour minéraliser cet humus, structurer le sol et mettre à disposition des racines les principaux éléments nutritifs (azote, phosphore, potasse, oligoéléments).
- **Pas d'apport externe** : Les seuls nutriments apportés sont d'origine biologique via les déjections animales et les litières formées suite au débroussaillage des prairies. Les exploitations familiales extensives (types 1 et 2) appliquent ce type de conduite sur l'ensemble de leurs prairies. Les fazendas de grande taille (types 4 et 5) n'ayant pas les moyens financiers d'appliquer des fertilisants sur toutes les prairies (coût : 1650 R$/ha) priorisent les prairies où cela est nécessaire (sol dégradé, infestation d'adventices) et n'apportent pas d'intrants sur les autres. Cette stratégie amène à un déséquilibre avec un excès d'exportation d'éléments nutritifs par rapport aux apports.

Gestion des adventices et des recrus forestiers

- **Usage du feu :** Dans les six cas d'étude, l'usage du feu n'est plus volontaire. Toutefois, toutes les exploitations ont été victimes d'incendies involontaires venant de parcelles voisines.
- **Débroussaillage mécanique** : Toutes les fazendas y ont recours (généralement une fois tous les deux ans pour maintenir une réserve tampon de fourrage). Les débris végétaux restent à même le sol et leur décomposition sert à recycler la matière organique.

L'exploitation familiale consolidée a également fait un test sur un parc de l'exploitation mais le coût s'est avéré relativement élevé (150 à 200 R$/ha) à cause de la présence de souches qui ralentissent la vitesse de passage.

- **Sarclage manuel** : Cette pratique est utilisée par toutes les exploitations familiales (types 1, 2 et 3) 3 fois par an (deux en hiver et une en été) et ponctuellement par les fazendas.
- **Herbicide** : Aucune exploitation familiale n'en a encore utilisé dans les pâturages. La fazenda extensive de type 4 en a déjà appliqué une fois (par voie aérienne), mais n'a pas renouvelé l'expérience à cause du coût (500 R$/ha). Aujourd'hui, elle n'en applique qu'en bordure des clôtures là où la débroussailleuse mécanisée ne passe pas. La fazenda de type intensification écologique de type 5 utilise des herbicides au moment de la réforme des pâturages pour contrôler l'envahissement par le capim duro (*Axonopus leptostachyus*). Mais une fois contrôlé, elle préfèrerait arrêter d'en appliquer car ils sont défavorables aux légumineuses qui poussent naturellement. La fazenda intensive en intrants de type 6 en applique en faible quantité pour contrôler certaines espèces mais cherche aussi à minimiser leur emploi pour minimiser les coûts.
- **Mesures préventives** : Plusieurs exploitations ont aussi signalé qu'elles cherchent à maintenir le sol couvert le plus possible, via la gestion de la charge animale (les trois fazendas de type 4, 5 et 6) et une forte densité de semis (exploitation familiale consolidée de type 2).

3.1.2.4 Gestion des APP et de la réserve forestière

Gestion des APP

Aujourd'hui, tous les éleveurs de l'échantillon ont ou sont en train de recomposer les ripisylves. Les nouvelles pratiques associées sont :

- **La régénération naturelle** (abandon et arrêt du nettoyage) : bien que les résultats puissent être mitigés sur des sols qui ont été fortement piétinés par les bovins ou avec une faible banque de semences, cette pratique est attractive du fait de son faible coût et sa simplicité.
- **Enrichissement** : Si l'enrichissement des APP n'est pas pratiqué dans les fazendas étudiées, les trois exploitations familiales ont implanté ou ont pour projet de planter des espèces natives (açaí et buriti) pour produire des fruits qui seront autoconsommés.
- **Clôture** : Les deux exploitations intensives en intrants (types 3 et 6) ont clôturé les ripisylves dans les paddocks où les bovins ont accès aux abreuvoirs. Les deux fazendas de grande échelle n'ont pas clôturé les APP car le linéaire de ripisylve peut être très important et elles n'ont pas les moyens financiers de le faire, ni d'installer des abreuvoirs dans tous les parcs. Elles ont de toute façon remarqué que les bovins utilisent toujours le même couloir pour accéder à l'eau, sans dégrader l'ensemble de l'APP. Les deux exploitations familiales de type pionnière et extensive (types 1 et 2) ont aussi pour projet de clôturer.
- **Largeur** : Les largeurs de recomposition sont variables. Les fazendas qui nettoient les pâturages avec des débroussailleuses mécaniques ne se réfèrent pas aux règles imposées par le code forestier (30 mètres sur chaque rive) mais à la rupture de pente qui empêche le

passage de tout outil mécanique. Il se peut donc que l'APP mesure plus ou moins 30 m de large.

Réserve forestière

Les trois fazendas suivies respectent le minimum de 50% autorisé par le code forestier dans les zones consolidées (au lieu de 80%), soit en cumulant les surfaces forestières présentes sur l'exploitation, soit en ayant recours au mécanisme de compensation forestière avec d'autres fazendas leur appartenant. Le pourcentage de réserve forestière maintenue dans les exploitations familiales est plus hétérogène et varie de 9 à 66%. L'exploitation familiale de type pionnier présente le pourcentage le plus élevé, celle-ci ayant eu jusqu'à présent une faible capacité de défriche. Au contraire, les deux autres exploitations familiales de type 2 et 3, plus capitalisées, ont étendu rapidement leur surface agricole jusqu'à atteindre respectivement 91% et 64% du lot (+ 10 ha/an).

3.2 Rôle des pratiques agricoles dans les éco-efficiences

Dans cette partie, nous étudions les effets des pratiques agricoles sur quatre processus écologiques à l'origine de l'évolution des ressources naturelles. Ces processus écologiques, discontinus dans l'espace et dans le temps, sont : l'évaporation, la lixiviation de l'azote, les émissions d'azote et de carbone et l'érosion hydrique. Ces processus écologiques sont influencés à la fois par des facteurs naturels (biophysiques et climatologiques) mais aussi par les activités anthropiques. Nous qualifierons les impacts de ces deux types de facteurs sur les processus écologiques. Puis nous mesurerons les efficiences énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre des six exploitations à l'aide du bilan énergétique ANERPAAM. La description de ces relations est importante pour la conceptualisation du modèle SMA.

3.2.1 A l'échelle de l'exploitation : Efficience énergétique et émissions de gaz à effet de serre

Nous avons évalué le bilan énergétique et les émissions de GES de ces six systèmes d'exploitation. Compte tenu de la faible taille de notre échantillon, il ne s'agissait pas de tirer des conclusions sur les efficiences énergétiques de notre typologie. Notre objectif était de situer notre échantillon par rapport aux moyennes obtenues dans la région (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015a) pour mieux comprendre et caractériser nos exploitations vis-à-vis de l'éco-efficience énergétique. Les résultats de ces exploitations ont ainsi été comparés avec les moyennes de 3 groupes : fazenda intensives viande (n=6), fazendas extensives (n=6) et exploitations familiales (n=20).

3.2.1.1 Bilan énergétique

Au niveau du bilan énergétique, nous avons mesuré 4 types d'indicateurs :

- L'efficience énergétique : c'est le rapport entre les sorties d'énergie (quantité de viande et de lait produite convertie en MJ) et l'énergie consommée pour produire ces output (exprimée en équivalent MJ) ;
- L'intensité énergétique : c'est le rapport entre la consommation d'énergie en MJ et les recettes en R$;
- La consommation totale d'énergie ramenée à la tonne de Poids Vif (MJ / T de PV) ;
- La consommation d'énergie pour l'entretien des fourrages, c'est-à-dire pour l'achat d'engrais, d'herbicides et de semences, ramenée à la surface fourragère, c'est-à-dire l'aire en pâturage et en cultures annuelles ou pérennes autoconsommées par les animaux (MJ / ha de surface fourragère).

Les résultats chiffrés sont disponibles dans le Tableau 3-8 et la Figure 3-3.

Efficience énergétique

Premier résultat intéressant, l'intensification via un usage plus important d'intrants ne permet pas nécessairement une meilleure efficience énergétique. L'exploitation familiale intensive – haut niveau d'intrants (type 3) a une faible efficience énergétique légèrement supérieure à 1. Autrement dit, elle consomme quasiment autant d'énergie qu'elle n'en produit. Ceci peut s'expliquer par deux raisons. Premièrement, en saison sèche, elle consomme énormément de concentrés et d'ensilage pour alimenter les vaches en lactation, ce qui augmente son coût énergétique par rapport au pâturage. Deuxièmement, cette exploitation ne recherche pas à faire du lait en quantité (à produire beaucoup), mais en qualité pour satisfaire les exigences requises par son client qui en contrepartie lui paie 50% plus cher que la laiterie. Ce premier résultat rejoint les conclusions des études précédentes qui ont montré que l'efficience énergétique moyenne des fazendas intensives est sensiblement égale à la moyenne des fazendas extensives (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015a). Cependant, nos résultats montrent que des marges de progrès sont possibles puisque dans notre échantillon, la fazenda intensive – haut niveau d'intrants (type 6) présente la meilleure efficience énergétique.

Second résultat intéressant, la fazenda écologiquement intensive présente une efficience énergétique supérieure aux moyennes des autres groupes, ce qui montre qu'il y a une bonne conversion de l'énergie solaire dans cette exploitation.

Troisième point intéressant, l'efficience énergétique de l'exploitation familiale pionnière (type 1) est la plus faible et le bilan est même négatif (elle consomme plus d'énergie qu'elle n'en produit). Ce cas est toutefois assez particulier, puisque compte tenu de la situation familiale (pluriactivité, habitat éloigné du lot), les exploitants sont peu présents sur le lot et ne peuvent donc bien surveiller le troupeau qui devient plus vulnérable (le taux de mortalité a atteint presque 20% en 2015). De plus, l'exploitation enregistre des pertes sur ces cultures (dégâts dus à des sangliers ou des bovins de la fazenda voisine). Pour l'instant, le projet des exploitants n'est pas de rechercher un haut niveau de productivité. Leur exploitation constitue plutôt un patrimoine.

Quatrième résultat intéressant, la fazenda et l'exploitation familiale extensive consolidée (types 2 et 4) qui utilisent peu d'intrants ont une efficience énergétique supérieure ou égale aux moyennes des groupes. Toutefois, ce bon résultat repose sur l'exploitation de la fertilité résiduelle des sols forestiers dont la tendance est de se dégrader. Les calculs d'efficience énergétique ont été réalisés à partir des données de 2015. Or, en 2016, la situation des systèmes fourragers de ces deux exploitations s'est fortement dégradée et si l'on devait refaire le calcul, l'efficience énergétique serait certainement plus faible.

Consommation d'énergie

Dans les exploitations intensives (types 3 et 6), la consommation totale d'énergie par tonne de poids vif est supérieure à la moyenne de leur groupe. Au contraire, les exploitations extensives utilisant peu d'intrants (types 2 et 4) et la fazenda écologiquement intensive (type 5) présentent des résultats inférieurs aux moyennes de leurs catégories. Dans l'exploitation familiale pionnière (type 1), la consommation d'énergie ramenée à la tonne de poids vif est largement supérieure à la moyenne de son groupe et aux valeurs des autres types de l'échantillon, du fait de son très faible niveau de production.

Dans les exploitations laitières, on constate des tendances différentes si l'on utilise la production de lait comme indicateur au lieu de la viande. L'exploitation intensive, lait (type 3) a de bons résultats puisque pour produire 1 000 litres de lait, elle consomme deux fois moins d'énergie que la moyenne. En revanche, la tendance reste toujours aussi peu favorable pour l'exploitation pionnière de type 1.

Si l'on considère uniquement l'énergie consommée pour l'entretien des fourrages (achat d'engrais, de semences et d'herbicides), les exploitations intensives (types 3 et 6) ont les plus forts niveaux de consommation, ce qui est logique puisque ce sont elles qui utilisent le plus d'engrais et qui réforment le plus souvent les pâturages. Dans les autres exploitations (types 1, 2, 4 et 5), le niveau de consommation d'énergie indirecte pour l'entretien des fourrages est très faible, puisqu'elles utilisent très peu d'engrais.

La répartition de la consommation de l'énergie est très variable entre les exploitations (Figure 3-4). Les fertilisants et amendements et l'achat d'aliments constituent les postes les plus couteux en énergie dans les exploitations intensives (types 3 et 6). Dans l'exploitation familiale intensive (type 3), deux autres postes importants de dépense sont : l'électricité (à cause de la traite automatisée et de l'irrigation notamment) et les infrastructures et équipements (de récents investissements ont été réalisés pour pouvoir mécaniser les sols de l'exploitation). Dans les autres exploitations, les principaux postes de dépense sont les produits pétroliers, suivis généralement des achats d'aliments ou d'animaux (la fazenda traditionnelle achète des veaux au sevrage pour les engraisser, le nombre de veaux nés sur l'exploitation étant devenu trop faible suite à la décapitalisation effectuée) et des infrastructures et équipements.

Intensité énergétique

On retrouve des tendances similaires avec la consommation énergétique. La fazenda intensive (type 6) et l'exploitation familiale intensive (type 3) présentent des intensités énergétiques plus fortes que leur propre groupe. Ceci signifie qu'elles ont une forte consommation d'énergie par rapport aux recettes. Les exploitations extensives (types 2 et 4) et écologiquement intensive (type 5) présentent de plus faibles intensités énergétiques que leur propre groupe. L'exploitation de type pionnier (type 1) présente une intensité énergétique largement supérieure à la moyenne de son groupe et aux autres exploitations de notre échantillon du fait des très faibles niveaux de production.

Tableau 3-8 : Indicateurs d'efficience énergétique calculés dans les six établissements agricoles

		Efficience énergétique	**Intensité énergétique**	**Consommation totale d'énergie**	**Consommation d'énergie pour l'entretien des fourrages**
			MJ/R $	MJ / T de PV (MJ / 1000 L de lait)	MJ / ha de fourrage
Agriculture familiale	1 Pionnier	0,36	8,37	47998 (47690)	10
	2 Extensive consolidée	2,67	1,26	6234	32
	3 Intensif en intrants, lait	1,06	2,33	32043 (5502)	499
	Moyenne - familiales[a]	**2,35**	**2,12**	**10910 (10913)**	**52**
Fazenda	4 Extensive sans feu	2,55	1,30	5497	11
	5 Ecologiquement intensive	2,85	1,31	4769	39
	6 Intensif en intrants, viande	3,48	3,14	14334	2512
	Moyenne - extensives viande[b]	**2,51**	**1,44**	**5813**	**192**
	Moyenne - intensives viande[c]	**2,57**	**2,24**	**9724**	**1210**

a - données récoltées pour l'année 2013 ; b – données récoltées pour l'année 2014 ; c - données récoltées pour l'année 2011

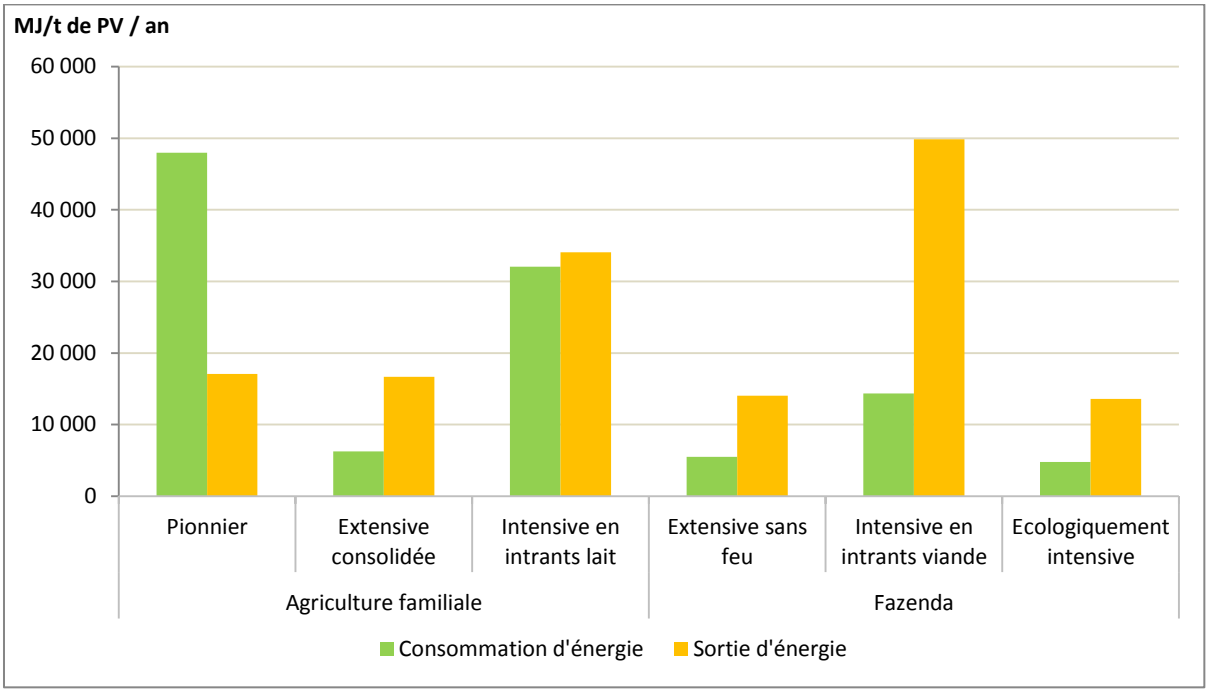


Figure 3-3 : Bilan énergétique des six établissements agricoles

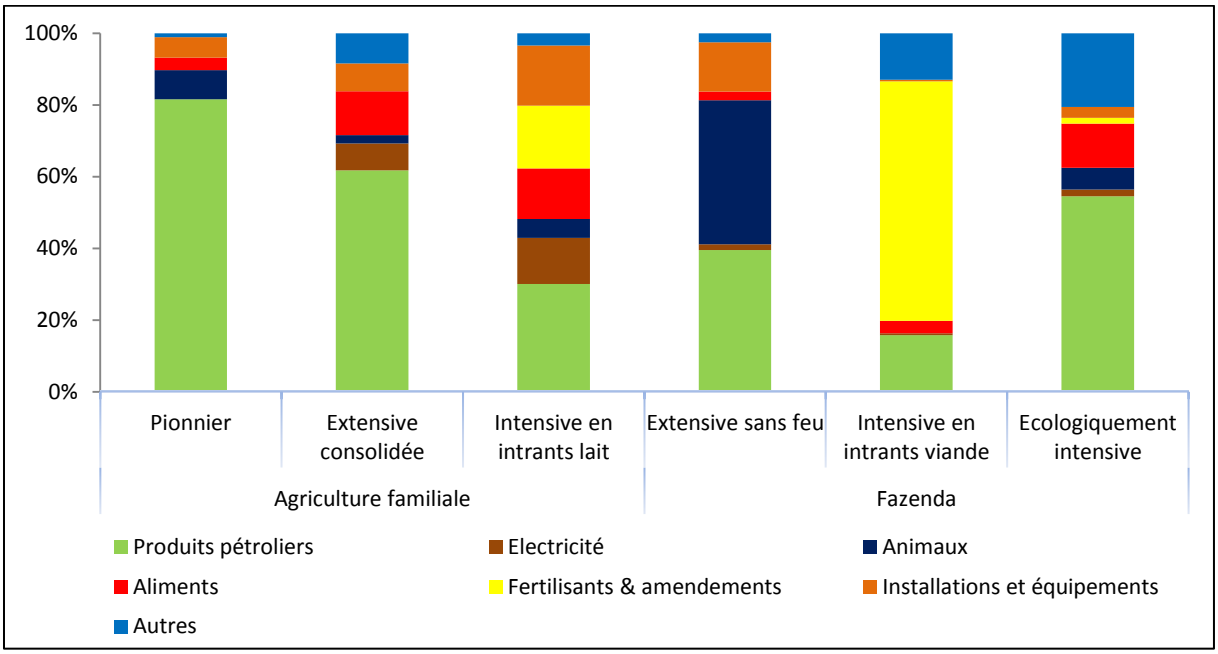


Figure 3-4 : Répartition de la consommation énergétique entre les principaux postes

3.2.1.2 Emissions de Gaz à Effet de Serre

Les émissions de Gaz à Effet de Serre ont été calculées à trois niveaux (Tableau 3-9) :

- au niveau de l'ensemble du système d'exploitation (exprimées en T équivalent CO_2/an);
- au niveau du système fourrager (exprimées en Kg équivalent CO_2/an par hectare de surface fourragère) ;

- au niveau du troupeau (exprimées en Kg équivalent CO_2/an par tonne d'animaux vendus ou en Kg équivalent CO_2/an pour 1 000 litres de lait produit).

Au niveau du système d'exploitation, les valeurs sont très variables (de 265 à 11 800 T eq CO_2/an) et sont fortement liées à la taille de l'exploitation et au nombre d'animaux élevés. Les émissions sont principalement directes et sont issues de deux postes : l'usage du feu et les animaux (fermentation entérique, déjections) (Figure 3-5).

Au niveau du système fourrager, il existe une corrélation entre le type d'exploitation et le niveau d'émissions :

- L'exploitation familiale pionnière (type 1) a un niveau d'émissions de GES par hectare de surface fourragère largement supérieur à la moyenne de son groupe et aux autres types de l'échantillon. Le feu volontaire ou involontaire est responsable de 88% de ces émissions, soit du fait de l'abattis-brûlis de régénérations forestières pour implanter des cultures vivrières ou du pâturage, soit à cause d'un incendie accidentel qui a brûlé les prairies.
- L'exploitation écologiquement intensive (type 5) a un niveau d'émission de GES par hectare de surface fourragère largement inférieur à la moyenne du groupe extensif et aux autres types de l'échantillon. Ses émissions sont principalement dues aux animaux et à l'usage du feu pour brûler les résidus de nettoyage des pâturages dégradés (un peu plus de 40% des émissions).
- Les exploitations extensives de type 2 et 4 présentent des niveaux d'émission de GES comparables à celui des moyennes de leur catégorie, soit respectivement 5 449 kg eq CO2/ha et 3 094 kg eq CO2/ha. Dans l'exploitation familiale (type 2), le feu a généré 61% des émissions (déforestation entre 2004 et 2014 et feu accidentel sur pâturage ces dernières années). Dans la fazenda (type 4), le feu représente encore 21% des émissions. Bien que cette fazenda n'utilise plus l'abattis-brûlis depuis les années 2000, des ouvertures ont été réalisées après 1995 et ont donc été inclues dans le calcul. Le reste des émissions de la fazenda sont dues aux animaux.
- Dans les exploitations intensives, la comparaison avec les moyennes de référence fait apparaître des résultats contrastés. L'exploitation familiale (type 3) a généré presque 2 fois plus d'émissions par hectare de surface fourragère que la moyenne des exploitations familiales. Cette exploitation a défriché la moitié de sa forêt primaire sur une courte période entre 1998 et 2004. Bien qu'aujourd'hui elle n'utilise plus le feu, la défriche par abattis brûlis pèse encore sur son bilan et les émissions de gaz dues au feu représentent 61% des émissions, alors que celles dus aux animaux représentent à peine 31%. La fazenda intensive (type 6) a émis deux fois moins de GES par hectare de surface fourragère que la moyenne de son groupe et présente un niveau d'émission comparable à celui des fermes extensives. Cette fazenda n'utilise plus du tout le feu depuis les années 85 et relativement peu d'intrants comparé à des systèmes intensifs européens. Ses émissions sont principalement dues aux animaux.

Au niveau du troupeau, si l'on compare les émissions ramenées à la tonne d'animaux vendus et pour 1 000 litres de lait produit dans le cas des exploitations laitières (types 1 et 3), on constate que :

- L'exploitation familiale pionnière (type 1) est la plus forte émettrice de GES par tonne d'animaux vendus ou de lait produit. Ses émissions de GES dépassent largement les moyennes de son groupe.
- Dans les exploitations intensives (types 3 et 6), les émissions ramenées à la tonne d'animaux vendus sont légèrement inférieures à la moyenne de leur groupe. Si l'on compare par rapport aux litres de lait produits, l'exploitation laitière de type 3 génère très peu d'émissions comparées à la moyenne de son groupe (60% de moins).
- L'exploitation extensive de type 2 génère deux fois moins d'émissions que son groupe. L'exploitation extensive de type 4 en émet 30% de plus.
- L'exploitation écologiquement intensive reste la moins émettrice.

Tableau 3-9 : Emissions de Gaz à Effet de Serre

		Emissions de GES			**Part du feu**
		T eq CO_2 / exploitation	Kg eq CO_2 / ha de pâturage	Kg eq CO_2 / T d'animaux vendus (/ 1000 L de lait produit)	Kg eq CO_2 / an
Agriculture familiale	1 Pionnier	265	33879	426766 (424031)	88%
	2 Extensive consolidée	666	5449	49671	71%
	3 Intensif en intrants, lait	723	8787	106351 (18262)	61%
	Moyenne - familiales[a]	**153**	**4568**	**107456 (45324)**	
Fazenda	4 Extensive sans feu	11802	3094	17747	21%
	5 Ecologiquement intensive	7322	414	3821	43%
	6 Intensif en intrants, viande	2081	3446	16943	0%
	Moyenne - extensives viande[b]	**4028**	**3974**	**14009**	
	Moyenne - intensives viande[c]	**10140**	**6448**	**19785**	

a - données récoltées pour l'année 2013 ; b – données récoltées pour l'année 2014 ; c - données récoltées pour l'année 2011

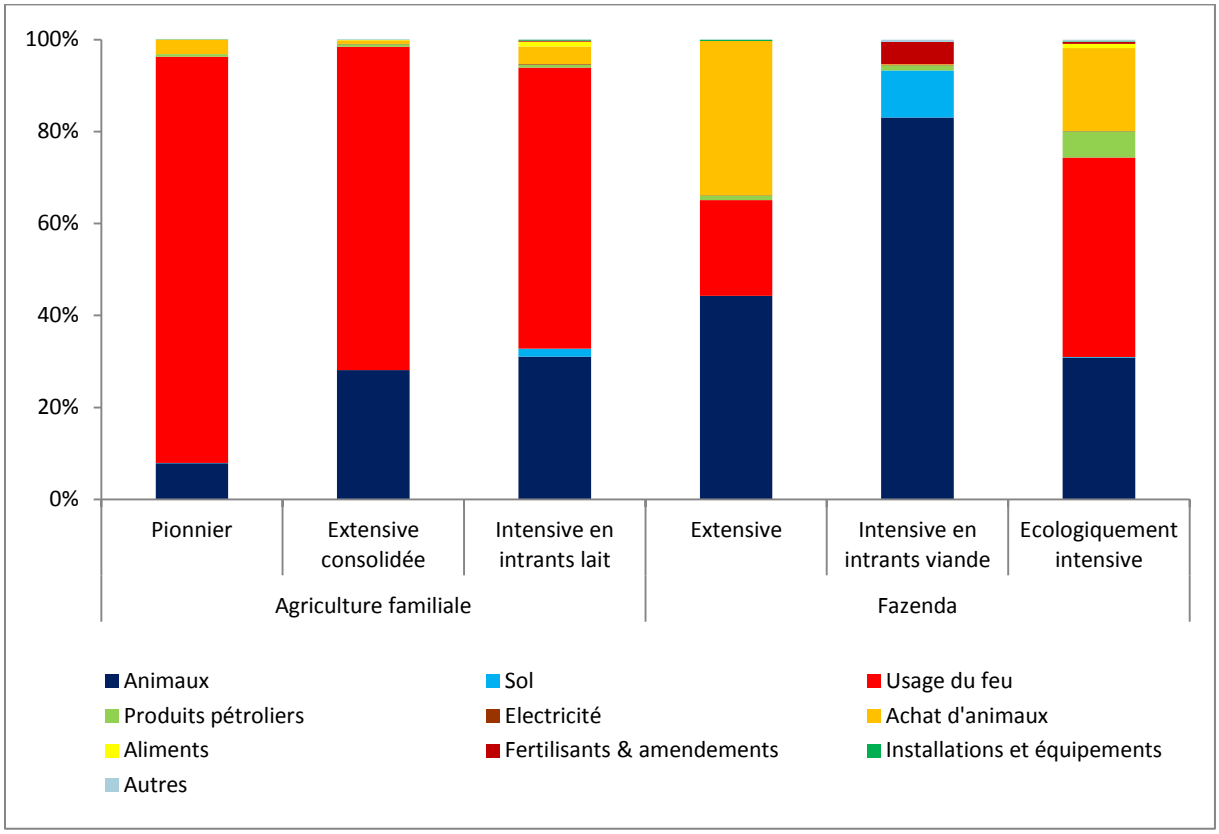


Figure 3-5 : Part des émissions de gaz à effet de serre entre les différents postes

Ces résultats nous permettent de discuter trois points importants :

- Il n'existe pas de corrélation entre le bilan énergétique et les émissions de GES. Par exemple, la fazenda écologiquement intensive dont le bilan énergétique est plus faible que la fazenda intensive émet en revanche beaucoup moins de GES. Le bilan énergétique et les émissions de GES sont deux indicateurs complémentaires pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les ressources énergétiques.
- Une grande partie des émissions sont dues à l'usage du feu et sont donc contrôlables par les éleveurs. En revanche, nous remarquons que dans les exploitations n'utilisant plus le feu, ce sont les animaux qui représentent le principal poste d'émissions (fermentation entérique, déjection). Or, il est difficile pour les éleveurs de contrôler les émissions de gaz générées par les animaux.
- Même quand les fertilisants et amendements sont utilisés en quantité non négligeables (exploitations intensives), ils représentent une très faible part des émissions dans les systèmes d'élevage amazoniens.

L'efficience énergétique et les émissions de gaz à effet de serre constituent deux indicateurs intéressants pour analyser le processus d'intensification de l'élevage et de transition agraire. Ces indicateurs qui permettent d'évaluer l'efficience dans l'utilisation de l'énergie solaire et l'empreinte carbonée de l'élevage ne sont toutefois pas spatialement explicites. Or, certaines pratiques selon leur localisation dans les unités de paysage peuvent avoir un effet plus ou moins dégradant sur les autres ressources importantes dans les systèmes d'élevage (l'eau

verte, l'eau bleue, la fertilité des sols, la structure des sols). C'est ce que nous proposons d'étudier dans la partie suivante.

3.2.2 A l'échelle de la parcelle : Effets des facteurs naturels et anthropiques sur les ressources hydriques et pédologiques

Cette partie ne prétend pas être exhaustive sur l'ensemble des processus d'interactions entre l'eau et les sols tropicaux. Elle cite de façon simplifiée les processus ayant un impact significatif sur les systèmes fourragers, et sur lesquels les pratiques des éleveurs sont déterminantes. De nombreux processus, tels que la décomposition chimique de la matière organique du sol, le lessivage de différents minéraux non azotés, ne sont ainsi pas cités ici.

3.2.2.1 Processus naturels de dégradation

L'évaporation et l'évapotranspiration

Ces deux processus traduisent les pertes relatives à l'eau verte, l'évaporation concernant l'eau du sol, l'évapotranspiration étant liée à l'eau des végétaux. Tous deux constituent des processus écologiques déterminants dans la production fourragère en saison sèche, ralentissant l'offre fourragère et augmentant la sensibilité aux feux incendies. Ce phénomène peut être accentué par cinq facteurs climatologiques et biophysiques.

- L'intensité du vent : Le vent, par son énergie cinétique, joue un rôle prépondérant dans l'évaporation de l'eau à la surface du sol, et accentue les pertes d'eau par les végétaux.
- L'exposition aux rayons solaires : Le rayonnement solaire favorise les deux processus. Un sol nu sera plus exposé aux rayonnements et subira une plus forte perte d'eau liée à l'évaporation qu'un sol couvert qui se réchauffera moins vite.
- La texture du sol : Les sols argileux ont une meilleure capacité de rétention en eau que les sols sableux pendant la saison des pluies. A l'inverse en saison sèche, du fait d'une capillarité plus fine, les sols argileux s'assèchent sur une plus grande profondeur que les sols sableux. Ceux-ci sont ainsi plus à même d'offrir des réserves en eau à des systèmes racinaires profonds, comme ceux d'espèces arborées.
- La structure du sol : Un sol aéré présente une surface irrégulière qui empêche l'eau de s'évaporer, contrairement au sol tassé qui perd plus d'eau par évaporation du fait des remontées capillaires. De plus, il possède une meilleure capacité d'infiltration et une bonne réserve utile.
- La matière organique : Elle augmente la réserve utile du sol en eau, notamment en favorisant mieux l'infiltration.

Processus de lixiviation de l'azote

Les nitrates (NO_3^-) sont présents naturellement dans le sol. Ils sont issus de la minéralisation de la matière organique (formation d'ammonium NH_4^+après dégradation de la matière organique par les micro-organismes), puis de la nitrification de l'ammonium ($NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$

→ NO_3^-). C'est la forme la plus soluble de l'azote. Avec l'ammonium, ce sont les deux sources d'azote assimilables par les racines des plantes.
Dans les sols, en cas d'excédents d'azote, les nitrates peuvent être transférés au-delà de la zone explorée par les racines, par l'eau qui draine verticalement. Ce processus de lixiviation entraîne une baisse de l'azote disponible pour les plantes ainsi que la pollution azotée des ressources d'eau souterraines et superficielles. Dans les systèmes fourragers amazoniens extensifs, le risque de lixiviation est faible car d'après Braga do Carmo *et al.* (2005), l'accumulation d'N sous forme de nitrates ainsi que les taux de minéralisation et de nitrification sont faibles sous pâturages. Toutefois, l'intensification chimique entraîne une hausse de l'usage d'engrais fertilisés azotés, très solubles, et pourrait donc accroître les risques de lixiviation.
Le processus de lixiviation de l'azote est donc important à maîtriser pour optimiser la fertilité des sols et limiter la pollution de la nappe phréatique et donc la dégradation de la qualité de l'eau bleue.

Cinq facteurs climatologiques et biophysiques influencent fortement ce processus sur nos terrains d'étude :

- L'intensité des précipitations : L'abondance et la répartition des précipitations dans le temps peuvent accentuer l'entraînement des nitrates en profondeur.
- La couverture du sol : La présence d'une couverture végétale permet de piéger l'azote en excédent et de le stocker sous forme organique.
- La texture du sol : Les sols sableux sont plus sensibles à la lixiviation de l'azote que les sols constitués de fines particules (riches en argile) car ils sont plus perméables et drainent beaucoup plus vite que les sols argileux (la majorité du lessivage a lieu au niveau des macropores).
- La structure du sol : Les sols compactés permettront un moins bon développement racinaire que les sols aérés et donc un plus fort risque de lixiviation.
- La matière organique : Les matières organiques stabilisées participent à la formation du complexe argilo-humique et donc à l'adsorption de cations tels que l'ammonium, les protégeant ainsi de la lixiviation.

Processus d'émissions atmosphériques
Les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre au niveau des systèmes fourragers sont majoritairement de trois types : les émissions de gaz carbonique (CO_2) par combustion de la biomasse végétale, la volatilisation d'azote ammoniacale (NH_3) et la dénitrification par réduction des nitrates et nitrites sous forme de monoxyde d'azote (NO), de protoxyde d'azote (N_2O) ou de diazote (N_2).
D'après la synthèse bibliographique de Clerc (2011), les émissions de N_2O sont contrôlées par de nombreux facteurs dont :

- Les précipitations : Les émissions de N_2O sont plus élevées après de fortes pluies.

- L'humidité : Les conditions de sols très humides et saturées en eau (anaérobie) sont favorables à la dénitrification et aux émissions de N_2O. Toutefois les zones humides ont également des capacités épuratrices permettant de réduire les concentrations en nitrates et donc de protéger la qualité de l'eau.
- La texture du sol : Les émissions de N_2O seraient plus importantes en sol argileux qu'en sol sableux, du fait d'une plus faible porosité qui influence très probablement la diffusion des gaz.
- Changement d'usage des sols : La déforestation entraîne une augmentation des émissions de N_2O pendant une durée de 3 ans.

Processus d'érosion hydrique

L'érosion hydrique correspond à l'ensemble des processus de détachement des particules de sol, leur transport et leur sédimentation sous l'action de l'eau (Joannon, 2004). L'érosion hydrique engendre un transfert de matières de l'amont vers l'aval qui peut dégrader trois types de ressources naturelles : les couches de sol superficielles (perte de particules de terre), la fertilité (perte de matière organique) et l'eau bleue (altération de la qualité de l'eau des rivières, envasement). Ce phénomène naturel est particulièrement intense sous climat tropical humide.

Plusieurs facteurs naturels d'ordre biophysiques et climatologiques favorisent les processus d'érosion hydrique.

- L'intensité des précipitations : En cas de pluie de forte intensité, le sol n'a pas la capacité d'absorber toute l'eau tombée. La partie supérieure du sol devient saturée. Une fraction de l'eau de pluie n'est pas infilitrée et ruisselle, ce qui favorise le risque d'érosion.
- La topographie : L'inclinaison de la pente détermine la sensibilité du sol à l'érosion. Plus l'inclinaison est forte, plus la vitesse de l'eau ruisselant augmente, plus le sol est érodable.
- La protection du sol par une couverture végétale : l'impact de gouttes de pluies à la surface d'un sol nu (effet splash) fragmente les agrégats. Ces nouveaux agrégats plus fins obturent les pores en surface, affectant l'état de surface du sol (pouvant aller jusqu'à former une croûte de battance) ce qui réduit la capacité d'infiltration de l'eau, pouvant dans des cas extrêmes provoquer son imperméabilisation. L'eau tend ainsi à plus ruisseler, et ainsi provoquer une érosion accrue. La végétation en interceptant les gouttes de pluies réduit l'énergie cinétique et la vitesse de l'eau, maintenant un état de surface favorable à l'inflitration.
- La texture du sol : Les sols contenant une majorité d'éléments fins (argiles, limons fins) présentent une stabilité structurale forte (effets cohésifs des argiles), c'est-à-dire une forte capacité à conserver leur structure sous l'action de la pluie. Les plateaux argileux de Belterra que l'on trouve à Paragominas présentent une macrostructure particulièrement favorable à l'infiltration de l'eau. Au contraire, la cohésion des sols

riches en éléments grossiers (sables) est plus faible, les agrégats se fragmentent plus facilement, le risque d'érosion est plus élevé.

- La matière organique : La teneur en Matière Organique influence la stabilité structurale. Un taux élevé favorise la cohésion des agrégats et donc la stabilité structurale.

3.2.2.2 Effets des pratiques agricoles sur les processus écologiques

Les activités anthropiques peuvent amplifier ou au contraire réduire les effets de ces facteurs naturels sur les processus écologiques. Nous présentons dans les Tableau 3-10 et Tableau 3-11 et les paragraphes suivants les relations entre pratiques agricoles et processus écologiques.

Pratiques amplifiant les processus de dégradation des ressources naturelles

- Mauvaise formation du pâturage : Elle peut être due à une mauvaise germination (semences de mauvaise qualité), à de faibles densités de semis ou à une mise à l'herbe trop précoce des animaux. Les conséquences sont une mauvaise couverture du sol et donc une exposition du sol au soleil, au vent et aux précipitations. Cette pratique favorise à la fois les processus d'évaporation (eau verte), et d'érosion hydrique (perte de sol, de nutriments et altération de la qualité de l'eau).
- Surpâturage : Le surpâturage a plusieurs origines : une mauvaise gestion du pâturage dans de grands parcs en gestion continue ou alternée (les repousses plus appétentes sont aussitôt pâturées) ou un manque de surface fourragère sur l'exploitation par rapport à la charge bovine totale (fréquemment en saison sèche). Le surpâturage génère une disparition de la couverture fourragère et donc favorise des phénomènes d'évaporation et d'érosion hydrique.
- Piétinement : Les zones de piétinement aparaissent autour des abreuvoirs, sur les berges des cours d'eau et dans les lieux de passage entre deux parcs. Les piétinements, outre le fait de laisser les sols nus, compactent les sols, réduisent la macroporosité et donc la capacité d'infiltration de l'eau mais aussi le développement des racines. Cela génère une hausse de l'évaporation et des risques de lixiviation des nutriments et d'érosion hydrique.
- Nettoyage des pâturages par le feu (écobuage) et incendies : Pendant longtemps, le nettoyage des pâturages par le feu a été la pratique la plus couramment utilisée par les éleveurs pour contrôler les adventices et les repousses forestières, du fait de son faible coût et de son faible besoin en main d'oeuvre. Cette pratique favorise aussi la minéralisation de la MO et la mise à disposition rapide de nutriments. Mais ses effets sont négatifs sur l'ensemble des processus. L'usage du feu favorise l'évaporation de l'eau, l'érosion hydrique, l'émission de gaz à Effet de Serre (du CO_2 et du N_2O), la lixiviation des nutriments (en cas de pluies), et en dégradant quasiment toute la MO, réduit graduellement le stock de nutriments du sol.

- Sol nu entre deux cultures (saison sèche) : Dans les systèmes de cultures annuelles, il est fréquent que les sols soient laissés nus en inter-culture (saison sèche). A Paragominas, ces sols qui correspondent aux plateaux argileux sont fortement exposés aux processus d'évaporation et d'érosion hydrique (ravinement).
- Défriche des ripisylves : La défriche de la végétation en bordure des cours d'eau a eu lieu systématiquement dans les exploitations. Elle peut entraîner des problèmes d'érosion au niveau des berges, modifier le lit de la rivière, le débit et la qualité de l'eau.

Pratiques et aménagements paysagers réduisant les processus de dégradation des ressources naturelles

- Division des parcs et pâturage tournant : La division des parcs est une pratique d'intensification simple couramment mise en œuvre sur nos terrains d'étude. Le pâturage tournant consiste également à subdiviser les parcs mais en plus petites parcelles et à faire tourner les animaux rapidement dessus. Ces deux pratiques visent une meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, une meilleure couverture des sols et un meilleur enracinement. Ces pratiques peuvent avoir des effets positifs sur les processus écologiques en réduisant l'évaporation de l'eau et l'érosion hydrique.
- Fertilisation d'entretien : Encore peu pratiquée du fait de son coût, elle permet pourtant d'améliorer le métabolisme des plantes fourragères, d'assurer une meilleure couverture du sol et un meilleur enracinement, limitant donc l'évaporation de l'eau et l'érosion hydrique.
- Semis direct sous couverture végétale : Cette technique consiste à implanter la culture ou le pâturage sous une couverture végétale permanente vivante ou morte (résidus de cultures ou cultures intermédiaires). Les avantages sont nombreux : accroissement de l'activité biologique du fait de la couverture végétale présente, amélioration de la structure du sol, de la porosité et donc de l'infiltration, recyclage des nutriments, accroissement de la réserve en eau des sols. En climat tropical humide, elle a des effets très positifs sur la baisse de l'évaporation, la réduction de l'érosion et de lixiviation de l'N.
- Implantation de haies et d'arbres brise-vent localisés dans le paysage : Cette pratique permet d'accroître la rugosité du paysage et donc de ralentir la vitesse du vent. Les haies et les arbres brise-vent permettent également de former des obstacles au ruissellement et à l'érosion hydrique.
- Localisation des pratiques pour protéger les surfaces érosives : L'agencement des pratiques dans les paysages peut réduire les risques d'érosion hydrique, via notamment une meilleure protection des surfaces sensibles à l'érosion. La régénération forestière des bordures de cours d'eau, des hauts de versants découpés et des reliefs assurera une meilleure protection de ces surfaces érodables. Le semis direct et le travail du sol superficiel sont aussi efficaces pour limiter l'érosion sur les pentes.

- Localisation des pratiques pour limiter le processus de lixiviation de l'azote : Comme expliqué précédemment, les sols sableux sont plus propices à la lixiviation de l'azote. Les pratiques privilégiant l'usage de fertilisants azotés seront donc à privilégier sur les sols plus riches en argile.
- Localisation des pratiques pour valoriser l'eau du sol : Les pâturages positionnés dans les fonds de vallée, à proximité de la nappe phréatique sont les moins sensibles à la sécheresse.

Tableau 3-10 : Pratiques favorisant la dégradation des ressources naturelles dans les systèmes d'élevage en Amazonie brésilienne

EVAPORATION ET EVAPOTRANSPIRATION		LIXIVIATION		EMISSIONS ATMOSPHERIQUES		EROSION HYDRIQUE	
Pratiques	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**
Pâturage sans arbre	Accélère la vitesse et l'exposition au vent	**Sol nu en saison humide**	Fuite N soluble issu de la minéralisation non retenu par racines	**Pas de chaulage sur sol acide**	Dénitrification	**Pâturage mal implanté**	Couverture fourragère peu dense, sol exposé
Pâturage mal implanté	Couverture fourragère peu dense, sol exposé	**Piétinement**	Compaction du sol, porosité réduite, mauvais développement racinaire, fuite N	**Apport déjections animales**	Améliore porosité, fournit substrat pour micro-organismes, réduit disponibilité en O2, dénitrification	**Surpâturage et piétinement**	Disparition de la couverture fourragère, compaction, baisse taille macropores, infiltration plus lente, ruissellement
Surpâturage et piétinement	Disparition de la couverture du sol, sol exposé	**Travail du sol conventionnel (labour)**	Aère et réchauffe le sol, favorise la minéralisation de l'humus stable	**Pas d'enfouissement engrais urée**	Volatilisation N	**Sol nu entre deux cultures**	Effet "splash" des gouttes de pluies peuvent former une croûte de battance
Piétinement	Compaction du sol, baisse taille macropores, infiltration plus lente	**Réduction de la durée de jachère**	Faible recyclage de MO et CEC réduite	**Abattis-brûlis forêt**	Combustion C et volatilisation NH3	**Cultures annuelles conventionnelles sur relief**	Sol en partie découvert sensible à l'effet splash
Absence de fertilisation d'entretien	Métabolisme des plantes fourragères limité, moins bonne couverture du sol	**Nettoyage régulier des pâturages par le feu et incendie accidentel**	Minéralisation de grande quantité de MO en nutriments solubles (N, P) sensible à la lixiviation. Réduction graduelle du stock de MOS	**Nettoyage des pâturages par le feu et incendie accidentel**	Combustion C et Volatilisation N	**Travail du sol**	Déstructuration des agrégats argilo-humiques
Nettoyage des pâturages par le feu et incendie accidentel	Diminution taille des macropores, des agrégats, de l'infiltration et de l'humidité. Augmentation de la densité du sol et de la résistance à la pénétration des racines			**Fertilisation chimique après de fortes pluies**	Dénitrification	**Nettoyage des pâturages par le feu (écobuage) et incendie accidentel**	Disparition de la couverture fourragère, baisse taille macropores, infiltration plus lente, ruissellement
Labour profond	Favorise les remontées capillaires					**Défrichement des ripisylves**	Berges non stabilisées pas les racines des arbres
Sol nu entre deux cultures	Exposition au soleil et vent						
Pas de recyclage de la MOS	Réduit le stockage de l'eau par les agrégats argilo-humiques						

Tableau 3-11 : Pratiques favorisant l'aggradation des ressources naturelles dans les systèmes d'élevage en Amazonie brésilienne

EVAPORATION ET EVAPOTRANSPIRATION		LIXIVIATION		EMISSIONS ATMOSPHERIQUES		EROSION HYDRIQUE	
Pratiques	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**	**Pratiques**	**Effets**
Arbres coupe-vent	Augmente rugosité du paysage	**Régulation charge de bovins**	Meilleure couverture, enracinement et rétention N	**Chaulage**	Réduit dénitrification	**Semis dense du pâturage**	Couverture fourragère et enracinement dense
Systèmes Sylvo-Pastoraux	Augmente la rugosité du paysage. Reconstitution stock MOS et augmente RU	**Systèmes Sylvo-Pastoraux**	Prélèvement N en profondeur et recyclage MO	**Apport d'engrais sous forme NH4+**	Moins d'émissions de N qu'avec urée	**Contrôle chargement**	Meilleure couverture du sol, réduit effet splash des gouttes de pluies
Semis dense du pâturage	Meilleure couverture du sol et enracinement	**Semis dense du pâturage**	Meilleure couverture du sol et enracinement, augmente rétention N	**Arrêt usage du feu**	Recyclage de la MO dans les sols	**Fertilisation d'entretien**	Améliore métabolisme des plantes fourragères, meilleure couverture du sol, réduit effet « splash »
Régulation charge de bovins	Meilleure couverture du sol	**Pâturage tournant**	Meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, couverture, enracinement et rétention N			**Division des pâturages**	Meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, moins de risque surpâturage, réduit effet « splash »
Fertilisation d'entretien	Améliore métabolisme des plantes fourragères, meilleure couverture	**Légumineuse**	Absorption N			**Pâturage tournant**	Meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, moins de surpâturage et piétinement, réduit effet « splash »
Division des pâturages	Meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, meilleure couverture du sol	**Paillage ligneux**	Augmente stock MOS stable et CEC			**Semis direct sous couverture végétale**	Couverture du sol, réduit effet splash, reconstitution stock MO, activité biologique, macroporosité et infiltration
Pâturage tournant	Meilleure gestion de l'équilibre biomasse-troupeau, meilleure couverture	**Semis direct sous couverture végétale**	Minéralisation de l'N moins rapide, recycle MO, améliore CEC			**Arbre et haies (courbes de niveaux)**	Réduit taille parcelle, "casse" le ruissellement, favorise l'infiltration
Interculture ou double cultures	Couverture du sol en saison sèche	**Fractionner les apports**	Ajustement des apports aux besoins			**Régénération relief escarpé**	Couverture du sol, interception des gouttes de pluie par la végétation, infiltration
Paillage (résidus végétaux)	Réfléchit le rayonnement solaire. Reconstitution stock MOS et augmente RU					**Recomposition des ripisylves**	Fixation des berges par les racines, favorise infiltration
Semis direct	Résidus maintenus en surface, rétention de l'humidité					**Arrêt usage du feu**	Diminution du risque de sol nu et du ruissellement de l'eau de pluie

3.2.3 Evolution des perceptions des éleveurs sur les ressources naturelles et adaptation des pratiques

Les éleveurs évaluent avec leurs propres indicateurs les effets de leurs pratiques agricoles sur les ressources naturelles. En fonction des impacts, leurs perceptions sur les ressources naturelles peuvent changer et ils ajustent leurs pratiques en retour. Nous proposons d'analyser comment les perceptions des éleveurs ont évolué et si cela a induit des adaptations de pratiques. Cette analyse est importante pour mieux comprendre les boucles de rétroactions entre ressources naturelles, stratégie d'intensification et organisation des paysages.

L'eau bleue

Dans notre échantillon, nous observons que les perceptions des éleveurs vis-à-vis de cette ressource ont évolué suite à des dégradations des rivières et des écosystèmes aquatiques et ripariens. Perçue à l'époque de la colonisation comme une source d'abreuvement, aujourd'hui il existe de plus en plus un consensus sur le fait que cette ressource est essentielle à la production agricole, qu'elle est fragile et qu'elle doit être conservée. La principale adaptation mise en place par les éleveurs est la recomposition des ripisylves. Elle présente des intérêts écologiques (préservation du cours d'eau en termes de débit, température et qualité, protection des sols contre l'érosion), productifs (pêche, abreuvement, irrigation), et de bien être humain et animal (fourniture d'ombre au troupeau et de fruits pour la consommation vivrière).

L'eau verte

Les pratiques de gestion extensive du système fourrager mises en place lors de la colonisation (faible charge à l'hectare, nettoyage des pâturages avec le feu) valorisent mal cette ressource. Mais les sécheresses marquées de ces dernières années ont favorisé de nouvelles perceptions de cette ressource. Désormais perçue comme une ressource rare, les pratiques sont adoptées pour mieux la valoriser. Nous distinguons plusieurs types d'adaptations.

- Le recours à des pratiques permettant un accroissement de la capacité de rétention de l'eau verte : réduction de la charge animale à l'année ou en saison sèche (vente, location de pâturage), recours au pâturage tournant (cela permet une meilleure gestion de la pousse de l'herbe), implantation d'arbres coupe-vent dans ou en bordure des parcs, semis plus dense ou semis direct.
- La complémentation en saison sèche : distribution d'ensilage de cultures fourragères (exploitation familiale laitière intensive), ou de farine pour les animaux aux plus forts besoins (fazendas) ;
- L'irrigation : les éleveurs intensifs viande et lait ont investi ou ont pour projet d'investir dans un système d'irrigation afin de transformer l'eau bleue en eau verte et pouvoir maintenir ainsi un certain niveau de production fourragère en saison sèche. Irriguer les cultures pérennes fait aussi partie des projets des éleveurs familiaux de type 1 et 2 (pionnier et extensif consolidé) sur des zones sableuses.
- La localisation des usages : si possible les éleveurs privilégient l'implantation de cultures pérennes sur les sols argileux car ces sols offrent une meilleure réserve utile.

Tous les éleveurs constatent également que les pâturages installés dans les zones de bas-fond restent plus longtemps humides que ceux de versants en été (ceci s'explique par la faible profondeur de la nappe phréatique).

Extrait du discours éleveur pionnier : « *Un sol couvert retient davantage l'eau, il est moins agressé par le soleil* »[1].
Extrait du discours fazenda intensive : « *Je préfère avoir plus d'herbe que trop de bêtes* ».
Extrait du discours éleveur familial consolidé : « *Le secret du pâturage c'est de le semer dense. Un sol couvert reste plus humide et le pâturage aussi* ».

La fertilité du sol

L'approche des éleveurs sur la fertilité du sol a aussi évolué. A l'époque de la colonisation, cette ressource importe peu car la forêt distribuée de manière homogène sur leur espace constitue une réserve de fertilité pour l'implantation de cultures annuelles ou de pâturage. Jusqu'alors la fertilité des sols était entretenue par le feu. Mais les éleveurs ont pris conscience que l'historique d'usages sur le temps long et d'entretien sur le temps court (usage du feu répété, surpâturage, peu ou aucune réalimentation de la matière organique du sol aucune fertilisation), ont eu des effets négatifs sur la fertilité des sols. De plus, ils considèrent davantage l'hétérogénéité des types de sol.

Extrait du discours éleveur familial intensif : « *Notre terre s'est épuisée. Quand nous avons commencé, nous pouvions vivre de l'élevage viande. La nature nous a aidés un bon moment, mais aujourd'hui, nous ne pouvons plus. A l'époque où nous avons formé les pâturages, nous pouvions mettre jusqu'à 10 têtes par alqueire [2 têtes par hectare]. Aujourd'hui, nous ne pouvons pas en mettre plus que 3 par alqueire. Nous devons élever un troupeau laitier pour continuer à vivre sur notre lot* »[2].
Extrait du discours éleveur familial consolidé : « *Le feu détruit, autant qu'il reconstruit. Mais chaque fois que passe le feu, la terre s'affaiblit. Le feu aide autant qu'il ne dérange. Il nous aide car il nous évite de débroussailler et d'utiliser des herbicides. Mais il nous dérange car il brûle les clôtures et réduit la disponibilité de pâturage. Je ne suis pas en faveur du feu. Les conséquences sont lourdes. Il y avait 70 km de forêt de mon lot jusqu'à la réserve indigène. S'en est fini avec notre forêt* »[3].

[1] "*Um solo coberto segura mais a úmidade, o sol agrede menos"*.
[2] *"A terra é acabada. Quando começamos, podiamos viver do gado de corte. A natureza ajudou um bom tempo, mas hoje, não podemos mais. Quando formamos os pastos, colocavamos até 10 cabeças per alqueire [2 cab/ha]. Hoje, a gente não pode colocar mais do que 3 per alqueire. Temos que criar gado de leite para continuar a viver sobre nossos lotes"*.
[3] *"O fogo tanto faz destrução [queima tudo] que construção [o capim volta]. Mas cada vez que passa o fogo, a terra enfraquece. O fogo tanto atrapalha como ajuda. Ele ajuda porque não precisa roçar nem usar veneno. Mas ele atrapalha porque queima as cercas e reduz a disponibilidade de capim. Não sou a favor do fogo. As consequëncias são pesadas. Tinha 70 km de mata até a reserva indigena. Acabou com nossa mata"*.

Extrait du discours éleveur familial intensif : « *Le pâturage est beau l'année qui suit le nettoyage du pâturage avec le feu. Cela semble avantageux sur le moment. Mais en réalité, on détruit la ressource, on affaiblit le sol* »[1].
Extrait du discours éleveur familial consolidé : « *Là où il y a des pierres, les sols restent toujours plus faibles, le pâturage ne germine pas bien* »[2].

Conséquence de l'évolution des perceptions, la fertilité des sols devient plus centrale dans leurs décisions de gestion des fourrages et de localisation des pratiques. Cela se traduit par l'adoption de nouvelles pratiques :

- Reconstitution de la fertilité organique : plusieurs éleveurs épandent des déjections animales du corral sur les cultures ayant de fort besoin (exploitation intensive type 3), dans les parcs voisins (exploitation extensive type 4), ou sur les cultures pérennes (poivriers). D'autres les vendent (type 2). Deux éleveurs ont testé l'usage de légumineuses (types 5 et 6).
- Utilisation de fertilisants chimiques : seules les fazendas et l'exploitation familiale intensive en épandent. Mais du fait de la dimension des surfaces et du coût élevé des fertilisants, ils financent la réforme par l'intégration avec l'agriculture ou ils réservent cette pratique aux parcs ayant le plus de besoins (pâturage tournant intensif ou pâturage très dégradé). L'éleveur pionnier souligne la praticité d'utiliser les engrais chimiques par rapport aux déjections (plus concentrés, ils sont plus faciles à transporter et à épandre).
- Localisation des usages : les parcelles les plus pauvres sont réservées aux espèces de prairie les plus rustiques. Par exemple, l'éleveur intensif de type 6 réserve les parcelles pauvres au *Brachiaria brizantha* et le mombaça aux meilleures parcelles. Deux exploitants (types 2 et 3) ont choisi aussi de positionner certaines parcelles à proximité du corral pour faciliter les épandages des déjections animales (plantation de poivre, pâturage tournant intensif). L'exploitant intensif de type 6 a aussi pour projet d'installer un parc d'engraissement sur un affleurement de cuirasse de légère pente pour récupérer facilement les déjections.

Extrait du discours fazenda intensive : *« D'un élevage extrativiste, nous devons évoluer vers une gestion qui améliore la qualité du sol. Extraire du sol sans jamais recomposer, on en finit avec le sol. C'est ce que je dis à mes enfants : il va falloir utiliser des légumineuses, des engrais verts. La nature a déjà donné ce qu'elle pouvait »*[3].
Extrait du discours éleveur familial consolidé : « *La terre, on ne fait que l'utiliser, elle s'affaiblit. On la pousse jusqu'au jour où elle ne supportera plus. Nous allons finir par*

[1] *"O ano que vem o capim fica bonito. Fica vantajoso na hora. Mas na verdade, destruie o recurso, enfraquece o solo".*
[2] *" Onde tem pedras, os solos sempre ficam mais fracos, o capim não germina bem".*
[3] *"Da pecuária extrativista, temos que evoluir para um manejo que melhora a qualidade do solo. Tirar do solo sem nunca botar nada, acaba com o solo. É o que estou falando para meus filhos : usar leguminosas, adubo verde… a natureza já proporcionou".*

devoir changer nos pratiques et mécaniser nos sols, les fertiliser, diviser les parcs. Sans aucun doute, les prairies se porteront mieux. Le problème c'est le coût »[1].

Extrait du discours éleveur pionnier : « *Je récupère les fécès du corral et les mets dans mon jardin. Si je pouvais je les mettrai dans mes pâturages, mais j'aurai besoin de camions de fumier ! Les déjections, c'est plus compliqué à épandre et à transporter que l'engrais chimique*[2] ».

Relief et structure du sol

Le relief n'a pas non plus été pris en compte dans le processus d'occupation des sols. L'abattis-brûlis réalisé manuellement a permis d'exploiter n'importe quel type de relief. Mais plusieurs facteurs aboutissent à une évolution des perceptions. Tout d'abord, la mécanisation devient impossible sur des zones très escarpées (versants abruptes et bordures de cours d'eau). De plus, même en cas de travail manuel, le dénivelé rend le travail fastidieux ce qui ne permet pas d'optimiser le travail. Certaines exploitations ont également pu être victimes de processus d'érosion et de ravinement suite à l'exposition de sol nu aux précipitations ou au piétinement des bovins. Les zones de relief sont donc perçues comme des zones fragiles et ayant un faible potentiel agronomique qu'ils doivent protéger.

Parmi les nouvelles pratiques adoptées, on peut citer :

- L'implantation d'espèces fourragères pour leur bonne capacité de couverture du sol sur les sols érodés (capim estrela africana et amendoim forrageira) ;
- Le recours au semis direct par la fazenda intensive (type 6) et l'écologiquement intensive (type 5). La fazenda intensive (type 6) va tester de produire en interculture du millet qui servira d'engrais vert, et de couverture dans lequel sera semé le soja ou maïs. Cette technique est couramment pratiquée par les éleveurs du Sud du Brésil (Paraná).
- Abandon des zones de relief et régénération forestière. Cependant, si ces zones sont jugées nécessaires pour l'autonomie fourragère, l'éleveur ne les abandonne pas, mais la gestion des repousses est moins rigoureuse et on peut voir apparaître des formations hybrides, avec un mélange de pâturage et de régénération régulièrement dégradées par le feu.

Extrait du discours éleveur familial consolidé : *« Sur les pentes, il faut tout couvrir. Sinon la pluie emporte tout, le pâturage, le sol. Le mieux serait d'implanter une espèce telle que le quicuio car il couvre bien le sol. Mais cette espèce est seulement adaptée aux bas-fonds »*[3].

[1] *"A terra, estamos só usando, está enfraquecendo. Estamos empurrando com a barriga. Vamos ter que gradear, adubar no plantio, instalar piquetes. Sem duvida, os pastos ficariam melhores. O problema é o custo".*

[2] "*Eu recupero o esterco do curralzinho e coloco nas hortas. Se puder, eu colocaria nos pastos, mas eu precisaria de carretas de esterco ! Fica mais complicado para espalhar e transportar. O adubo quimico é mais prático!"*

[3] *"Tem que cobrir todas as ladeiras. Se queimar e não plantar, a chuva leva tudo, o capim, a materia orgânica. O melhor seria de plantar quiquio nessas áreas porque ele cobre bastante o solo. Mas não adianta porque ele gosta de baixão e morre nas ladeiras".*

Extrait du discours éleveur écologiquement intensif : « *Le semis direct c'est une technique que nous devons utiliser en climat tropical compte tenu des conditions pluviométrique et solaire* »[1].

L'arbre

L'arbre a aussi une nouvelle place dans le système d'élevage. Pendant la phase de colonisation, la réserve forestière de l'exploitation était perçue comme une réserve de fertilité ainsi que de bois dans laquelle les exploitants prélevaient des grumes pour la vente ou la construction des clôtures, du corral. Désormais il s'agit d'une réserve qu'il s'agit de préserver pour respecter les normes environnementales et assurer plusieurs services écosystémiques.

Dans les pâturages, l'arbre est perçu positivement par les différents interviewés car il fournit de l'ombre au troupeau, produit du bois de valeur ou des fruits qui peuvent servir de compléments à l'alimentation des bovins (cas du cajou). Quatre éleveurs y voient aussi un moyen de réalimenter la matière organique du sol, et un éleveur estime que l'arbre permet de couper le vent.

Extrait du discours éleveur familial consolidé : « *L'ombre protège la terre et le troupeau. Les feuilles fertilisent le sol. Economiquement, c'est aussi intéressant car cela permet de produire deux ressources en même temps, de la viande et du bois* »[2].

Extrait du discours éleveur familial intensif : « *Je pense qu'il est bon de planter des arbres dans les pâturages pour l'ombre, le bois et le sol nous en remercient* »[3].

Toutefois, excepté dans la fazenda écologiquement intensive, nous constatons que la densité d'arbres dans les pâturages régénérés reste relativement faible. Les raisons qui ont été citées sont les suivantes : risques de compétition avec le pâturage et d'être cassés par le bétail, nécessité d'accroître la productivité fourragère pour compenser les pertes causées par les piétinements des bovins sous les arbres (ombre), absence de document de la terre, accès au crédit limité, risque d'incendie (un éleveur a déjà perdu 30 à 40 *ipê*[4] suite à un incendie).

3.3 De nouvelles projections dans les paysages

Cette partie vise à tester l'hypothèse selon laquelle le processus d'intensification induit une réorganisation spatiale des usages des sols et des pratiques qui vise pour les éleveurs à optimiser l'usage de multiples ressources naturelles, spatialement distribuées dans les paysages. Pour ce faire, nous nous intéresserons dans le 3.3.1 aux adaptations spatiales qu'ont mises en œuvre les éleveurs, Dans le 3.3.2, nous synthétiserons les variables décisionnelles

[1] *"O plantio direito é uma tecnologia que tem que ser usada em clima tropical por causa das condições de chuva e de sol".*

[2] "*A sombra protege a terra, o gado. As folhas adubam o chão. Economicamente é também interessante, porque permite de produzir dois recursos no mesmo tempo (gado e madeira)".*

[3] "Acho que é bom plantar árvores nos pastos para a sombra, a madeira, e o solo agradece".

[4] Espèce d'arbre native d'Amazonie

biophysiques et topologiques majeures qui guident la localisation des pratiques d'intensification.

3.3.1 Impacts de l'intensification sur l'organisation des usages des sols dans les paysages

Ces résultats sont le fruit d'une analyse croisée des trajectoires d'exploitation et des dynamiques de paysage. Une analyse diachronique est disponible dans l'Annexe 10 pour chaque cas d'étude. Nous avons distingué trois phases de cohérence pour lesquelles les dynamiques d'interaction élevage-paysage présentent des tendances similaires entre exploitations :

- Une phase d'expansion du système d'élevage extensif avec de substantiels changements d'usages des sols (3.3.1.1) ;
- Une phase de modernisation du système d'élevage et du système fourrager avec une nouvelle dynamique d'interaction paysage-élevage dans les fazendas (3.3.1.2) ;
- Une phase d'intensification avec des projets variés de réorganisation du système fourrager (3.3.1.3).

3.3.1.1 Phase de cohérence 1 : Installation et expansion du système d'élevage extensif : l'accès à l'eau et la distance dictent l'organisation des usages de sol

La première phase, commune à toutes les exploitations, correspond à l'expansion des surfaces en pâturage et à la croissance du troupeau bovin. Au moment de l'installation, les forêts primaires et/ou secondaires dominent largement les usages des sols, exceptées dans les fazendas de type 4 et 6 où une part significative de pâturages était déjà présente.
Durant cette phase, les intensités de conversion de forêt en pâturage sont variables. Les exploitations familiales ne défrichent généralement pas plus de quelques hectares par an alors que les fazendas défrichent plusieurs centaines d'hectares (jusqu'à 600 ha/an pour l'exploitation de type 5). Cette capacité de déforestation est liée au capital et à la quantité de main d'œuvre disponible. Dans les fazendas, l'accès à des capitaux externes et à des financements publics (BASA, SUDAM) ont favorisé une expansion rapide. Au contraire, les exploitations familiales ont peu de ressources financières disponibles. L'exploitation pionnière de type 1 a pratiqué pendant 7 ans l'agriculture itinérante sur brûlis en rotation sur de jeunes régénérations forestières (âgées de 3 à 4 ans) avant d'investir dans l'élevage et de convertir les régénérations forestières en prairies permanentes. Les exploitations de type 2 et 3 ont implanté des prairies à un rythme plus soutenu (autour de 10 ha/an) grâce à la disponibilité de ressources issues de la vente d'une ferme ou du travail salarié.

La forêt est alors perçue comme une réserve d'espace et de fertilité naturelle. Nous observons des déforestations systématiques dont la localisation spatiale est raisonnée selon l'une des logiques suivantes (éventuellement combinées) :

- Une expansion rectiligne d'une extrémité vers une autre de l'exploitation. L'appropriation du foncier et la distance (du plus proche vers le plus loin) sont les déterminants dans la logique d'organisation des usages des sols (exemple Figure 3-6).
- Une expansion priorisant les vallées et les dépressions, où s'écoule le réseau hydrographique, afin de profiter de l'eau superficielle pour l'abreuvement des bovins (Figure 3-7).
- Une expansion radiale du contour de l'exploitation vers son centre. Cette logique vise à protéger la réserve forestière. Les franges de pâturages démarquent le territoire et servent de barrière aux invasions.

L'accès à l'eau de surface (pour l'abreuvement du troupeau), la distance au siège d'exploitation ou aux routes et la présence de biomasse forestière sont les principales variables décisionnelles de localisation des défriches. Par contre, les facteurs pédologiques (type de sol, profondeur, capacité de drainage), la topographie et l'exposition au vent n'ont pas de poids dans les décisions.

Cette logique pionnière qui prend peu en compte la variabilité spatiale des conditions agro-écologiques donne lieu à des mosaïques d'usages des sols à trois composantes randomisées dans l'espace : i) des pâturages de graminées exotiques de grande taille (jusqu'à 200 ha dans les fazendas) gérés de manière extensive ; ii) des fragments forestiers en attente de déforestation ; iii) des parcelles en régénération forestière issues de la dégradation des pâturages et en attente de nouvelles conversions par le feu. Le feu est la principale technique de changement d'utilisation des sols et de gestion des repousses et touche tous les éléments paysagers. Cela aboutit aussi à la déforestation de zones sensibles sur le plan environnemental (ripisylve, relief) et pourtant protégées par le code forestier brésilien à travers les APP.

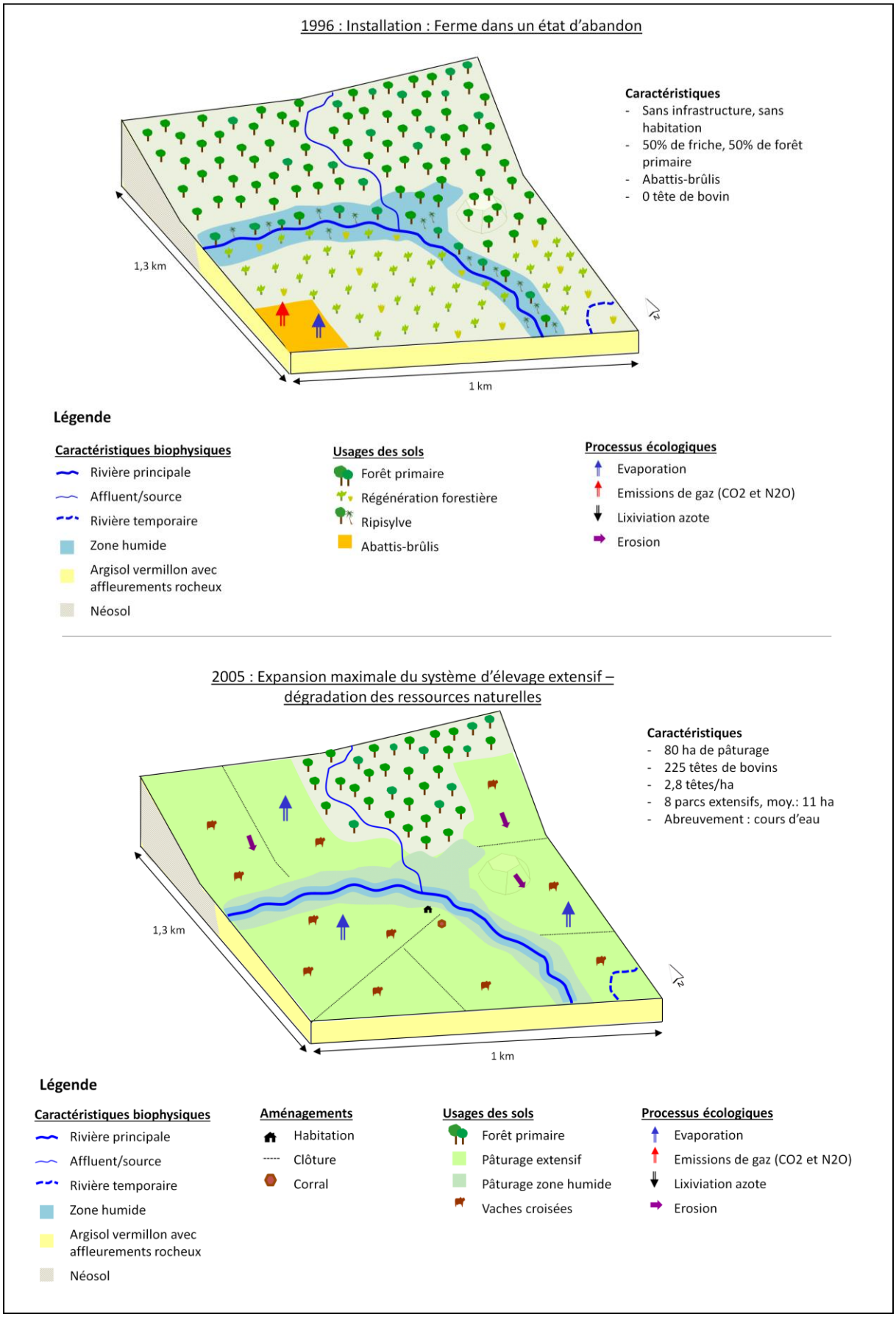


Figure 3-6 : Modèle paysager de l'exploitation familiale laitière intensive (type 3) en phase d'expansion L'expansion des surfaces en prairies au détriment des forêts s'effectue de l'avant vers l'arrière de la propriété.

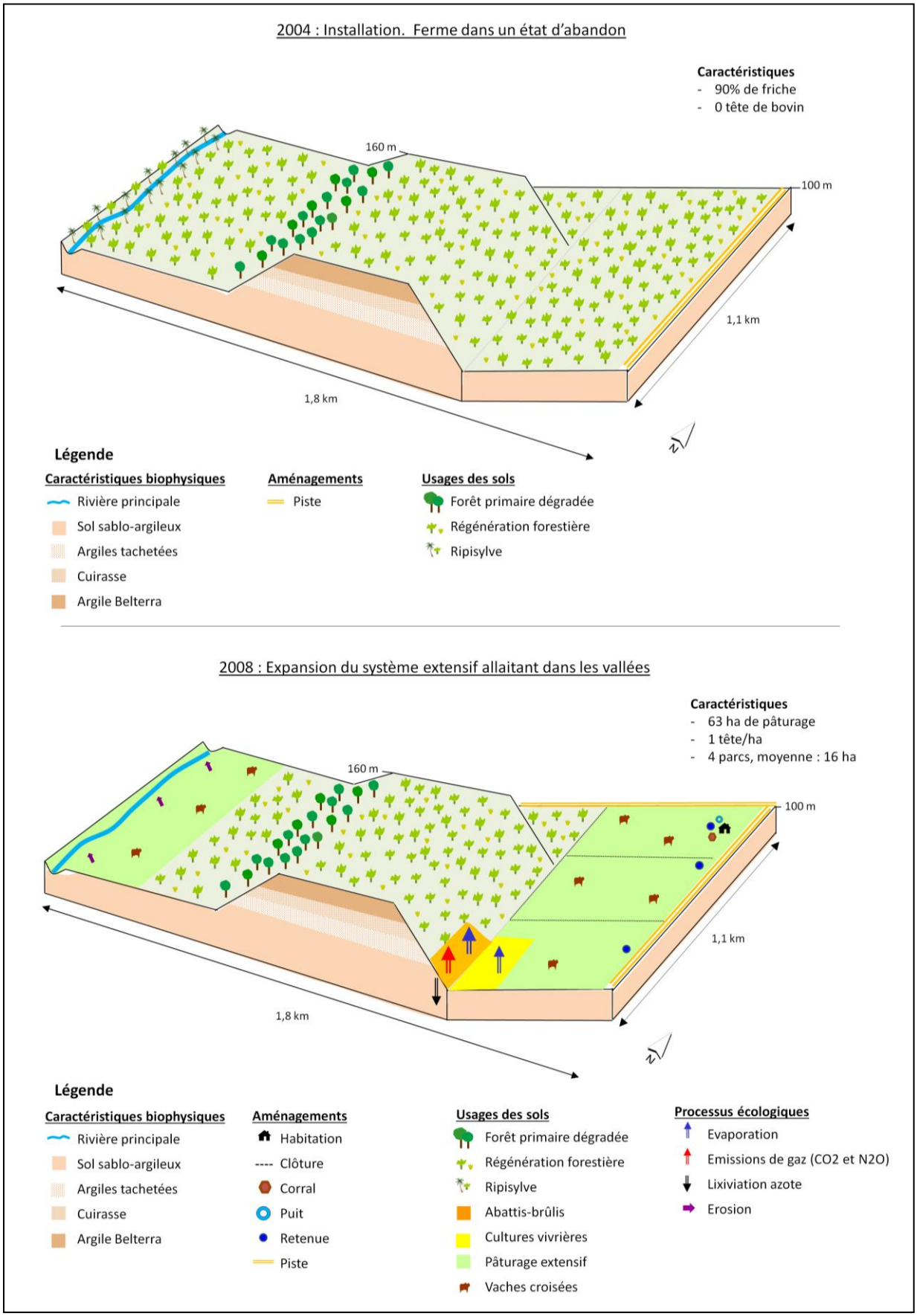


Figure 3-7 : Modèle paysager de l'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) en phase d'expansion
L'expansion des surfaces en prairies s'effectue en priorisant d'abord l'accès au cours d'eau.

3.3.1.2 Phase de cohérence 2 (fazendas) : Modernisation du système d'élevage, arrêt de la déforestation et régénération des prairies non mécanisables

Après cette phase d'expansion, nous avons observé une nouvelle phase de cohérence dans les fazendas. Les exploitants arrêtent de défricher et concentrent leurs investissements dans la réforme des pâturages dégradés. De plus, ils mécanisent le nettoyage des prairies et s'équipent pour ce faire de tracteurs et débroussailleurs. Cette phase correspond à un processus de modernisation du système d'élevage et d'adéquation aux normes environnementales.

La réforme des pâturages s'appuie sur des pratiques accessibles sur le plan technologique : semis de graminées plus productives et couvrant davantage le sol pour limiter les compétitions avec les repousses forestières, division des parcs, usage d'engrais riche en phosphore pour corriger les carences du sol. Les pâturages à réformer sont sélectionnés selon leur niveau de dégradation. A Paragominas, au début des années 2000, les fazendas bénéficient du développement de l'agriculture et de l'arrivée de producteurs de grains (maïs puis soja) et d'équipements du Sud du Brésil pour réformer certaines parcelles via l'intégration agriculture-élevage. Au niveau du troupeau, les éleveurs modernisent aussi la conduite, investissent dans la génétique en ayant recours à l'insémination artificielle et aux croisements industriels pour améliorer les performances animales (qualité bouchère et capacité reproductive en particulier).

Ces évolutions dans la conduite du système d'élevage amènent à de nouvelles dynamiques d'usages des sols. Du fait du recours à la mécanisation, les zones inaccessibles en tracteurs, notamment les collines, les versants escarpés et les rives inclinées des cours d'eau, ainsi que les sols hydromorphes, sont abandonnées. Un processus de régénération naturelle débute (Figure 3-8). De nouvelles variables biophysiques guident les décisions de localisation des usages des sols des éleveurs : la forme du relief et en particulier la pente et l'état de la végétation (niveau de dégradation des pâturages).

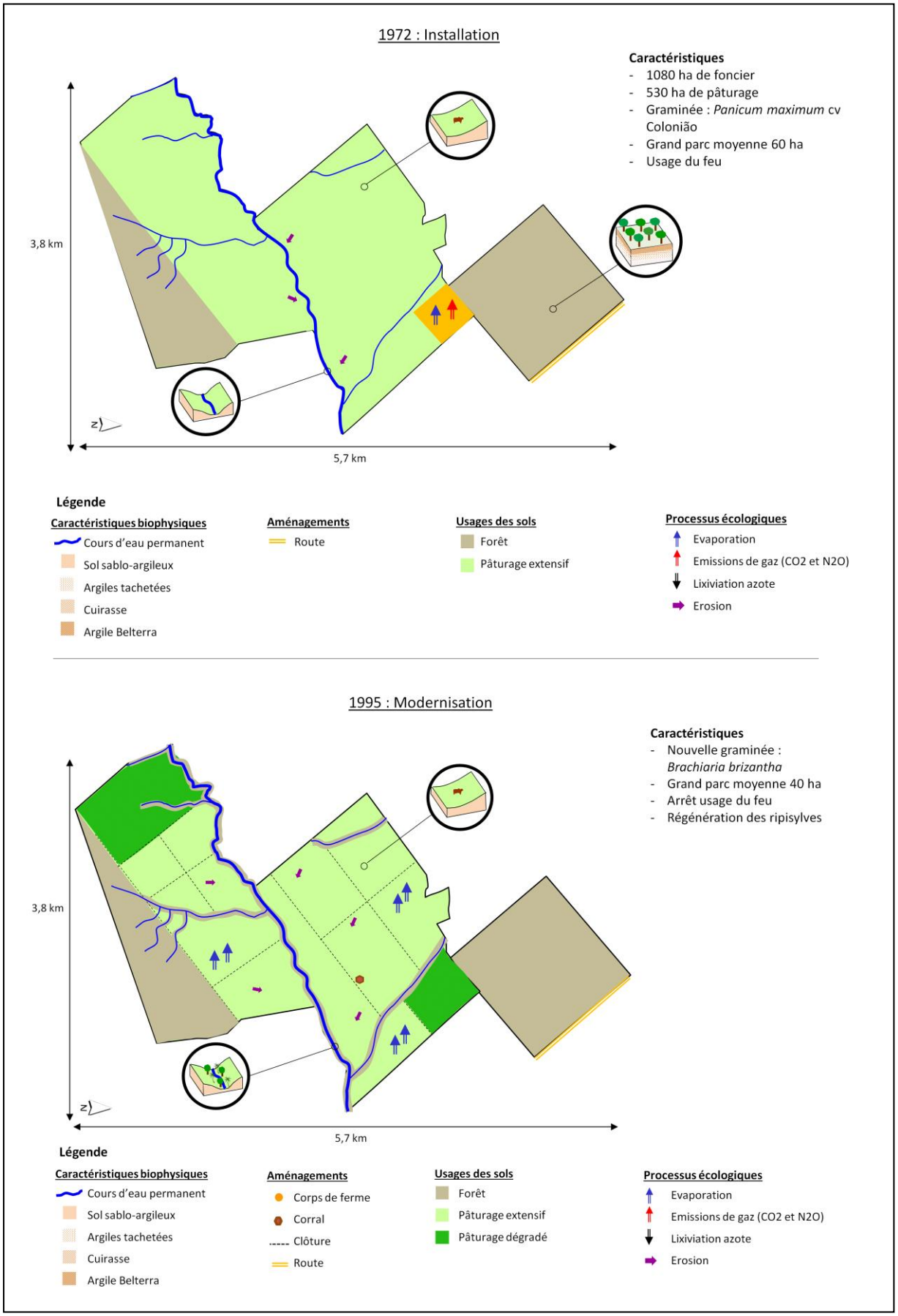


Figure 3-8 : Modèle paysager de la fazenda intensive en intrants (type 6) en phase de modernisation
Les usages des sols évoluent : régénération des ripisylves, réforme des prairies dégradées, division des parcs.

3.3.1.3 Phase de cohérence 3 : Intensification du système d'élevage : adaptation des usages à la diversité de paysages, diversification des modèles paysagers

Dans la phase de transition agraire actuelle, nous observons de nouvelles adaptations et une réorganisation différentiée des usages des sols en fonction des caractéristiques des paysages de chaque exploitation et du projet d'intensification.

3.3.1.3.1 Type 1 (pionnier) : avancée des pâturages et diversification des usages des sols

Du fait de la faible surface de l'espace agricole, le projet du type 1 pionnier est basé à la fois sur une expansion et une intensification. Tout d'abord, les exploitants planifient d'agrandir l'espace productif dans la réserve forestière dégradée (de 35 à 70 % de la surface du lot) afin de produire plus et de pouvoir agrandir la taille du troupeau. De plus, ils envisagent de diversifier l'usage des sols vers des activités à plus forte valeur ajoutée (pisciculture, maraîchage irrigué, lait). Enfin, ils projettent de mettre en place des pratiques de conduite du système fourrager plus intensive (travail du sol, fertilisation, division des parcs, couloir d'accès au cours d'eau, construction d'un corral).

Dans leur projet, l'aménagement du paysage repose sur une plus grande valorisation des ressources hydriques et du relief. Les prairies occupent les versants ondulés pour assurer une couverture permanente du sol et limiter les problèmes d'érosion hydrique. Les cultures annuelles et pérennes sont implantées sur les reliefs peu marqués pour être mécanisées et à une faible distance des cours d'eau pour être irriguées en saison sèche. Elles sont également éloignées de la réserve forestière et encerclées de pâturage pour limiter les risques de dégâts de gibier. Les bassins de pisciculture sont installés en fond des vallées pour valoriser la présence d'eau résiduelle. Ce projet génèrerait une mosaïque paysagère organisée pour s'adapter à la diversité d'unités géomorphologiques et aux conditions pédologiques (Figure 3-9).

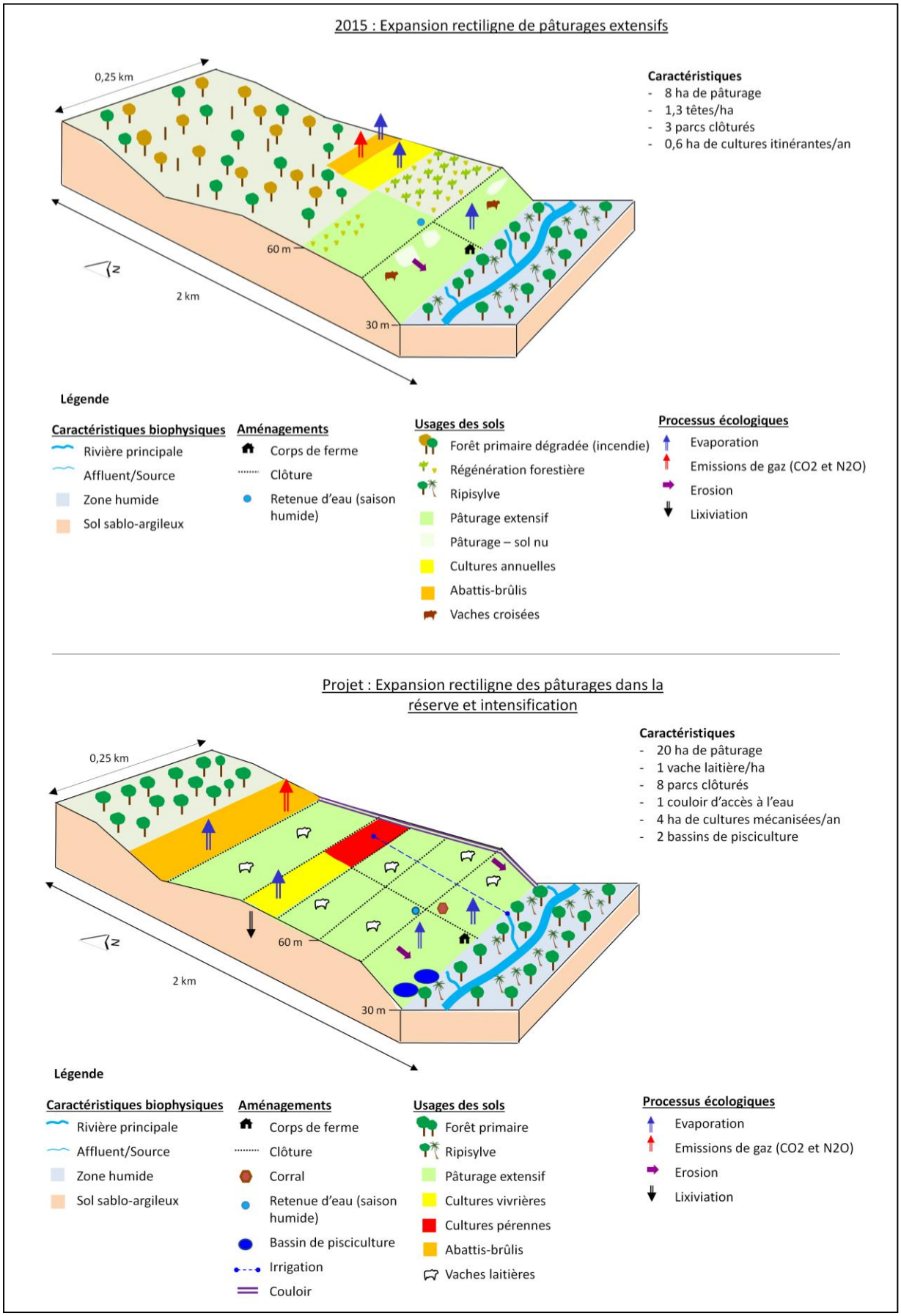


Figure 3-9 : Modèle paysager de l'exploitation familiale pionnière (type 1) en phase d'intensification
Cette exploitation prévoit une expansion de l'aire productive et une réorganisation des usages des sols.

3.3.1.3.2 Type 2 (extensive consolidée) : intensification bas niveau d'intrants limitée dans l'espace

Le projet d'intensification de cette exploitation repose sur un faible usage d'intrants sur un espace limité. Les éleveurs justifient leur stratégie pour trois raisons. Premièrement, ils ont peu de ressources économiques disponibles pour réformer les 100 ha de pâturages disponibles (impossibilité d'accéder au crédit, capital limité). Deuxièmement, ils sont proches de la retraite et aucune reprise familiale n'est prévue. Troisièmement, le risque d'incendie est important. Le retour sur investissement dans l'intensification est donc incertain.

Plusieurs facteurs ont récemment conduit à une dégradation rapide des pâturages : incendies, épisodes de sécheresse à répétition et invasion de chenilles (*lagarta*). Les exploitants ont donc prévu de réformer les prairies les plus dégradées à court terme. L'idéal serait de travailler le sol puis de semer une graminée. De plus, si les étés continuent à être aussi secs, les exploitants nous ont confié qu'il faudrait irriguer certains paddocks, produire ou acheter du fourrage (tels que du maïs, sorgho, herbe à éléphant) et diviser davantage les prairies. Mais pour l'instant le manque de ressources ne leur permet que de débroussailler les prairies les plus dégradées et de recourir au pâturage.

Les distances et la facilité d'accès aux prairies constituent les principaux déterminants dans la localisation des pratiques d'intensification (Figure 3-10). Toutefois, leurs perceptions sur les ressources naturelles et les paysages comptent également dans leurs décisions. Les exploitants perçoivent des problèmes d'érosion sur les pentes et en bordure de cours d'eau ce qui les amènent à mettre en place des pratiques pour mieux protéger les sols et l'eau (éviter que le cours d'eau ne s'assèche). Outre la régénération naturelle de la ripisylve, ils prévoient de la clôturer, planter des espèces natives et faire un coupe-feu pour éviter la propagation des incendies du pâturage vers la forêt riparienne. Outre l'accès à l'abreuvement, l'eau devient capitale dans le système de production. Ils envisagent d'irriguer les cultures pérennes telles que le poivre. Les exploitants perçoivent enfin une hétérogénéité des sols (sables dans les vallées, gravillons et pierres sur les versants, argile sur le plateau) sans pour autant en tenir compte dans leur décision de localisation. Ils notent que les pâturages dans les vallées résistent plus longtemps à la sécheresse que ceux sur les versants et le plateau, et que les graminées ont moins bien germiné sur les pentes que sur les plaines et plateaux.

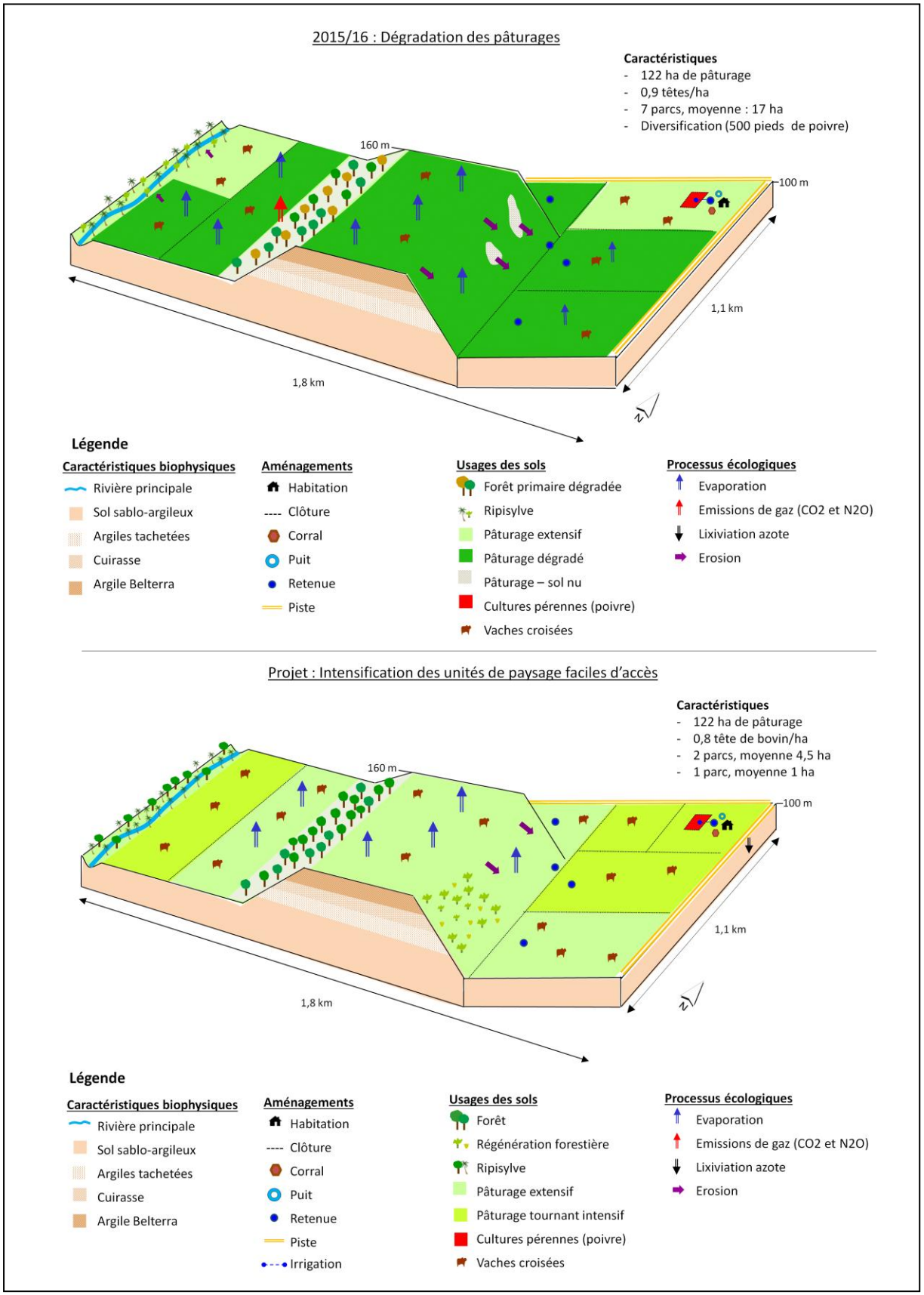


Figure 3-10 : Modèle paysager de l'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) en phase d'intensification. Le projet de cette exploitation est de réformer les pâturages dégradés et de mener une conduite plus intensive sur les parcelles proches du siège de l'exploitation et qui ont un accès direct à l'eau de surface.

3.3.1.3.3 Type 6 (intensif viande) : intensification haut niveau d'intrants et maintien de l'espace cultivé (*land-sparing*)

La fazenda intensive, haut niveau d'intrants, type 6 a pour projet d'augmenter le potentiel de production en ayant recours à des pratiques plus intensives en intrants chimiques et en énergie dans l'espace actuel, et de préserver la végétation naturelle sur le reste de l'exploitation. Cela donne lieu à des paysages qualifiés dans la littérature de « *land-sparing* », qui allient des espaces agricoles intensifiés avec un haut niveau de production et de larges zones de protection de la nature.

Ses projets sont basés sur un plus grand recours aux intrants et à des investissements en infrastructures :

- Privilégier le pâturage tournant intensif sur de plus petites parcelles ;
- Implanter un module de 30 ha de pâturage fertirrigué pour permettre la production de fourrage en vert même en saison sèche ;
- Développer une activité d'engraissement de taurillons, construire un parc d'engraissement et produire la farine nécessaire à leur alimentation ;
- Tester des graminées plus productives (comme par exemple l'Aruana), et éventuellement des espèces riches en protéines ou résistants mieux à la sécheresse (certaines légumineuses) ;
- Planter des arbres coupe-vent (2200 plants) en bordure et/ou dans les parcs pour réduire l'évapotranspiration dans les pâturages exposés au vent en saison sèche ;
- Investissement dans des aménagements visant à protéger la qualité de l'eau et à préserver les berges des cours d'eau : abreuvoirs avec couloirs d'accès, clôture pour mise en défens des ripisylves ;
- Poursuivre l'amélioration de la génétique du troupeau sur les critères de morphologie et de qualités maternelles.

Compte tenu de l'investissement financier que ce type d'intensification représente, l'éleveur positionne les pratiques à des lieux stratégiques de l'exploitation. Les décisions de localisation deviennent à la fois déterminées par des facteurs biophysiques et topologiques ce qui les rend bien plus complexes que par le passé (Figure 3-11).

Premièrement, les pratiques sont localisées de manière à mieux valoriser l'eau bleue et l'eau verte. L'exploitant prévoit d'installer les pâturages fertirrigués dans la vallée pour bénéficier de la proximité du réseau hydrographique pour les irriguer. L'exposition des parcelles au vent devient aussi déterminante pour installer les arbres brise-vent.

Deuxièmement, l'éleveur considère davantage le relief, les caractéristiques physiques des sols (capacité de drainage, type de sol) et les caractéristiques chimiques (priorité aux sols moins sensibles au risque de lessivage). Cet éleveur a laissé se régénérer naturellement les zones dont la topographie est défavorable à la mécanisation (berges des cours d'eau, légère

dépression où ruisselle temporairement l'eau en saison des pluies). En ce qui concerne la localisation des prairies et des cultures, la fazenda (type 6) dédie les plateaux argileux aux cultures annuelles mécanisables, les versants sablo-argileux aux graminées exigeantes (*panicum Maximum cv Mombaça*), et elle maintient des espèces plus rustiques (*Brachiaria brizantha*) sur les affleurements de cuirasse latéritique. Elle a aussi pour projet d'installer le parc d'engraissement sur les affleurements de cuirasse pour profiter des propriétés physiques de ces sols (bien drainés, ils ne génèrent pas de boue en saison des pluies) et de relief (la pente légère à moyenne permet de récolter facilement les déjections par gravité qui pourront être épandues dans d'autres parcs).

Troisièmement, les critères de distance et d'accessibilité deviennent prépondérants. Les pâturages tournants intensifs sont implantés à proximité du siège de l'exploitation pour une meilleure surveillance. Les fourrages destinés à être stockés (ensilage de canne ou maïs) sont implantés plus près du corral, salle de traite et du parc d'engraissement pour faciliter les flux de fertilité (épandage des déjections) et leur distribution (alimentation).

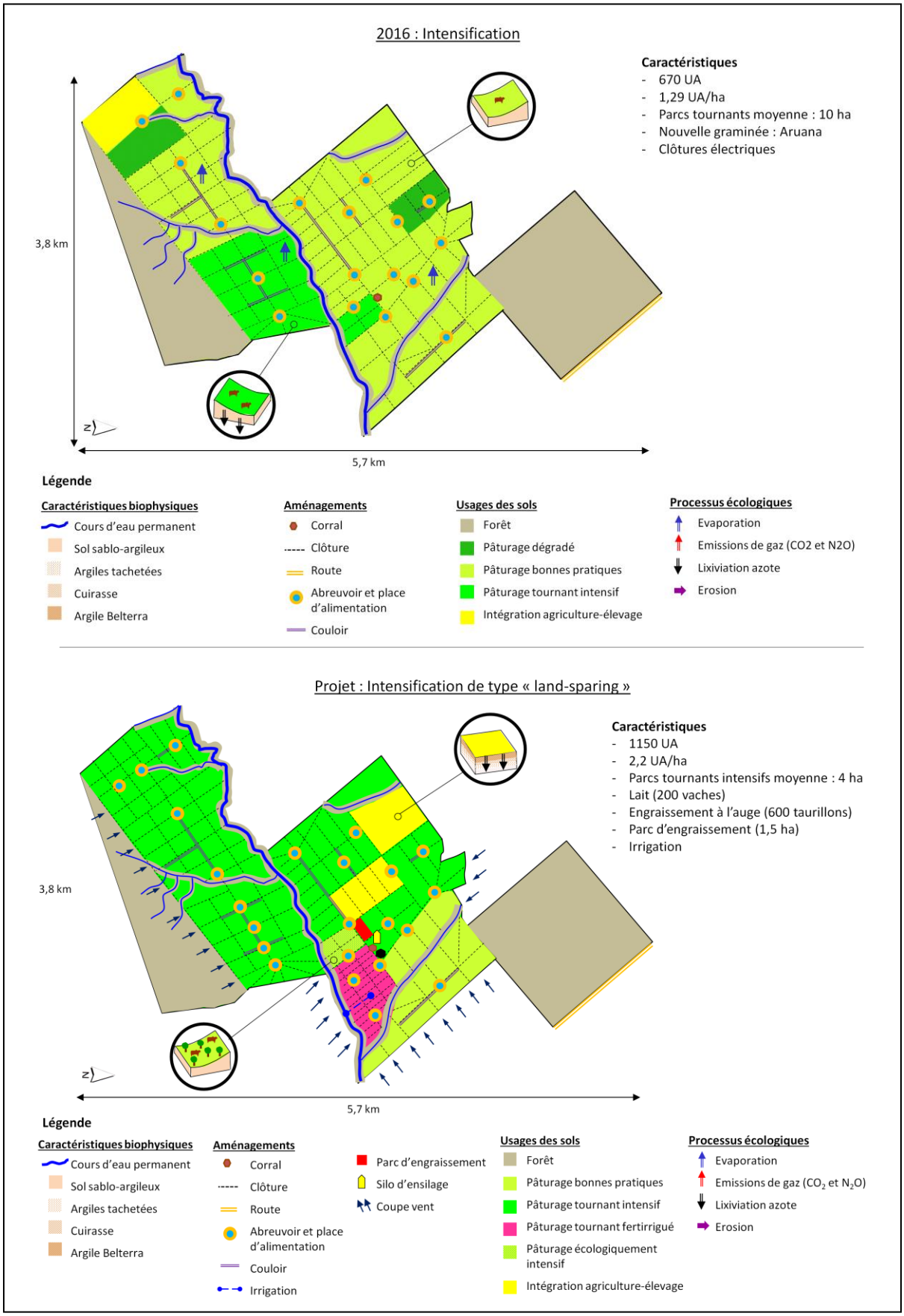


Figure 3-11 : Modèle paysager de la fazenda viande intensive (type 6), projet *land-sparing*
Le projet de cette exploitation est de continuer à accroître la productivité de ses prairies pour atteindre une capacité de charge de 2 UA/ha.

3.3.1.3.4 Type 3 (intensif lait) : intensification haut niveau d'intrants limitée et réduction de l'espace cultivé (*land-sparing*)

L'exploitation familiale intensive, type 3, a un projet similaire à la fazenda de type 6. Elle souhaite accroître la productivité de ses pâturages ainsi que la taille de la réserve forestière.

Ses projets sont de :

- Intensifier la production sur 30% de la surface de l'exploitation et agrandir la réserve forestière sur une surface équivalente à 70% ;
- Privilégier le pâturage tournant intensif sur de plus petites parcelles ;
- Implanter un module de 2 ha de pâturage fertirrigué pour subvenir aux besoins des vaches en lactation en saison sèche ;
- Produire de l'ensilage (maïs ou canne) pour la complémentation des vaches en lactation en saison sèche ;
- Tester des graminées plus productives (comme par exemple Tifton) ;
- Investissement dans des aménagements visant à protéger la qualité de l'eau et à préserver les berges des cours d'eau : abreuvoirs avec couloirs d'accès, clôture pour mise en défens des ripisylves ;
- Se diversifier davantage dans des productions à haute valeur ajoutée telles que la pisciculture, l'élevage de volailles, la vente directe de maïs épis ;
- Poursuivre l'amélioration de la génétique du troupeau.

De même que pour la fazenda, une réorganisation des usages des sols est en projet, dictés par des facteurs biophysiques et topologiques (Figure 3-12) :

- Installation des pâturages fertirrigués dans les vallées et à proximité du siège de l'exploitation et du corral pour une meilleure surveillance des vaches en lactation et réduire leurs déplacements quotidiens ;
- Implantation des fourrages destinés à être stockés (ensilage) près des pâturages fertirrigués pour faciliter les flux de fertilité (épandage des déjections) et de la salle de traite pour faciliter leur distribution (alimentation).
- Intensification des parcelles présentant les meilleures caractéristiques morphopédologiques : l'exploitation réserve les cultures mécanisées aux parcelles de faible pente et sans affleurement rocheux alors que les parcelles avec une pente faible à moyenne et des affleurements rocheux sont réservées aux prairies ;
- Régénération forestière sur environ 70% de la surface de l'exploitation incluant des zones inaptes à la mécanisation (relief, faible capacité de drainage, sols avec des affleurements rocheux), éloignées et dont l'accès à cheval ou à pied est rendu difficile par la présence d'un obstacle naturel (zone très marécageuse qui est un habitat de la *sucuri amarela*, anaconda jaune).

L'objectif de cette réorganisation est d'assurer une meilleure surveillance des animaux et réduire le linéaire de clôture et donc les coûts d'entretien. La conservation de forêt vise à améliorer le bien être de la famille et la fourniture de services écosystémiques de régulation.

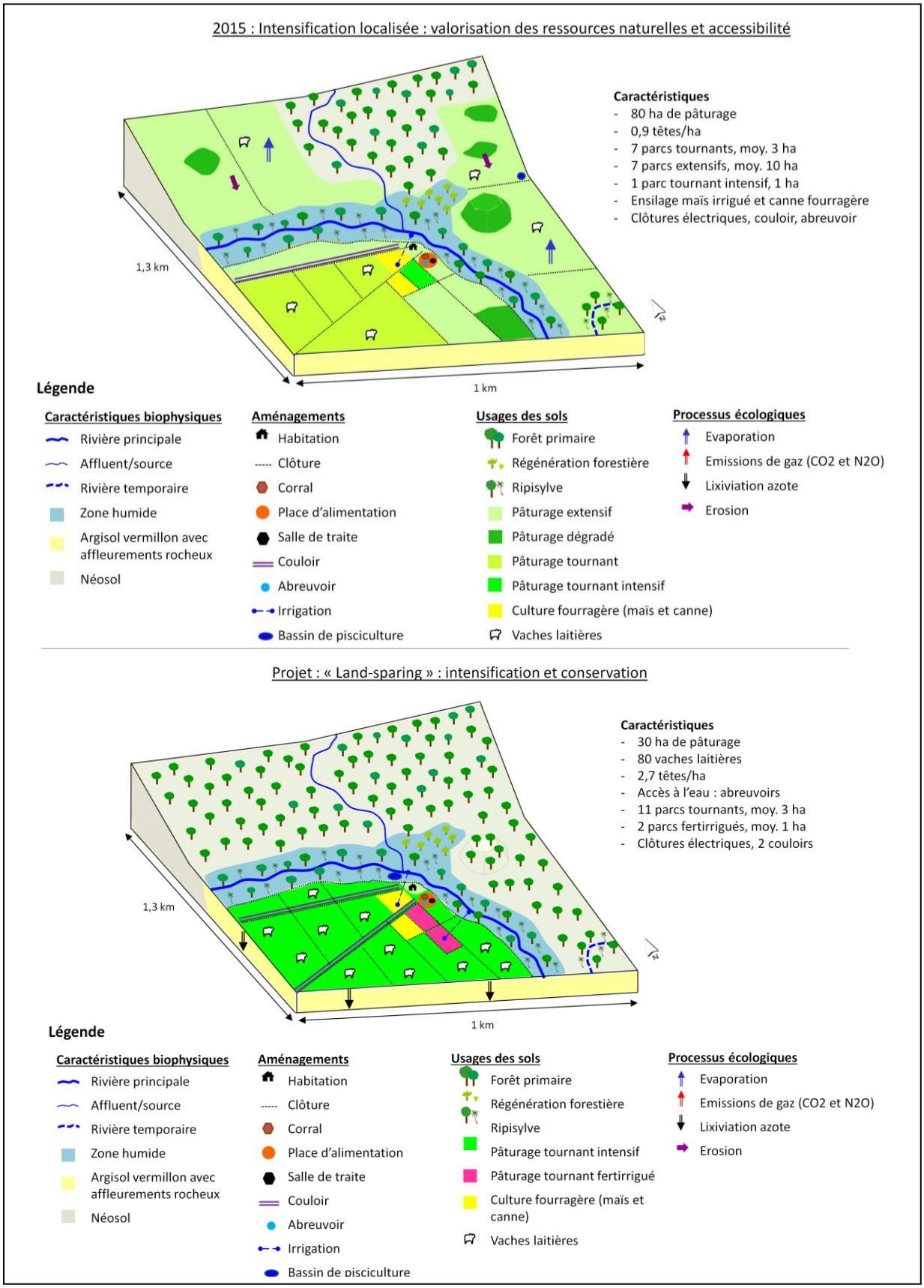


Figure 3-12 : Modèle paysager de l'exploitation laitière intensive (type 3), projet *land-sparing*
Le projet de cette exploitation est d'intensifier la production sur les espaces à plus fort potentiel (30% de la taille de l'exploitation) et de protéger des zones dégradées ou à plus faible potentiel (sur une surface équivalente à 70%).

3.3.1.3.5 Type 5 (intensification écologique) : une intensification bas niveau d'intrants sur de vastes espaces (*land-sharing*)

Un autre modèle d'intensification privilégie non pas de hauts niveaux de productivité sur des surfaces limitées, mais un renforcement des mécanismes écologiques sur toutes les surfaces agricoles déjà converties. Cette stratégie s'apparente au « *land-sharing* ». C'est la stratégie choisie par l'exploitation de type 5.

Dans cette fazenda, la surface est d'une telle dimension que le recours à des techniques intensives en intrants sur l'ensemble de la surface nécessiterait de forts besoins en trésorerie et en main d'œuvre et une adaptation des infrastructures. De plus, l'exploitant ne souhaite pas concentrer ses investissements sur certaines surfaces au détriment d'autres. Il veut maintenir en production la surface qui a déjà été défrichée à cause de leur bon potentiel agronomique et de la plus value foncière. En effet, réduire la surface agricole utile de l'exploitation pourrait entraîner une diminution de sa valeur. Par ailleurs, l'exploitation a déjà une très grande surface en forêt qu'elle espère pouvoir un jour rémunérer à travers le marché des crédits carbone.

Plusieurs pratiques peu coûteuses et nécessitant peu d'intrants visent une meilleure gestion des processus écologiques dans les paysages :

- Régénération naturelle d'arbres de valeur dans les pâturages. L'arbre a un rôle central dans la fazenda. Outre le maintien de grands blocs de réserve forestière, l'exploitation adopte cette pratique pour fournir de l'ombre au troupeau et pour créer un patrimoine économique. Involontairement, cela favorise la construction de paysages « rugueux » freinant le vent et le ruissellement.
- Régulation de la charge adaptée à chaque parc et gestion fine de la hauteur d'herbe résiduelle après pâturage afin d'assurer le recyclage de la matière organique, une bonne couverture du sol et limiter les risques d'érosion ;
- Régénération de légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique et enrichissent le fourrage en protéines ;
- Abandon des pâturages sur les berges des cours d'eau non mécanisables permettant la régénération de corridors biologiques.

L'exploitation a également mis en place un vaste programme de réforme pour améliorer la production fourragère (9 000 ha de pâturage ont été réformés en 5 ans) et pouvoir ainsi accroître la taille du troupeau. De plus, les épisodes de sécheresse toujours plus marqués l'ont conduit à utiliser des rations protéinées pour la phase d'engraissement des bœufs en saison sèche. Parallèlement aux améliorations dans la conduite des pâturages, la fazenda a investi dans l'amélioration génétique de son troupeau et le suivi individuel des animaux.

Ses projets d'intensification sont de cultiver du maïs et du sorgho sur une surface lui permettant de devenir autonome, de tester le pâturage tournant intensif pour l'élevage des

jeunes bovins (de 8 à 18 mois), d'accroître de 50% la taille du troupeau allaitant pour atteindre 30 000 têtes dont 10 000 matrices en 6 ans, d'accroître le GMQ, de développer la production laitière (objectif 200 vaches laitières) et d'investir dans la vente directe.

Au niveau des interactions paysage-élevage (Figure 3-13), cette stratégie d'intensification donne lieu à une organisation spatiale des usages des sols relativement homogène dans les paysages. Contrairement aux précédents types, il y a moins de variabilité spatiale dans la taille des parcs par exemple. La taille moyenne des paddocks est de 45 ha quel que soit le *retiro*[1]. Le plus grand parc mesure 90 ha, le plus petit 8 ha et l'écart type est de 15.

Selon le type de pratiques, les variables décisionnelles sous-tendant leur localisation sont différentes :

- **Réforme des prairies** : l'état de dégradation des prairies et la taille du paddock sont les principales variables (plus le paddock est grand et la prairie dégradée, plus il a de chances d'être réformé). Le relief est aussi une variable clé puisque les zones non mécanisables en particulier les bordures de cours d'eau sont abandonnées.
- **Choix des espèces fourragères** : l'éleveur adapte le type de graminées à la topographie et à la capacité de drainage des sols. Sur les versants bien drainés, 50% des prairies sont composées de *Brachiaria brizantha cv*. Xaraés (MG5) en association avec du *panicum Maximum* cv Mombaça. Dans les fonds inondables en saison humide, l'exploitation a implanté du *Brachiaria humidicola* (quicuio da Amazônia) pour sa résistance aux excès d'eau.
- **Cultures annuelles** : Les variables biophysiques sont primordiales. Le passage de machines agricoles implique de sélectionner des parcelles avec peu de pente, une bonne capacité de drainage, et où toutes les souches d'arbres ont déjà été éliminées. Les variables topologiques le sont également. L'exploitation privilégie les parcelles de taille suffisamment grande, de forme régulière (éviter une forte densité d'APP), et facile d'accès avec des engins agricoles (piste de bonne qualité, proximité du siège).
- **Allotement des animaux** : Pour certains types de bovins, la distance aux infrastructures est essentielle. Ainsi, les bœufs sont engraissés à proximité du siège de l'exploitation pour faciliter le suivi (pesée, complémentation) et de la route pour faciliter le chargement lors de la vente (les bovins n'ont pas besoin de beaucoup se déplacer).

[1] Compte tenu de la taille de la fazenda, l'exploitation est divisée en *retiro* qui correspond à une unité de gestion avec son propre vacher et une certaine orientation (naisseur, éleveur ou engraisseur).

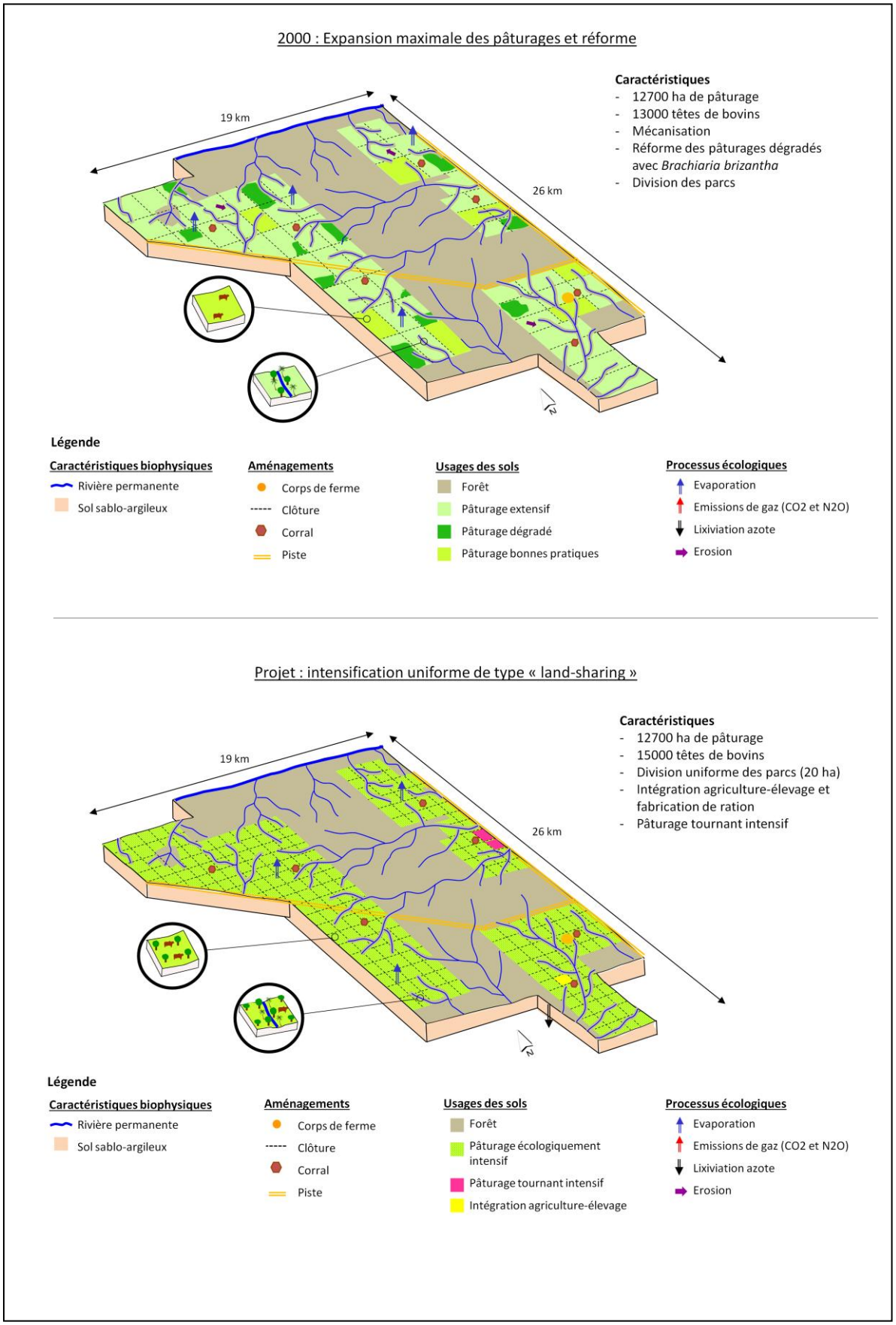


Figure 3-13 : Modèle paysager de la fazenda intensification écologique (type 5), projet *land-sharing*
Cette fazenda projette d'accroître la capacité de charge de ses prairies par des pratiques plus écologiques tout en maintenant la surface agricole actuelle.

3.3.1.3.6 Type 4 (extensif sans feu) : Arrêt de l'élevage, diversification dans le soja

Le dernier modèle d'intensification existant se caractérise par un arrêt de l'élevage et une spécialisation dans l'agriculture donnant lieu à de nouveaux paysages binaires soja et forêt. C'est la stratégie adoptée par la fazenda extensive sans feu (type 4).

Dès le début de nos enquêtes, ce fazendeiro nous avait confié vouloir intensifier l'élevage en réformant petit à petit les pâturages qui se dégradaient (fertilisation, division) et en améliorant la génétique et la taille du troupeau. Cependant, entre 2015 et 2016 plusieurs évènements ont conduit le fazendeiro à abandonner totalement cette activité. Deux sécheresses successives (été 2015 et 2016) couplées à des invasions de chenilles *(lagarte*) ont dégradé rapidement les pâturages, nécessitant de réformer près de 4 000 ha. Ses capacités financières ne le permettant pas, sur 9 955 ha, le fazendeiro a décidé de vendre la moitié de ses terres (4 375 ha) et de mettre en location 2 300 ha pour la culture de soja (le reste du foncier correspondant à la réserve forestière). Tous ces employés ont pu être réaffectés à de nouvelles tâches. Le fazendeiro recevra un loyer bisannuel pendant 10 ans, sans risque financier (sans investissement) et « *sans rien faire* ». Il estime en plus que la culture de soja permettra de restaurer à terme la fertilité chimique de ses sols (application de calcaire et de fertilisants NPK). Avec le capital de la vente et de la location, le fazendeiro pense investir dans des fazendas de taille plus modeste (environ 1 000 ha) et des activités à plus forte valeur ajoutée (açaí, pisciculture). Il pense que l'intensification est plus facile à maîtriser à cette échelle.

Ce changement d'usages des sols est assez étonnant puisque cette situation agraire (dépression du Rio Gurupi avec des sols de texture sablo-argileuse et une forte densité en APP) est beaucoup moins propice à la culture de soja que d'autres situations agraires (telles que la 6). C'est l'indisponibilité de plateaux argileux dans le couloir d'intensification qui ont poussé les agriculteurs à commencer à investir dans cette zone, d'autant plus que des programmes d'expérimentation sont en cours pour trouver les variétés les plus adaptées à ces conditions géomorphologiques et pédologiques.

Compte tenu de l'uniformité des unités géomorphologiques dans cette situation agraire, ce sont les critères d'accessibilité et de proximité qui ont prévalu dans les décisions de l'éleveur. En effet, le fazendeiro a mis en location les terres les plus proches de la BR-010 (qui correspondaient également aux parties de la fazenda les plus modernisées) et a vendu celles qui en étaient le plus éloignées (Figure 3-14).

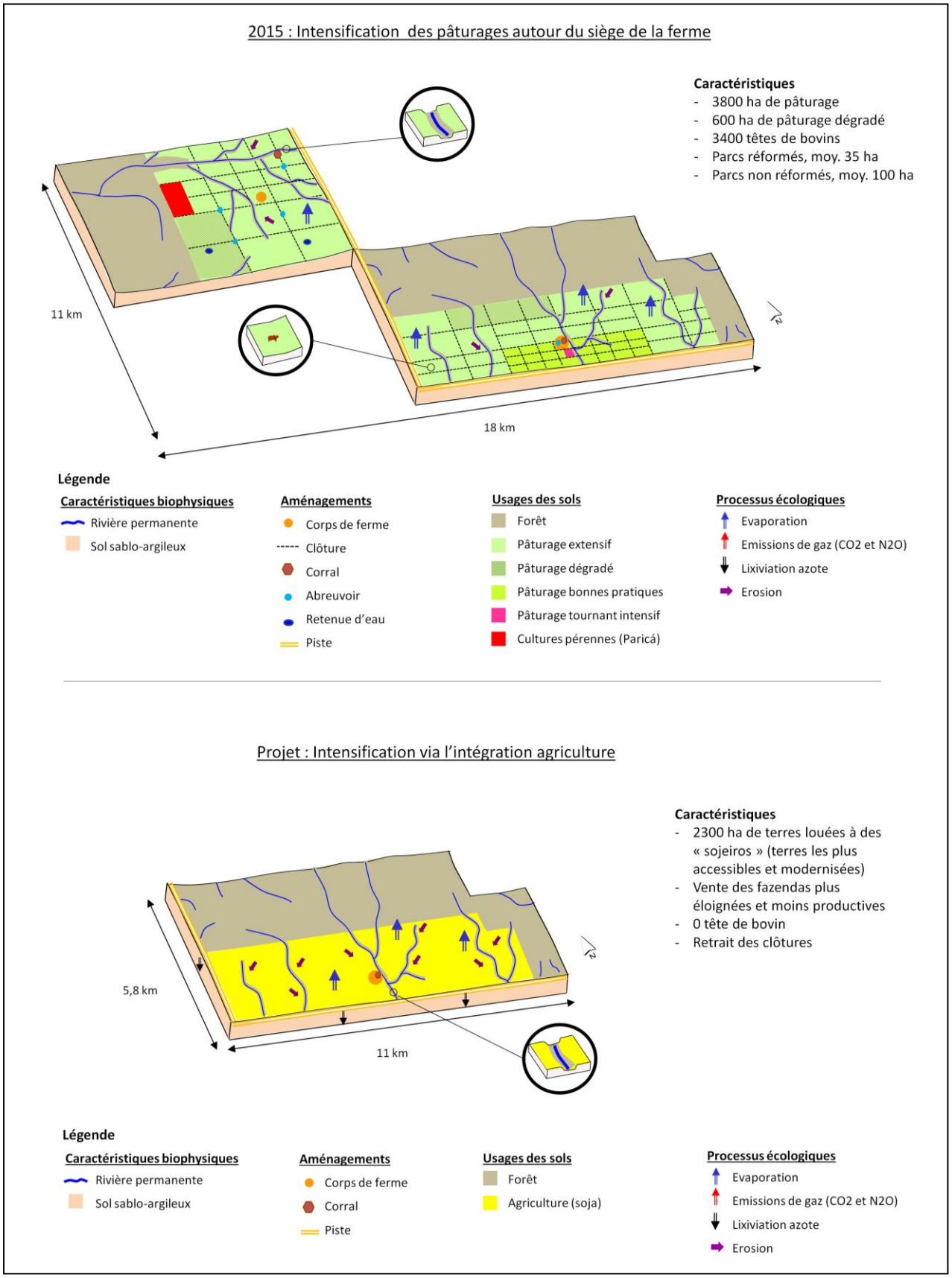


Figure 3-14 : Modèle paysager de la fazenda extensive (type 4) en phase d'intensification via l'intégration avec l'agriculture. Suite à une crise des pâturages, cette exploitation a préféré arrêter l'élevage, vendre la moitié du foncier et en louer une autre partie à des producteurs de soja.

3.3.2 Déterminants de la localisation des pratiques d'intensification

Nous synthétisons ci-dessous les principaux déterminants biophysiques et topologiques influençant la localisation des principales pratiques d'intensification. Nous avons regroupé ces pratiques selon le type de ressources naturelles qu'elles influencent. Le Tableau 3-2 résume les différentes variables et critères de décision qui seront utilisés pour élaborer les règles de décisions des agents dans le modèle SMA. A la fin de cette partie, plusieurs planches photos appuieront et illustreront nos propos.

Déterminants pour les pratiques permettant de mieux gérer l'eau bleue

La principale pratique relative à la gestion de l'eau bleue concerne la régénération des ripisylves. En dehors du fait que cette pratique soit imposée par le code forestier, la topographie (rives inclinées) et le drainage (présence d'eau résiduelle dans les sols) sont les principaux déterminants biophysiques qui poussent les éleveurs à les régénérer.

Déterminants pour les pratiques permettant de mieux gérer les risques d'érosion

Les pratiques d'agriculture de conservation telles que le semis direct et les intercultures sont localisées sur les unités géomorphologiques mécanisables (plateau, glacis), dont les pentes sont faiblement à moyennement inclinées, et les sols ayant une bonne capacité de drainage, de texture argileuse et sans pierre.

Les agriculteurs peuvent aussi choisir d'implanter du pâturage sur des unités géomorphologiques au relief ondulé (versant découpé, colline marquée) car leur couverture permanente du sol assure une fonction anti-érosive par rapport aux cultures annuelles.

Les unités morphopédologiques[1] qui présentent de faibles aptitudes agronomiques et qui ne sont pas mécanisables du fait de leur relief (forte inclinaison), du type de sol (faible fertilité, présence de pierres), de leur taille (petites parcelles), de leur forme (exiguë) ou de difficultés d'accès (obstacles naturels) sont le plus souvent laissées en friches, permettant une rapide restauration forestière .

Déterminants pour les pratiques permettant de mieux gérer l'eau verte

Les variables biophysiques suivantes deviennent déterminantes :

- La topographie et le drainage : Il s'agit de réserver les pratiques qui ont besoin d'être mécanisées et fertilisées (banques de protéines, irrigation, pâturage tournant, division des pâturages, culture pour la complémentation) aux parcelles les plus planes et globalement bien drainées. On notera que pour récupérer les déjections, une légère inclinaison est nécessaire au niveau du parc d'engraissement.
- L'accès au réseau hydrographique ou la profondeur de la nappe phréatique : L'accès à l'eau souterraine ou superficielle est essentiel pour l'irrigation de pâturage tournant intensif, de cultures annuelles et pérennes, ainsi que l'installation d'abreuvoirs dans les paddocks divisés. Pour limiter le réseau de distribution de l'eau ou les coûts de

[1] Combinaison de la géomorphologie et de la pédologie

prélèvements de la nappe, les éleveurs privilégient les unités géomorphologiques de vallée et bas de versant.

- La présence de pierres et de graviers peut être un défaut pour de nombreuses pratiques intensives. On notera que pour le confinement, la localisation sur la cuirasse est privilégiée pour éviter la formation de boues.

L'accessibilité, les distances et la forme des parcelles deviennent également des variables décisionnelles de poids :

- La distance aux bâtiments d'élevage : principalement du corral où sont triés les animaux et d'où sont récupérées les déjections pour les épandre sur les parcelles gérées plus intensivement (parc tournant, culture fourragère, banque de protéine, confinement).
- Voisinage des parcs : Les pratiques nécessitant un investissement financier important (pâturage tournant, irrigation, Système SylvoPastoraux, cultures pérennes) sont localisées à l'abri du risque d'incendie.
- Forme des parcelles : Les parcelles de forme irrégulière peuvent présenter une contrainte pour le passage de machines agricoles.
- Taille des parcelles : Cette variable est prise en compte dans la division des pâturages.

Pour deux pratiques seulement (la régulation de la charge animale et le semis dense de pâturage), les décisions de localisation sont raisonnées indépendamment des caractéristiques de paysage.

Déterminants pour les pratiques permettant de mieux gérer la fertilité

Trois types de variables biophysiques sont importants pour ces pratiques :

- La topographie et la capacité de drainage des sols compte tenu de l'usage de machines agricoles (réforme des parcs, pâturages tournants intensifs).
- L'état de la fertilité chimique, la texture des sols et la présence de pierres influencent la localisation des usages. Les éleveurs privilégient les sols argileux, fertiles et sans pierre aux cultures annuelles, pérennes et au pâturage tournant intensif.
- L'accès au réseau hydrographique ou la profondeur de la nappe phréatique (dans le cas de semis de pâturages tournants intensifs).

Les variables de distance sont importantes dans la localisation des usages qui reçoivent des déjections animales (pâturage tournant intensif, intégration agriculture-élevage). Ces parcelles sont localisées dans un rayon autour des bâtiments d'élevage pour faciliter le travail. Les usages des sols qui nécessitent des opérations quotidiennes ou régulières (pâturages tournants intensifs, cultures pérennes) sont aussi souvent localisées proches du siège d'exploitation. L'accessibilité avec un tracteur est aussi un critère prépondérant tout comme le voisinage (les pratiques intensives sont positionnées à distance du voisinage où le risque d'incendie est élevé).

Tableau 3-12 : Règles de localisation des pratiques dans le processus d'intensification

Ressource naturelle	Pratiques	Déterminants de la localisation des pratiques		Unité géomorphologique visée
		Biophysique	Accessibilité / distance / forme	
Eau bleue	Régénérer la ripisylve	Relief : forte inclinaison Drainage : présence d'eau résiduelle		Bordure du réseau hydrographique
Gestion de l'érosion	Abandonner le pâturage, régénérer la forêt	Fertilité du sol : faible Relief : forte inclinaison Pierre : affleurement rocheux Etat pâturage : dégradé	Obstacle naturel : zone marécageuse Accès aux véhicules : difficile Taille parcelle : petite Forme parcelle : irrégulière et contraignante	Escarpement, colline marquée, bas-fond, affleurement rocheux
	Implanter du pâturage après des cultures annuelles	Relief : forte inclinaison		Versant découpé, colline marquée
	Recourir au semis direct et aux intercultures	Relief : faible à moyenne inclinaison Drainage : bien drainé Texture : argile en priorité Pierre : absence	Accès facile aux tracteurs	Plateau, versant
Fertilité des sols	Epandre les déjections animales	Végétation : pâturage intensifié, cultures annuelles et cultures pérennes		Plateau, versant, fond de vallée
	Introduire des légumineuses	Relief : faible à moyenne inclinaison Pierre : absence	Voisinage : faible risque d'incendie	Plateau, versant, fond de vallée, versant découpé, bas fond
	Réformer les parcs avec fertilisation	Drainage : bien drainé Relief : faible à moyenne inclinaison Etat pâturage : dégradé	Accès facile aux tracteurs	Plateau, versant, fond de vallée
	Réformer les parcs avec l'intégration agriculture-élevage	Texture du sol : argile en priorité Drainage : bien drainé Pierre : absence Relief : faible inclinaison Fertilité des sols : du plus fertile au moins fertile Etat pâturage : dégradé	Accès facile aux tracteurs Taille des parcs : grand Distance aux bâtiments d'élevage : proche	Plateau, versant, fond de vallée
	Implanter des pâturages tournants intensifs	Relief : faible inclinaison Drainage : bien drainé Fertilité du sol : du plus fertile au moins fertile Accès au réseau hydrographique : proche Profondeur nappe phréatique : peu profond	Distance aux bâtiments d'élevage : proche Distance au siège d'exploitation : proche Voisinage : faible risque d'incendie	Plateau, versant, fond de vallée

	Implanter des cultures pérennes	Texture du sol : argile en priorité Relief : faible inclinaison	Distance aux bâtiments d'élevage : proche Voisinage : faible risque d'incendie	Plateau
Ressource naturelle	**Pratiques**	**Déterminants de la localisation des pratiques**		**Unité géomorphologique visée**
		Biophysique	**Accessibilité / distance / forme**	
Eau verte	Réguler la charge animale	Tous les parcs en pâturage		Toutes les unités en pâturage
	Semer dense	Tous les parcs en pâturage		Toutes les unités en pâturage
	Diviser les parcs	Relief : faible à moyenne inclinaison Accès au réseau hydrographique : proximité	Distance aux bâtiments d'élevage : proche Taille des parcs : grand Voisinage : faible risque d'incendie	Fond de vallée, versant et bas-fond
	Implanter du pâturage tournant	Relief : faible à moyenne inclinaison Drainage : bien drainé Accès au réseau hydrographique : proximité	Distance aux bâtiments d'élevage : proche Voisinage : faible risque d'incendie Proche	Fond de vallée et bas de versant
	Irriguer	Relief : faible inclinaison Drainage : bien drainé Accès au réseau hydrographique : proximité Profondeur nappe phréatique : peu profond Végétation : Pâturage intensifié, cultures pérennes	Distance au siège d'exploitation : proximité	Fond de vallée et bas de versant
	Produire des compléments au pâturage (ensilage, grains)	Texture du sol : argile en priorité Drainage : bien drainé Pierre : absence Relief : moyenne inclinaison Fertilité chimique : du plus fertile au moins fertile Etat pâturage : dégradé	Accès facile aux tracteurs Taille parcelle : grande Distance aux bâtiments d'élevage : proche Voisinage : éloignée des lisières de forêt (dégâts gibier)	Versant et plateau
	Engraisser dans un parc de confinement	Pierre: affleurement rocheux Drainage : bien drainé Relief : moyenne inclinaison	Distance aux bâtiments d'élevage : proche	Cuirasse
	Implanter des arbres	Fertilité chimique : peu à moyennement fertile		Plateau, versant, fond de vallée, collines
	Implanter des banques de protéines	Drainage : bien drainé Pierre : absence Relief : faible inclinaison Fertilité chimique : du plus fertile au moins fertile	Distance aux bâtiments d'élevage : proche	Plateau, versant, fond de vallée

Planche photos 1 : L'eau dans les systèmes d'élevage

1

2

3

4

Photo 1 : Un abreuvoir installé au niveau d'un pâturage tournant. Cette alternative à l'abreuvement dans les cours d'eau permet d'améliorer la qualité de l'eau distribuée aux ruminants et de réduire les déplacements du troupeau jusqu'au cours d'eau. L'eau est pompée depuis la rivière.

Photos 2 et 3 : Système d'irrigation (bombe au niveau de la rivière et sprinkler dans un champ de maïs) pour produire l'ensilage en saison sèche.

Photo 4 : Ripisyvle régénérée en fond de vallée sur des berges escarpées et rives mal drainées.

Planche photos 2 : Intégration agriculture-élevage

1

2

3

4

5

6

Photo 1 et 2 : Parcelles de soja et maïs mécanisées, implantées sur plateau (photo 1) et versants légèrement ondulés (photo 2) à Paragominas.
Photo 3 : Affleurement rocheux rendant difficile la mécanisation des parcelles et la mise en place d'usages intensifs (Arraiporã, Redenção)
Photo 4 : Regroupement de jeunes taurillons à l'embouche pour les trier en fonction du poids, avant abattage. Ils sont généralement engraissés près du corral (pour limiter les déplacements) sur des parcelles bien entretenues pour maximiser le GMQ.
Photo 5 et 6 : Place d'alimentation (photo 5) où l'ensilage issu de canne (photo 6) est distribué en saison sèche. La place d'alimentation est adjacente à la parcelle où est produit, fabriqué et stocké l'ensilage et proche de la salle de traite. Objectifs : faciliter la distribution, limiter les déplacements du troupeau, et optimiser les flux entre agriculture et élevage. Les déjections sont épandues sur les cultures.

Planche photos 3 : Erosion et relief

Photo 1 : Sol nu avant semis d'une culture annuelle. Compte tenu de l'intensité pluviométrique des pluies en Amazonie, les sols nus sont très exposés aux phénomènes d'érosion hydrique.

Photo 2 : Semis direct d'une culture de soja. Alternative visant à éviter les problèmes d'érosion hydrique dans les systèmes de cultures annuelles.

Photo 3 : Réforme mécanisée des pâturages : façonner de nouveaux paysages, où forêts et prairies sont imbriquées. Seules les portions planes ou peu ondulées sont mécanisées et semées, pour éviter l'érosion et l'assèchement du sol. Au premier plan, on observe qu'en phase d'installation de la graminée, le sol est partiellement découvert, et donc exposé aux agents érosifs (pluie, rayons solaires). A l'arrière-plan, l'imbrication forêts-prairies est visible : ravines, escarpements, bas-fonds et versants inclinés sont laissés en friches, permettant une rapide restauration forestière. Cette nouvelle trame forestière, organisée en fonction du réseau hydrographique et de la topographie, est donc fortement connectée et protectrice des sols.

Planche photos 4 : Incendies, et arbre dans le paysage des exploitations

1

2

3

4

Photo 1 : Les incendies constituent un risque pour les éleveurs qui souhaitent investir dans des pratiques plus intensives. Fin 2015, de graves incendies ont touché la région de Paragominas. On peut observer sur cette photo du pâturage brûlé à l'arrière plan limitant la disponibilité en fourrages de l'exploitation, déjà restreinte en saison sèche (pâturage sec au premier plan).

Photo 2, 3 et 4 : Elles représentent différents types d'associations entre arbres et pâturages. Dans la photo 2, les arbres régénérés naturellement augmentent la rugosité du paysage en freinant le vent et le ruissellement (la fazenda écologiquement intensive). Dans la photo 3, une espèce d'arbre a été implantée en association avec la graminée (hors échantillon). Dans la photo 4, l'éleveur a laissé des haies se régénérer en bordure des clôtures pour fournir de l'ombre au troupeau et casser le vent (fazenda viande intensive).

Planche photos 5 : Des paysages reflets d'un processus de transition agraire

1

2

3

4

Photo 1 : Paysage dans la communauté de Luiz Inacio (situation agraire 2). Dans la vallée où s'écoule le réseau hydrographique, on trouve majoritairement des pâturages et des plantations de poivre irrigué. Des corridors de forêt riparienne bordent le cours d'eau. Les versants sont également occupés par du pâturage et des régénérations forestières. Les plateaux sont occupés par des forêts primaires dégradées.

Photo 2 : Pâturage propre et enfriché sur des versants vallonés.

Photo 3 : Pâturage implanté uniformément sur vallée et colline.

Photo 4 : Mosaïque d'usages de sol dans une communauté d'agriculture familiale. Le pâturage et les cultures vivrières et pérennes (poivre) sont plantés sur les surfaces planes, à proximité de la maison. Le versant est occupé par de jeunes régénérations forestières au premier plan et par une forêt primaire dégradée au fond.

3.4 Moteurs de changement et barrières à l'intensification

Comprendre comment les moteurs de changement ont historiquement affecté les trajectoires des exploitations pour façonner les systèmes d'exploitation actuels peut nous aider à explorer de futures réponses possibles du système face à des évènements semblables et nous aider à construire des scénarios à tester dans le modèle SMA. De plus, cette analyse nous permet de mettre en évidence les potentiels et les limites des politiques publiques actuelles pour stimuler le processus d'intensification.

A partir de l'étude des trajectoires, nous avons identifié aux dires des éleveurs les principaux évènements déclencheurs de changements que nous avons regroupés en 4 catégories :

- Les évènements climatiques, biologiques et économiques (externes au système d'exploitation) ;
- Les politiques publiques nationales et locales (externes au système d'exploitation) ;
- Les relations au sein d'un réseau, voisinage ;
- Les évènements intrinsèques au système d'exploitation.

Ces évènements ont été décrits selon leur durée, leur fréquence, leur échelle spatiale, leurs conséquences (Tableau 3-13). De plus, face à un même évènement, nous avons comparé dans les paragraphes suivants comment les exploitations se sont comportées (changement/pas de changement) et quelles adaptations elles ont mises en place.

- **Les évènements biologiques, climatiques et économiques**

Sécheresse

Les producteurs perçoivent une augmentation de l'intensité et de la durée des saisons sèches par rapport à la période de colonisation. Cela affecte fortement la production fourragère basée sur le pâturage permanent et donc les performances de l'élevage. Comme nous l'avions souligné précédemment, les exploitations ont investi dans la complémentation protéinée (les trois fazendas et l'exploitation familiale intensive, types 3, 4, 5 et 6) et l'irrigation de maïs et de pâturage tournant (en cours ou en projet dans les deux exploitations intensives, types 3 et 6) pour compenser la baisse de la production fourragère.

Nouveaux marchés (grain, eucalyptus, lait)

Le développement de nouvelles filières au niveau territorial a eu un impact positif sur le processus d'intensification dans plusieurs exploitations, directement ou indirectement. Deux fazendas ont intégré leurs parcelles de pâturages dégradées avec l'agriculture (maïs) ce qui a permis de fertiliser la terre et de nettoyer les régénérations forestières à moindre coût. La diversification dans d'autres productions à l'échelle de l'exploitation (lait, poivre, plantations forestières) a aussi permis de générer des ressources financières qui ont été réinvesties dans l'intensification des fourrages.

Attaques de ravageurs

Plusieurs exploitations ont subi les effets combinés de la sécheresse et d'attaques de *lagarte* (chenille). Les interactions entre ces deux évènements ont fortement impacté le système fourrager, entraînant une dégradation du couvert fourrager et favorisant la colonisation par des adventices.

Pour financer la réforme des pâturages, les exploitations ont : i) converti les prairies en cultures annuelles de soja dans le cas où un projet d'intégration était possible (exploitation extensive viande, type 4) ; ii) nettoyé les pâturages dégradés mais sur une surface limitée du fait des contraintes budgétaires et de l'impossibilité de recourir à l'intégration (exploitation familiale extensive consolidée, type 2).

- **Les politiques publiques**

Accès au crédit

L'intensification du système fourrager nécessite un minimum d'investissements pour améliorer les infrastructures (clôtures, abreuvoirs), restaurer la fertilité des sols et réformer les pâturages dégradés (resemis, mécanisation). L'accès au crédit au moment de la colonisation (FNO, PRONAF) a influencé significativement la trajectoire de l'exploitation en favorisant l'expansion de surfaces fourragères. L'accès à des lignes de crédit et à des taux bonifiés est donc un facteur qui peut stimuler le processus d'intensification, à condition que les montants, taux d'intérêts, et durées soient adaptés aux capacités des exploitations. De plus, il est important pour garantir la réussite du projet que cet appui financier soit accompagné d'un suivi technique de qualité.

Aujourd'hui, il existe toutefois peu de lignes de crédits dédiés à l'intensification et elles sont peu connues des éleveurs. De plus, le faible niveau d'appui technique dont bénéficient les exploitations et les irrégularités foncières constituent des obstacles importants. Le programme ABC (Agriculture Bas Carbone) qui réserve une enveloppe importante pour la récupération des pâturages dégradés a été peu utilisé dans la région Nord (Observatório do plano ABC, 2015).

Assistance technique

L'assistance technique a un effet déterminant dans le processus d'intensification des usages des sols. Les trois fazendas ont pu recevoir un tel appui par des bureaux d'étude privés ou des agrofournisseurs. Récemment la fazenda viande intensive a aussi franchi un seuil en participant au projet BPA accompagné par l'Embrapa, puis au projet Elevage Vert encadré scientifiquement par l'USP.

En revanche, les exploitations familiales sont accompagnées par des organismes d'assistance technique locaux dont les ressources financières sont publiques et peuvent fortement varier. Elles ont donc reçu un accompagnement discontinu dans le temps. A Redenção, on peut noter le rôle important qu'ont joué les laiteries (agro-industries privées) dans la mise en œuvre de nombreuses innovations pour l'agriculture familiale (insémination artificielle, pâturage tournant intensif, traite mécanisée, plantation de canne fourragère pour la complémentation en saison sèche) et le financement de matériels (tank à lait réfrigéré, machine à traire).

Rigidification de la législation environnementale

Le durcissement dans l'application de la législation environnementale à partir de 2004 a eu un impact contrasté sur les exploitations. Les trois fazendas et l'exploitation familiale intensive ont arrêté d'utiliser le feu et de déforester avant 2004. Elles ont réformé les pâturages et investi dans la mécanisation pour d'autres motifs (dégradation des pâturages notamment). La rigidification de la législation environnementale les a poussées à respecter les nouvelles normes telles que le CAR, compensation des surfaces de réserve forestière et les APP.

En revanche, l'exploitation pionnière et l'exploitation familiale extensive consolidée (types 1 et 2) ont continué d'accroître leur surface agricole dans les régénérations forestières jeunes et âgées même après le vote du nouveau code forestier et l'instauration de la loi sur les *juquiras*. Récemment, elles ont cherché à se mettre aux normes suite à l'évolution de la législation sur le GTA (autorisation de transport des animaux) : l'émission de GTA est désormais conditionnée au cadastre environnemental de l'exploitation (CAR). L'exploitation pionnière a payé un bureau d'étude privé et a obtenu un CAR provisoire en 2015. Dans l'*assentamento* de Luiz Inacio, un grand nombre d'exploitations de la communauté, dont l'exploitation de notre échantillon, n'avait pas encore de CAR provisoires fin 2016.

Amélioration des infrastructures : électricité, routes

L'amélioration des infrastructures routières est importante pour faciliter l'écoulement des produits agricoles, l'accès aux intrants et assurer des possibilités de diversification vers des productions ayant une plus haute valeur ajoutée. La maintenance des routes est de la responsabilité du gouvernement fédéral, de l'Etat ou des municipes. Mais fréquemment, les habitants des communautés s'organisent à leur échelle pour récolter des fonds et financer par eux-mêmes la maintenance et l'amélioration de ces infrastructures. A Oriente par exemple, l'association de producteurs a négocié avec l'entreprise Vale de réformer la route d'accès à la communauté, lors de la construction du pipeline de bauxite qui traverse la communauté. Toujours à Oriente, un groupe d'agriculteurs dont l'exploitant de notre échantillon s'est réuni et a échangé du bois en échange de la construction d'un pont avec un forestier, permettant de désenclaver un îlot de terres encerclé de cours d'eau.

L'accès à l'électricité est aussi un prérequis important pour l'intensification des pâturages, afin de permettre l'installation d'abreuvoirs, de clôtures électriques ou de projets d'irrigation par exemple. Dans notre échantillon, seule l'exploitation familiale pionnière (type 1) n'a pas accès à l'électricité dans son lot, ce qui limite les opportunités de diversification et d'intensification. Dans les fazendas de grande échelle, tous les parcs n'ont pas accès au réseau électrique. Relier tous les pâturages au réseau électrique coûterait beaucoup trop cher. Une alternative serait d'installer des panneaux photovoltaïques mais selon les éleveurs, les risques de vol sont élevés. Ces grandes fazendas soulignent donc qu'il est très coûteux de mettre en place des infrastructures d'intensification nécessitant l'accès à l'énergie (abreuvoirs, clôtures électriques).

- **L'appartenance à un réseau et voisinage**

Relations avec le collectif/réseau

Elles sont favorables à l'intensification car elles permettent des investissements en commun, des échanges d'expériences et de savoirs.

En termes d'investissements, l'association de la communauté de Luiz Inacio s'est équipée en matériels qu'elle met à disposition de tous les membres. L'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) a ainsi pu réformer une parcelle de pâturages dégradés à un coût abordable. Dans la communauté d'Arraiporã, l'éleveur familial intensif (type 3) s'est associé à un autre éleveur de sa communauté pour acheter en copropriété du matériel spécifique pour produire de l'ensilage de maïs (ensileuse, semoir).

En termes de savoirs, il existe aussi des échanges entre éleveurs d'une même association. Par exemple, l'éleveur familial intensif (type 3) s'est procuré des plants de Tifton chez son associé qui les a produits à partir de semences collectées chez son frère dans le Minas Gerais. Il existe aussi des échanges entre exploitations familiales et fazendas. Par exemple, l'éleveur familial intensif (type 3) a reproduit une pratique d'intensification découverte dans une fazenda : il produit de l'ensilage de maïs en association avec du *Brachiaria Brizantha* pour accroître la biomasse produite.

Risque d'incendie

Les risques d'incendie sont défavorables au processus d'intensification fourragère car non contrôlés ils peuvent entraîner la dégradation des clôtures, le brûlis de la ressource fourragère et d'investissements dans le système fourrager (plantation d'arbres et de nouvelles espèces de graminées par exemple), ainsi que des réserves forestières. C'est particulièrement le cas dans les communautés d'exploitants familiaux où les risques sont élevés (Oriente et Luiz Inacio) et où les exploitations ont peu de matériel pour contrôler leur propagation.

> Extrait du discours éleveur pionnier *: « Pendant que toi tu humidifies pour ne pas brûler, les autres sèchent pour mettre le feu »*[1].

- **Les facteurs internes**

Dégradation des pâturages

Cela a été l'un des principaux évènements déclencheurs du processus d'intensification. Certaines pratiques telles que le surpâturage ou le sous-pâturage, l'usage du feu pendant de nombreuses années, des semis peu denses, la non recomposition de l'exportation de la fertilité des sols et le développement incontrôlé de certains ravageurs (chenille, cicadelle) ont entraîné une dégradation des pâturages, avec l'envahissement par des adventices herbacées ou des recrus forestiers et la mise à nu du sol. Dans les fazendas et l'exploitation familiale intensive (types 3, 4, 5 et 6), le processus d'intensification a été initié pour récupérer les pâturages en baisse de productivité. L'exploitation familiale pionnière (type 1), qui a implanté ses pâturages récemment, n'a pas encore été confrontée à une réduction de la productivité, ce qui peut justifier pourquoi elle n'a pas initié de changements dans la conduite de ses pâturages.

[1] "*Enquanto você agua para não queimar, os outros estão secando para botar fogo".*

L'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) n'a pas non plus réformé ses pâturages ; bien qu'elle le souhaite, le manque de ressources économiques limite les possibilités.

Disponibilité de main d'œuvre

Beaucoup de pratiques visant une intensification de la production (le pâturage tournant intensif, l'épandage de fertilisant, le travail du sol…) nécessitent une hausse des besoins en main d'œuvre par unité de surface ou animale. Les exploitations doivent donc opérer un choix : intensifier la production sur une surface limitée et réduire la surface productive (par régénération naturelle ou vente) ; ou maintenir la surface productive actuelle en ayant recours à des pratiques peu exigeantes en main d'œuvre ; ou accroître la main d'œuvre.
L'augmentation de la main d'œuvre disponible dans l'exploitation familiale intensive (type 3) a ainsi permis un développement des activités et une intensification de la production.

Evènements sur la famille

Dans les exploitations familiales en particulier, plusieurs évènements négatifs ont freiné le processus d'intensification. Chez l'exploitation familiale extensive consolidée (type 2) par exemple, des problèmes de santé ont nécessité la décapitalisation de cheptel pour financer les soins médicaux. Dans l'exploitation familiale intensive (type 3), un cambriolage a démotivé la famille à investir.

Âge des exploitants et possibilité de reprise

La reprise de la ferme par les enfants est un facteur favorable au processus d'intensification. En effet, les exploitants proches de la retraite et sans reprise familiale (exploitation familiale extensive consolidée, type 2) ont peu d'intérêt à investir dans l'intensification car il leur serait difficile d'amortir cet investissement sur du court terme. En outre, étant installés sur des terres de la réforme agraire, ils ne sont pas intéressés par une augmentation de la valeur du patrimoine foncier.

L'identification des moteurs de changements à partir de l'étude des trajectoires des exploitations nous a permis de mettre en évidence que les crises (telles que la dégradation des pâturages, les épisodes de sécheresse chroniques) ont constitué des moteurs importants de changement. Les stratégies des éleveurs ont été peu orientées par des politiques publiques visant l'intensification, mais davantage par des facteurs intrinsèques à l'exploitation ou par des variables économiques ou climatiques externes. L'unique politique d'incitation à l'intensification de l'élevage, le plan ABC, a été peu mobilisée dans l'Etat du Pará. Cette faiblesse des soutiens à l'intensification de l'élevage constitue une évolution importante par rapport à la phase de colonisation pendant laquelle les politiques publiques ont fortement encouragé l'expansion de l'élevage.

Tableau 3-13 : Synthèse des principaux évènements et de leurs attributs ayant stimulé le processus d'intensification. Adapté de Resilience Alliance (2010)

Evènement	Discret ou graduel	Fréquence[a]	Echelle spatiale	Système le plus affecté	Incitation au changement
Sécheresse	Discret	Fréquent	Régionale	Fourrager	Important
Nouveaux marchés	Discret	Peu fréquent	Régionale	Exploitation	Important
Problèmes sanitaires	Discret	Peu fréquent	Locale	Fourrager	Mineur
Accès au crédit	Discret	Moyennement fréquent	Nationale	Exploitation	Important
Assistance technique	Graduel		Locale	Exploitation	Intermédiaire
Evolution politique environnementale	Discret	Fréquent	Multi-échelle	Exploitation / réserves forestières	Intermédiaire
Nouvelles infrastructures	Discret	Peu fréquent	Locale	Exploitation	Important
Incendie	Discret	Fréquent	Locale / Exploitation	Fourrager	Intermédiaire
Association entre éleveurs	Graduel		Locale / Exploitation	Exploitation	Intermédiaire
Dégradation des pâturages	Graduel		Exploitation	Fourrager	Important
Evolution main d'œuvre	Discret	Peu fréquent	Exploitation	Exploitation	Important
Evènement famille	Discret	Moyennement fréquent	Exploitation	Exploitation	Variable selon évènement
Possibilité de reprise	Discret	Peu fréquent	Exploitation	Exploitation	Important

a - si l'évènement est discret

3.5 Discussion

3.5.1 Changement de perceptions et construction de paysages plus éco-efficients

Notre approche basée sur la compréhension des décisions des éleveurs et la modélisation graphique des paysages a mis en évidence une transition plus ou moins avancée à trois niveaux : 1) un changement de pratiques de conduite du troupeau et gestion des pâturages, 2) une nouvelle organisation des usages des sols dans les paysages et 3) une évolution des perceptions sur les ressources naturelles.

L'élevage extensif, par ses aspects multifonctionnels (entre constitution d'un patrimoine foncier, prestige social, sécurité d'une épargne et d'un revenu régulier, flexibilité de la conduite et faible besoin en main d'œuvre), a montré son efficacité dans le processus de colonisation et d'expansion de la frontière agricole (Léna, 1999 ; Tourrand *et al.*, 2007). Dans ce contexte, la gestion durable des ressources naturelles passe après la satisfaction d'objectifs sociaux essentiels (Biri & Maitre d'Hotel, 2002 ; Poccard-Chapuis, 2004 ; Bonaudo, 2005) et les pratiques sont peu orientées par les facteurs biophysiques (Poccard-Chapuis *et al.*, 2014). Comme nous l'avons observé dans les six exploitations, ce processus de colonisation a

favorisé la formation de paysages mosaïqués à trois composantes randomisées dans l'espace (pâturages de graminées exotiques, fragments forestiers et régénérations forestières) où le feu est la principale technique de changement d'utilisation des sols. Malgré ses avantages socio-économiques (faible coût et productivité du travail), il constitue le principal agent de dégradation des ressources naturelles dans les systèmes d'élevage : combustion du carbone, dégradation de la structure des sols (Grimaldi *et al.*, 2014). Ces structures de paysages, sensibles au feu, n'optimisent pas non plus la fourniture de services écosystémiques, tels que la biodiversité et le stockage de carbone. Chaplin-Kramer *et al.* (2015) ont pourtant montré l'importance de l'arrangement spatial des forêts et des zones agricoles dans la fourniture de ces services.

Après cette phase d'expansion, nos résultats montrent que le processus d'intensification donne lieu à une nouvelle imbrication forêt-prairie-cultures. L'espace fourrager n'est pas uniformément intensifié. Les éleveurs ont tendance à localiser les pratiques intensives dans les unités géomorphologiques ayant de bonnes aptitudes agronomiques (pédologiques, capacité de drainage), potentiellement mécanisables (plateaux, vallée avec versants peu ondulés) et facilement accessibles. Ce changement d'organisation des usages est guidé par le développement de la mécanisation mais aussi par la rationalisation des activités agricoles en fonction des ressources naturelles (eau bleue, eau verte, fertilité, sols), économiques (éviter d'investir dans des zones peu productives) et humaines (optimiser le temps de travail).

Parallèlement à ce mouvement d'intensification, il existe un processus de régénération forestière. Avec l'arrêt de l'usage du feu, les travaux de nettoyage et de réforme des pâturages sont de plus en plus mécanisés. Par conséquent, on observe que les zones de relief, faiblement drainées ou sensibles à l'érosion telles que les bas-fonds, ravines, escarpements, et versants inclinés (correspondant pour la plupart aux APP dans le code forestier), sont spontanément laissées en friche. Maintenir ces zones en production n'est plus pertinent tant sur le plan agronomique, écologique et économique.

Le rôle du paysage dans les dynamiques d'intensification d'usage des sols en Amazonie brésilienne a aussi été mis en évidence par des analyses spatiales SIG à de plus larges échelles (Caviglia-Harris *et al.*, 2014 ; Laue & Arima, 2015). Ces auteurs ont montré une corrélation positive entre les usages des sols de type régénération forestière et des zones aux caractéristiques biophysiques et d'accessibilité défavorables à la production agricole : parcelles situées en bordure de cours d'eau (facilement inondables), forte pente, mauvaise qualité agronomique du sol, distance des routes et des marchés. Cette réorganisation des usages des sols dans les paysages n'est pas une dynamique propre aux fronts post-pionniers d'Amazonie et a également été observée ailleurs dans le monde. Au Sud du Mali, sous climat tropical de savane, les assolements sont organisés selon la toposéquence et la fertilité des sols (Poccard-Chapuis *et al.*, 2014). Sous climat tempéré, en région de montagne (Alpes et Pyrénées), le processus d'intensification et de mécanisation des parcelles fourragères concernent principalement les parcelles avec peu de pente, orientées vers le Sud, ayant une

bonne capacité de rétention en eau du sol, proches du corral ou du siège d'exploitation et facilement accessibles (Mottet *et al.*, 2006 ; Andrieu *et al.*, 2007a ; Andrieu *et al.*, 2007b). Plus les parcelles de pâturage sont petites, et plus elles ont aussi tendance à être abandonnées (Hinojosa *et al.*, 2016). Une méta-analyse conduite au niveau européen montre aussi le rôle des facteurs biophysiques et topologiques dans les processus d'intensification et d'extensification de l'usage des sols (Van Vliet *et al.*, 2015).

Bien que ce mouvement en soit encore à ses prémisses, le processus d'intensification dans lequel s'engagent les exploitations vise un meilleur compromis entre productivité des pâturages, valorisation des ressources naturelles et production de services écosystémiques en comparaison avec les paysages des fronts pionniers. Ces paysages plus éco-efficients se caractérisent par des usages des sols plus intensifs et la mise en place d'une nouvelle trame forestière assurant une meilleure connectivité écologique au sein des paysages et donc une meilleure conservation de la biodiversité, mais aussi la protection des sols et de l'eau, le bien être pour le troupeau et les habitants locaux (ombre, production de fruits natifs).

3.5.2 Diversité des stratégies techniques et spatiales d'intensification d'usage des sols

Cette tendance générale cache toutefois une pluralité de stratégies d'intensification, tant dans le choix des pratiques que des localisations. Concernant le choix des pratiques, nous avons observé cinq tendances.

(1) Le premier type correspond à une faible intensification de l'élevage et une diversification des activités vers des productions à plus forte valeur ajoutée (poivre, autres cultures pérennes, pisciculture, aviculture). Il n'y a pas de changement majeur au niveau de la conduite du troupeau. Ce sont principalement les exploitants familiaux qui se trouvent dans cette situation. La distance aux centres urbains, la faible disponibilité de capital et de main d'œuvre et le faible accès à l'assistance technique limitent les possibilités.

(2) La seconde tendance se traduit par l'artificialisation de l'agroécosystème via un usage intensif d'intrants et une spécialisation dans la production laitière. Les surfaces dédiées à l'élevage sont réduites et intensifiées tandis que les surfaces abandonnées sont destinées à la régénération forestière. La conduite du troupeau est également intensifiée via le recours à l'amélioration génétique (IA) et une alimentation à l'auge. La présence d'une filière laitière bien structurée, l'accès à l'assistance technique et la coopération avec d'autres éleveurs pour l'acquisition de matériel facilitent cette transition.

(3) Le troisième type correspond à l'intégration dans l'agriculture-élevage (récupération de pâturages dégradés via la production de soja et maïs), et à l'intensification de la conduite du troupeau. Ce type cherche à optimiser ses performances techniques et

économiques. La présence d'unités morpho-pédologiques favorables à l'agriculture (surfaces planes, fertiles, bien drainées, sans affleurement rocheux), la connaissance technique, l'accès au matériel, la disponibilité de capital et de main d'œuvre qualifiée sont des déterminants importants dans cette orientation.

(4) La quatrième tendance est d'abandonner l'élevage et de se spécialiser dans l'agriculture. Ce type cherche avant tout une efficience économique (prix du soja et du maïs attractifs) et à réduire la charge de travail via la location des terres à un tiers. Pour se convertir, les exploitations ont besoin d'unités morpho-pédologiques appropriées et préférentiellement d'un titre foncier pour louer les terres.

(5) Le cinquième type correspond à des exploitations qui intensifient de façon modérée et écologique leur atelier de bovins allaitants. Grâce à des pratiques de gestion des pâturages qui visent une meilleure valorisation des processus agro-écologiques et à un faible usage de ressources non renouvelables (intrants de synthèse, pétrole, etc.), elles parviennent à un ratio favorable entre production de fourrage et consommation en ressources naturelles. L'un des principaux déterminants de cette stratégie est la capacité d'innovation, l'accès à l'assistance technique et à des sources de connaissances sur les processus écologiques.

Cette diversité de stratégies est donc très influencée par la situation agraire des éleveurs (disponibilité de capital financier, de main d'œuvre, connaissances et qualification, distance aux centres urbains, etc.) ainsi que la diversité de projets.

Concernant la réorganisation des usages des sols, nous avons mis en évidence que la relation entre ressources naturelles et localisation des pratiques peut varier entre exploitations selon le degré d'intensification des exploitations mais également d'hétérogénéité des unités géomorphologiques. Ainsi dans les exploitations caractérisées par une distribution spatiale des ressources naturelles relativement homogène, les déterminants topologiques (accessibilité, distance, forme des parcelles) sont prépondérants et on assiste en général à une concentration des activités autour du siège de la ferme. Ce phénomène a également été observé dans d'autres fermes en Europe (Thenail & Baudry, 2004 ; Andrieu *et al.*, 2007a). En revanche, dans les exploitations où il existe une plus grande hétérogénéité de distribution des ressources naturelles, les caractéristiques biophysiques du milieu ont beaucoup plus de poids. L'agencement des usages des sols n'est pas uniquement optimisé en fonction de la distance au siège de l'exploitation ce qui donne lieu à différents types d'agencements des usages des sols.

Les exploitations et notamment les très grandes exploitations, ne disposent pas nécessairement de suffisamment de capital et de main d'œuvre pour intensifier et entretenir toute leur surface cultivée. Notre hypothèse était donc que les éleveurs abandonnent ces surfaces. Or, les résultats mettent en évidence des stratégies différentes. Certes, certains éleveurs ont exprimé leur projet de mettre en friche des zones de pâturages marginales,

éloignées ou difficiles d'accès pour consacrer leurs investissements sur des surfaces intensifiées de plus petite taille. Cette dynamique a été également reportée dans différentes régions de montagnes européennes (MacDonald *et al.*, 2000). En revanche, d'autres ne sont pas favorables à l'enfrichement pour deux raisons. Premièrement, ils évoquent une incertitude sur leur capacité à être autonomes en fourrages sur une surface agricole plus restreinte. Deuxièmement, les éleveurs craignent de réduire la valeur de leur patrimoine foncier. En effet, la valeur foncière des surfaces converties en usages agricoles est supérieure à celle des forêts (Piketty *et al.*, 2015b). Ces deux inquiétudes sont renforcées par l'évolution de la réglementation environnementale avec notamment la loi sur la suppression des *juquiras* qui limite à moyen terme les possibilités d'intervention sur les régénérations forestières.

La valeur patrimoniale de l'exploitation reste donc un élément important dans les décisions d'occupation des éleveurs. D'ailleurs, ses ressources humaines et financières ne lui permettant pas de tout intensifier, un éleveur de notre échantillon a fait le choix de vendre la moitié de son exploitation et de louer l'autre moitié plutôt que d'abandonner des surfaces ou de continuer à appliquer des pratiques extensives. La plus-value générée par la vente et location est réinvestie dans des activités à plus forte valeur ajoutée (*açai* dans cet exemple) sur des surfaces plus restreintes. Par conséquent, après une phase de concentration foncière, le processus d'intensification pourrait peut-être favoriser une tendance inverse de réduction de la taille des exploitations d'élevage. Ce phénomène de morcellement des grandes exploitations est de surcroît stimulé par la hausse du prix du foncier sur les zones de fronts pionniers consolidées, proches des grands axes routiers et bien intégrées au marché, telles que le Nord-Est et le Sud du Pará (Pacheco & Poccard-Chapuis, 2012). Le processus d'intensification pourrait enfin accroître la valeur des exploitations grâce à l'amélioration de l'outil de production : amélioration de la génétique du troupeau et de la production fourragère, entretien du sol, plantation ou régénération d'arbres de valeurs, investissements dans de nouvelles installations rurales et équipements (divisions des parcs, installation d'abreuvoirs, de couloirs d'accès, de réseaux d'irrigation, silos...).

3.5.3 Quels liens entre intensification, récupération des pâturages dégradés et préservation des forêts ?

Les dynamiques d'intensification des usages des sols sont complexes remettant en question deux hypothèses sur lesquelles sont souvent fondés les raisonnements scientifiques et les politiques publiques. Premièrement, ce ne sont pas les pâturages dégradés qui sont visés par l'intensification mais les terres aux bonnes aptitudes agronomiques et les plus accessibles. Il n'y a pas d'intérêt agronomique à investir dans la récupération de terres à faible potentiel. L'état de dégradation des pâturages est une variable décisionnelle secondaire dans la localisation des activités d'intensification. Deuxièmement, l'hypothèse selon laquelle l'intensification pourrait permettre d'épargner plus de terres en forêt n'est pas vérifiée dans notre analyse. Nos résultats montrent qu'à l'échelle micro, les terres ayant un bon potentiel agricole restent des cibles privilégiées pour l'agriculture et l'élevage (Piketty *et al.*, 2015a),

quel que soit leur usage agricole (pâturage, forêt primaire ou régénération forestière). De plus, le processus d'intensification ne conduit pas nécessairement à une hausse de la surface en régénération forestière à l'échelle de l'exploitation. En effet, sur les parcelles agronomiquement intéressantes mais qu'ils ne peuvent intensifier faute de capital ou de main d'œuvre, certains éleveurs préfèrent continuer à appliquer des pratiques extensives ou à en vendre une partie.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif d'expliquer le processus d'intensification dans ses dimensions spatiales et techniques, et d'analyser les interactions entre les pratiques, les ressources naturelles et les processus écologiques dans six fermes d'élevage représentant différents degrés d'intensification et des situations agraires contrastées.

Premièrement, nous avons montré que le processus d'intensification se caractérise par des changements importants de stratégies de production fourragère et donne lieu à une nouvelle imbrication forêt-prairie-cultures. L'espace fourrager n'est pas uniformément intensifié. Dans les six cas types étudiés, les éleveurs projettent d'allouer les usages intensifs dans les zones les plus favorables à la production fourragère. Divers facteurs biophysiques tels que le relief, les caractéristiques des sols (texture, capacité de drainage, pierrosité), l'accès à l'eau superficielle ou souterraine (pour l'abreuvement et l'irrigation), l'exposition au vent des parcelles, et des variables topologiques telles que la facilité d'accès, la taille et la forme des parcelles sont désormais pris en compte dans les décisions d'aménagement. Parallèlement à ce processus d'intensification, un processus de régénération forestière a lieu au niveau des zones de relief, faiblement drainées ou sensibles à l'érosion telles que les bas-fonds, ravines, escarpements, et versants inclinés. Ce changement d'organisation des usages est favorisé par de multiples facteurs : le développement de la mécanisation ; la volonté de mieux valoriser les ressources naturelles présentes dans les paysages et de limiter les externalités négatives dues à leur exploitation minière ; et la volonté de mieux optimiser les investissements humains (travailler sur des zones plus restreintes et/ou plus proches pour optimiser le temps de travail) et économiques (éviter d'investir dans des zones peu productives).

Néanmoins, on constate que les stratégies d'intensification et de réagencement des usages des sols sont diverses. Elles varient selon la situation agraire de l'exploitation (disponibilité de capital financier, de main d'œuvre, connaissances et qualification, distance aux centres urbains, etc.) et le degré d'hétérogénéité spatiale des unités géomorphologiques. Lorsque ces unités sont homogènes, la distance et l'accessibilité deviennent des variables majeures d'organisation des usages des sols alors que les caractéristiques biophysiques deviennent des déterminants secondaires.

Ces stratégies ont des impacts différentiés sur les ressources naturelles et donc les éco-efficiences. Par exemple, l'efficience énergétique mesurée à l'échelle du système de production varie de 0,36 à 3,48 dans les six cas types étudiés. Il est intéressant de noter que tant les exploitations ayant recours à de faibles niveaux d'intrants que les exploitations utilisant de hauts niveaux d'intrants sont capables d'atteindre de bons niveaux d'efficience énergétique. En revanche, le plus faible niveau d'émissions est émis par le type écologiquement intensif. Des marges de progrès existent. Toutefois, jusqu'à présent, peu de

politiques publiques ont encouragé les changements de pratiques vers plus d'éco-efficiences. Par ailleurs, d'autres facteurs freinent les éleveurs à investir : l'absence d'infrastructures, le risque d'incendie, le manque de main d'œuvre, notamment de main d'œuvre qualifiée.

Les évolutions des systèmes de production s'appréhendent sur le temps long. Il s'agit de choix stratégiques pour les exploitants. Or, le contexte est très incertain et les impacts de ces systèmes de production sur le long terme mal connus. Sur la base des données collectées, nous avons proposé de développer un modèle SMA afin d'explorer comment les différents types de stratégies d'intensification pourraient affecter l'évolution des ressources naturelles, les paysages et les revenus d'exploitations d'élevage. C'est ce que nous allons analyser dans le Chapitre 4.

Chapitre 4. Un modèle multi-agents pour représenter les interactions entre les stratégies d'intensification d'usage des sols, les paysages et l'évolution des ressources naturelles

Présentation du chapitre

Ce chapitre est dédié à la présentation du modèle à base d'agents. L'objectif de cet exercice de modélisation était de développer un modèle SMA, empirique et spatialisé, représentant à l'échelle de l'exploitation la diversité des stratégies d'intensification, des paysages et de leurs ressources, dans le but d'analyser les interactions entre ces composants et la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies dans les fermes d'élevage. Le modèle conceptuel a été construit à partir des données issues de nos enquêtes sur les systèmes de décision des éleveurs et leurs relations avec les paysages, couplées aux connaissances d'experts de notre équipe, aux précédents travaux de modélisation (Bommel *et al.*, 2010 ; Bommel *et al.*, 2012 ; Bommel *et al.*, 2014) et à des données bibliographiques.

Ce chapitre se compose de trois sections :

- Dans la section 4.1, nous décrirons le modèle conceptuel que nous avons élaboré en suivant l'approche ODD + D. Nous nous appuierons sur le langage UML pour représenter la structure et les processus inclus dans le modèle.
- Dans la section 0, nous présenterons les résultats issus des simulations pour deux stratégies d'intensification : un élevage intensif basé sur une intensification haut niveau d'intrants vs un élevage intensif semi-intensif basé sur une intensification faible niveau d'intrants. Nous avons testé ces deux stratégies sur une fazenda de taille moyenne (1000 ha).
- Dans la section 4.3, nous aborderons le travail accompli et restant à accomplir pour vérifier et évaluer le modèle. Nous discuterons ensuite les apports et les limites du modèle. Nous proposerons enfin des perspectives futures de développement.

4.1 Description du modèle par l'approche ODD + D (Overview - Design concepts - Details + Decision)

La description du modèle SMA repose sur le protocole ODD (*Overview - Design concepts - Details*) (Grimm *et al.*, 2006 ; Grimm *et al.*, 2010) et son extension, l'ODD + D (*Overview - Design concepts -Details + Decision*) (Müller *et al.*, 2013). Cette description standardisée vise à documenter, discuter et justifier les principales hypothèses que nous avons choisies. C'est une exigence de transparence importante dans la démarche d' « *evaludation* » des modèles SMA (Augusiak *et al.*, 2014). Par ailleurs, dans un souci de communication interdisciplinaire, nous avons élaboré des diagrammes UML, de façon à pouvoir partager une représentation graphique simple du modèle, compréhensible par des non modélisateurs.

La construction du modèle s'est faite de manière itérative avec des allers-retours constants entre conceptualisation et simulations. Comme annoncé dans la méthodologie, la conceptualisation du modèle (structure et dynamique) et son implémentation sur la plateforme Cormas s'est appuyée sur les précédents travaux de modélisation menés par le groupe de recherche du DP Amazonie et portant sur les interactions entre forêt et systèmes agricoles en Amazonie brésilienne (Bonaudo, 2005 ; Bommel *et al.*, 2010 ; Bommel *et al.*, 2012 ; Bommel *et al.*, 2014).

4.1.1 Objectifs

Les objectifs du modèle sont de : i) explorer les conséquences de la diversité de stratégies d'intensification sur les dynamiques de paysage et de leurs ressources ; ii) analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies sur le plan économique et humain.
Le modèle a été conçu à destination de la communauté scientifique s'intéressant aux dynamiques de paysages (changements des usages des sols) et à la durabilité des systèmes d'élevage en Amazonie orientale et plus largement sur d'autres zones de fronts post-pionniers.

4.1.2 Entités, variables et échelles

4.1.2.1 Entités

Trois types d'entités composent le modèle : des entités spatiales, passives et des agents. Le diagramme de classe UML (Figure 4-1) représente ces différentes entités et leurs relations. Les classes grisées sont des classes abstraites qui ne peuvent pas être instanciées (c'est-à-dire qu'on ne peut pas créer d'objet de type Rancher par exemple). L'intérêt de créer ces classes abstraites est de pouvoir encapsuler des attributs (variables) et méthodes (fonctions) qui peuvent être utilisés par les instances des classes qui en héritent. Par exemple SmallExpansion, SmallIntensiveInputs, etc. héritent des mêmes attributs et méthodes que Rancher.

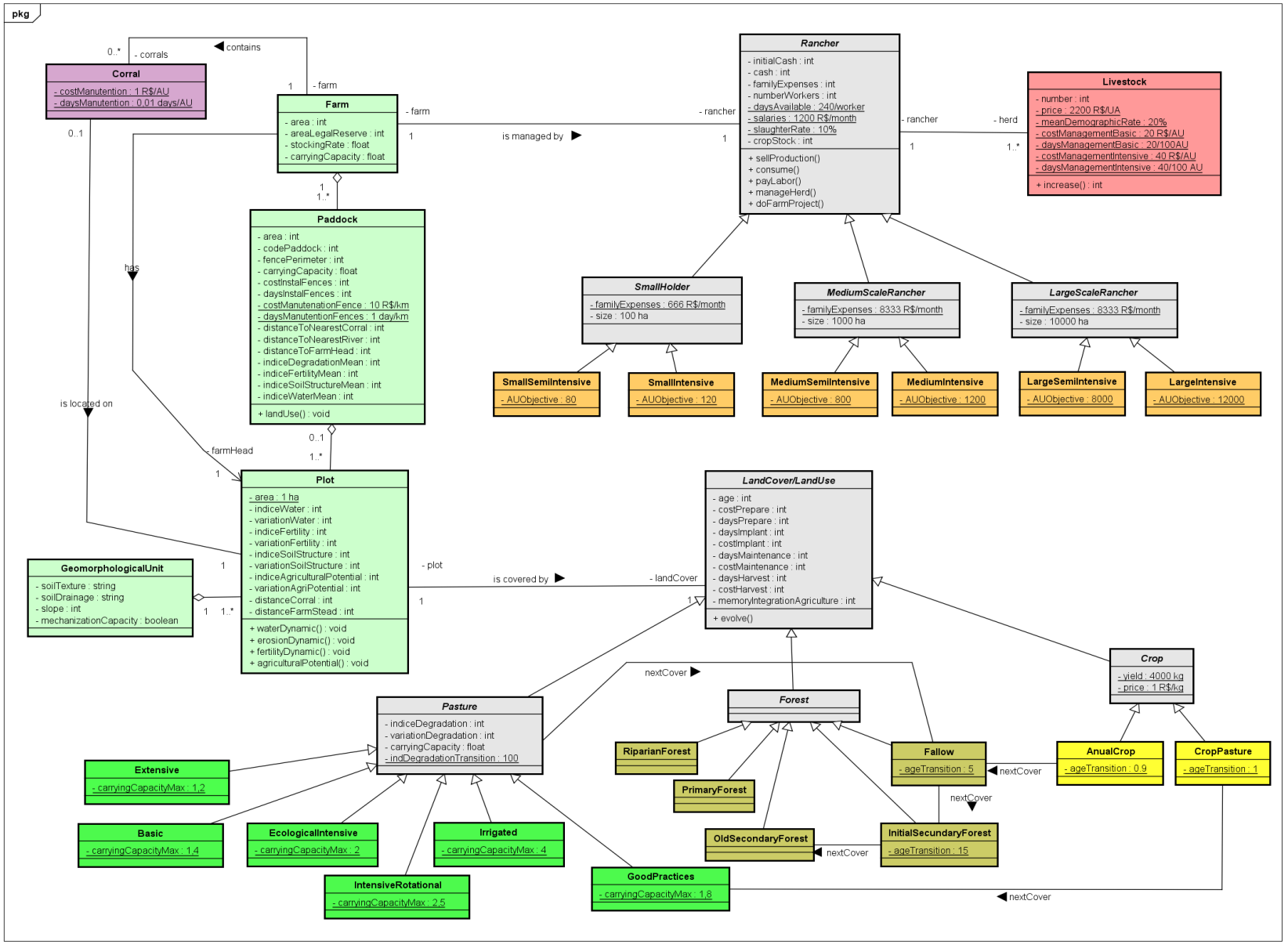


Figure 4-1 : Diagramme de classe du modèle

Agents

Le modèle comprend six types d'éleveurs (Rancher). Ils se différentient selon leurs objectifs de capacité de charge, leurs stratégies d'intensification (intensif haut niveau d'intrants, semi-intensif bas niveau) et les caractéristiques socio-économiques de leurs situations agraires (Figure 4-2 et Figure 4-3). Les simulations se restreignent pour l'instant au comportement des éleveurs de taille moyenne, intensif.

Chaque éleveur possède un troupeau bovin (Livestock). Ce troupeau se caractérise par un nombre d'unités animales (UA), un taux démographique, une valeur unitaire, une charge de travail, et un coût de gestion.

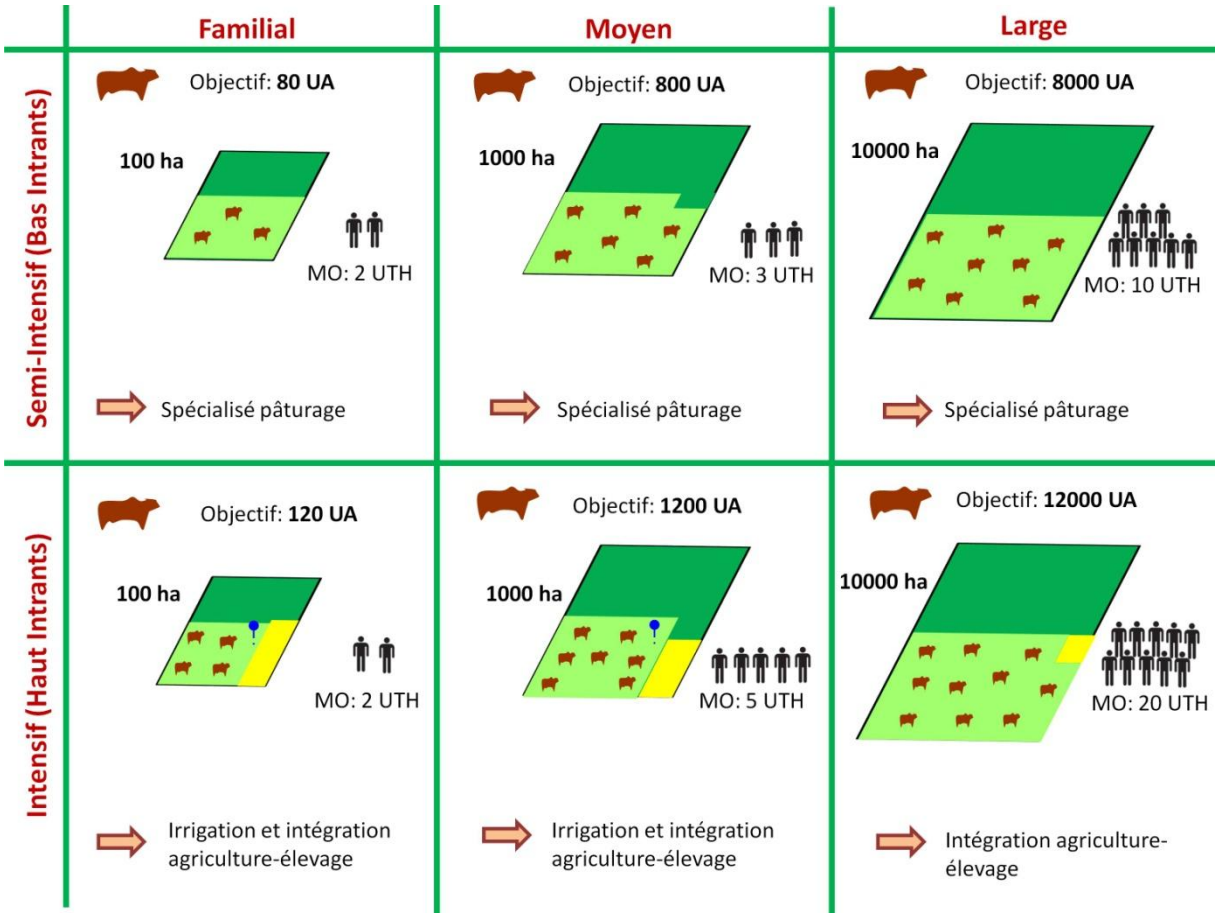


Figure 4-2 : Caractérisation et stratégie d'intensification des six types d'exploitation d'élevage

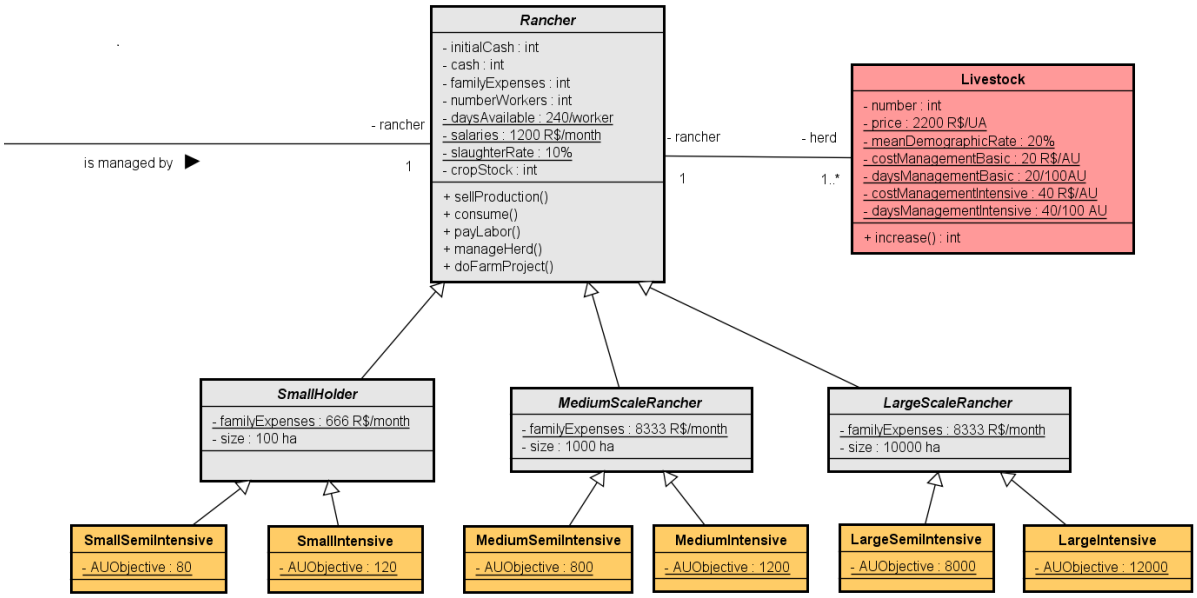


Figure 4-3 : Zoom sur les agents du modèle (extrait du diagramme de classe UML)

Entités spatiales et représentation de l'espace

L'environnement représente une exploitation (Farm), composée d'entités spatiales élémentaires (Plot) de 1 ha (100 x 100 m). Tous les Plots sont agrégés en unités géomorphologiques (Geomorphological Units). Ces unités sont définies par le type de sol, la pente, la capacité de drainage et la position dans la toposéquence. Six types d'unités géomorphologiques sont représentés dans le modèle : plateau (plateaus), bordure convexe de plateau (escarpment), versants de vallée faiblement ondulées/plaine (gently undulated Valley), versants de vallée moyennement à fortement ondulés (sloping Valley), fond de vallée inondable (flood bottom valley), rive des cours d'eau (river edge) (Tableau 4-1 et Figure 4-4).

Tableau 4-1 : Caractéristiques des unités géomorphologiques représentées dans le modèle

Unité géomorphologique	**Texture de sol**	**Pente**	**Capacité de drainage**	**Aptitude mécanisation**
Plateau (Plateaus)	Argileux	Faible	Bonne	Oui
Bordure convexe de plateau – relief escarpé (Escarpment)	Pierreux	Forte	Bonne	Non
Versant de vallée légèrement ondulée (Gently undulated Valley)	Sablo-argileux	Faible	Bonne	Oui
Versant de vallée moyennement ondulée (Sloping Valley)	Sablo-argileux	Forte	Bonne	Non
Fonds de vallée (Bottom Valley)	Sablo-argileux	Faible	Faible	Oui en saison sèche
Rive des cours d'eau (River Edge)	Sablo-argileux	Moyenne	Faible	Non

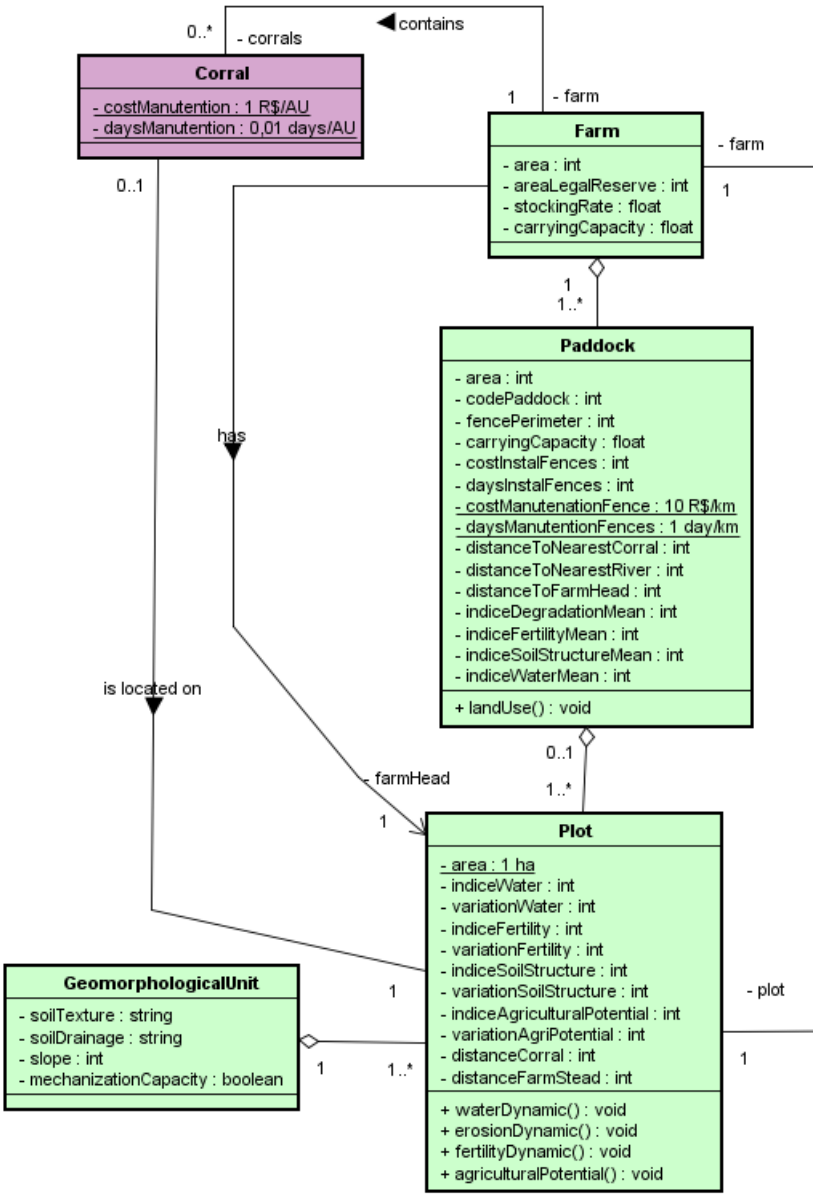


Figure 4-4 : Zoom sur les entités spatiales du modèle (extrait du diagramme de classe UML)

Chaque parcelle est associée à une occupation du sol (Land-Cover/LandUse) : forêt (Forest), prairie (Pasture) et cultures (Crop). Chaque occupation de sol comprend plusieurs sous-types. Les six classes de pâturage se différentient selon le type de gestion (pratiques), les performances agronomiques (capacité de charge maximale), la charge de travail et les coûts liés à l'implantation et à l'entretien (nettoyage, fertilisation). Les deux classes de cultures annuelles se différentient selon leur place dans la rotation (les cultures associées avec du pâturage sont nécessairement suivies d'un pâturage). Les cinq classes de forêts ont été différentiées à partir des règles du code forestier (Tableau 4-2 et Figure 4-5).

Chaque parcelle est également associée à un indicateur de l'état de la ressource en eau verte (indice Water), en fertilité (indice Fertility) et en sol (indice Soil Structure). Les pratiques des éleveurs, le type de couverture et les unités géomorphologiques affectent les processus

écologiques (l'évaporation, combustion, lixiviation, érosion) qui vont dégrader ou agrader l'état de ces trois ressources.

Toutes les parcelles couvertes de prairie sont regroupées au sein de parcs clôturés (Paddocks) (Figure 4-4). La taille des paddocks peut varier dans le temps et dans l'espace. Les paddocks sont caractérisés par une capacité de charge moyenne, une distance au siège et aux corrals de l'exploitation. Les clôtures présentent un coût d'installation et d'entretien (humain et financier), fonction du périmètre du paddock. Le troupeau est spatialement distribué sur les Paddocks selon leur capacité de charge moyenne. L'introduction de l'entité spatiale Paddock est une nouveauté par rapport au modèle AMAZ (Bommel *et al.*, 2012). Dans notre modèle, les éleveurs prennent des décisions de gestion des usages des sols à l'échelle du paddock et plus à l'échelle du plot.

Tableau 4-2 : Caractéristiques des usages des sols dans le modèle

Usage des sols	**Caractéristiques**
Forêt (forest)	
Jeune régénération (Fallow)	Régénérations ligneuses dominées par des arbustes et petits arbres (moins de 3-4 m), disparition des herbacées Âge : 0 - 5 ans
Forêt secondaire initiale (Initial Secondary Forest)	Composée essentiellement d'arbres de port plus développé, canopée irrégulière Âge : 5 - 20 ans
Forêt secondaire âgée (Old Secondary Forest)	Forêt avec une canopée plus dense Âge : plus de 20 ans
Forêt primaire (Primary Forest)	Forêt sans coupe rase
Forêt riparienne (Riparian Forest)	Forêt (primaire ou régénérée) en bordure des cours d'eau
Prairie (Pasture)	
Extensif (Extensive)	Pratiques visant à minimiser les coûts : implantation après brûlis, graminée rustique (Brachiarão), entretien minimum (nettoyage avec feu, pas de fertilisation), grands paddocks Capacité de charge maximum = 1,2 UA/ha
Intensification Basique (Basic)	Réforme basique des prairies : travail du sol, nouvelle graminée, amendement calcaire au semis, arrêt de l'usage du feu, désherbage mécanique, division des paddocks Capacité de charge maximum = 1,4 UA/ha
Bonnes Pratiques (Good practices)	Gestion améliorée : travail du sol, amendement calcaire au semis et fertilisation (P2O5) à intervalle régulier, graminée sélectionnée, herbicide, division des paddocks Capacité de charge maximum = 1,8 UA/ha
Tournant Intensif en intrants chimiques (Intensive Rotational)	Pâturage tournant, amendement calcaire au semis et fertilisation (NPK) après chaque passage, graminée sélectionnée, herbicide, petits paddocks Capacité de charge maximum = 2,5 UA/ha
Irrigué (Irrigated)	Mêmes pratiques que Tournant Intensif + irrigation en saison sèche Capacité de charge maximum = 4 UA/ha
Ecologiquement intensif (Ecological Intensive)	Gestion visant à favoriser les processus écologiques : mêmes pratiques que bonnes pratiques + usage d'arbres/légumineuses Capacité de charge maximum = 2 UA/ha
Cultures (Crop)	
Non intégrée (Anual Crop)	Cultures en saison humide (soja ou maïs), sol nu en saison sèche
Culture x pâturage (Pasture crop)	Culture de maïs en association avec du pâturage

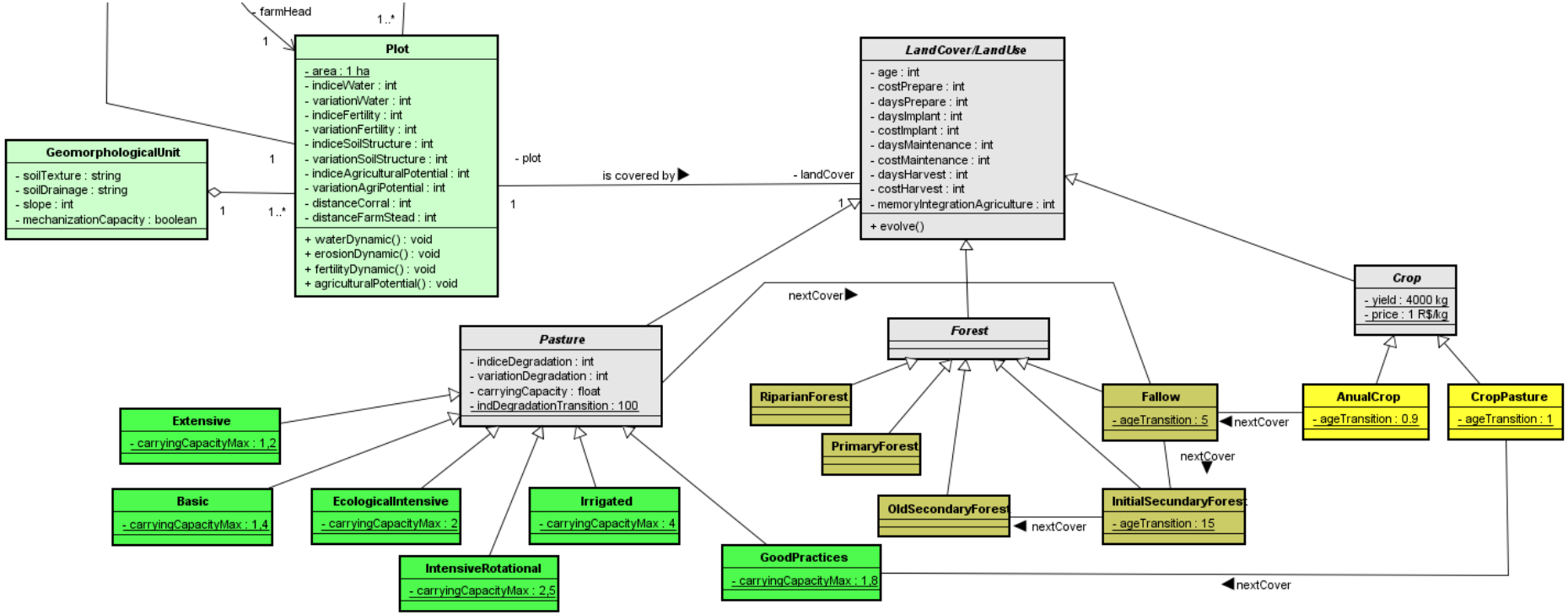


Figure 4-5 : Zoom sur les types d'usages des sols dans le modèle (extrait du diagramme de classe UML)

Parmi les trois types de représentations de l'espace utilisés dans les SMA, abstraite, explicite ou faisant implicitement référence à un territoire donné (Le Page, 2017), nous avons choisi le troisième cas. Nous avons conçu un environnement stylisé d'un paysage typique des fronts post-pionniers d'Amazonie, rendant compte de la configuration spatiale des principales unités géomorphologiques dans la région (Figure 4-6).

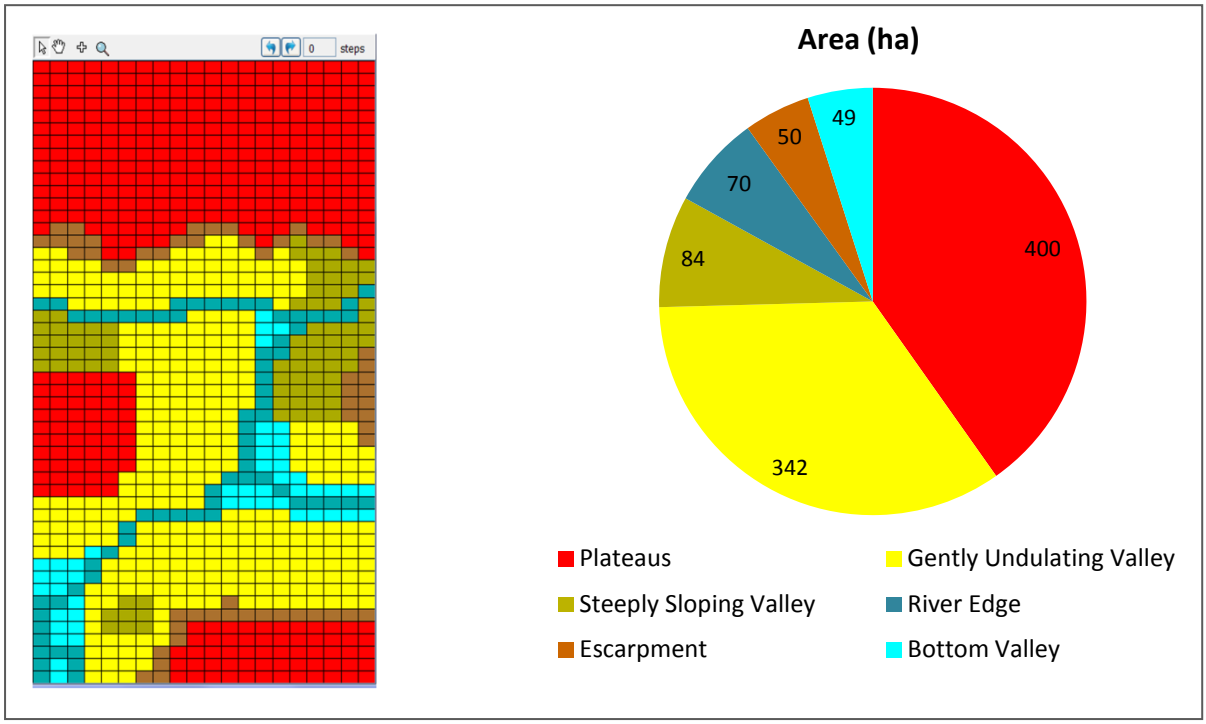


Figure 4-6 : Distribution spatiale et proportion des différentes unités géomorphologiques représentées dans l'environnement virtuel du modèle sous Cormas (cas de l'exploitation moyenne de 1000 ha)

Entités passives

Chaque exploitation possède un siège (Farm head) et de un à plusieurs corrals (Corral), localisés sur un Plot (Figure 4-4). Nous avons représenté ces infrastructures du fait de l'importance qu'elles jouent dans les décisions de localisation des pratiques d'intensification. Chaque corral a un coût d'entretien.

Facteurs exogènes

Dans le scénario *Business as usual*, le modèle n'intègre pas de moteurs de changement extérieurs au système tel que le climat, le marché ou des politiques publiques spécifiques (accès au crédit, législation forestière).

4.1.2.2 Variables

L'Annexe 11 décrit de manière exhaustive l'ensemble des variables utilisées et leur valeur par défaut.

4.1.2.3 Echelle spatiale et temporelle

La résolution spatiale du modèle est de 100 mètres. Chaque pixel constitue un Plot (100 x 100 mètres). L'étendue spatiale est définie selon la taille de l'exploitation :

- 100 ha pour les éleveurs familiaux, soit une grille de 10 x 10 pixels ;
- 1 000 ha pour les éleveurs de taille moyenne, soit une grille de 20 x 50 pixels ;
- 10 000 ha pour les fazendas de grande échelle, soit une grille de 100 x 100 pixels.

Pour définir l'échelle temporelle, nous avons cherché un compromis entre les activités anthropiques et les dynamiques écologiques. Chaque simulation est exécutée sur une période de 20 ans et le pas de temps est de 1 an. A chaque pas de temps, les éleveurs prennent des décisions relatives au choix de pratiques et à leur organisation spatiale. Il est important de noter que dans la réalité, les producteurs n'appliqueront certainement pas les mêmes stratégies pendant 20 ans. Cependant, pour pouvoir observer certaines dynamiques écologiques telles que la régénération forestière par exemple, il est nécessaire de simuler de longues périodes de temps.

4.1.3 Vue d'ensemble des processus et de leur séquence

Chaque année, une séquence d'activités a lieu en suivant l'ordre présenté dans le diagramme de séquence (Figure 4-7). Tout d'abord, les ressources naturelles, la couverture végétale et le potentiel de production des prairies évoluent (effets différés dans le temps des pratiques de l'année n-1). Puis, les éleveurs réalisent leurs activités. Ils commencent par subvenir aux besoins essentiels (consommer, payer les salariés), puis gérer le troupeau, puis gérer les infrastructures. Puis ils réalisent leurs pratiques liées à l'intensification des pâturages (gestion des pâturages, implantation de cultures, division des parcs, réforme des parcs les plus dégradés). Pour ce faire, ils comparent la capacité de charge actuelle de leurs parcs à leur objectif de capacité de charge. Si la capacité de charge actuelle est inférieure à leur objectif, alors ils vont chercher à implanter un maximum de pâturage ayant une forte productivité. Dans le cas contraire, ils ne changent pas d'usage de sol. En fonction des pratiques de gestion du troupeau et de l'indice de charge, le troupeau croît. Enfin, à la fin de l'année, l'éleveur dresse le bilan économique. Il vend la production issue du troupeau bovin et des cultures (s'il en a cultivé).

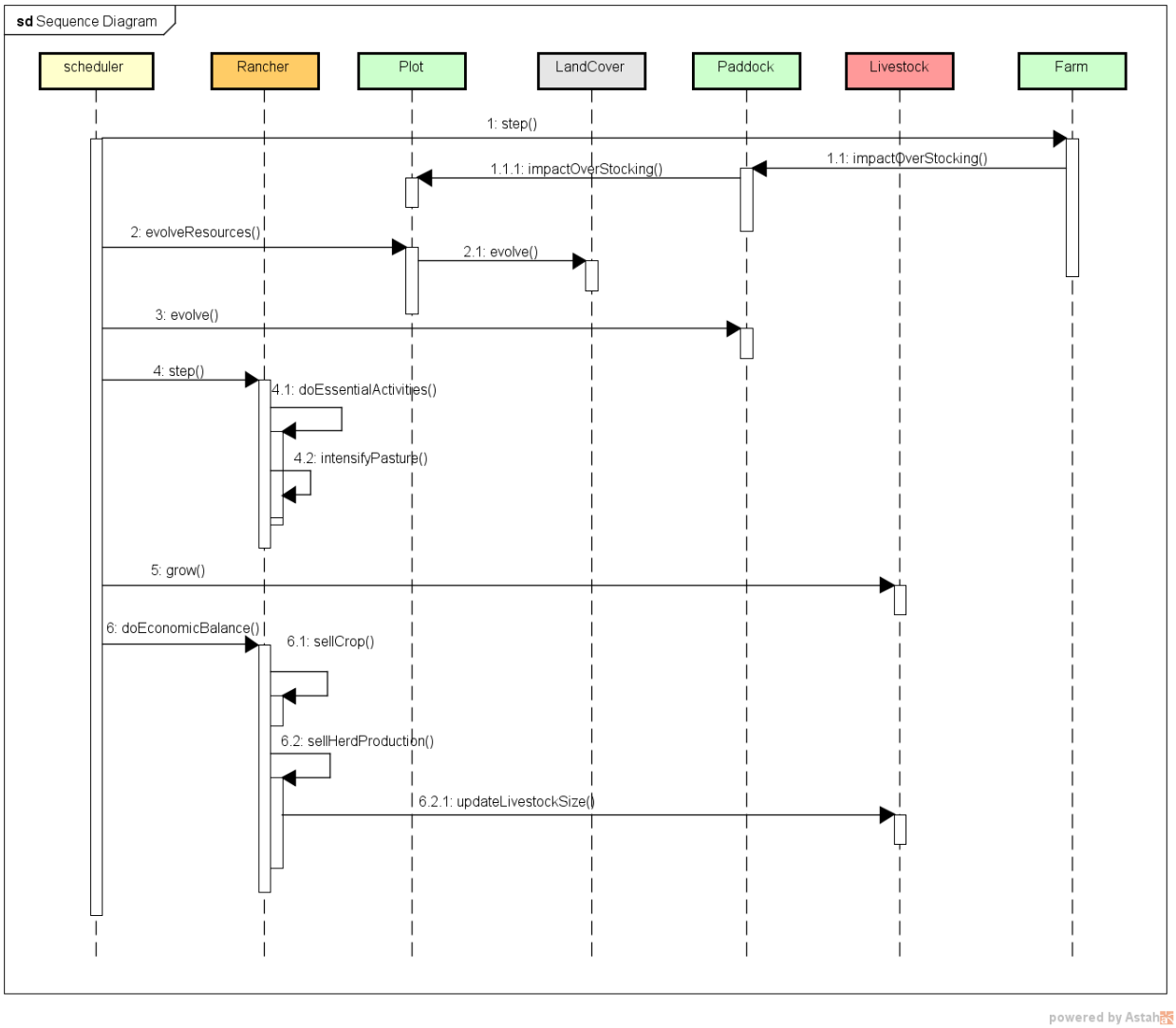


Figure 4-7 : Diagramme de séquence

4.1.4 Concepts

4.1.4.1 Cadre théorique et empirique

Pour représenter les interactions entre système de décision des éleveurs, pratiques agricoles, processus écologiques et ressources naturelles, nous nous sommes appuyés sur l'approche théorique proposée dans la section 2.1.

Concernant la représentation des décisions des éleveurs en termes de choix de pratiques et de localisation de ces pratiques, d'après la typologie de An (2012) décrite dans le paragraphe 2.1.4.2.4, nous nous sommes appuyés sur un modèle de décision à base de règles heuristiques de type *« Si, ..., alors ..., sinon »* et des théories spatiales (espace absolu et relatif). Nous avons considéré que les éleveurs prennent des décisions en fonction d'une distance euclidienne entre deux points (théorie de l'espace absolu) et en fonction des caractéristiques du paysage, un agroécosystème spatialisé où sont spatialement distribués différents types d'unités géomorphologiques et d'usage des sols avec des potentiels agro-

écologiques variables (théorie de l'espace relatif). Les règles de décision ont été définies de façon empirique à partir des observations directes issues de notre travail d'enquêtes ou de connaissances d'experts. Pour définir les règles de décision relative à la localisation des pratiques, nous nous sommes en particulier basés sur les variables décisionnelles biophysiques et topologiques et des critères de décision identifiés dans le paragraphe 3.3.2. Mais, dans un souci de simplification, nous n'avons pas considéré l'ensemble de ces variables et critères de décision.

Pour représenter les effets des pratiques sur les ressources naturelles, nous avons eu recours à une approche qualitative, basée sur des connaissances d'experts, du fait de l'absence de données expérimentales quantitatives. Nous nous sommes également appuyés sur ce type de connaissances et les algorithmes développés dans AMAZ (Bommel *et al.*, 2012) pour modéliser la dynamique démographique du troupeau et la dégradation des pâturages.

4.1.4.2 Prises de décision individuelle et hétérogénéité

Chaque éleveur se fixe un objectif de capacité de charge à atteindre sur l'ensemble de la ferme, sous des contraintes de ressources financières et humaines. Pour atteindre cet objectif, les éleveurs doivent intensifier la conduite des prairies. Cet objectif et les stratégies d'intensification pour l'atteindre varient selon les types d'éleveur.

Les prises de décision concernant leurs activités essentielles, la gestion du troupeau, des infrastructures, et le bilan économique sont les mêmes entre les types. En revanche, les prises de décision relatives aux choix des usages des sols, à la conduite des pâturages et à leur localisation dans l'espace diffèrent entre les types intensif et semi-intensif. Les éleveurs choisissent les types d'usage des sols et de conduite des pâturages en fonction de leurs préférences (un ensemble de possibilités est défini au préalable pour chaque stratégie), des performances escomptées et de l'état de la parcelle. Les éleveurs localisent ces pratiques en tenant compte des distances euclidiennes (espace absolu) ; mais aussi de l'attractivité des unités géomorphologiques (un ensemble de variables géomorphologiques et pédologiques), des types d'usages des sols, de l'état de dégradation des prairies et des ressources naturelles (espace relatif).

De manière générale, le type intensif haut niveau d'intrants choisit des usages des sols intensifs en intrants, en capital et en main d'œuvre.

- Sur les parcelles situées sur les unités géomorphologiques perçues comme les plus adaptées à l'intensification (plateau, vallée peu ondulée, fond de vallée) et dans un rayon proche du corral et du siège de l'exploitation, ce type choisit des usages des sols de type « pâturage irrigué » et « pâturage tournant intensif ».
- Les usages agricoles localisés sur les unités géomorphologiques protégées par la législation et perçues comme étant moins aptes à l'intensification (rives des cours d'eau, zones escarpées et vallées ondulées) sont mises en friche.

- Sur les parcelles les plus éloignées, l'éleveur choisit plutôt des usages des sols de type « bonnes pratiques », et « écologiquement intensifs ».
- Ce type intensif se diversifie aussi dans l'agriculture. Il spécialise les parcelles à haut potentiel (plateau) ou intègre les cultures dans une rotation avec des prairies pour les réformer.

Le type semi-intensif, bas niveau d'intrants adopte une stratégie d'intensification qui exige moins d'intrants et de main d'œuvre. Ce dernier recourt aux usages des sols « pâturage bonnes pratiques », « pâturage écologiquement intensif » et en plus faible proportion au « pâturage tournant intensif ». Ce type n'investit pas dans les cultures annuelles, ni dans l'irrigation. Pour atteindre son objectif de capacité de charge, ce type d'éleveur doit maintenir une surface productive suffisamment grande. Aussi il ne met en friche que les zones protégées par le code forestier (rives des cours d'eau, zones escarpées) et maintient en production toutes les autres unités de production.

Les éleveurs agissent dans un certain degré d'incertitude. Les dynamiques des prairies (état de dégradation et potentiel) constituent des processus très complexes, résultant d'interactions entre des dynamiques biophysiques (croissance des pâturages et dégradation des sols variant selon les caractéristiques des unités géomorphologiques) et des pratiques de gestion (entretien des prairies, charge animale), qui sont difficilement prédictibles par les éleveurs.

4.1.4.3 Collectif et apprentissage

Le modèle représente une seule exploitation à la fois. Nous n'avons donc pas exploré toutes les possibilités offertes par les SMA, à savoir la communication et les relations sociales entre agents.

Nous n'avons pas non plus représenté les facultés d'apprentissage individuel des agents. Aussi, les éleveurs ne changent pas de stratégie d'intensification au cours de la simulation. En revanche, en fonction des effets de leur gestion passée sur l'état de dégradation des pâturages, ils peuvent adapter le choix et la localisation des pratiques d'intensification des pâturages.

4.1.4.4 Perceptions

Les éleveurs sont capables de percevoir les différences de potentiel entre les unités géomorphologiques, l'état des ressources naturelles ainsi que l'état de dégradation des pâturages. Ils considèrent ces différentes valeurs pour localiser les usages des sols, et décider de nettoyer ou réformer leurs pâturages.

4.1.4.5 Interactions

L'état des ressources naturelles sur chaque Plot est le résultat d'interactions entre les pratiques des éleveurs, la végétation et les caractéristiques des unités géomorphologiques. Ces

interactions peuvent varier selon la distance du Plot aux infrastructures majeures de l'exploitation (corral, siège de l'exploitation). Elles aboutissent à la formation de paysages spatialement hétérogènes.

4.1.4.6 Stochasticité

Le processus de dégradation des pâturages résulte de l'effet combiné des pratiques (type de gestion, sous-pâturage...) et de l'évolution du potentiel du Plot. Mais il inclut également une dimension aléatoire à chaque pas de temps.

4.1.4.7 Observations

Afin d'analyser et comparer comment les différentes stratégies d'intensification pourraient affecter sur le long terme les ressources naturelles, les dynamiques de paysage et les revenus des éleveurs, nous avons mesuré trois types d'indicateurs.

1) Des indicateurs reflétant les interactions entre élevage et paysage :
   - Les surfaces des différents types d'usages des sols et leur distribution spatiale (pourcentage des différents types par unité géomorphologique),
   - L'évolution des ressources naturelles et leur distribution spatiale (eau, fertilité des sols, structure des sols),
   - L'état de dégradation des prairies,
   - La taille moyenne des paddocks et la longueur des périmètres de clôtures.
2) Des indicateurs de performances :
   - L'évolution de la taille du troupeau,
   - La capacité de charge des prairies (à l'échelle des paddocks et de l'exploitation).
3) Des indicateurs socio-économiques :
   - Le cash accumulé par les exploitations à la fin de chaque année,
   - La quantité de main d'œuvre utilisée.

4.1.5 Implémentation informatique

Le modèle a été implémenté sur la plateforme de simulation CORMAS (version 2015) basée sur l'environnement de programmation VisualWorks 7.6 et le langage de programmation orienté-objet SmallTalk.

4.1.6 Initialisation

Au sein de chaque groupe (petit, moyen ou grand), les éleveurs possèdent le même environnement de départ, c'est-à-dire la même composition et distribution spatiale des usages des sols, le même état de dégradation des pâturages et les mêmes niveaux de ressources naturelles (eau, fertilité des sols, structure des sols) (Figure 4-8, Figure 4-9, Figure 4-10, Figure 4-11). L'état de dégradation des pâturages et les niveaux de ressources naturelles ont été définis à partir du type d'usage des sols à l'initialisation (Annexe 12). La taille du troupeau (nombre d'UA) est égale à la capacité de charge de l'ensemble des pâturages de

l'exploitation. La capacité de charge totale de l'exploitation est calculée automatiquement au début de chaque initialisation. L'environnement de départ est le même à chaque simulation. Au sein de chaque groupe (petit, moyen ou grand), le montant de cash initial est identique.

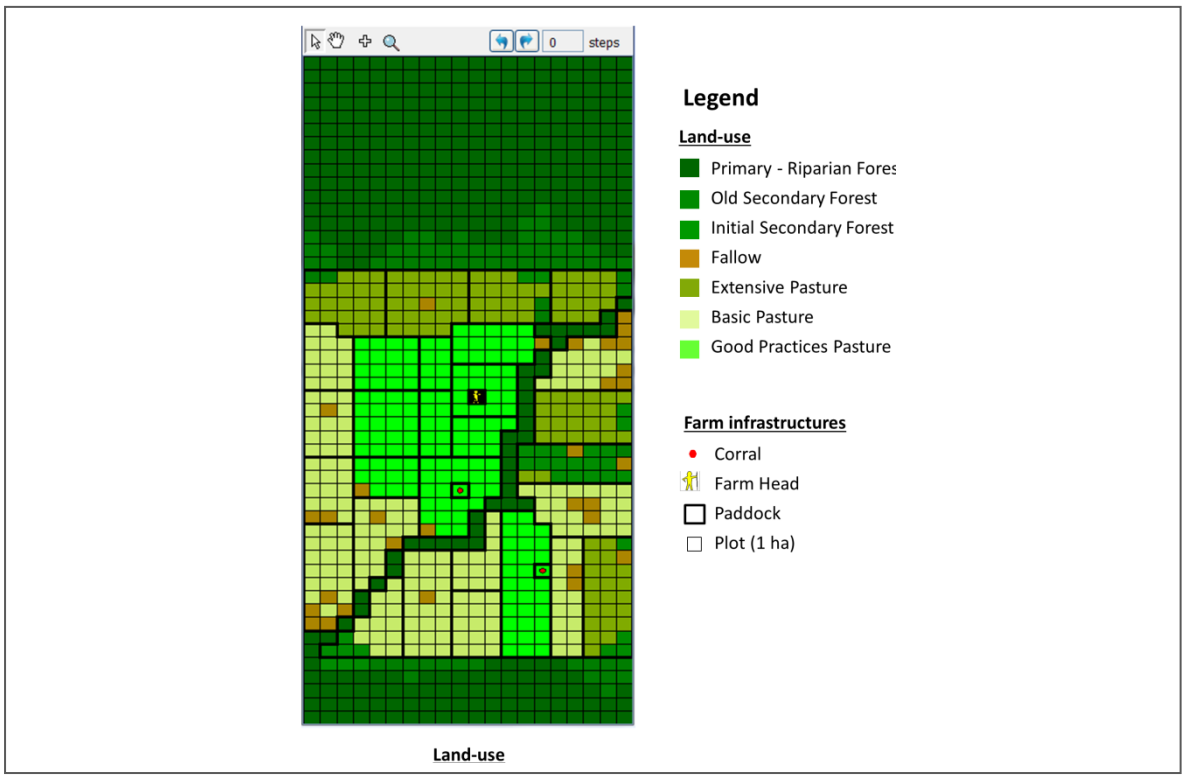


Figure 4-8 : Distribution spatiale des usages de sols à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha)

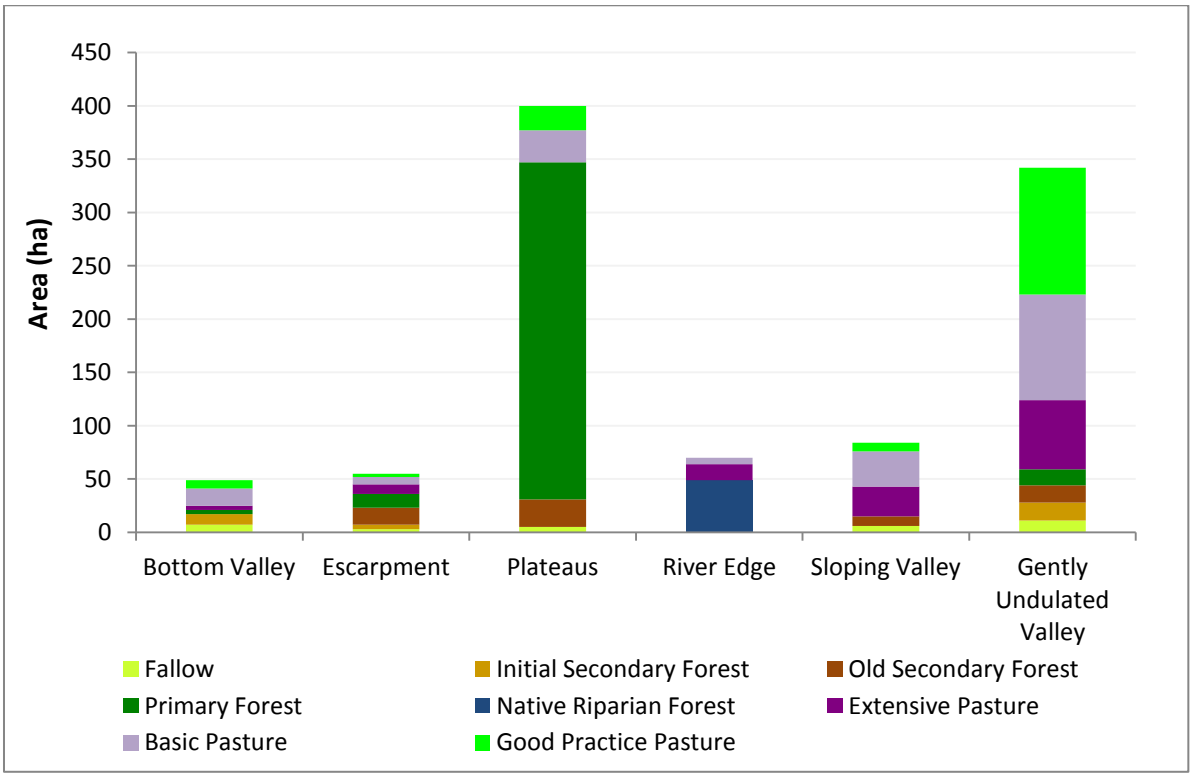


Figure 4-9 : Distribution des différents types d'usages de sols par unité géomorphologique à l'initialisation du modèle (cas de l'exploitation de 1000 ha)

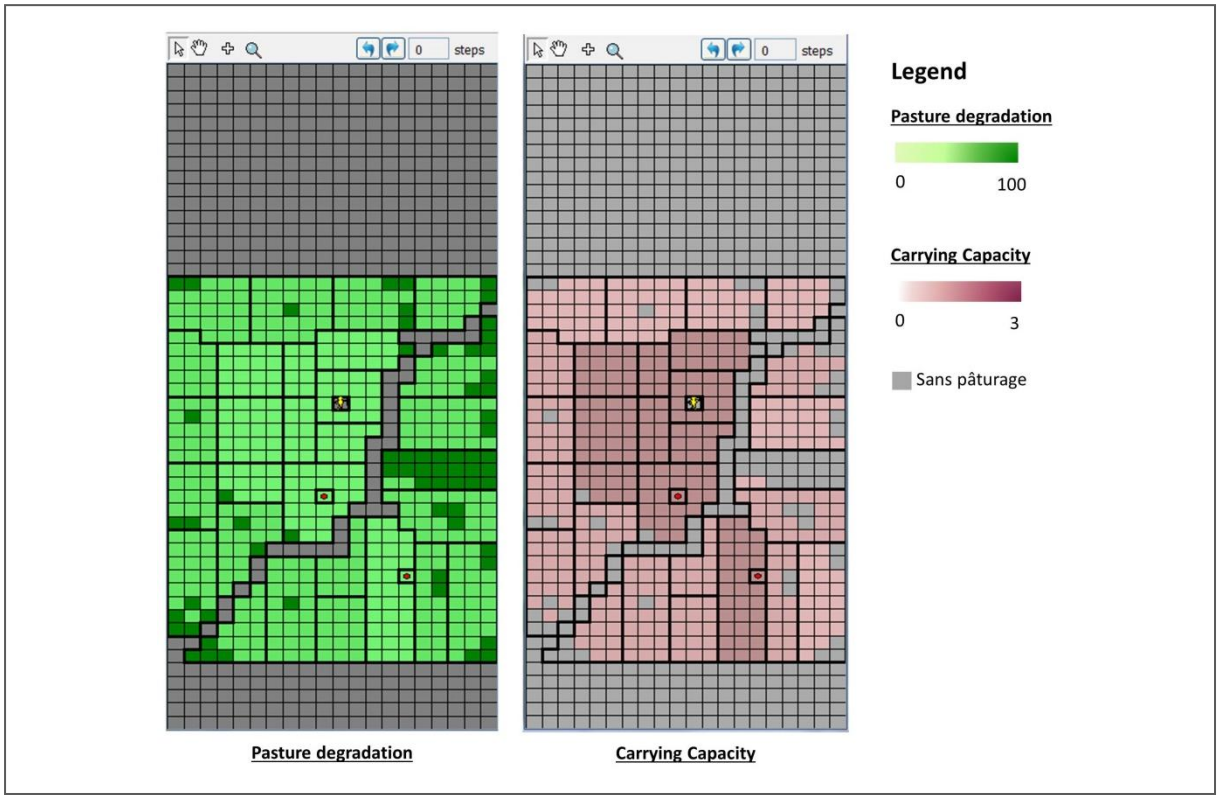


Figure 4-10 : Distribution spatiale de la dégradation des pâturages et de la capacité de charge à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha)

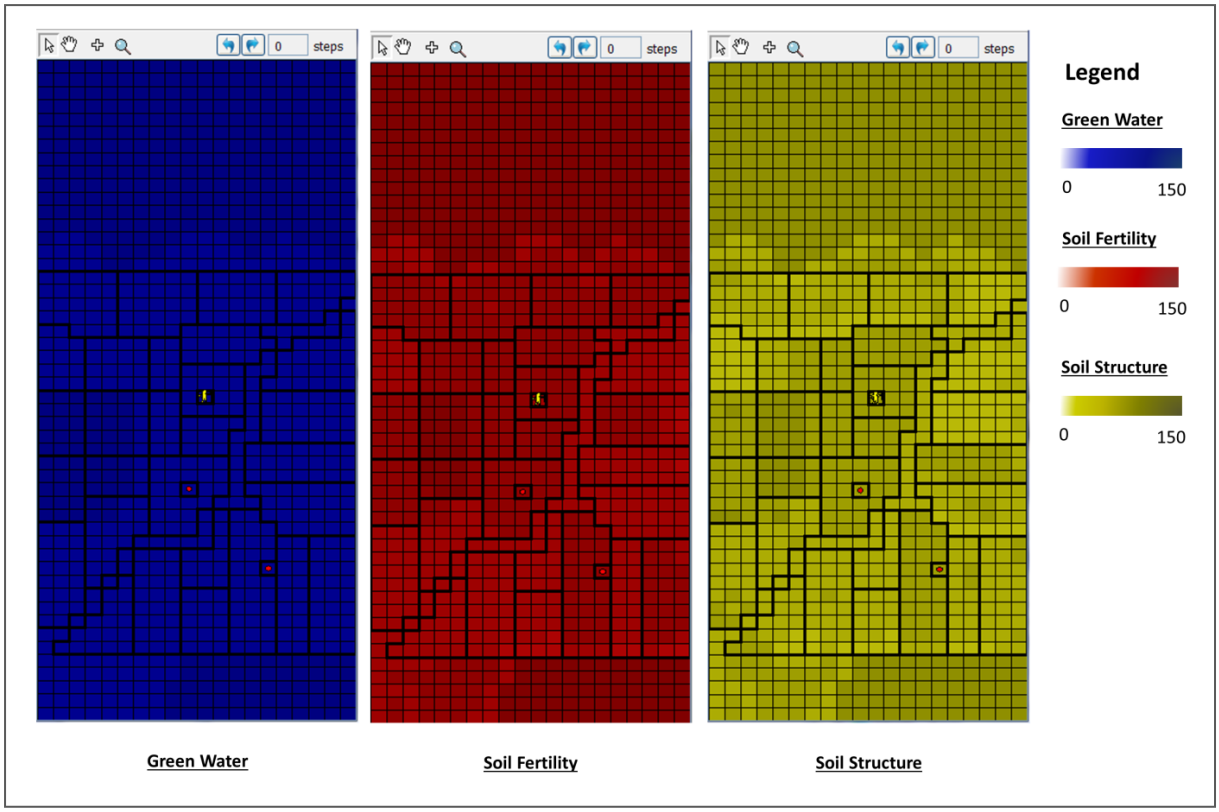


Figure 4-11: Distribution spatiale des ressources naturelles à l'initialisation du modèle (exploitation de 1000 ha)

4.1.7 Données

Le modèle n'utilise pas de données de source externe pour représenter des processus variant dans le temps.

4.1.8 Sous-modèles

Le modèle comprend trois sous-modèles : 1) la gestion globale de l'exploitation, du troupeau et des pâturages; 2) la dynamique du troupeau ; 3) les dynamiques écologiques de l'environnement (succession de végétation, dégradation des pâturages et ressources naturelles). Pour la construction de plusieurs algorithmes (gestion globale de l'exploitation et du troupeau, dynamique du troupeau, dégradation des pâturages, succession de végétation), nous nous sommes appuyés sur le modèle AMAZ (Bommel *et al.*, 2012).

4.1.8.1 Gestion de l'exploitation, du troupeau et des pâturages

Les activités des éleveurs se décomposent en trois phases :

1) Réaliser les activités essentielles, c'est-à-dire consommer, payer les charges fixes de l'exploitation, gérer le troupeau et les infrastructures de l'exploitation ;
2) Réaliser le projet d'intensification des usages des sols ;
3) Vendre les produits.

1) <u>Activités essentielles : Gestion de l'exploitation et du troupeau</u>

A chaque pas de temps, les éleveurs commencent par réaliser les activités prioritaires (Figure 4-12 et Annexe 13). Premièrement, les éleveurs consomment, puis ils paient les salaires (s'ils emploient de la main d'œuvre), puis ils soignent le troupeau, puis ils s'occupent des infrastructures de l'exploitation (corral, clôtures). A chaque fois que l'éleveur réalise une activité, son cash décroît et il utilise de la main d'œuvre. Ce diagramme d'activité est le même pour tous les éleveurs.

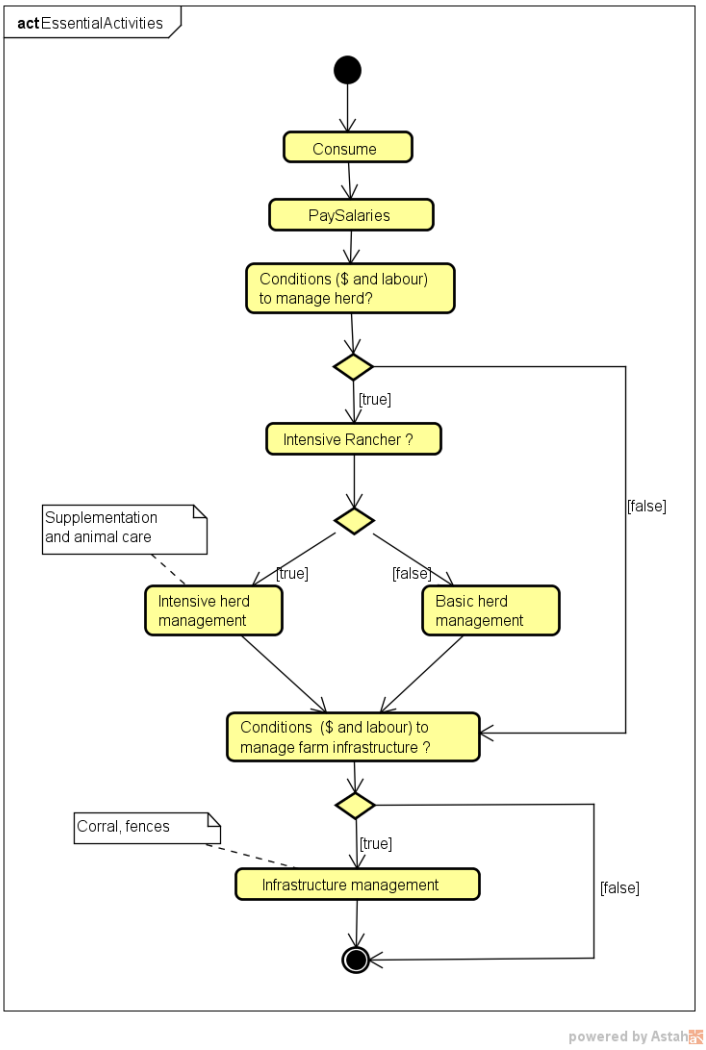


Figure 4-12 : Diagramme d'activités - Activités Essentielles

2) Intensification des usages des sols

Ensuite, les éleveurs réalisent leur stratégie d'intensification des usages des sols. Ils prennent des décisions quant au choix des usages des sols et à la gestion des cultures et prairies. Les activités se déroulent dans cet ordre (Figure 4-13).

a) Les éleveurs abandonnent les pâturages dégradés localisés sur des unités géomorphologiques qu'ils perçoivent non aptes à l'intensification ;
b) Ils implantent des cultures (en intégration ou non) s'ils sont de type intensifs ;
c) Ils entretiennent les prairies (nettoient et fertilisent) ;
d) Ils divisent les paddocks en plus petits paddocks ;
e) Ils réforment des prairies afin d'accroître la productivité si la capacité de charge de l'exploitation est inférieure à l'objectif fixé ;
f) Si la charge animale est inférieure à la capacité de charge, ils achètent des bovins pour maintenir l'équilibre entre le nombre d'UA (unités animales) et la capacité de charge.

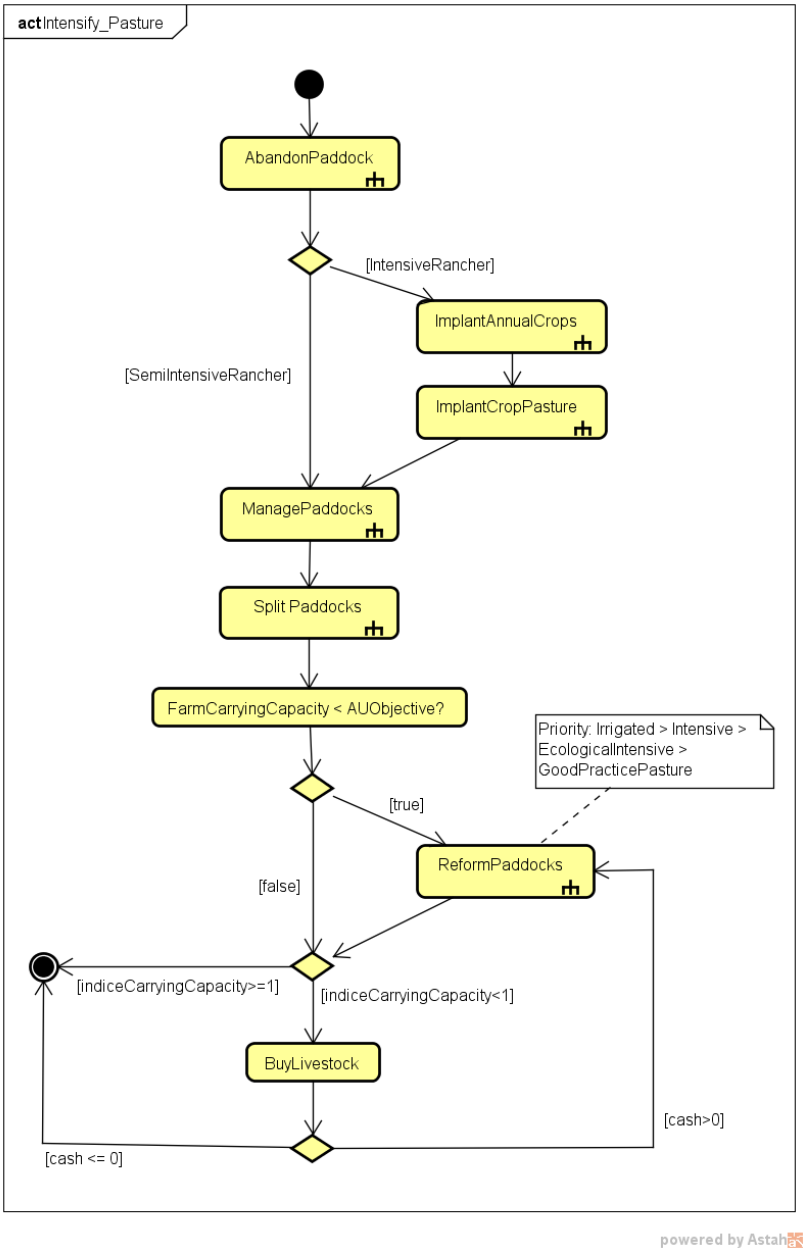


Figure 4-13 : Diagramme d'activités - Projet d'intensification

Les choix entre les différents types d'usages des sols diffèrent entre éleveur intensif et semi-intensif. Les règles de décision relatives à la localisation des usages des sols sont différentes selon le type d'usage des sols et varient entre éleveur intensif et semi-intensif (Tableau 4-3). Cinq variables décisionnelles peuvent influencer les décisions de localisation des activités des éleveurs : la distance euclidienne de la parcelle au siège ou au corral de l'exploitation, le type d'unités géomorphologiques, le type d'usages des sols, l'état de dégradation des prairies et, pour l'éleveur intensif, l'état de dégradation des ressources naturelles (fertilité et structure des sols).

Tableau 4-3 : Variables décisionnelles et critères considérés pour localiser les pratiques d'intensification

Action	**Localisation visée par les intensifs**	**Localisation visée par les semi-intensifs**
Abandon prairies => régénération forêts	- Rives des cours et zones escarpées (APP) et vallée ondulée - Usage des sols : prairie dégradée (dégradation > 60%), jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale	- Rive des cours et zones escarpées (APP) - Usage des sols : prairie dégradée (dégradation > 60%), jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale
Entretien des prairies	- Usage des sols : prairie - Priorité aux paddocks les plus dégradés, puis les plus près du siège de l'exploitation	- Usage des sols : prairie - Priorité aux paddocks les plus dégradés, puis les plus près du corral
Division des prairies	- Dans un faible rayon autour du corral - Indice de dégradation < 60% - Priorité aux paddocks les plus grands, puis les plus proches du corral	- Dans un grand rayon autour du corral - Indice de dégradation < 60% - Priorité aux paddocks les plus grands, puis ceux qui ont été moins souvent divisés
Implantation de cultures annuelles (spécialisation)	- Plateau - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) - Exclusion des prairies intensifiées - Priorité aux paddocks les plus grands, puis aux régénérations forestières (forêts secondaires initiales, puis jeunes régénérations), puis aux prairies en les classant des moins aux plus productives (pâturages extensifs, puis pâturages basiques)	Non pratiqué
Implantation de cultures annuelles en association avec du pâturage	- Plateau ou vallée mécanisable - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) - Prairies dégradées (dégradation > 60%) ou indice fertilité du sol < 30% - Priorité aux régénérations forestières (forêts secondaires initiales, puis jeunes régénérations), puis aux prairies les plus dégradées en les classant des moins aux plus productives (pâturages extensifs, puis pâturages basiques, puis bonnes pratiques, puis écologiquement intensives, puis tournant intensif puis irriguées)	Non pratiqué
Pâturage irrigué	- Versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée, dans un couloir le long de la rivière - Rayon proche du corral (max 1 km) [a] - Taille paddock <= 10 ha[a] - Capacité de charge prairie < 2 UA/ha - Usage des sols : prairie, jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale - Priorité aux prairies les plus proches du corral et de petite taille	Non pratiqué

Action	Localisation visée par les intensifs	Localisation visée par les semi-intensifs
Pâturage tournant intensif	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée - Rayon proche du corral (max 1 km[a]) - Taille paddock <= 10 ha[a] - Capacité de charge prairie < 1.8 UA/ha - Usage des sols : prairie, jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale - Priorité aux prairies les plus proches du corral	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée - Rayon proche du corral (max 1 km) [a] - Taille paddock <= 10 ha[a] - Capacité de charge prairie < 1.8 UA/ha - Usage des sols : prairie, jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale - Priorité aux prairies les plus proches du corral
Pâturage écologiquement intensif	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) et des cultures - Prairie dégradée (indice dégradation > 60%) ou jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale ou indice structure du sol < 50% - Priorité aux prairies avec structure de sol la plus dégradée et la plus faible capacité de charge	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée, vallée ondulée - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) et des cultures - Rayon proche du corral (max 1 km) [a] - Capacité de charge prairie < 1.8 UA/ha - Prairie dégradée (indice dégradation > 60%) ou jeune régénération forestière ou forêt secondaire initiale ou capacité de charge < 1.5 - Priorité aux parcelles sur plateaux et la plus faible capacité de charge
Pâturage bonnes pratiques	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée, vallée ondulée - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) et des cultures - Capacité de charge < 1 ou au moins 1 ha de régénération forestière - Priorité aux paddocks les plus enfrichés et ayant la plus faible capacité de charge	- Plateau, versant de vallée peu ondulée/plaine, fond de vallée, vallée ondulée - Exclusion des forêts protégées (primaire, secondaire âgée, APP) et des cultures - Rayon proche du corral (1 km) - Capacité de charge < 1 ou au moins 1 ha de régénération forestière - Priorité aux paddocks les plus enfrichés et ayant la plus faible capacité de charge
Pâturage basique	Abandon	Abandon
Pâturage extensif	Abandon	Abandon

[a] Valeurs variables selon la taille de l'exploitation. Dans ce tableau il s'agit des valeurs pour les exploitations de taille moyenne

Les principales activités liées au projet d'intensification sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Abandon des paddocks

Tous les éleveurs abandonnent les prairies dégradées (niveau de dégradation supérieur à 60%) localisées sur les surfaces protégées par le code forestier et perçues comme peu adaptées à l'intensification de l'élevage, c'est-à-dire les unités géomorphologiques de type rive des cours d'eau et zones escarpées. Ils les laissent se régénérer en forêt (Figure 4-14).

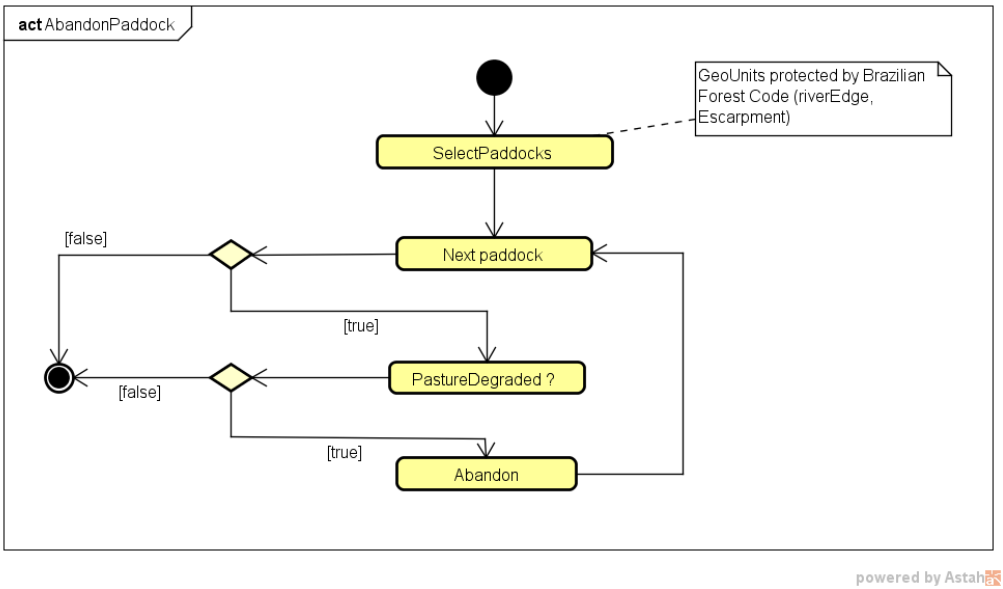


Figure 4-14 : Diagramme d'activités - Abandon des paddocks

Implantation des cultures

Les éleveurs intensifs implantent des cultures annuelles (seules ou en association avec du pâturage). L'itinéraire technique suivi est le même (Figure 4-15). En revanche, comme détaillé dans le Tableau 4-3, les décisions de localisation varient entre cultures annuelles et cultures intégrées dans une rotation avec du pâturage.

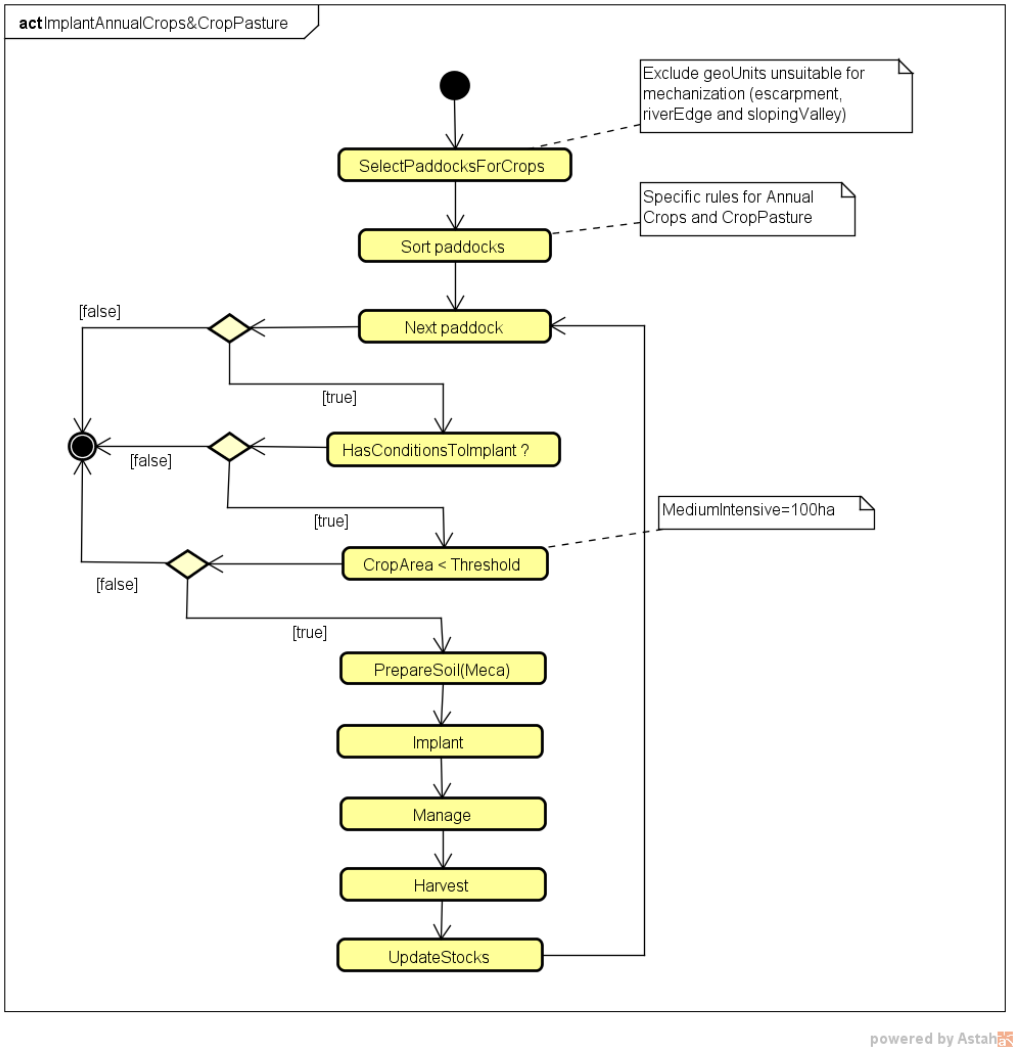


Figure 4-15 : Diagramme d'activités - Implantation des cultures annuelles

Entretien des pâturages

La technique d'entretien (fertilisation, nettoyage), la régularité d'entretien et l'intensité diffèrent selon le type de pâturage. Trois types sont utilisés :

- Type 1 : entretien amélioré sur tous les pâturages : les éleveurs nettoient et fertilisent l'ensemble des pâturages. Ils appliquent un nettoyage ajusté au niveau de dégradation de chaque plot. Ce nettoyage adapté à la géographie de la dégradation favorise des paddocks uniformes (Figure 4-16).
- Type 2 : entretien amélioré sur les pâturages en cours de dégradation : c'est le même type d'entretien que le type 1 mais il n'est appliqué que sur les pâturages ayant un état de dégradation supérieur à 30%. Le nettoyage est ajusté au niveau de dégradation de chaque plot.
- Type 3 : entretien traditionnel sur les pâturages en cours de dégradation : les pâturages avec un niveau de dégradation supérieur à 30% sont nettoyés mais pas fertilisés. L'entretien est homogène dans l'espace et ne considère pas le niveau de la dégradation du plot (ils éliminent 30 ou 50% des repousses sur chaque plot). Cela favorise plus d'hétérogénéité au sein du paddock (Figure 4-17).

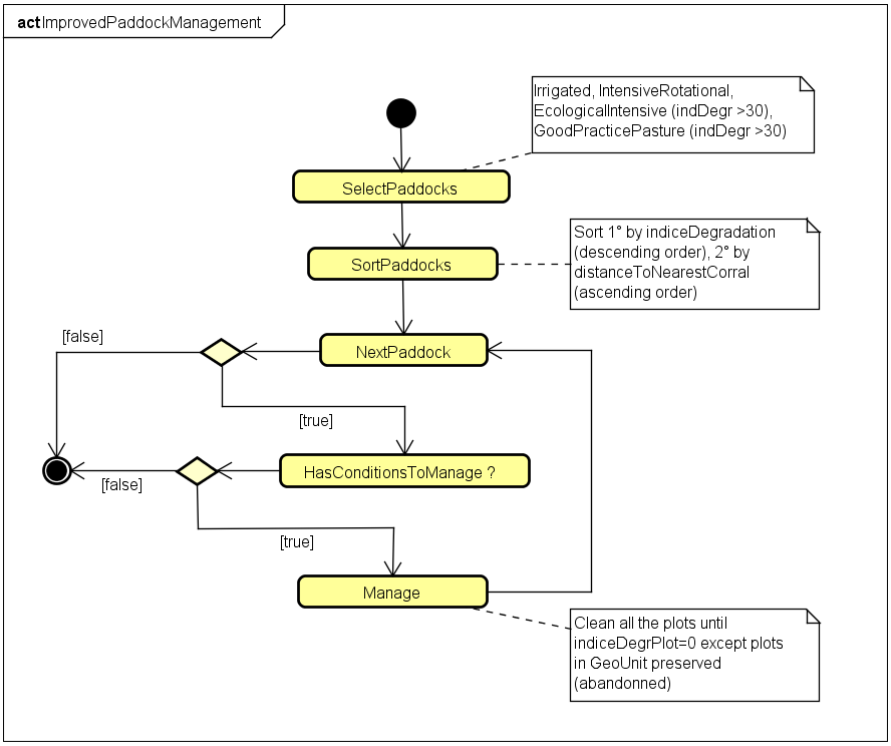


Figure 4-16 : Diagramme d'activités - Entretien amélioré des pâturages

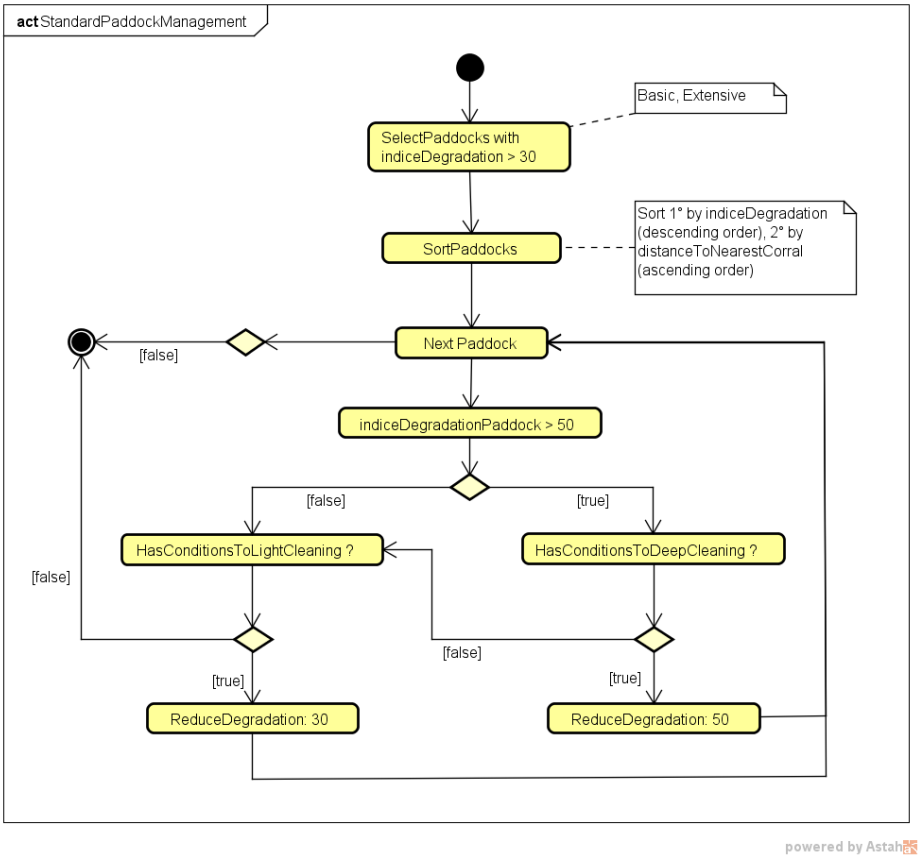


Figure 4-17 : Diagramme d'activités - Entretien traditionnel des pâturages

L'éleveur intensif a recours au type 1 sur les pâturages irrigués et tournants intensifs, au type 2 sur les pâturages écologiquement intensifs et bonnes pratiques et au type 3 sur les pâturages basiques. Dès le début des simulations, il arrête d'entretenir les pâturages extensifs. L'éleveur semi-intensif applique le type 1 sur les pâturages tournants intensifs, le type 2 sur les pâturages écologiquement intensifs et bonnes pratiques et le type 3 sur les pâturages extensifs et basiques (Figure 4-18).

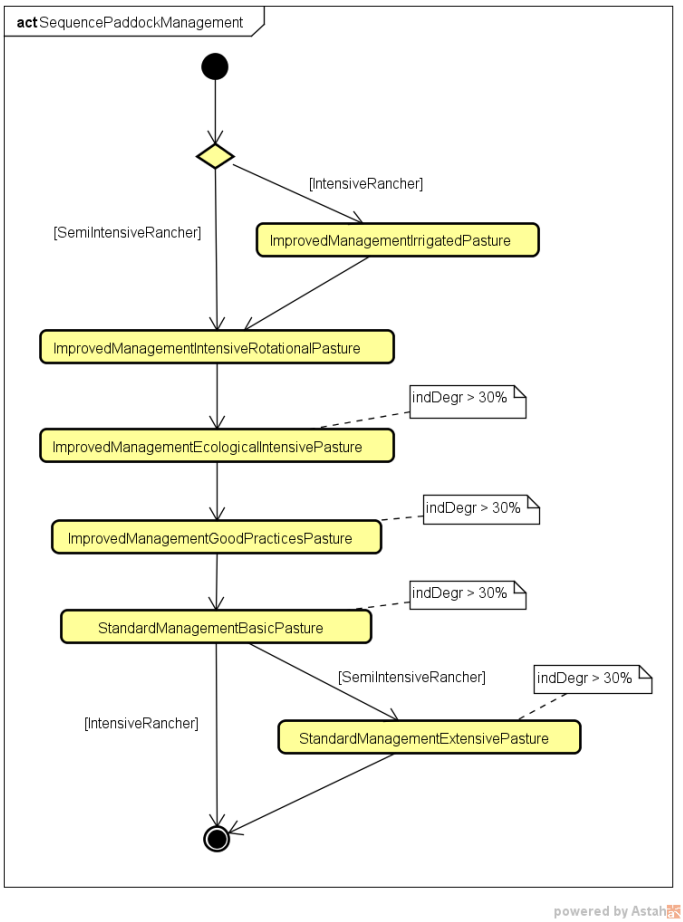


Figure 4-18 : Chronologie de l'entretien des pâturages dans les ranchs de type intensif et semi-intensif

Division des paddocks

Les éleveurs divisent les paddocks en deux dans un rayon autour du corral qui varie selon le type (intensif *vs* semi-intensif) et la taille de l'exploitation. Cette activité concerne 10% des paddocks chaque année chez les intensifs, 5% chez les semi-intensifs. Les éleveurs intensifs et semi-intensifs ont les mêmes règles de localisation. Ils sélectionnent les paddocks productifs, dans un certain rayon autour du siège de l'exploitation, et priorisent les paddocks les plus grands et les plus proches du corral (Figure 4-19).

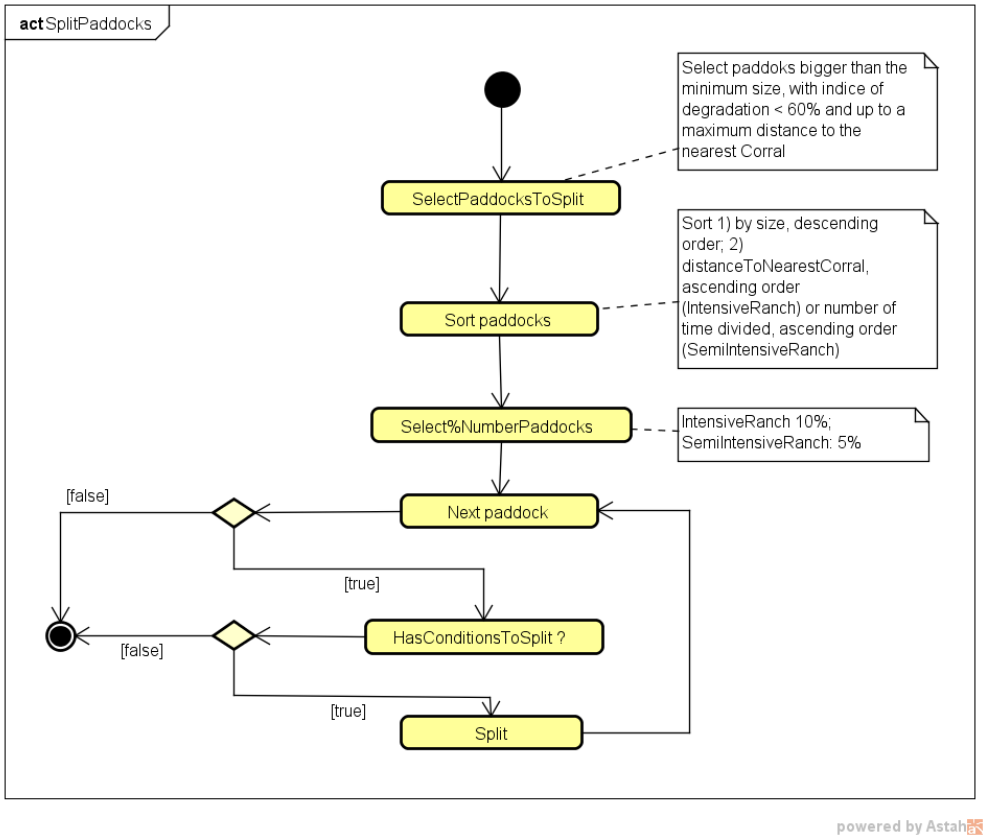


Figure 4-19 : Diagramme d'activités - Division des paddocks

Réforme / intensification des pâturages

Si la capacité de charge de l'exploitation est inférieure à l'objectif fixé, les éleveurs réforment les paddocks les moins productifs (pâturages basiques et extensifs). Les stratégies d'intensification diffèrent sensiblement entre éleveurs intensifs et semi-intensifs. Les éleveurs intensifs choisissent d'implanter en priorité des pâturages irrigués, puis des pâturages tournants intensifs, des pâturages écologiquement intensifs et des pâturages bonnes pratiques. Les éleveurs semi-intensifs implantent en priorité des pâturages tournants intensifs (en plus faible proportion), des pâturages écologiquement intensifs et des pâturages bonnes pratiques.

Le diagramme d'activité est le même pour chaque type de gestion (Figure 4-20), mais chaque pratique est associée à un coût et à un besoin en main d'œuvre différent (Annexe 11). Les pâturages irrigués et tournants intensifs permettent d'améliorer nettement la productivité mais sont en contre partie des activités exigeantes en main d'œuvre et en capitaux. Les coûts et besoins en main d'œuvre pour la préparation (travail du sol et si besoin défriche) sont fonction du précédent (forêt, pâturage ou cultures). Pour éviter que les éleveurs ne dédient l'ensemble de leurs ressources économiques et financières à une seule activité, nous avons appliqué des seuils (surface maximale à ne pas dépasser par activité).

Les éleveurs ont des préférences de localisation pour chaque activité. Ils sélectionnent dans un premier temps toutes les zones de l'exploitation qui sont adaptées à cette activité, puis ils les classent selon différents critères (Tableau 4-3). De manière générale, les cultures annuelles

sont implantées sur les unités géomorphologiques mécanisables (plateau, vallée peu ondulée). S'il elles n'entrent pas dans la rotation avec les prairies, elles sont installées sur les plateaux (meilleure texture de sol que vallée). Si elles servent à réformer des prairies dégradées ou de jeunes régénérations forestières, l'éleveur les implante aussi dans les vallées. Les pâturages les plus intensifs (pâturage irrigué et tournant intensif) sont implantés sur les unités géomorphologiques au meilleur potentiel pour l'intensification (plateau, vallée peu ondulée, fond de vallée) et dans un rayon proche du corral. Les prairies irriguées sont installées à proximité des rivières. Les prairies écologiquement intensives sont installées sur les reliefs ou sur les sols dont la structure est dégradée. Pour les prairies avec une gestion de type bonnes pratiques, les éleveurs considèrent uniquement le niveau de dégradation.

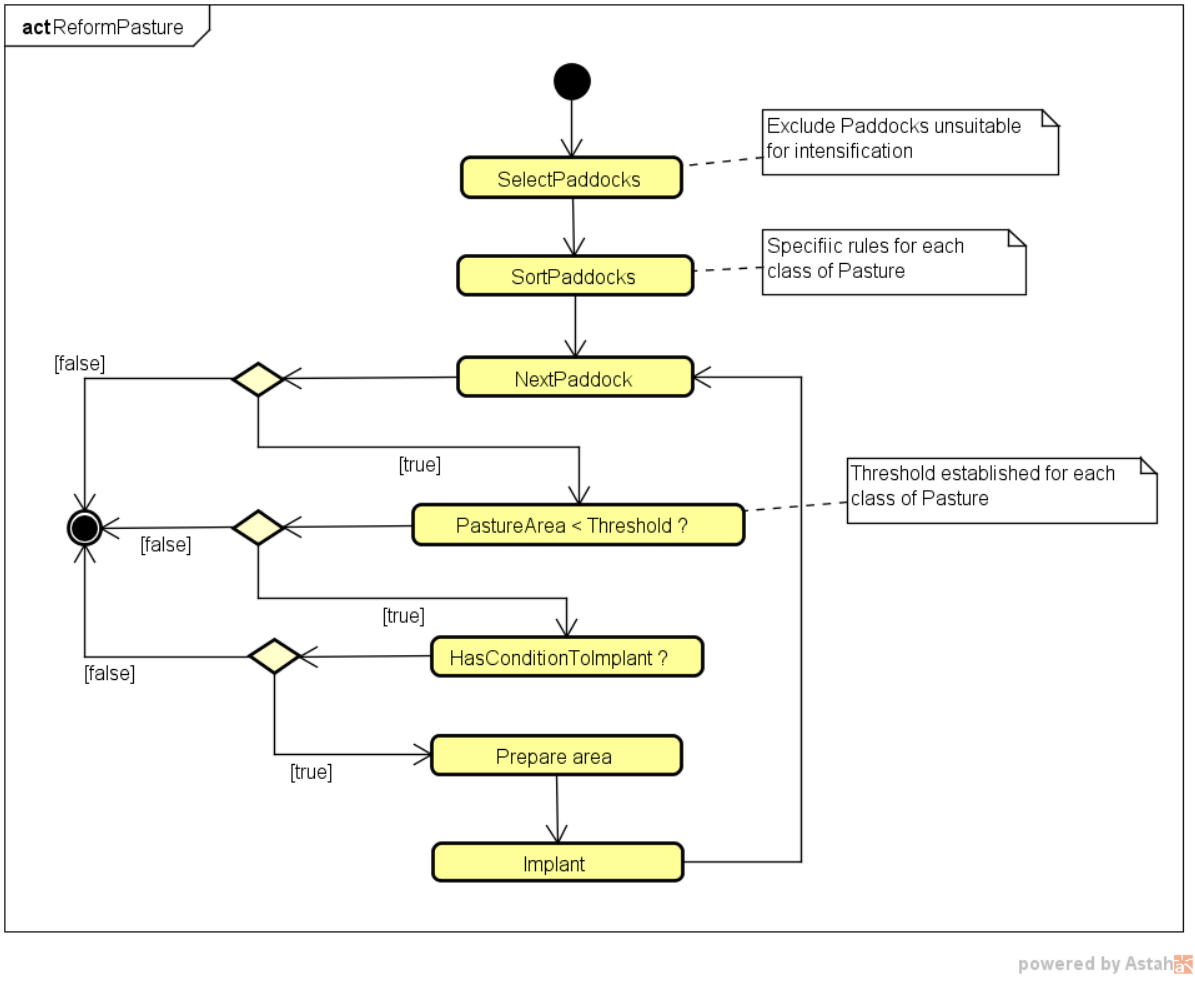


Figure 4-20 : Diagramme d'activités - Réforme des pâturages

3) Bilan économique

A la fin de la campagne, l'éleveur dresse le bilan économique de la saison. Cette activité (Figure 4-21 et Annexe 13), est identique pour tous les types d'éleveurs. Ils vendent leur stock de grains et 10% du troupeau bovin. Si malgré les réformes et les nettoyages, le nombre de bovins est supérieur à la capacité de charge des prairies, l'éleveur décapitalise davantage de têtes jusqu'à ce que la charge de bovins sur l'exploitation soit égale à 1,05 fois la capacité de charge des prairies. Enfin, l'éleveur peut décapitaliser davantage de bovins afin d'avoir un

minimum de trésorerie pour subvenir aux besoins essentiels de l'exploitation l'année suivante (consommation et salaire).

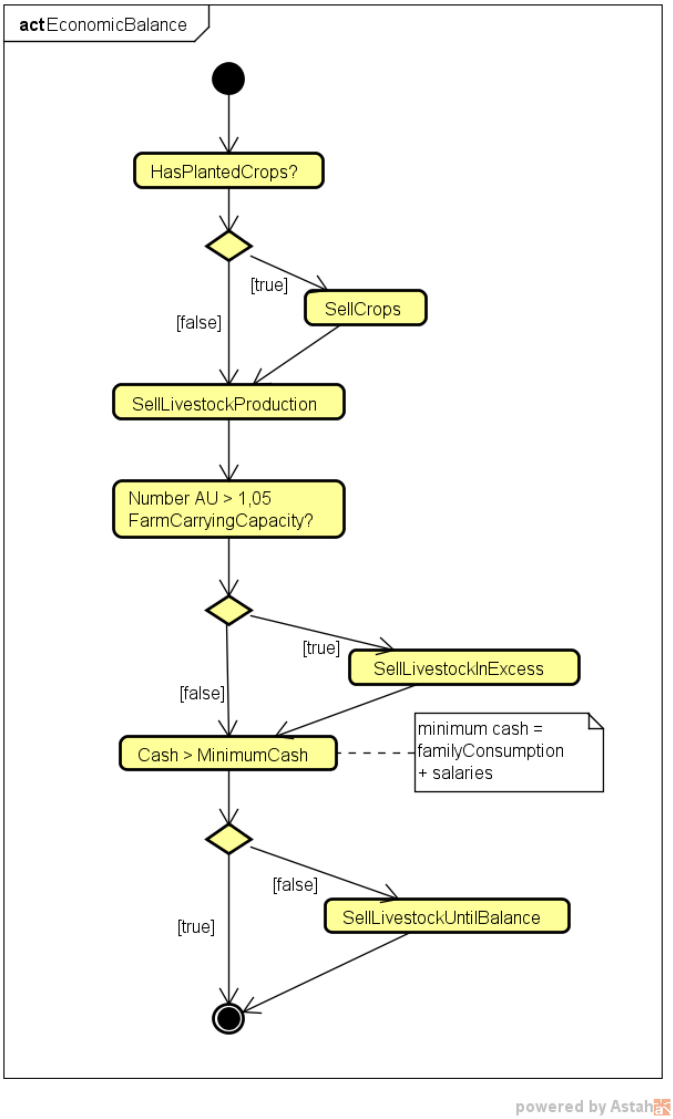


Figure 4-21 : Diagramme d'activités - Bilan économique

4.1.8.2 Dynamique du troupeau

Dans le modèle, trois facteurs affectent le taux démographique du troupeau :

- L'indice de charge : si l'indice de charge est supérieur à 1 (surpâturage), le taux démographique du troupeau diminue proportionnellement ;
- La gestion du troupeau : Si l'éleveur applique un management intensif, le taux démographique du troupeau augmente de +25%, s'il n'applique aucun management sur le troupeau, le taux démographique diminue de 10%.
- La manutention des infrastructures liées à l'élevage : s'il n'applique aucune manutention sur le troupeau, le taux démographique décroît de 10%.

Pour représenter la croissance démographique annuelle du troupeau, nous avons appliqué les équations (1),(2) et (3) :

$$IC = \frac{N}{\sum_{i=1}^{n} \bar{k}_{paddock}} \quad (1)$$

IC : indice de charge ;
N : nombre de bovins total sur l'exploitation ;
k̄: capacité de charge moyenne des paddocks (calcul décrit dans le sous modèle dégradation des pâturages)

$$\Delta g = \begin{cases} \Delta g\ moyen \times (1 + IMT + IMI) \times \frac{1}{IC} & si\ IC > 1 \\ \Delta g\ moyen \times (1 + IMT + IMI) & si\ IC < 1 \end{cases} \quad (2)$$

Δg : taux de croissance (%) ;
Δg moyen : taux de croissance moyen (valeur constante de 20%) ;
IMT: impact du management du troupeau; IMT = -0.1 si aucun management du troupeau, IMT = 0 si le management est basique et IMT = 0.25 si le management est intensif ;
IMI : impact du management des infrastructures ; IMI = -0.1 si aucune maintenance des infrastructures
IC : indice de charge

$$N_t = N_{t-1} \times (1 + \Delta g) \quad (3)$$

$\mathbf{N_t}$: nombre d'animaux au temps t ;
Δg : taux de croissance au temps t.

4.1.8.3 Dynamiques écologiques

Succession de végétation

Les successions de végétation ont été modélisées en suivant le diagramme d'état et de transition présenté dans la Figure 4-22. Ce diagramme a été élaboré sur la base des connaissances d'experts du groupe et en utilisant les règles définies dans le code forestier. Les successions de végétation suivent une trajectoire déterministe, non probabiliste : lorsque que la végétation atteint son âge maximum (cas des forêts et des cultures) ou son indice de dégradation maximum (cas des pâturages), elle passe à l'état suivant. Les décisions des éleveurs peuvent modifier cette trajectoire (détaillées dans le 4.1.8.1, sous-modèle gestion des pâturages).

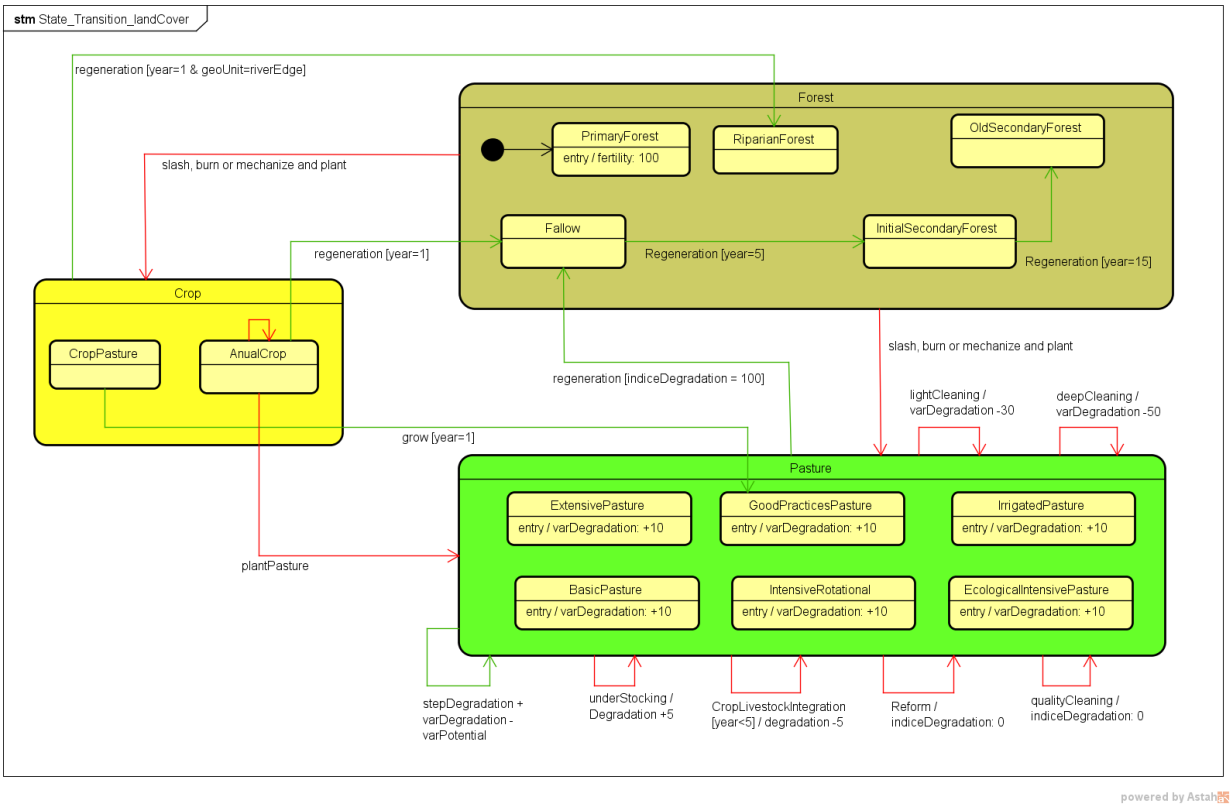


Figure 4-22 : Diagramme d'état et de transition de la végétation.Les flèches vertes correspondent à des transitions écologiques, et les flèches rouges à des évolutions dues à des activités anthropiques.

Les éleveurs ne choisissent qu'un seul type d'usage des sols par paddock. Toutefois, la dynamique de dégradation peut être variable spatialement, ce qui peut donner lieu à une mosaïque de végétation dans un même paddock (pâturage, jeune régénération, forêt secondaire initiale). C'est une situation courante dans les systèmes d'élevage extensifs. Pour le modèle, nous avons défini l'usage du paddock en fonction de sa composition. Tant que la surface en pâturage est supérieure à 25% de la surface totale du paddock, il sera classé comme pâturage. En-deçà, il sera classé comme jeune régénération forestière (Fallow) ou forêt secondaire initiale (Initial Secondary Forest). Si la surface en jeune régénération forestière est supérieure à celle de forêt secondaire initiale, il sera classé comme jeune régénération. Dans le cas contraire, il sera classé comme forêt secondaire initiale (Figure 4-23). Tant que le paddock est occupé par une jeune régénération forestière ou une forêt secondaire initiale, il peut être converti en culture ou en pâturage. A partir du moment où il devient une forêt secondaire âgée, il ne pourra plus être converti.

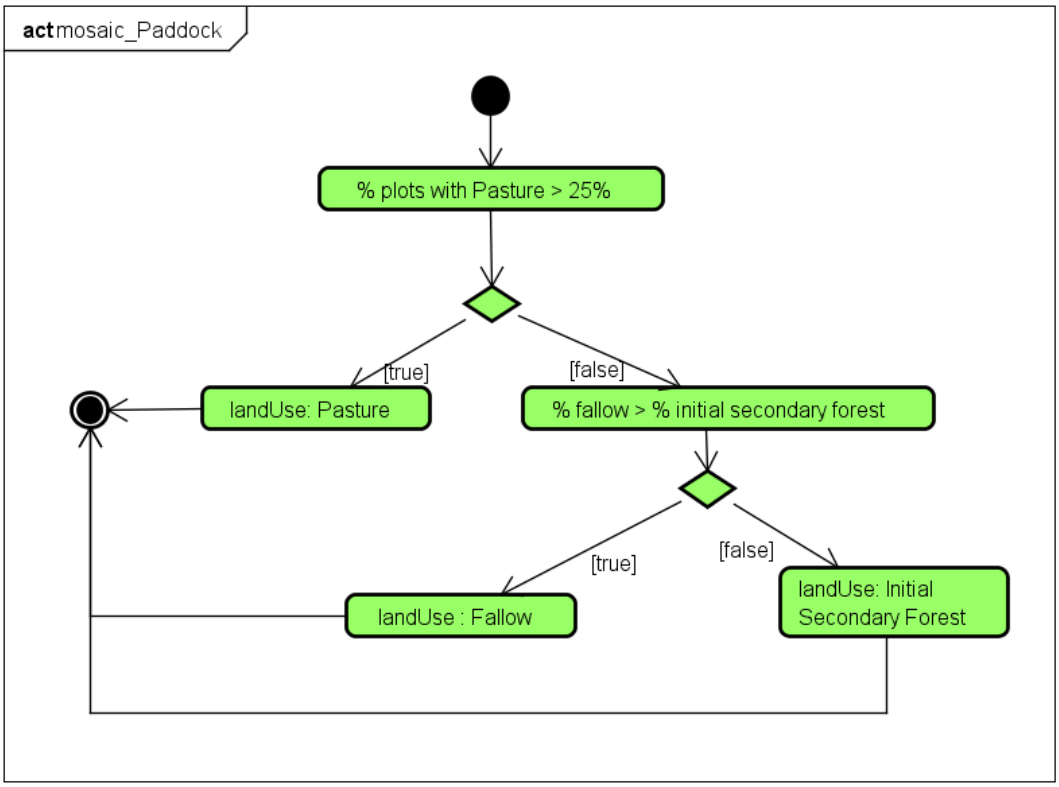


Figure 4-23 : Arbre de décision utilisé pour définir l'usage des sols dans les Paddocks composés d'une mosaïque de végétation

Dégradation des pâturages et productivité

A chaque pas de temps, les prairies se dégradent. Dans le modèle, le processus de dégradation des prairies résulte de la combinaison de quatre facteurs :

- La qualité d'implantation de la prairie : le taux de dégradation sera plus élevé pour les prairies de type extensive ou basique que pour les prairies de type intensive, irriguée, écologiquement intensive ou bonnes pratiques ;
- L'évolution du potentiel du sol, qui dépend du type d'usage de sol et des effets éventuels du surpâturage ;
- Les effets rétroactifs de l'intégration pâturage-culture : l'intégration réduit la propension à la dégradation pendant 5 ans ;
- Les effets du sous-pâturage : le taux de dégradation augmente en cas de sous-pâturage (moyenne calculée à l'échelle de l'exploitation).

Pour représenter ces dynamiques de dégradation, nous avons utilisé les équations (4), (5) et (6) :

$$\boldsymbol{ID_t = ID_{t-1} + \Delta d} \qquad (4)$$

$\mathbf{ID}_t$: indice de dégradation des pâturages au temps t (compris entre 0 et 100);
$\mathbf{ID}_{t-1}$: indice de dégradation des pâturages au temps t-1 ;
$\mathbf{\Delta d}$: variation de la dégradation (%)

$$\Delta \boldsymbol{d} = \begin{cases} \Delta \boldsymbol{d_{implant}} + (\mathbf{100} - \boldsymbol{p_t}) + \Delta \boldsymbol{d_{intégration}} + \Delta \boldsymbol{d_{sous-pâturage}} & \boldsymbol{si\ IC} < 1 \\ \Delta \boldsymbol{d_{implant}} + (\mathbf{100} - \boldsymbol{p_t}) + \Delta \boldsymbol{d_{intégration}} & \boldsymbol{si\ IC} \geq \mathbf{1} \end{cases} \quad (5)$$

Δd : variation de la dégradation (%) ;
$\Delta d_{implant}$: variation de la dégradation due à la qualité de l'implantation, $\Delta d_{implant}$ = +5% si pâturage irrigué, écologiquement intensif, intensif, ou bonnes pratiques et $\Delta d_{implant}$ = +10% si pâturage extensif ou basique ;
p_t : potentiel du sol au temps t ;
$\Delta d_{intégration}$: variation de la dégradation due à l'intégration pâturage-culture, $\Delta d_{intégration}$ = -0.05% pendant 5 ans si intégration, $\Delta d_{intégration}$ = 0% sans intégration ; $\Delta d_{sous\text{-}pâturage}$ = variation de la dégradation due au sous-pâturage si IC < 1
Avec **$\Delta d_{sous\text{-}pâturage}$** : variation de la dégradation due au sous-pâturage (%) ;

$$\Delta \boldsymbol{d_{sous-pâturage}} = (\mathbf{1} - \boldsymbol{IC}) \times \Delta \boldsymbol{d_{sous-pâturage\ moyen}} \quad (6)$$

IC : Indice de charge ;
$\Delta d_{sous\text{-}pâturage\ moyen}$: taux moyen dû au sous-pâturage (valeur constante égale à 5%)

Le nettoyage des pâturages ou la réforme peut réduire l'indice de dégradation (Figure 4-22). Les nettoyages léger et profond réduisent l'indice de 30 et 50 respectivement. L'indice devient nul en cas de nettoyage de qualité ou de réforme.

La dynamique de dégradation du pâturage a un impact sur le niveau de productivité du pâturage. Dans le modèle, l'indicateur qui sert à mesurer la productivité du pâturage est la capacité de charge.
Cette capacité de charge est fonction de 2 variables : la capacité de charge maximale permise par le type de gestion et le niveau de dégradation du pâturage. Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) :

$$\boldsymbol{k_{plot}} = \boldsymbol{k_{\max gestion}} \times (\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{ID}}{\mathbf{100}}) \quad (7)$$

k_{plot} : capacité de charge du plot ;
$k_{max\ gestion}$: capacité de charge maximale permise par le type de gestion (usage du sol), $k_{max\ extensif}$ = 1.2 UA/ha, $k_{max\ basique}$ = 1.4 UA/ha, $k_{max\ bonnes\ pratiques}$ = 1.8 UA/ha, $k_{max\ écologiquement\ intensif}$ = 2 UA/ha, $k_{max\ tournant\ intensif}$ = 2.5 UA/ha, $k_{max\ irrigué}$ = 4 UA/ha,
ID : Indice de Dégradation du pâturage

$$\overline{\boldsymbol{k}}_{\boldsymbol{paddock}} = \frac{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{k_{plot}}}{\boldsymbol{A_{Paddock}}} \quad (8)$$

Avec **$\overline{k}_{paddock}$** : capacité de charge moyenne du Paddock
k_{plot} : capacité de charge du plot i ;
$A_{paddock}$: surface du Paddock

$$\overline{k}_{exploitation} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_{paddock}}{\sum_{i=1}^{n} A_{paddock}} \quad (9)$$

$\overline{k}_{exploitation}$: capacité de charge moyenne de l'exploitation
$k_{paddock}$: capacité de charge du paddock i ;
$A_{paddock}$: aire du Paddock i

Ressources naturelles

Les dynamiques des ressources naturelles, eau verte, fertilité du sol et structure du sol sont représentées à l'échelle du Plot.

Pour l'eau verte (à disposition pour la croissance des plantes), nous avons considéré que chaque année, elle décroît d'un certain pourcentage dû à l'évaporation. Certaines pratiques peuvent amplifier ce pourcentage ou au contraire le limiter. Cette dynamique est représentée à travers les équations (10) et (11).

$$e_t = e_{t-1} + (1 \times \Delta e) \quad (10)$$

e_t : indice d'eau verte au pas de temps t (compris entre 0 et 150) ;
e_{t-1} : indice d'eau verte au pas de temps t-1 ;
Δe : variation de l'eau verte (%).

$$\Delta e = \Delta recyclage - \Delta export \quad (11)$$

Δe : variation de l'eau verte (%) ;
Δrecyclage : recyclage de l'eau (valeurs Annexe 14) ;
Δexport : évaporation (valeur constante de 5%).

Pour la fertilité des sols (C et N), nous avons considéré que chaque année, elle décroît d'un certain pourcentage dû à l'exportation par les plantes et à la consommation par l'activité biologique. Toutefois, certains usages des sols et pratiques de l'éleveur peuvent recycler ces éléments nutritifs en partie ou en totalité. Nous avons représenté ces processus avec les équations (12) et (13) :

$$f_t = f_{t-1} + (1 \times \Delta f) \quad (12)$$

f_t : indice de fertilité au pas de temps t (compris entre 0 et 150) ;
f_{t-1} : indice de fertilité au pas de temps t-1 ;
Δf : variation de la fertilité (%)

$$\Delta f = \Delta recyclage - \Delta export \quad (13)$$

Δf : variation de la fertilité des sols (%) ;
Δrecyclage : recyclage de la fertilité variant selon l'usage des sols et l'âge (valeurs Annexe 14) ;
Δexport : exportation (valeur constante de 10%)

Pour la structure du sol, nous avons considéré que chaque année, elle évolue en fonction du type d'usage du sol et de la pente de l'unité géomorphologique sur laquelle le plot est situé. Nous avons utilisé les équations (14) et (15) :

$$s_t = s_{t-1} + (1 \times \Delta s) \quad (14)$$

s_t : indice de la structure du sol au pas de temps t (compris entre 0 et 150) ;
s_{t-1} : indice de la structure du sol au pas de temps t-1 ;
Δs : variation de la structure du sol (%)

$$\Delta s = \Delta s_{usage\ du\ sol} + \Delta s_{pente} \quad (15)$$

Δs : variation de la structure des sols (%) ;
$\Delta s_{usage\ du\ sol}$: variation due à l'usage des sols (valeurs Annexe 14) ;
Δs_{pente} : variation due à la pente (0% si faible pente ; -5% si pente moyenne ; -10% si pente forte)

Evolution du potentiel du plot

Dans le modèle, le potentiel du plot varie selon le type d'usage du sol et les effets du surpâturage. Le potentiel du sol diminue si l'usage est de type pâturage extensif ou basique, il ne varie pas si l'usage est de type pâturage bonnes pratiques et cultures annuelles et il augmente s'il n'est pas cultivé ou si l'usage est de type intensif, irrigué, écologiquement intensif ou pâturage x cultures (à des taux différents). En cas de surpâturage (moyenne calculée à l'échelle de l'exploitation), tous les plots recouverts de prairies voient leur potentiel diminué. Pour représenter ces dynamiques, nous avons utilisé les équations (16) et (17) :

$$p_t = \begin{cases} p_{t-1} + \Delta p_{usage\ du\ sol} + \Delta p_{sur-pâturage} & si\ IC > 1 \\ p_{t-1} + \Delta p_{usage\ du\ sol} & si\ IC \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

p_t : potentiel du sol au temps t ;
p_{t-1} : potentiel du sol au temps t-1 ;
$\Delta p_{usage\ du\ sol}$: variation du potentiel du sol (valeur qui varie selon le type d'usage du sol ; $\Delta p = 0.15$ si l'occupation du sol est de type forêt ; $\Delta p = 0.10$ si pâturage écologiquement intensif ; $\Delta p = 0.05$ si pâturage irrigué, tournant intensif, ou pâturage x culture ; $\Delta p = 0$ si pâturage bonnes pratiques ou culture annuelles ; $\Delta p = -0.05$ si pâturage basique ; $\Delta p = -0.1$ si pâturage extensif ;
$\Delta p_{sur\text{-}pâturage}$: variation du potentiel du sol dû au surpâturage.

$$\Delta p_{sur-pâturage} = (IC - 1) \times \Delta p_{sur-pâturage\ moyen} \quad (17)$$

$\Delta p_{sur\text{-}pâturage}$: variation due au surpâturage ;
IC : Indice de charge ;
$\Delta p_{sur\text{-}pâturage\ moyen}$: taux de variation moyen dû au surpâturage (valeur constante égale à 5%)

4.2 Résultats des simulations

Nous avons simulé le scénario *Business as Usual* pour les éleveurs moyens intensifs et semi-intensifs. A partir d'un exemple de simulation, nous aborderons dans cette partie comment des stratégies différentiées d'intensification affectent les dynamiques des paysages, les performances du troupeau et le revenu de l'exploitation. Ici il s'agit essentiellement d'observer comment se comporte le modèle.

4.2.1 Dynamiques des interactions élevage-paysage

4.2.1.1 Usage des sols (composition)

Dans les deux types d'exploitations, l'intensification de l'élevage conduit à un changement significatif d'usage des sols (Figure 4-24 et Figure 4-25). Les surfaces régénérées augmentent substantiellement dans les deux exploitations (+ 64 ha chez les intensifs et + 89 ha chez les semi-intensifs) au détriment des surfaces agricoles (prairies et cultures). Les surfaces en prairies décroissent de -24% chez les éleveurs intensifs (de 473 ha à 359 ha) et de -19% chez les éleveurs semi-intensifs (de 473 ha à 384 ha). Les surfaces en cultures (annuelles et en association avec du pâturage) augmentent chez les éleveurs intensifs (de 0 à 50 ha).

Les surfaces en pâturage extensif et basique sont abandonnées ou réformées à différentes vitesses selon les éleveurs. Chez les éleveurs intensifs, tous les pâturages extensifs disparaissent au bout de 2 ans et les pâturages basiques en 7 ans. Chez les éleveurs semi-intensifs, tous les pâturages extensifs disparaissent en 5 ans et les pâturages basiques en 10 ans.

Les stratégies d'intensification varient entre les deux cas types. Dès la première année, l'éleveur intensif réforme 40% de sa surface productive et implante 202 ha de nouveaux usages (pâturage bonnes pratiques, écologiquement intensif et cultures annuelles). En revanche, ce type attend 3 à 5 ans avant d'implanter les premiers paddocks en pâturage tournant intensif et irrigué, dès que les conditions (capacité de charge, taille, distance au corral) sont satisfaites. Les surfaces en pâturage tournant et irrigué augmentent progressivement au détriment de pâturages moins productifs (bonnes pratiques). Au terme des 20 ans, les prairies sont composées de 44 ha (12%) de pâturage irrigué, 82 ha (23%) de tournant intensif, de 65 ha (18%) d'écologiquement intensif et 170 ha (47%) de bonnes pratiques. La surface en cultures varie entre 40 et 50 ha par an, voire plus si l'éleveur recourt à l'association culture x pâturage pour réformer des prairies dégradées.

Chez l'éleveur semi-intensif, la réforme des prairies se fait plus lentement. La première année, il réforme seulement 34 ha de pâturage (7% de sa surface productive). Il implante majoritairement des pâturages écologiquement intensifs et bonnes pratiques mais également 1 ha de pâturage tournant intensif. Cet éleveur ne se diversifie pas dans les cultures et ne recourt pas non plus au pâturage irrigué. Au bout de 20 ans, les surfaces en prairies sont composées

de 58 ha (15%) de pâturage tournant intensif, 90 ha (23%) de pâturage écologiquement intensif et 236 ha (61%) de pâturage bonnes pratiques.

Si l'on compare la proportion de surfaces agricoles les plus intensifiées (pâturages Irrigués, Tournants intensifs et Ecologiquement Intensifs, cultures) par rapport au total de la surface agricole (tous les types de prairies et cultures), chez l'intensif elle s'élève à 239 ha soit 58% des usages agricoles alors que chez le semi-intensif, elle est de 148 ha, soit à peine 39% des usages agricoles. Notons que ces surfaces se stabilisent avant la fin des simulations. Elles atteignent un plafond dès la 12ème année chez l'intensif et dès la 13ème année chez le semi-intensif.

En ce qui concerne les surfaces en régénération forestière, l'évolution est contrastée en fonction du type de forêt. Au bout de 20 ans, les forêts secondaires initiales (entre 5 et 20 ans) enregistrent une augmentation de + 61 ha chez les intensifs et + 79 ha chez les extensifs. La surface en forêt secondaire âgée (plus de 20 ans) reste relativement stable (+ 11 ha chez les intensifs et + 21 ha chez les extensifs). En revanche, les jeunes régénérations forestières (moins de 5 ans) ont tendance à diminuer (- 29 ha chez les intensifs et - 31 ha chez les semi-intensifs).

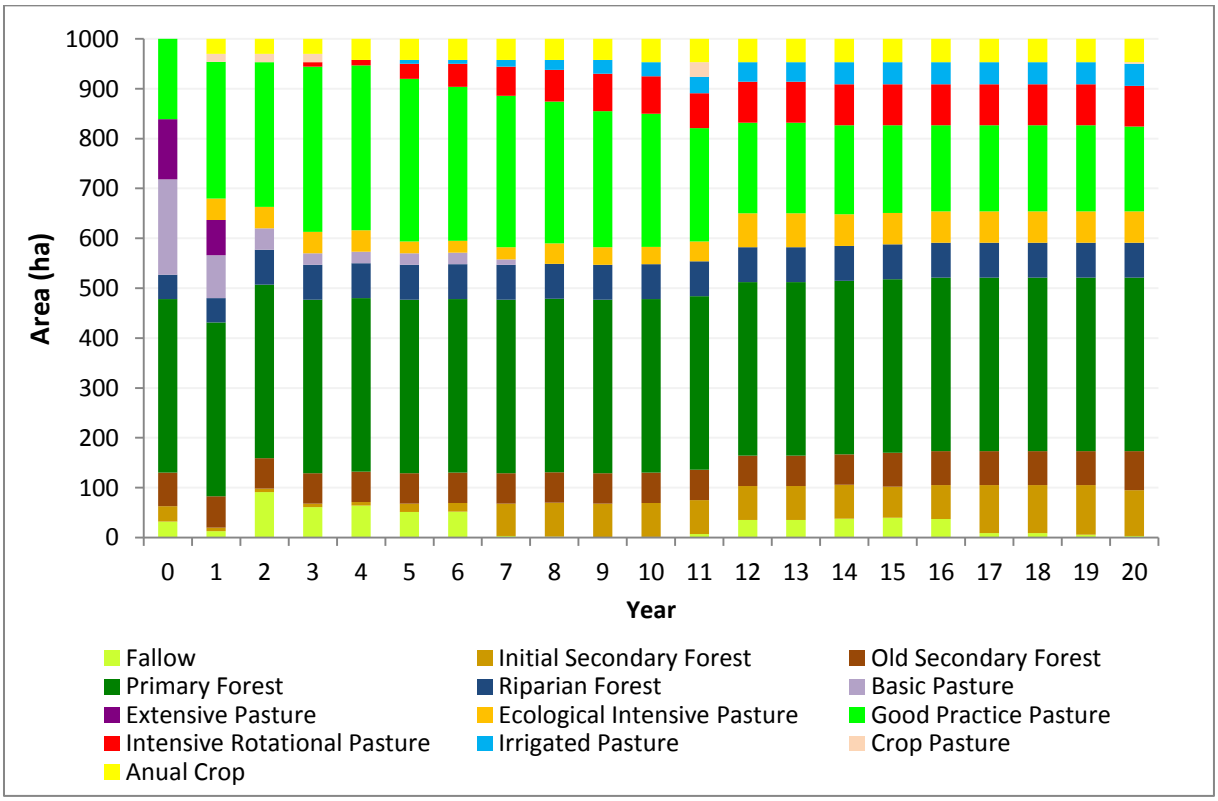


Figure 4-24 : Evolution des usages des sols dans le ranch moyen de type intensif

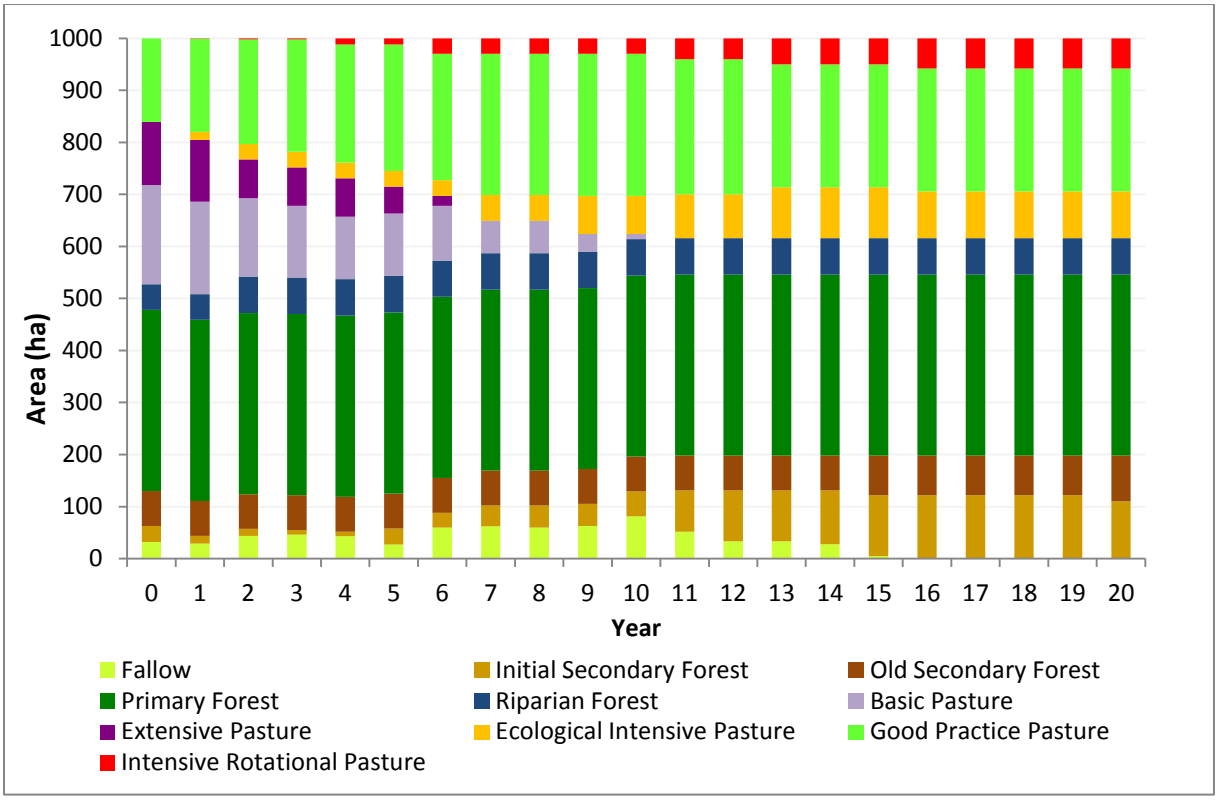


Figure 4-25 : Evolution des usages des sols dans le ranch moyen de type semi-intensif

4.2.1.2 Dégradation des pâturages

Pour évaluer la dynamique temporelle de dégradation des pâturages, nous avons mesuré deux métriques à l'échelle de l'exploitation :

- L'évolution des surfaces en paddocks enfrichés (indice de dégradation = 100 ou usage du sol = régénération forestière de 0 à 20 ans).
- L'évolution de l'indice moyen de dégradation des pâturages (moyenne calculée sur l'ensemble des paddocks couverts par du pâturage). Cet indice peut varier de 0 (aucune dégradation) à 100 (la dégradation est à son niveau maximal, il n'y a plus de production fourragère).

Dans les deux types d'exploitation, la surface en paddock productif diminue substantiellement (Figure 4-26 et Figure 4-27). Entre l'instant t=0 et t=20, elle passe de 518 ha à 364 ha soit une baisse de -30% chez les intensifs et de 518 ha à 393 ha soit une diminution de -24% chez les extensifs. Au contraire, la surface en paddocks enfrichés augmente. Chez les semi-intensifs, elle a été multipliée par près de 5, passant de 21 ha à 101 ha. Chez les intensifs, elle a été multipliée par près de 2, passant de 21 ha à 39 ha. Cette augmentation de la surface en paddocks enfrichés peut s'expliquer par un manque de ressources financières et/ou humaines pour gérer l'ensemble des paddocks réformés et intensifiés.

En revanche à l'intérieur des paddocks en pâturage, la moyenne de l'indice de dégradation a tendance à décroître (Figure 4-28 et Figure 4-29). Entre l'instant t=0 et t=20, l'indice passe de 24,2% à 11,2% chez les intensifs et de 24,2% à 10% chez les semi-intensifs. On note toutefois

un pic de dégradation chez les intensifs à t=10 (24,9%). Ce résultat met en évidence que les éleveurs intensifs et semi-intensifs ont tendance à mieux gérer la dégradation des paddocks au sein des paddocks productifs.

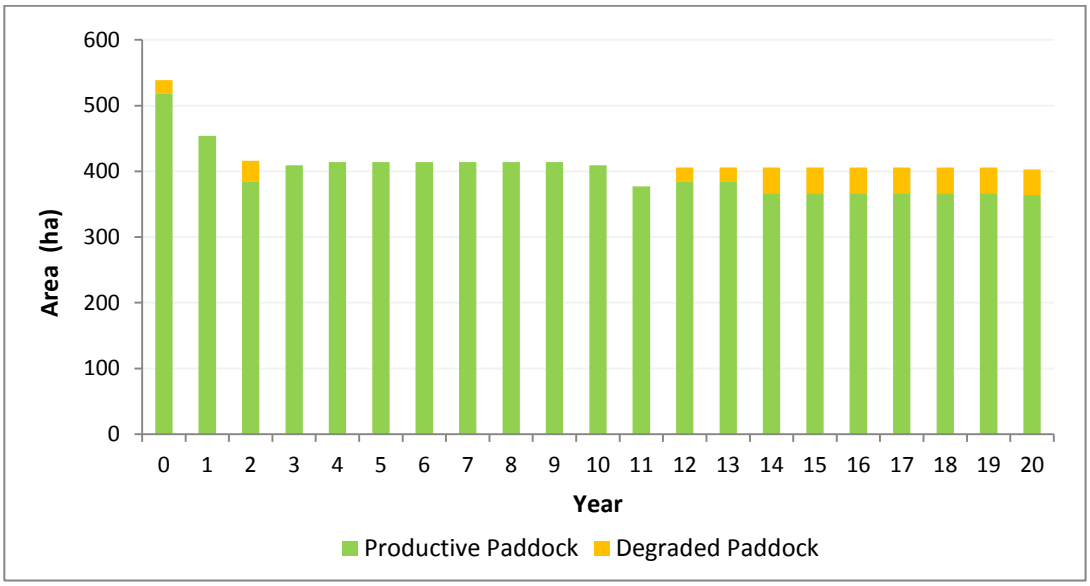


Figure 4-26 : Evolution des surfaces en paddocks productifs et dégradés dans le ranch moyen de type intensif

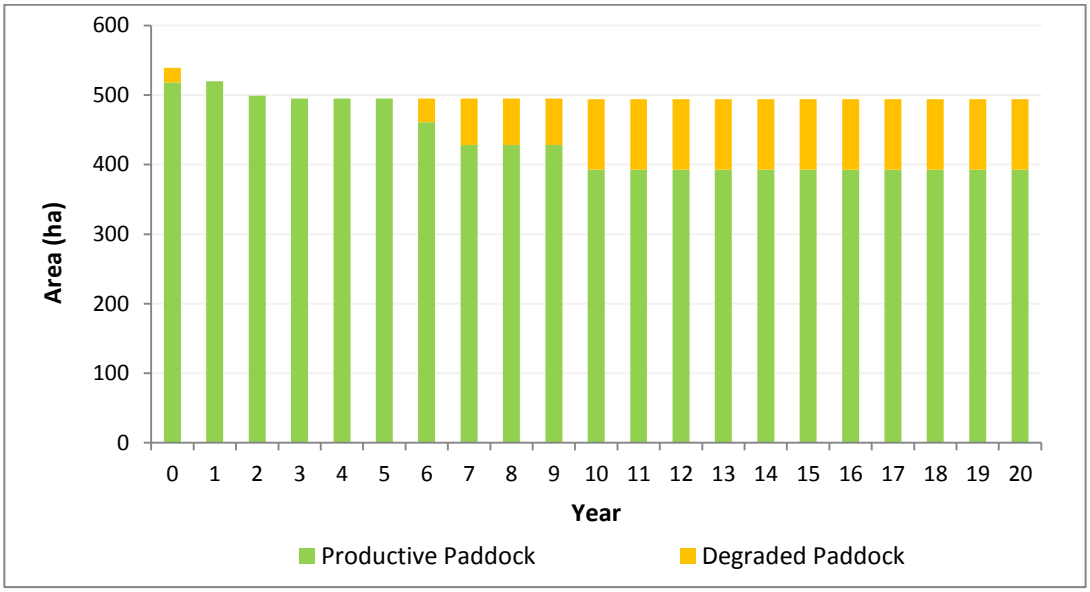


Figure 4-27 : Evolution des surfaces en paddocks productifs et dégradés dans le ranch moyen de type semi-intensif

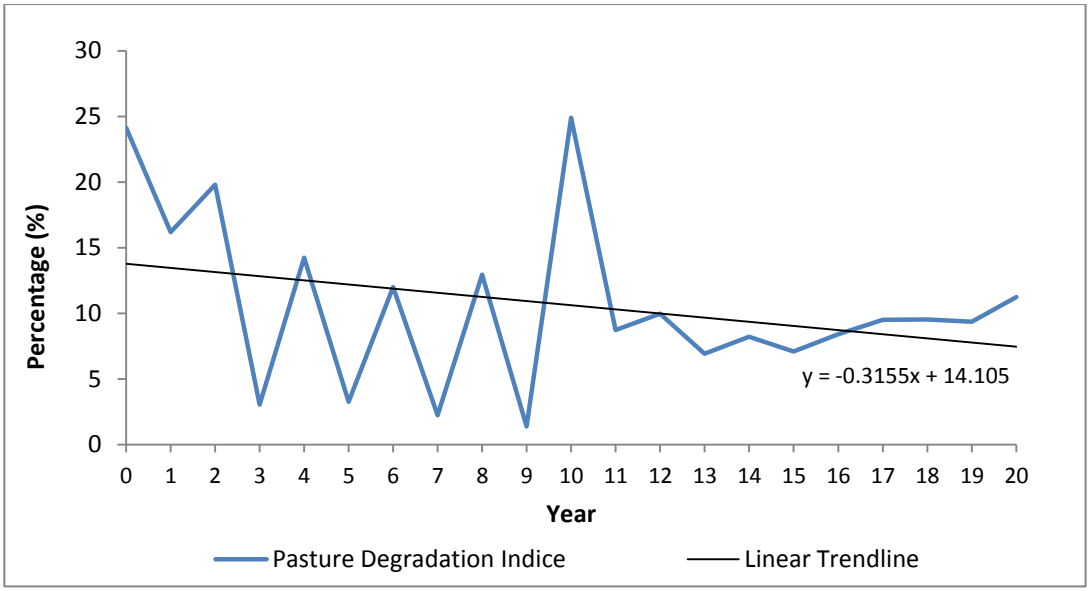


Figure 4-28 : Evolution de la moyenne de l'indice de dégradation des pâturages dans le ranch de type intensif

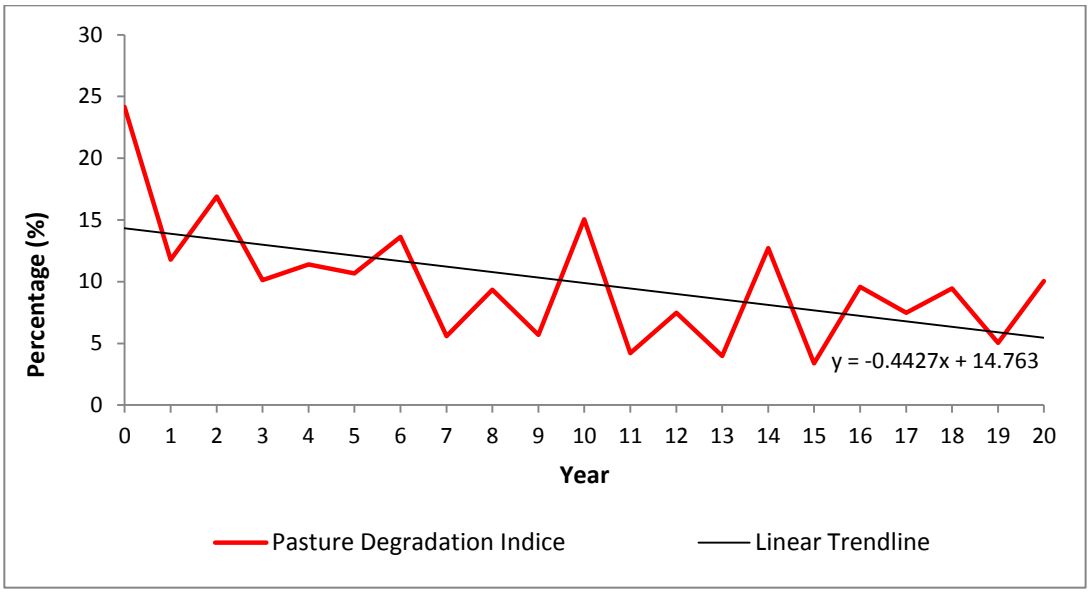


Figure 4-29 : Evolution de la moyenne de l'indice de dégradation des pâturages dans le ranch de type semi-intensif

La distribution spatiale des pâturages enfrichés (indice de dégradation = 100) et en cours de dégradation (indice de 0 à 100) est variable entre les ranchs de type intensif et semi-intensif. Chez les semi-intensifs, les paddocks enfrichés sont les plus distants des corrals. Chez les intensifs, les paddocks totalement enfrichés sont localisés sur les unités géomorphologiques de type versants de vallée fortement ondulés.

Figure 4-30 : Dynamique spatio-temporelle de la dégradation des pâturages dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

4.2.1.3 Division des paddocks (parcs)

Dans les deux types d'exploitation, la stratégie d'intensification repose sur la division des parcs. Le pourcentage maximal de paddocks que les éleveurs sont capables de diviser chaque année est de 10% chez l'intensif et de 5% chez le semi-intensif. La taille minimale des paddocks en deçà de laquelle les éleveurs ne divisent plus est de 2 ha chez l'intensif et de 5 ha chez le semi-intensif.

Dans les deux cas, les simulations donnent lieu à une diminution de la taille moyenne des paddocks et à une augmentation du nombre de paddocks. Le nombre de paddocks est multiplié par 2 chez le semi-intensif et par 3,6 chez l'intensif (Figure 4-31), alors que la taille des paddocks diminue de -9 ha chez le semi-intensif et de -13 ha chez l'intensif (Figure 4-32).

La division des parcs donne lieu à une augmentation du périmètre en clôture (+ 14.5 km chez le semi-intensif et + 22.8 km chez l'intensif) (Figure 4-33) et donc des coûts de maintenance.

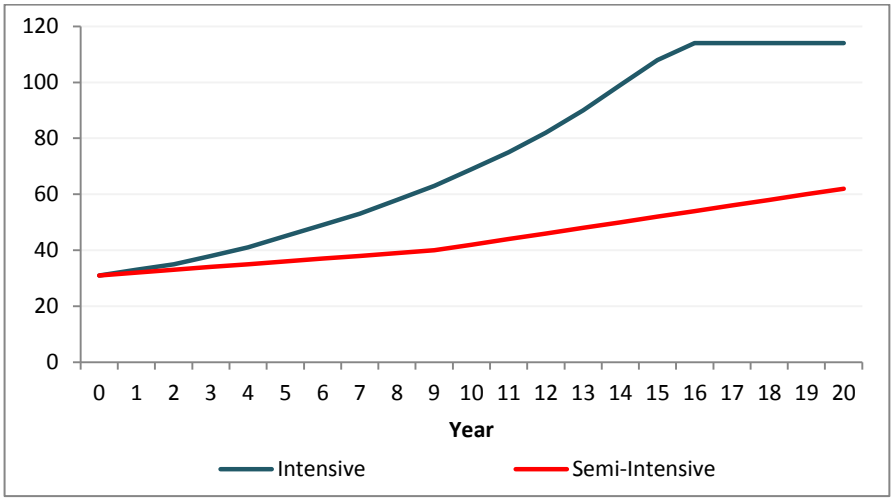


Figure 4-31 : Evolution du nombre de Paddocks dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

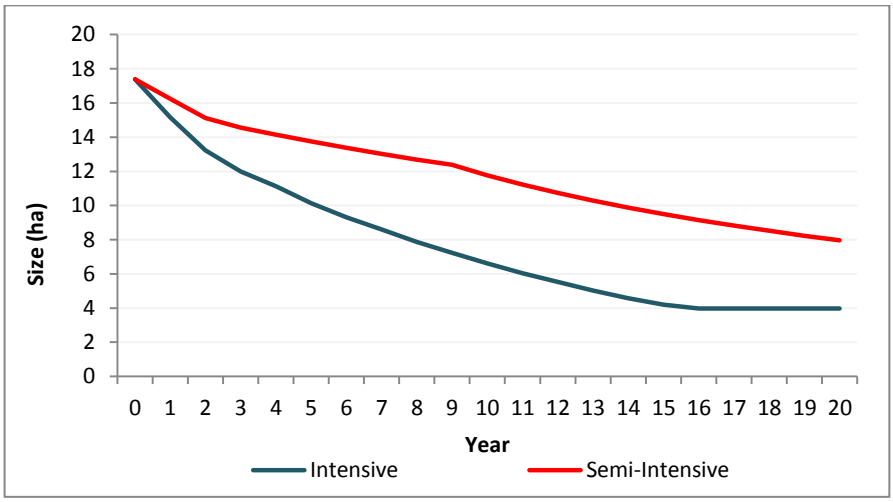


Figure 4-32 : Evolution de la taille moyenne des Paddocks dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

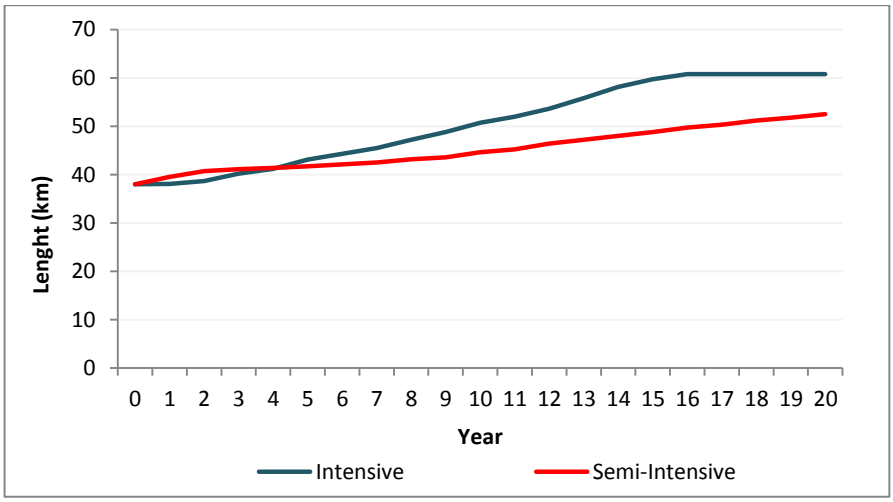


Figure 4-33 : Evolution du périmètre des clôtures dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

4.2.1.4 Distribution spatiale des usages des sols (configuration)

Les Figure 4-34 et Figure 4-35 montrent comment évolue la configuration spatiale des usages des sols à l'échelle des exploitations. Dans les deux types de ranchs, le processus d'intensification conduit à une réorganisation spatiale des usages des sols à l'échelle de l'exploitation. Deux variables guident majoritairement cette nouvelle configuration spatiale :

- La distance aux corrals : Nous observons que l'implantation de pâturages intensifs (pâturages irrigués, tournants intensifs, écologiquement intensifs) et le processus de division des pâturages a lieu principalement à proximité des corrals. Chez le ranch semi-intensif, l'enfrichement se produit davantage sur les parcelles les plus éloignées.
- Les caractéristiques des unités géomorphologiques : Les usages de sols ne sont plus localisés de façon aléatoire. Les caractéristiques des unités géomorphologiques deviennent prépondérantes dans les décisions de localisation des usages.

Comme nous l'avions observé pour les dynamiques temporelles d'usages des sols, nous observons que la distribution spatiale des usages des sols tend à se stabiliser avant la fin des simulations. La configuration spatiale des usages n'évolue plus ou à la marge à partir de la 14ème année chez les ranchs intensifs et de la 15ème année chez les ranchs extensifs.

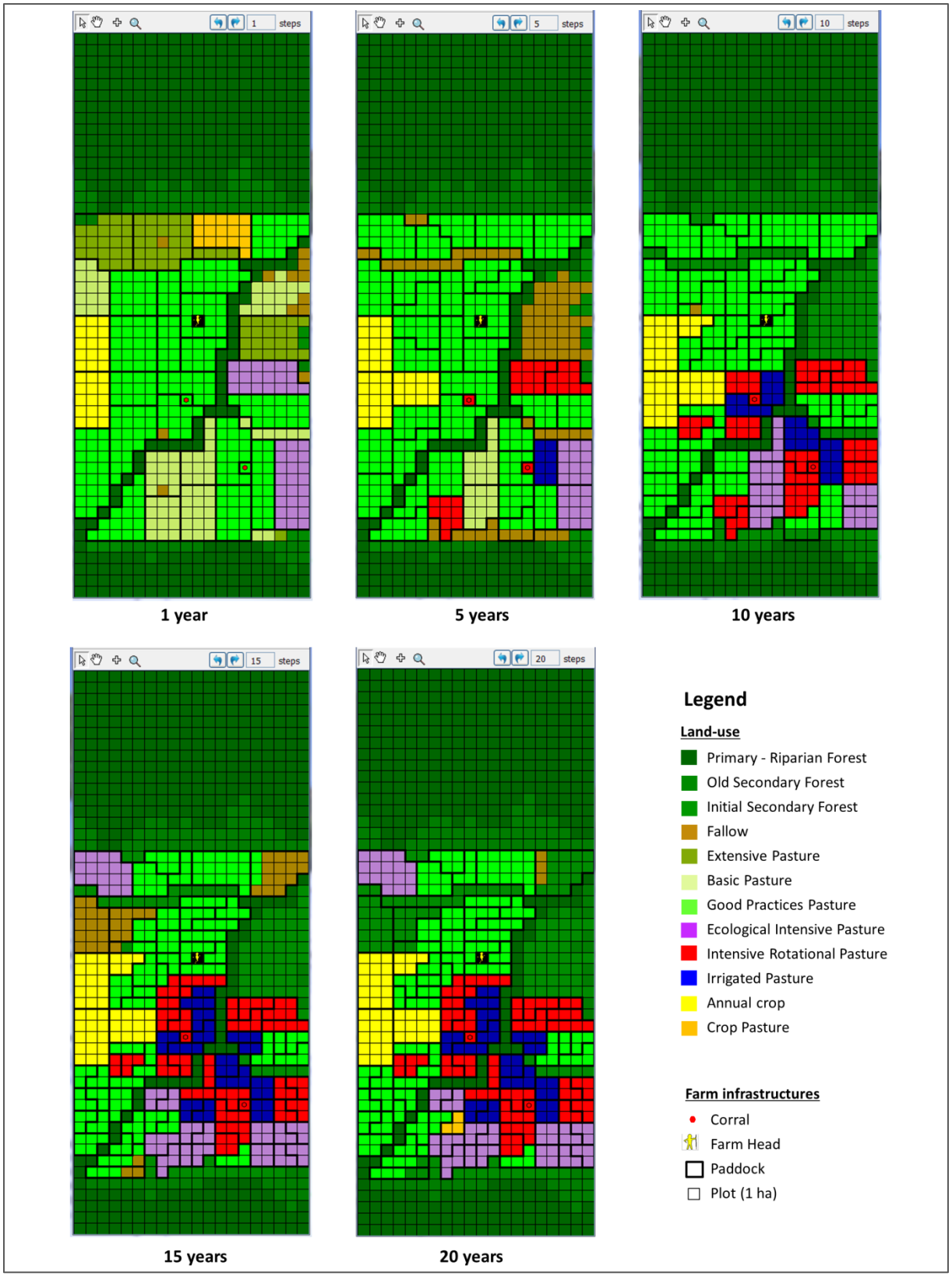


Figure 4-34 : Evolution de la distribution spatiale des usages des sols dans le ranch moyen de type intensif

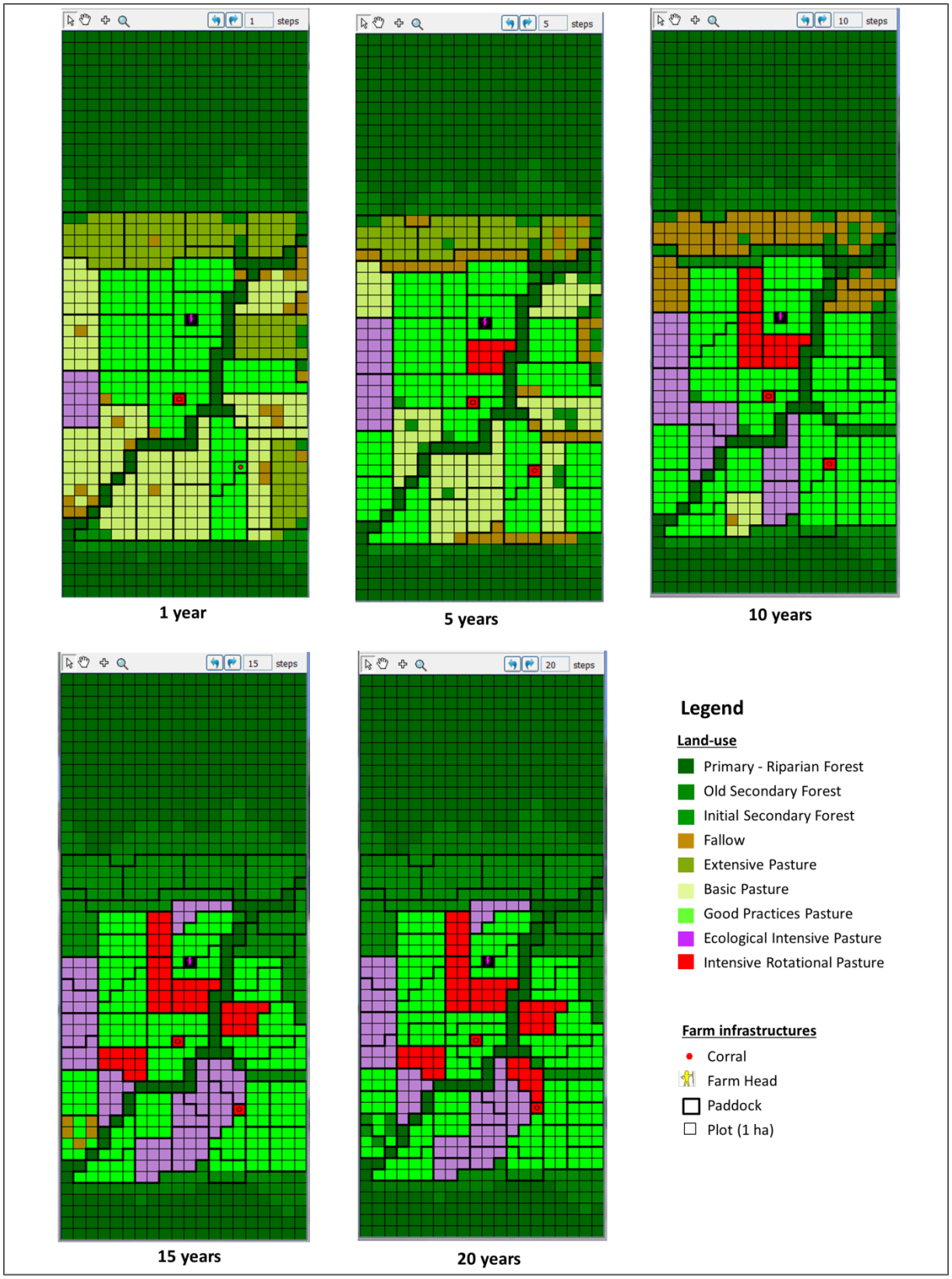


Figure 4-35 : Evolution de la distribution spatiale des usages des sols dans le ranch moyen de type semi-intensif

Nous avons donc observé ces dynamiques d'usages des sols au sein de chaque unité géomorphologique.

- **Dans les vallées (versants peu inclinés)**

Tant chez le type intensif que semi-intensif, les éleveurs commencent par réformer les pâturages basiques et extensifs avec des usages plus intensifs. Les éleveurs étendent la surface en pâturage bonnes pratiques et introduisent de nouveaux usages : pâturage écologiquement intensif et pâturages tournants intensifs dans les deux types d'exploitations, association Culture x Pâturage et pâturage irrigué chez l'intensif. Un très faible pourcentage (moins de 1% des surfaces) est aussi occupé par des cultures annuelles chez l'intensif. Au bout de 20 ans, les pâturages bonnes pratiques dominent ce type d'unité (40% chez les intensifs et 47% chez les semi-intensifs). La proportion de pâturage tournant intensif est plus importante chez l'éleveur intensif que semi-intensif (20% *vs* 13% respectivement). Les pourcentages de pâturage écologiquement intensif sont sensiblement les mêmes (18% chez l'intensif et 16% chez le semi-intensif). Les pâturages irrigués représentent 10% de ces surfaces chez l'intensif (implantation privilégiée dans ces zones du fait de la proximité des cours d'eau) et 0% chez le semi-intensif puisque cet usage ne fait pas parti de leur stratégie.

Dans cette unité, la dynamique d'évolution forestière est différente entre les deux types d'exploitations. L'éleveur intensif défriche les forêts secondaires (âgée, initiale et jeune régénération) alors que le semi-intensif étend ces surfaces dans les vallées. Au bout de 20 ans, la surface totale en forêt primaire et secondaire dans les vallées représente seulement 10% des usages chez l'intensif et 25% chez le semi-intensif. Tous les anciens pâturages (basiques et extensifs) ont disparu (Figure 4-36 et Figure 4-37).

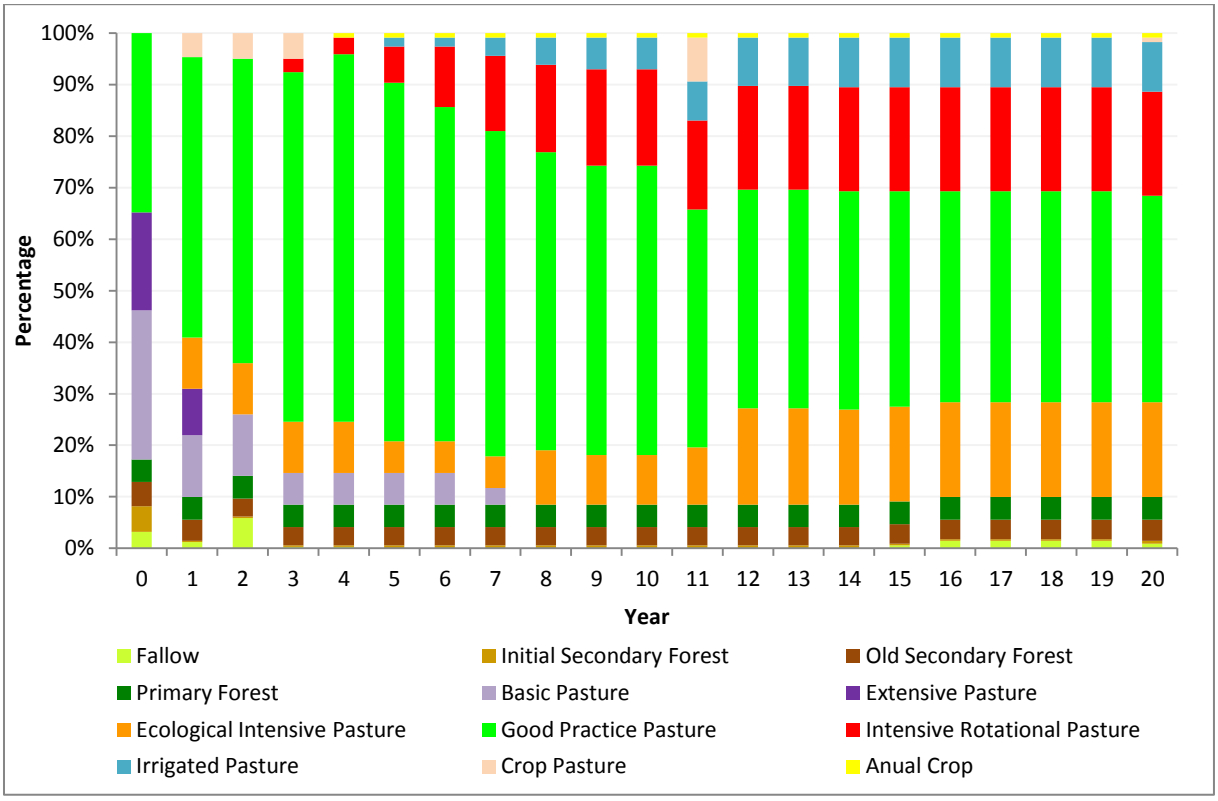


Figure 4-36 : Evolution des usages des sols dans les vallées du ranch moyen de type Intensif

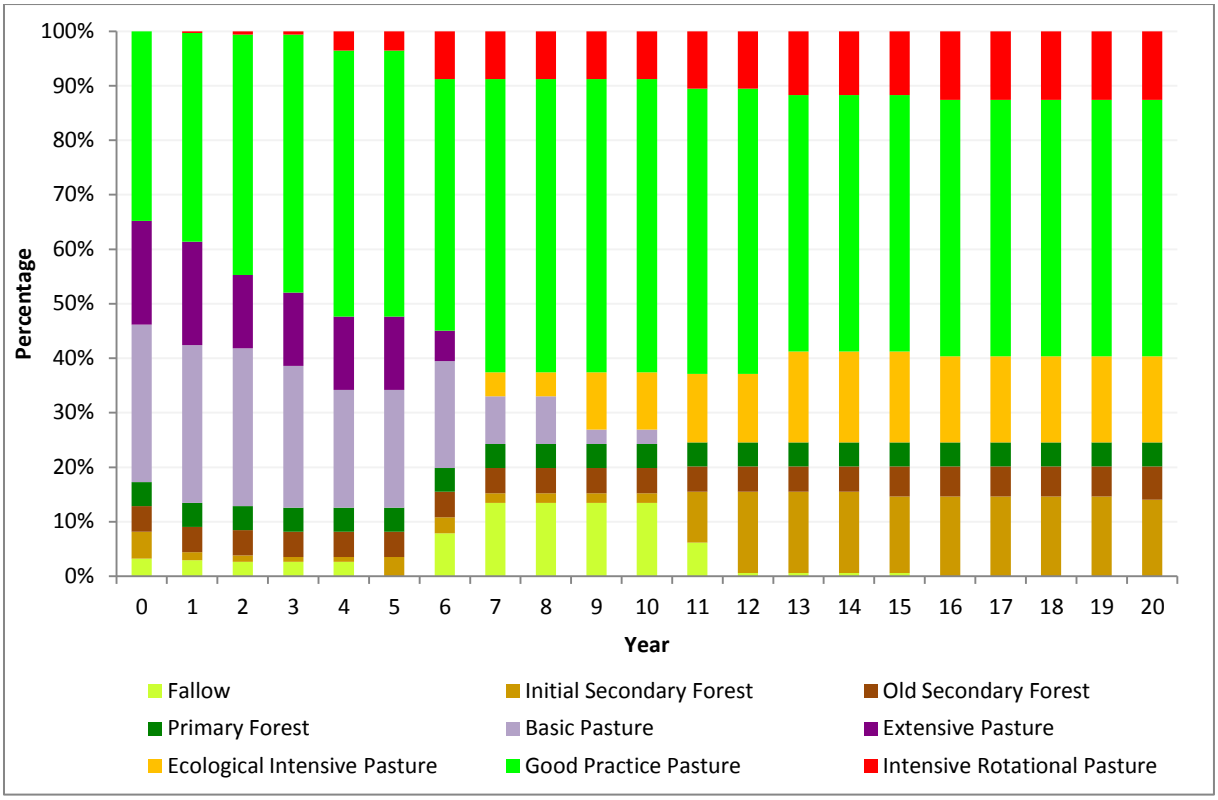


Figure 4-37 : Evolution des usages des sols dans les vallées du ranch moyen de type semi-intensif

- **Dans les fonds de vallées :**

La dynamique des usages des sols est similaire entre types d'éleveurs mais les réformes se font plus lentement dans les ranchs semi-intensifs. Les éleveurs intensif et semi-intensif réforment les pâturages basiques et extensifs, ainsi que les régénérations forestières de moins de 20 ans. Ceci aboutit à une disparition des pâturages datant de l'époque extensive et à une diminution de la proportion en forêt primaire et secondaire de 43% à 12% chez les intensifs et de 43% à 21% chez les semi-intensifs. Les principaux pâturages implantés sont les bonnes pratiques (43% chez les intensifs et 49% chez les semi-intensifs). Chez les éleveurs intensifs, on observe également une forte augmentation de pâturages tournants intensifs et irrigués (44%), mais pas de pâturages écologiquement intensifs. Les éleveurs semi-intensifs implantent aussi des pâturages tournants intensifs (22%) et des pâturages écologiquement intensifs (8%) sur ces unités (Figure 4-38 et Figure 4-39).

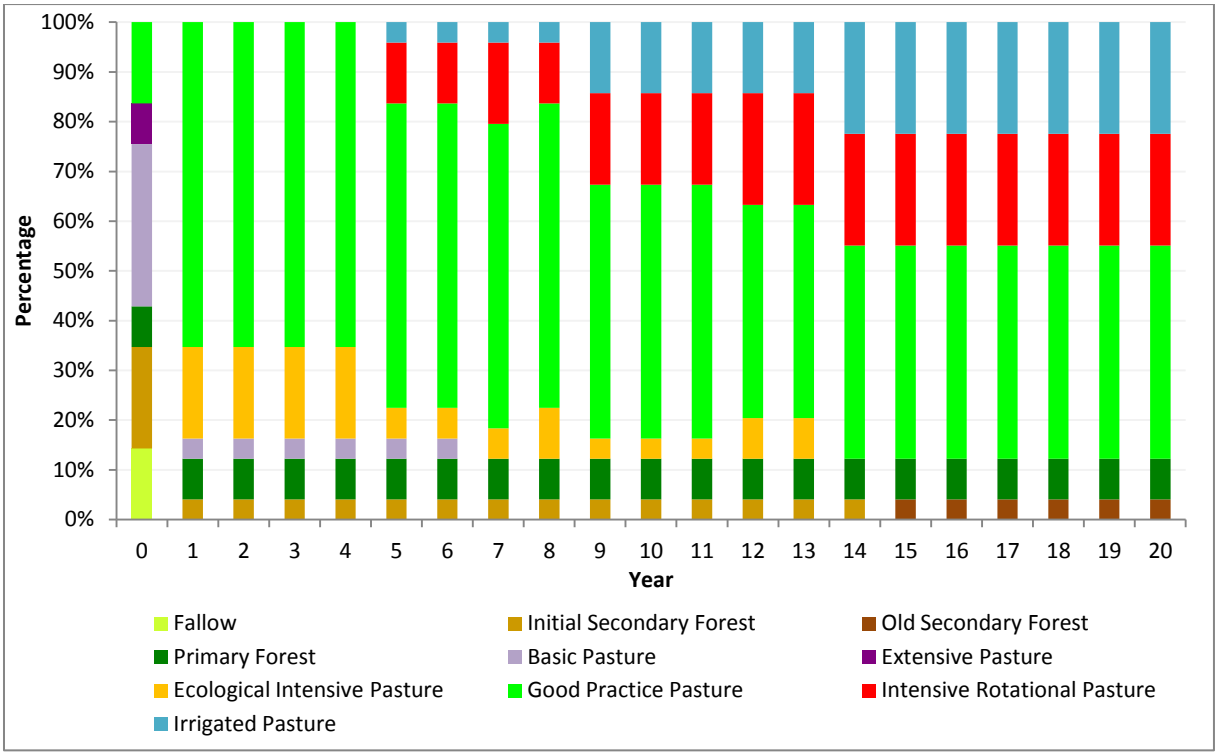


Figure 4-38 : Evolution des usages des sols dans les fonds de vallées du ranch moyen de type intensif

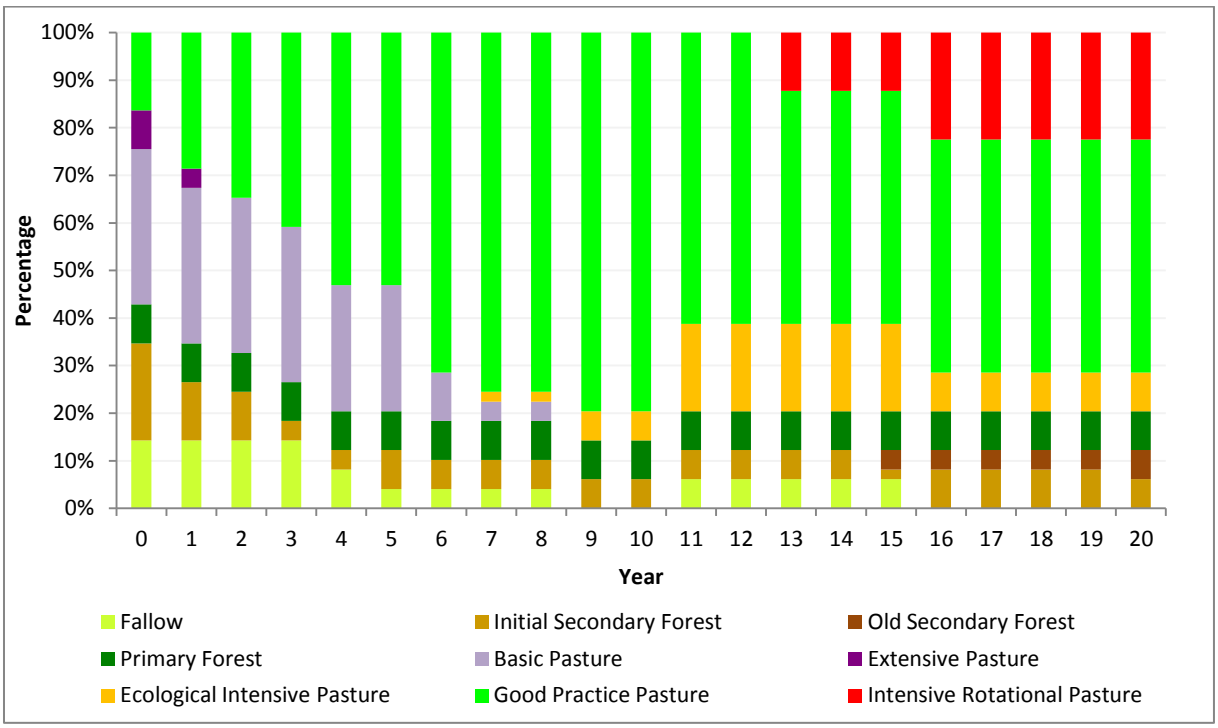


Figure 4-39 : Evolution des usages des sols dans les fonds de vallées du ranch moyen de type semi-intensif

- **Sur les plateaux :**

Dans les deux types, du fait de l'application de la législation environnementale, les plateaux majoritairement recouverts de forêt primaire (79%) à l'initialisation le restent tout au long de la simulation. En revanche, les zones ouvertes (surfaces agricoles, jeunes régénérations) sont réformées par les éleveurs vers des usages plus intensifs du fait de leur fort potentiel (sol

argileux, surface plane mécanisable). Les éleveurs intensifs y installent en priorité des cultures annuelles (11% de la surface), un peu de pâturage bonnes pratiques (3%) et tournants intensifs (0,5%). Les éleveurs semi-intensifs qui n'introduisent pas de cultures annuelles dans leur assolement, convertissent ces zones en pâturages écologiquement intensifs (7,5%) et bonnes pratiques (6%) (Figure 4-40 et Figure 4-41).

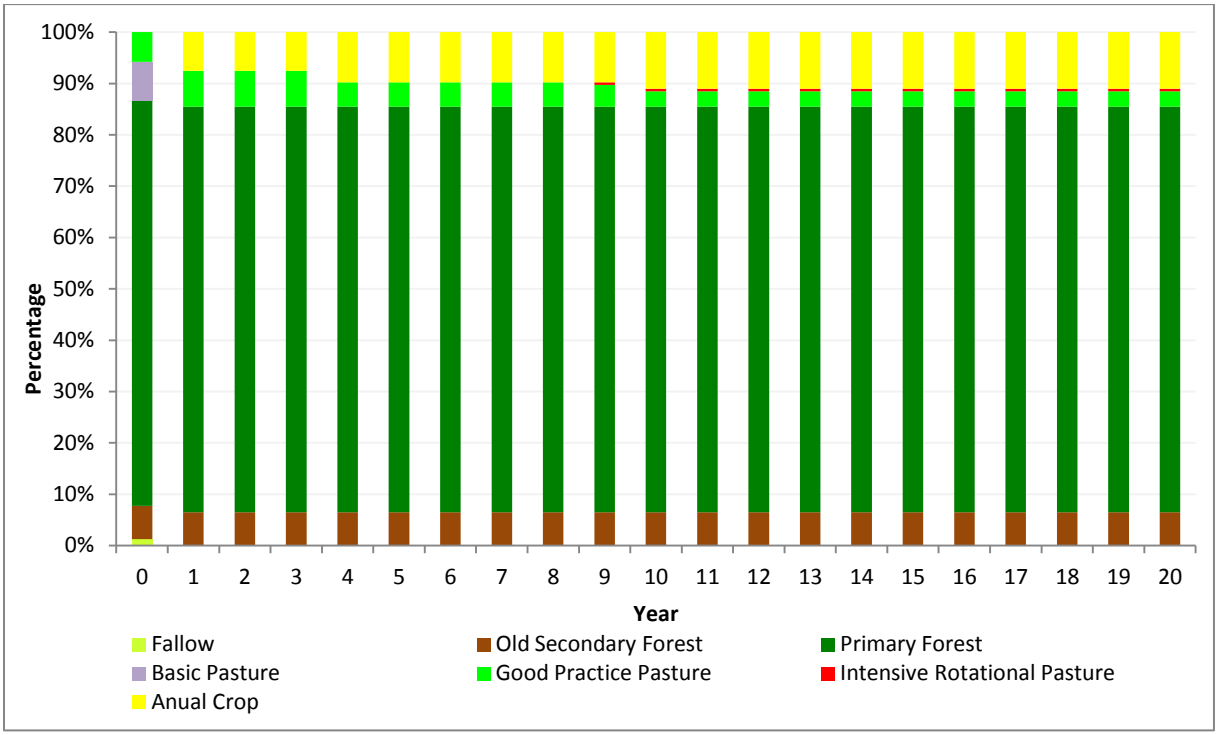


Figure 4-40 : Evolution des usages des sols sur les plateaux du ranch moyen de type intensif

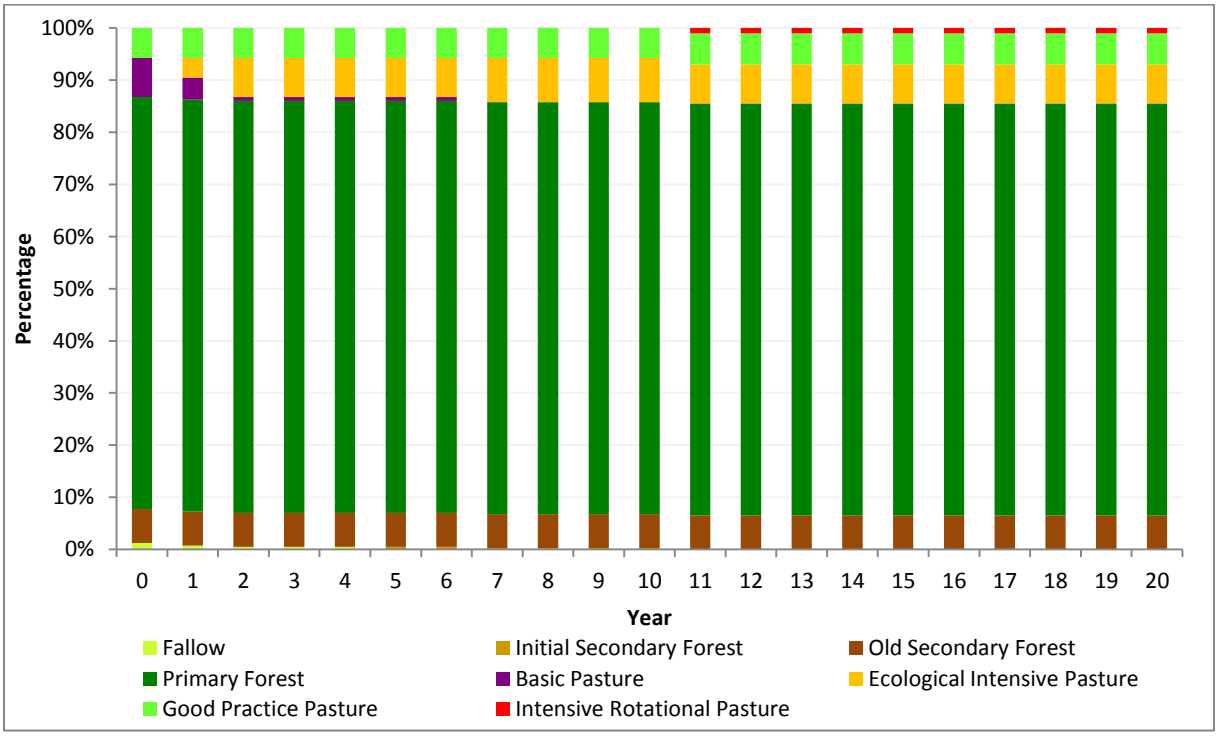


Figure 4-41 : Evolution des usages des sols sur les plateaux du ranch moyen de type semi-intensif

- **Dans les vallées ondulées (versants inclinés) :**

On observe une dynamique d'usage des sols différente entre type intensif et semi-intensif. Dans le ranch intensif, toutes les surfaces en pâturages sont abandonnées progressivement et disparaissent complètement. Au bout de 20 ans, les vallées ondulées sont exclusivement composées de forêts secondaires, dont 85% de forêt secondaire initiale et 15% de forêt secondaire âgée. Dans le ranch semi-intensif, les éleveurs n'abandonnent pas complètement ces surfaces. Ils réforment une partie des anciens pâturages en pâturages bonnes pratiques ou écologiquement intensifs qu'ils perçoivent comme des usages adaptés pour ce type de relief. Ces usages couvrent respectivement 32% et 2% des surfaces au bout de 20 ans. Les forêts secondaires (initiale et âgée) occupent le reste de l'unité, soit 65% (Figure 4-42 et Figure 4-43).

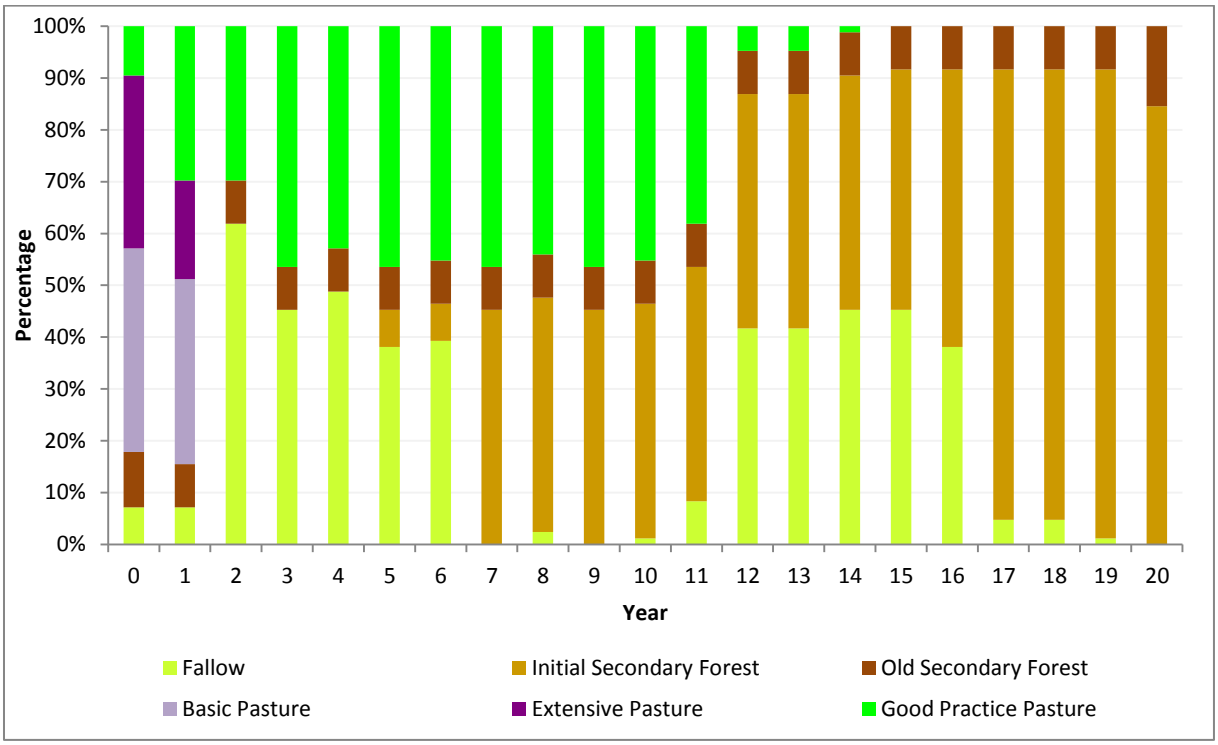


Figure 4-42 : Evolution des usages des sols dans les vallées ondulées du ranch moyen de type intensif

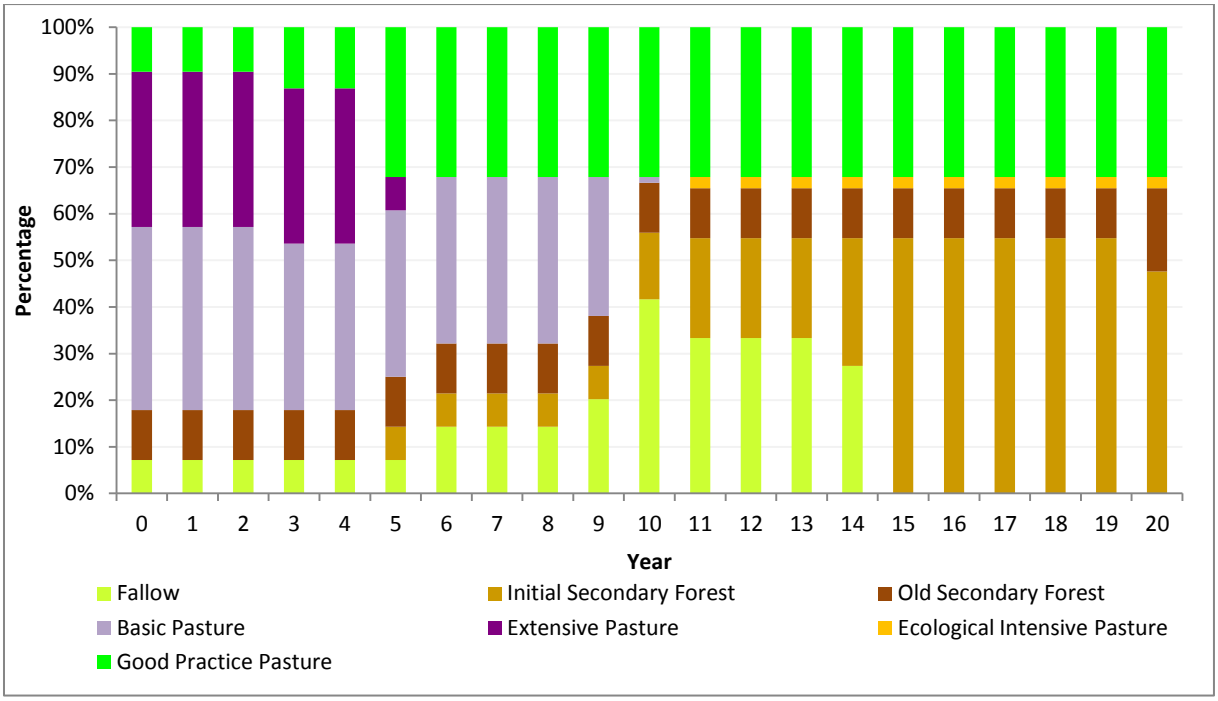


Figure 4-43 : Evolution des usages des sols dans les vallées ondulées du ranch moyen de type semi-intensif

- **Sur les reliefs escarpés et les bordures des cours d'eau :**

Dans les deux types intensif et semi-intensif, ces zones s'enfrichent de la même façon et à la même vitesse. Ces zones sont protégées par le code forestier. De plus, elles sont perçues comme difficiles d'accès et non mécanisables du fait de la pente (moyenne ou forte). Au bout de 20 ans, les zones escarpées sont composées de 42% de forêt secondaire âgée, 34% de forêt secondaire initiale et 24% de forêt primaire (Figure 4-44).

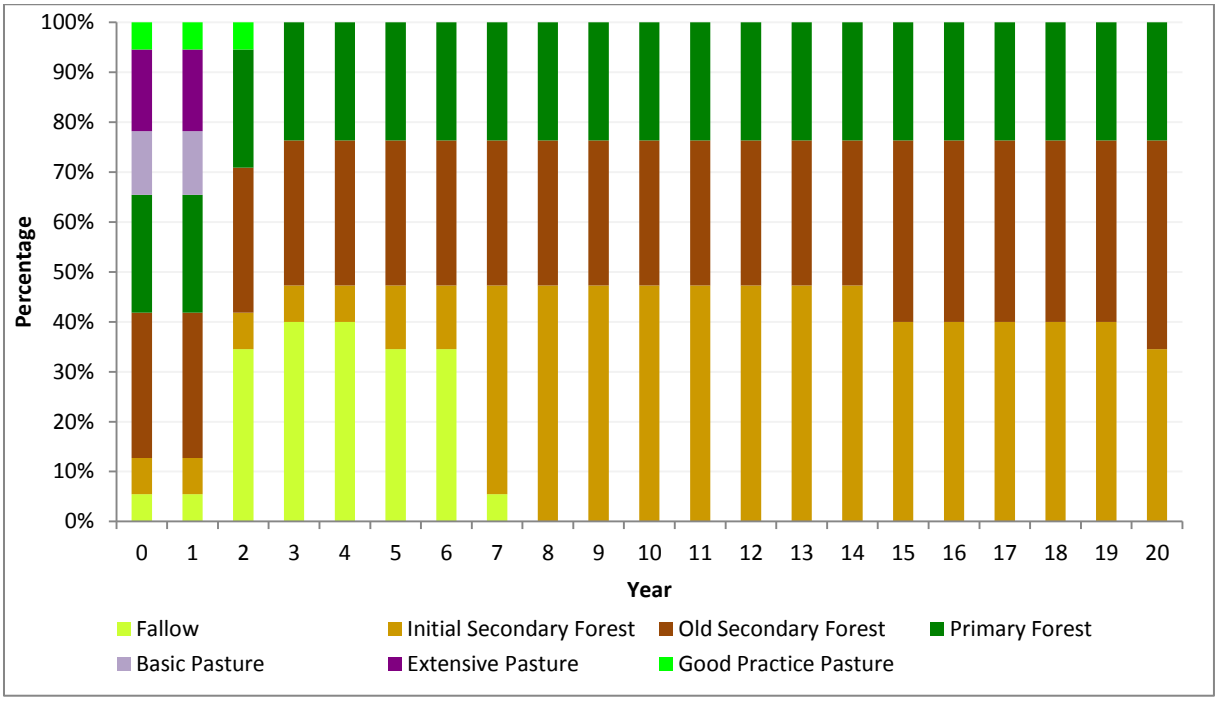


Figure 4-44 : Evolution des usages des sols sur les reliefs escarpés des ranchs moyens de type intensif et semi-Intensif

Pour conclure ce paragraphe, nous observons que le modèle représente des dynamiques d'usage des sols contrastées selon le type d'unités. L'intensification des pâturages a majoritairement lieu dans les vallées, les fonds de vallée et plateaux. C'est sur ces unités où on observe la plus forte croissance en pâturages irrigués, tournants intensifs, écologiquement intensifs et en cultures (annuelles ou en association). Sur les autres unités (versants de vallée ondulés, reliefs escarpés et rive de cours d'eau), on observe majoritairement une expansion des forêts. Le processus d'intensification conduit ainsi à une hétérogénéité de compositions entre unités géomorphologiques (c'est à dire à une répartition des usages des sols différente entre unités géomorphologiques) et à une configuration spatiale plus complexe.

4.2.1.5 Evolution des ressources naturelles

Le modèle évalue sur la base d'une approche qualitative l'évolution des ressources naturelles. La tendance d'évolution des indices moyens à l'échelle de l'exploitation est globalement similaire entre les ranchs intensifs et semi-intensifs (Figure 4-45 et Figure 4-46). L'indice moyen Eau (calculé à l'échelle de l'exploitation) a tendance à croître alors que les indices moyens Fertilité et Structure des sols ont tendance à décroître. Les valeurs moyennes des indices Fertilité et Structure des sols varient peu entre type intensif et semi-intensif. Au bout de 20 ans, dans les deux exploitations, ils atteignent respectivement 70 et 55. On observe par contre des indices Eau différents entre le type intensif (environ 115) et semi-intensif (100). Ceci pourrait s'expliquer par une plus forte proportion d'usages intensifs qui permettent de mieux valoriser l'eau du sol.

Les valeurs de ces indices évoluent toutefois différemment dans les paysages. La distribution des ressources naturelles devient plus hétérogène au cours du temps (Figure 4-47, Figure 4-48, Figure 4-49). Ceci peut s'expliquer par différentes règles de localisation des usages. Globalement, l'indice Eau s'améliore sur les plots que les éleveurs abandonnent (régénération forestière) ou qu'ils transforment en pâturage écologiquement intensif, irrigué et tournant intensif. Cependant, il tend à diminuer sur les zones occupées par des cultures annuelles. Les indices Fertilité et Structure des sols augmentent aussi au niveau des régénérations forestières et pâturage écologiquement intensif. L'indice Structure des Sols tend à se dégrader sur les zones occupées par des cultures.

Excepté pour la ressource eau, nos résultats ne permettent pas de mettre en évidence un type de stratégie d'intensification qui améliorerait les ressources naturelles sur l'ensemble de l'exploitation. En revanche, le processus d'intensification et de diversification des usages des sols tel qu'il est simulé dans le modèle donne lieu à une distribution spatiale des ressources naturelles plus hétérogènes.

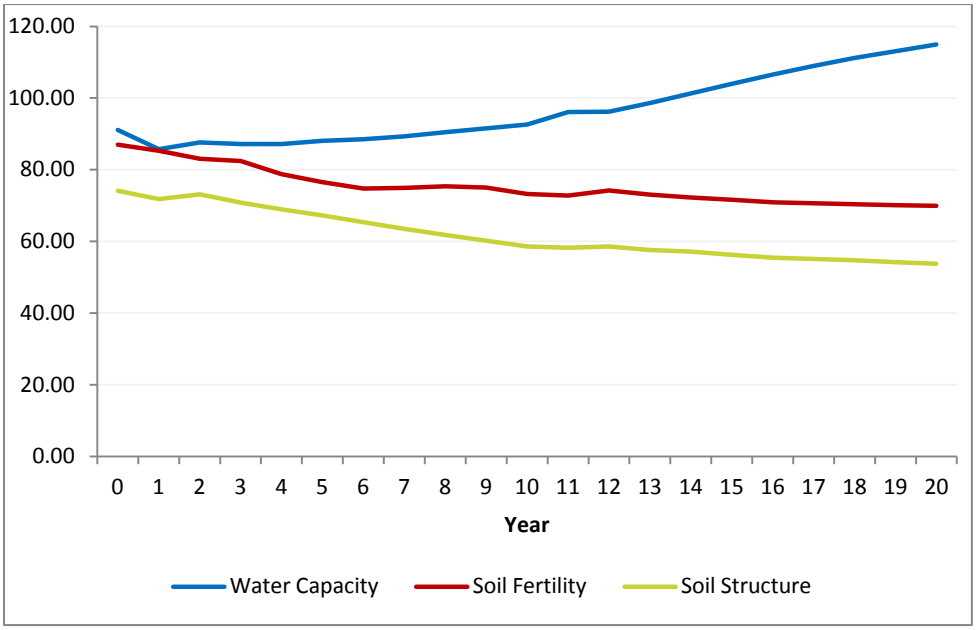


Figure 4-45 : Evolution des indices moyens Eau, Fertilité et Structure à l'échelle du ranch moyen de type intensif

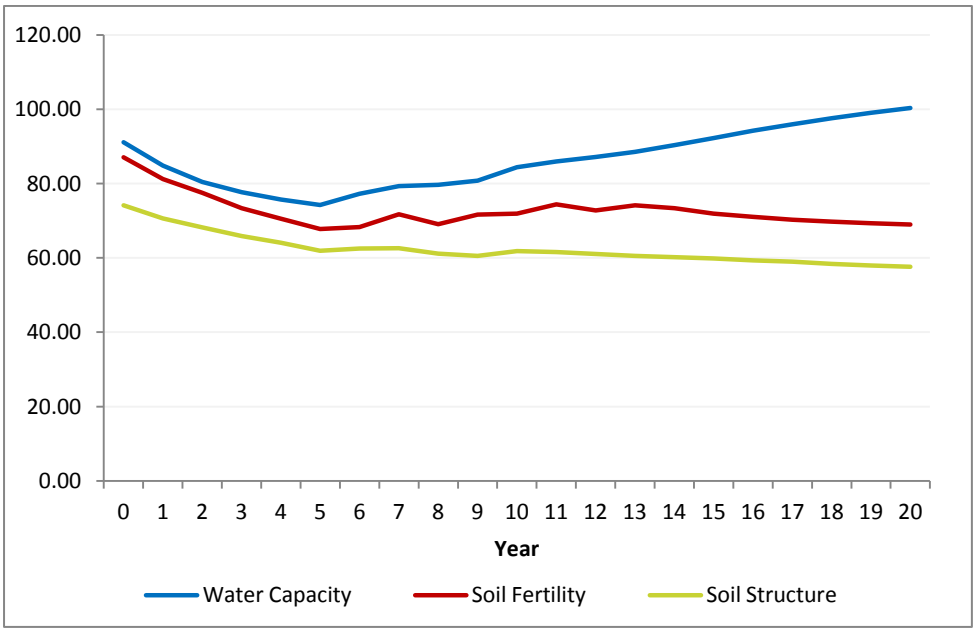


Figure 4-46 : Evolution des indices moyens Eau, Fertilité et Structure à l'échelle du ranch moyen de type semi-intensif

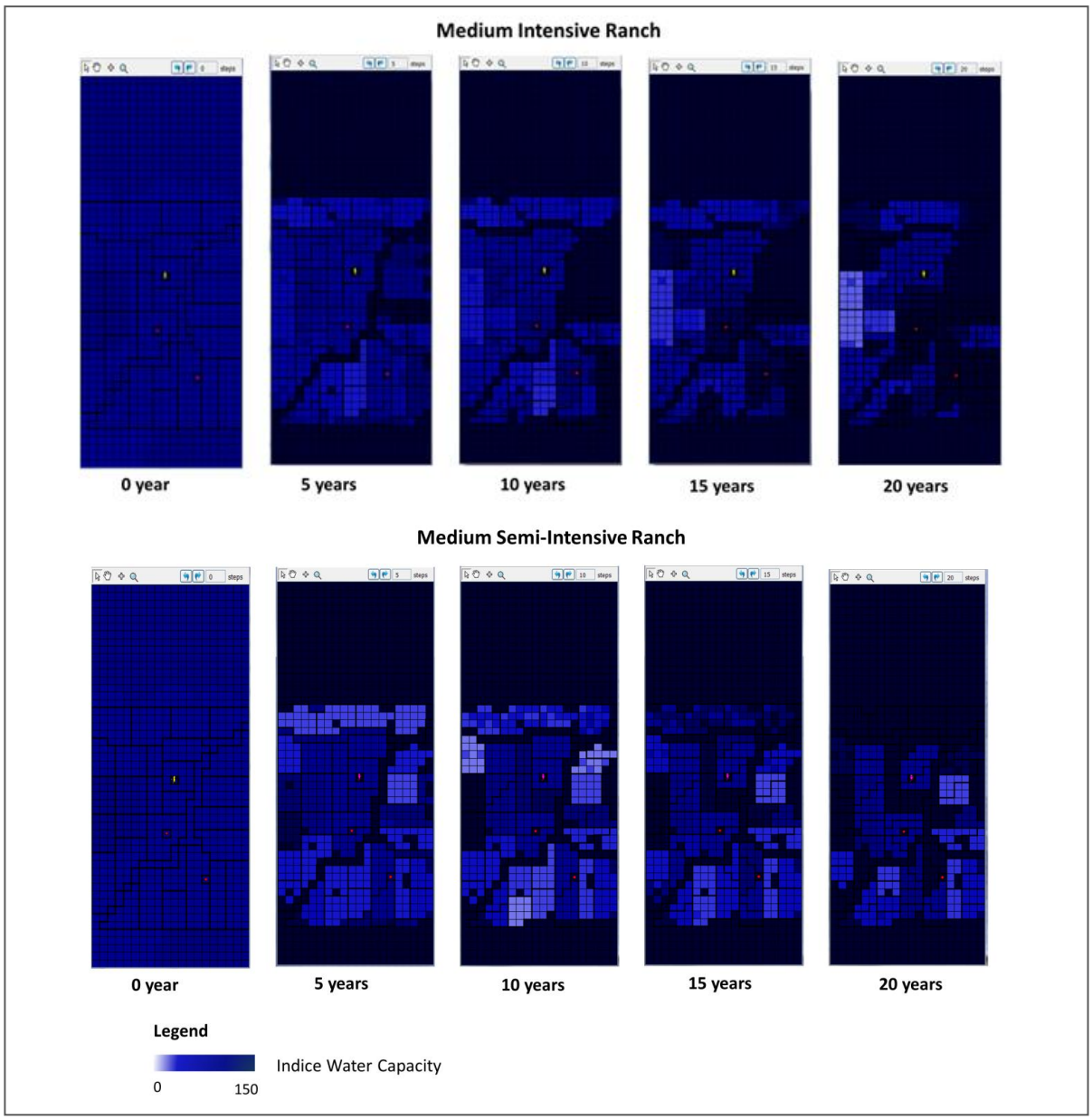


Figure 4-47 : Dynamique spatio-temporelle de la ressource en eau dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

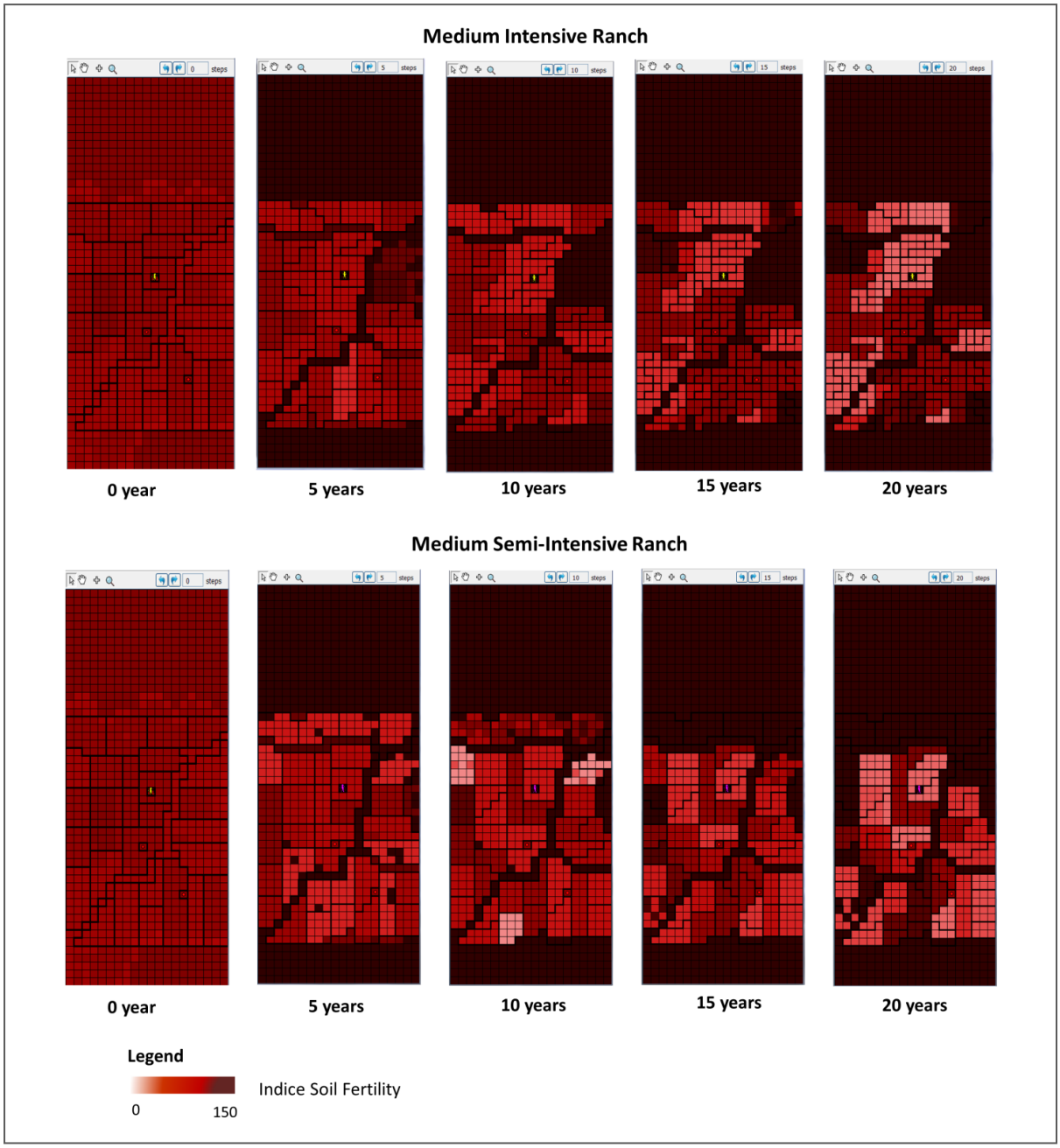


Figure 4-48 : Dynamique spatio-temporelle de la ressource fertilité des sols dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

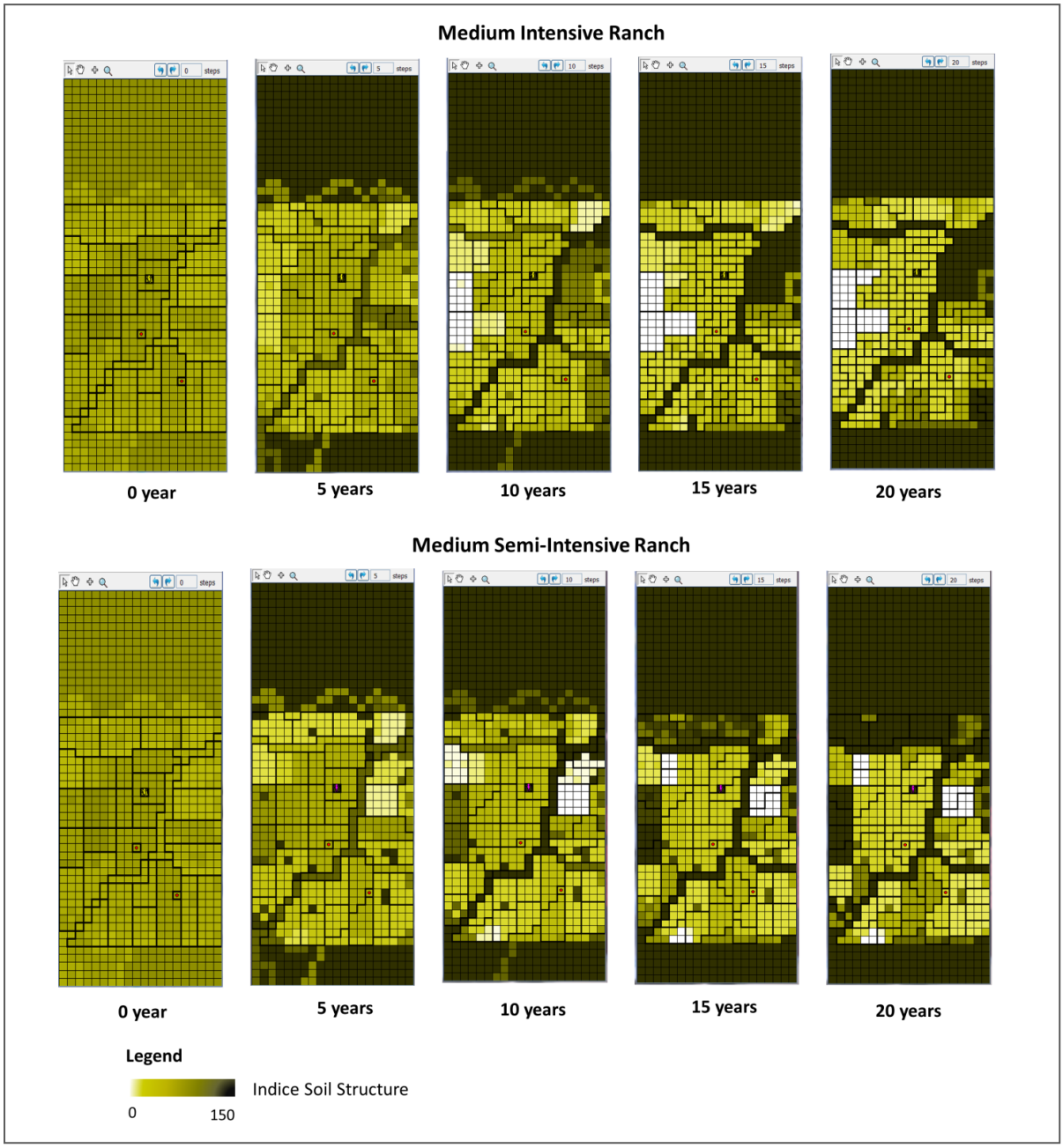


Figure 4-49 : Dynamique spatio-temporelle de la structure des sols dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

4.2.1.6 Respect du code forestier

Dans le scénario *Business as usual*, les deux exploitations respectent le code forestier (Figure 4-50). Dès la première année les éleveurs abandonnent les pâturages localisés au niveau des rives des cours d'eau et dès la troisième année, les ripisylves commencent à se régénérer. Par ailleurs, le pourcentage de la surface en réserve légale (ARL) progresse dans les deux exploitations suite à l'abandon et la mise en friche des paddocks perçus comme ayant un faible potentiel (reliefs escarpés, vallées ondulées, paddocks éloignés).

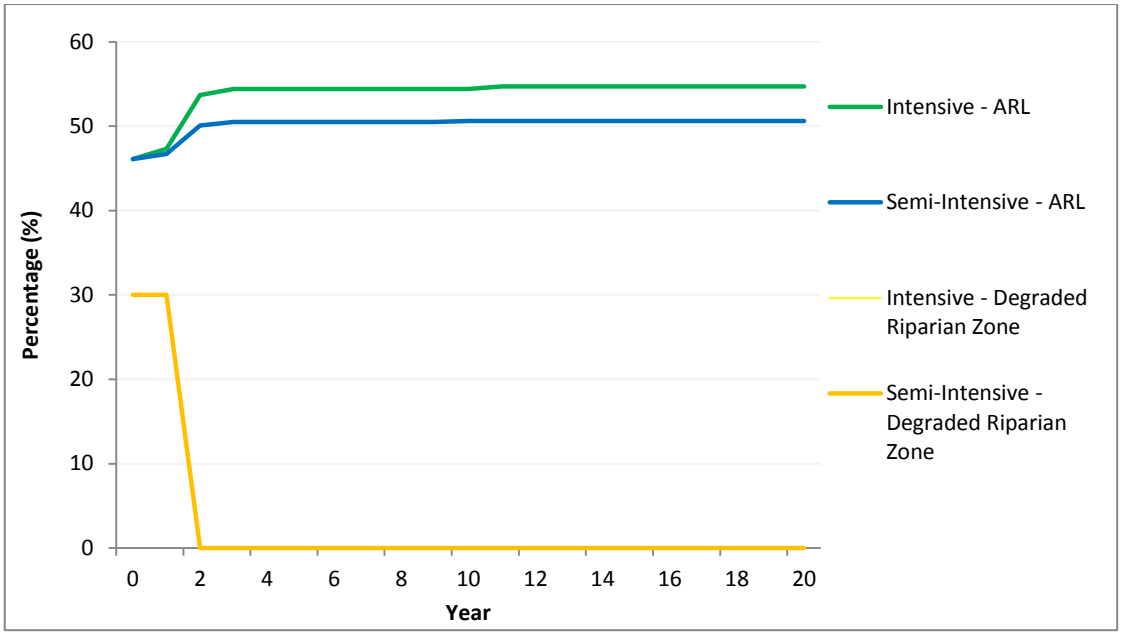


Figure 4-50 : Evolution du pourcentage de Réserve Légale (ARL) et de zones ripariennes défrichées dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif. Le pourcentage de zones ripariennes défrichées est confondu entre les deux exploitations.

4.2.2 Productivité fourragère et animale

4.2.2.1 Productivité fourragère : la capacité de charge

Le processus d'intensification améliore la capacité de charge totale des ranchs (nombre maximum de bovins qui peuvent pâturer sans dégrader les pâturages) (Figure 4-51). En 20 ans, la capacité de charge totale des ranchs augmente de 27% chez l'intensif et de 18% chez le semi-intensif. La capacité de charge est plus élevée chez le ranch intensif car la proportion en pâturages irrigués et en pâturages tournants intensifs, qui ont les meilleurs potentiels de production fourragère, est plus forte. On note cependant une exception au début des simulations : l'éleveur intensif abandonne dès le début les paddocks situés sur les vallées ondulées ce qui réduit sa surface pâturée et donc sa capacité de charge, comparé à l'éleveur semi-intensif.

Si l'on s'intéresse aux variations annuelles, on constate qu'après une augmentation significative, la capacité de charge totale diminue significativement en année 10 dans les deux ranchs. Ceci peut s'expliquer par la forte dégradation des prairies la même année. Les dernières années, la capacité de charge fluctue faiblement et tend à se stabiliser autour de 750 UA/ranch chez l'intensif et 690 UA/ranch chez le semi-intensif. Ce plafonnement de la productivité fourragère s'explique par une stabilisation des surfaces des différentes classes de pâturages et donc un arrêt de la réforme des pâturages moins productifs vers des pâturages très productifs.

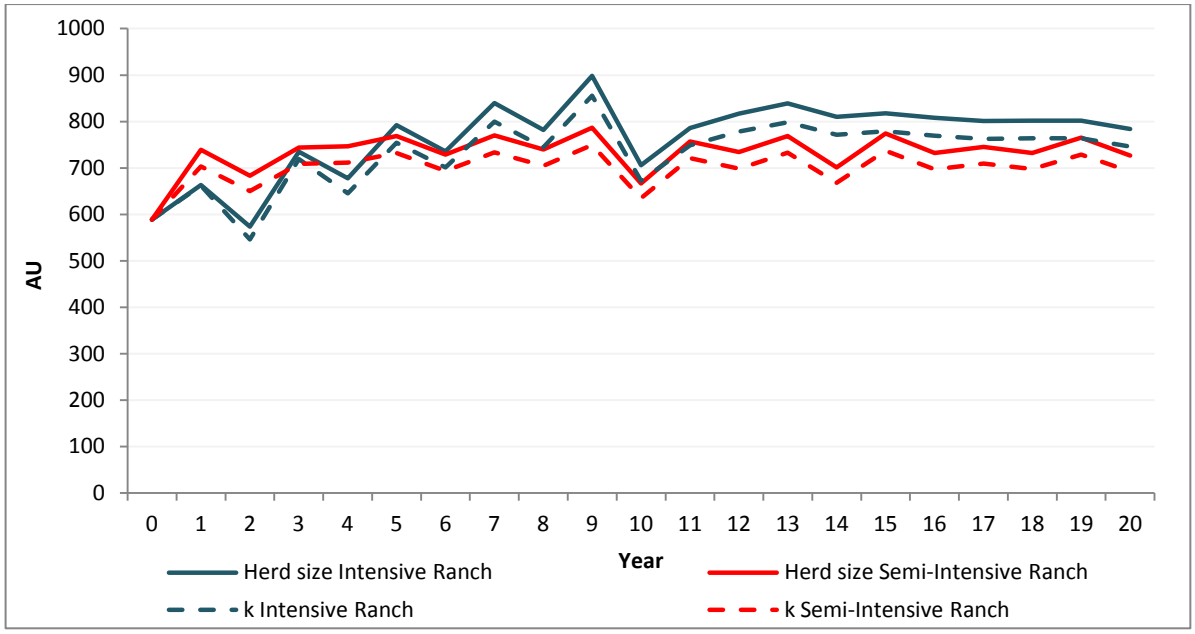


Figure 4-51 : Variation de la capacité de charge des pâturages (k) et de la démographie en bovins dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

La capacité de charge moyenne par hectare de pâturage[1] augmente fortement et dépasse même 2 UA/ha chez l'intensif (Figure 4-52). Toutefois, sur l'ensemble de la ferme aucun des deux ranchs n'atteint l'objectif de productivité fourragère fixé initialement (1 200 UA chez l'intensif et 800 UA chez l'extensif). Pour atteindre cet objectif avec les surfaces en pâturage disponible à la fin des simulations, la capacité de charge moyenne par hectare devrait être de 3,3 UA/ha chez le ranch intensif (364 ha de pâturage) et de 2 UA/ha chez le ranch extensif (393 ha de pâturage). Pour atteindre une capacité de charge moyenne de 3,3 UA/ha, il faudrait que l'éleveur intensif implante davantage de pâturages irrigués (qui permettent d'atteindre une capacité de charge de 4 UA/ha). Pour atteindre une capacité de charge moyenne de 2 UA/ha, il faudrait que l'éleveur semi-intensif investisse davantage dans l'implantation de pâturages tournants intensifs et écologiquement intensifs (qui permettent d'atteindre une capacité de charge de respectivement 2,5 UA/ha et 2 UA/ha).

[1] Calul effectué en divisant la capacité de charge totale par la surface en pâturage

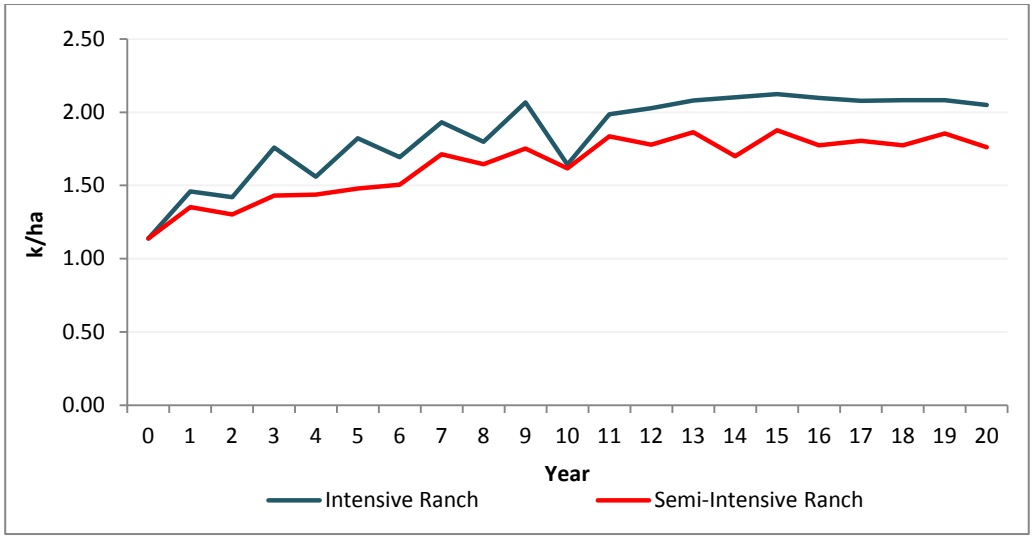


Figure 4-52 : Variation de la capacité de charge moyenne par hectare de pâturage dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

Au niveau spatial, la distribution de la capacité de charge varie entre les ranchs intensif et semi-intensif (Figure 4-53). Chez le semi-intensif, on observe une distribution spatiale qui tend à rester homogène entre paddocks. Chez l'intensif, la distribution devient de plus en plus hétérogène dans l'espace. Les paddocks avec les plus fortes capacités de charge se situent principalement à proximité des corrals, alors que les paddocks avec les plus faibles capacités ont tendance à en être les plus éloignés.

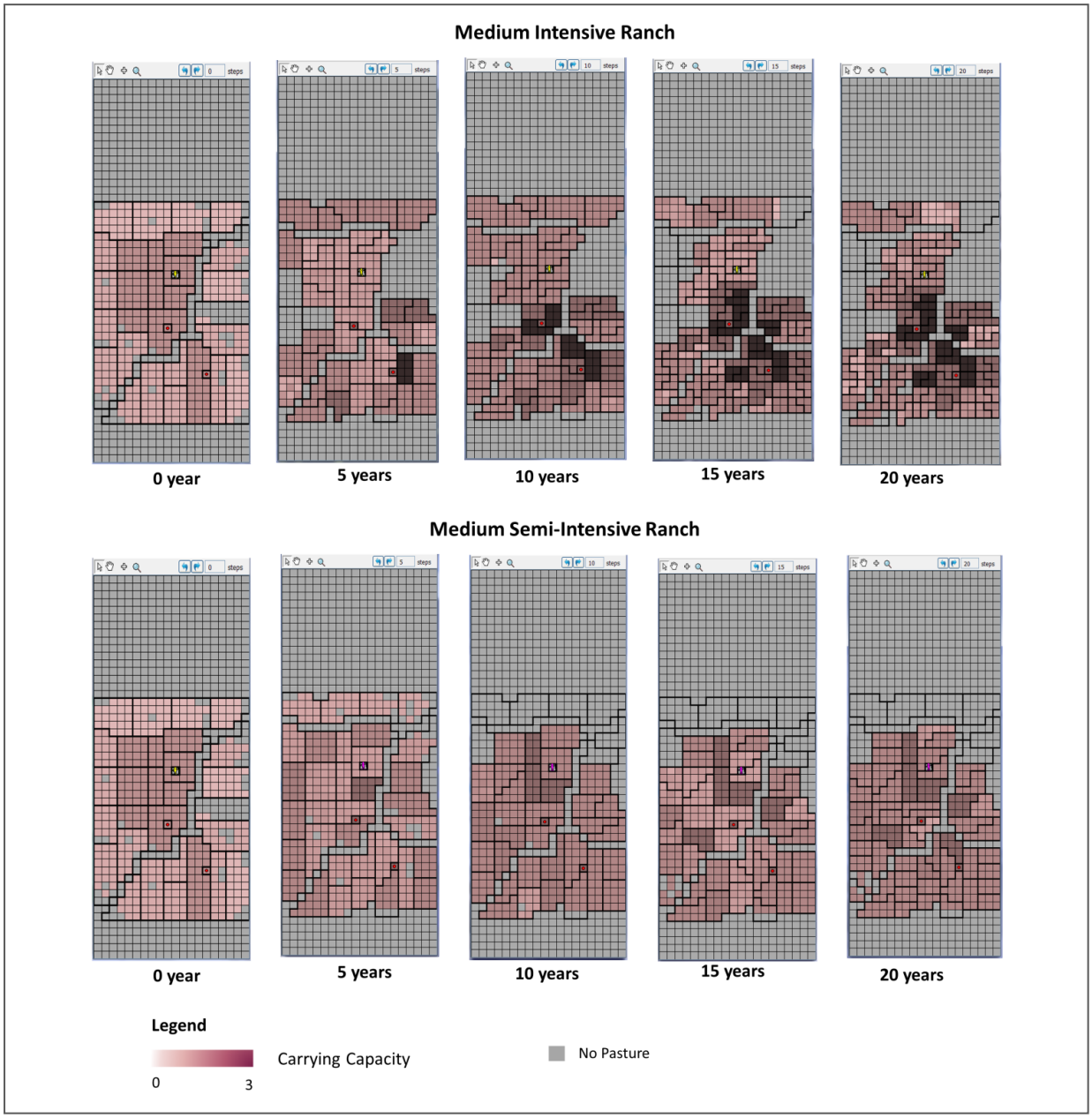


Figure 4-53 : Dynamique spatio-temporelle de la capacité de charge des pâturages dans les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

4.2.2.2 Productivité animale : la démographie

La taille des troupeaux suit une évolution semblable à la capacité de charge. L'accroissement du troupeau plafonne les dernières années du fait d'un plafonnement de la capacité de charge. Au bout de 20 ans, le nombre d'UA est égal à 784 chez l'intensif et à 727 chez le semi-intensif, soit 1,05 fois la capacité de charge totale. Dans ce modèle, la stratégie d'intensification suivie par l'éleveur intensif génère de meilleurs résultats en termes de productivité fourragère et animale.

4.2.3 Indicateurs socio-économiques

4.2.3.1 Ventes annuelles

La commercialisation de bovins est la principale source de revenu des deux ranchs. En moyenne, le ranch intensif a vendu 186 UA/an, soit 40 UA de plus que le ranch semi-intensif (Tableau 4-4 et Figure 4-54). Les écarts types révèlent toutefois de fortes variations interannuelles par rapport à la moyenne. En année 10, nous observons un pic de vente de bovins tant dans les ranchs de type intensif que semi-intensif. Cette décapitalisation est à relier à deux phénomènes observés la même année : un pic de dégradation des pâturages (Figure 4-28 et Figure 4-29) et la baisse de la capacité de charge totale (Figure 4-51).

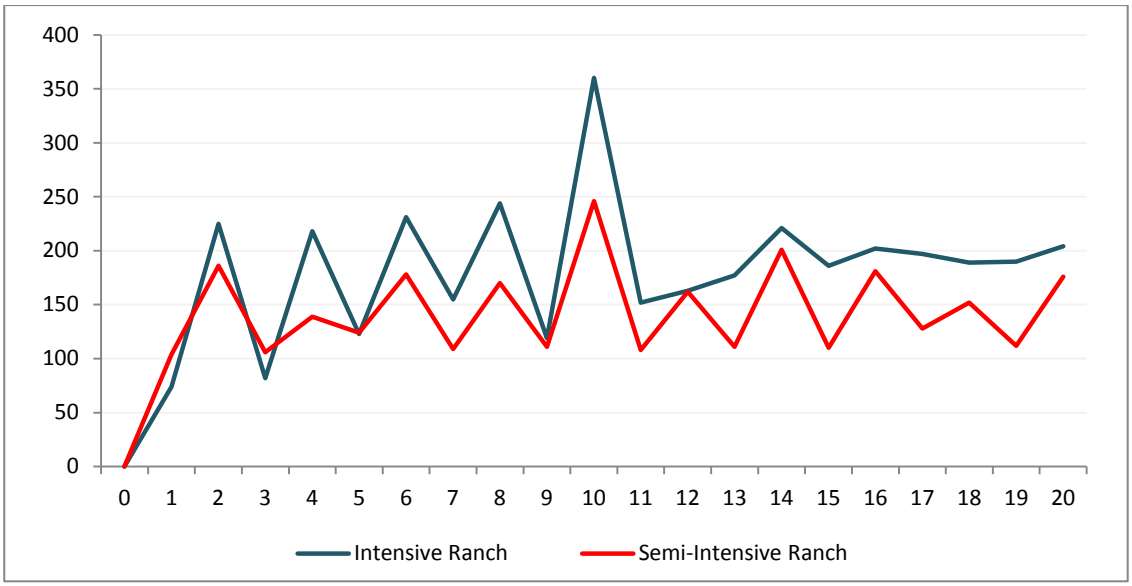


Figure 4-54 : Comparaison du nombre de bovins vendus annuellement par les ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

Tableau 4-4 : Données statistiques relatives à la vente annuelle de bovins

	Intensive Ranch	**Semi-Intensive Ranch**
MOY	186	146
MIN	74	104
MAX	360	246
Q1	154	111
Q3	219	177
Ecart-Type	61,1	39,1

Outre la vente des bovins, l'éleveur intensif bénéficie également de la vente de cultures. Selon les années, elle peut représenter de 25% à 60% du revenu de ce ranch (Figure 4-55).

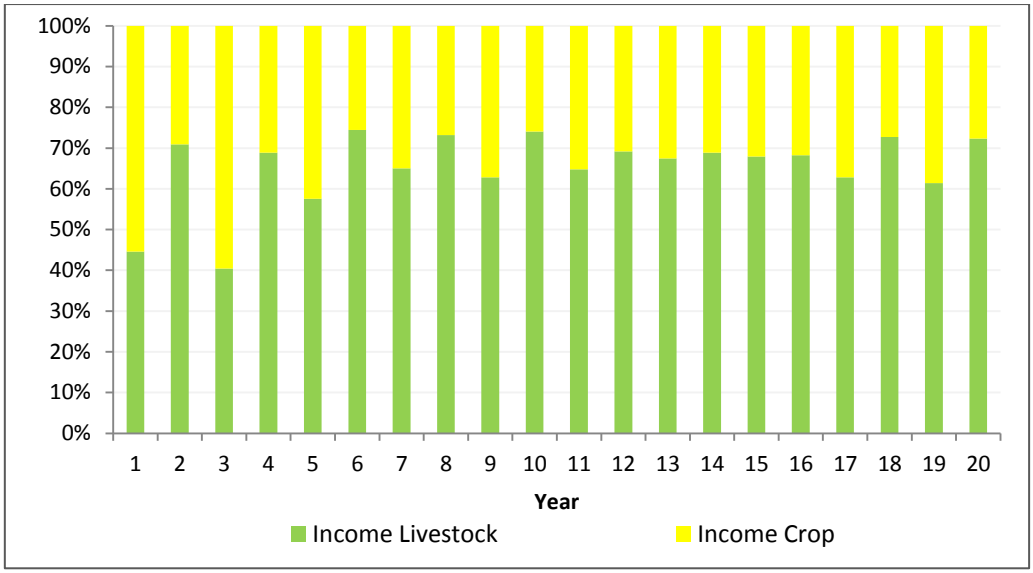


Figure 4-55 : Part du revenu généré par les cultures et de l'élevage chez le ranch moyen de type intensif

4.2.3.2 Trésorerie

Le cash correspond à la trésorerie disponible après la vente des produits issus de l'exploitation (bovins et pour l'intensif des cultures) et le paiement des charges opérationnelles et fixes. Il est reporté d'une année sur l'autre.

Jusqu'à la 10ème année, la tendance est similaire entre les deux ranchs : le cash fluctue entre 300 000 R$ et 650 000 R$ chez l'intensif et entre 200 000 et 450 000 R$ chez le semi-intensif. A partir de la 10ème année, on observe deux tendances différentes : le cash est en progression forte et constante chez le ranch intensif (+10%/an environ) et atteint 1,81 MR$ au bout de 20 ans, alors qu'il varie peu et se stabilise autour de 457 000 R$ chez le semi-intensif (Figure 4-56).

Si l'on compare les moyennes, sur 20 ans, le cash moyen du ranch semi-intensif est de 355 000 R$ alors qu'il dépasse 880 000 R$ chez le ranch intensif. Cependant les variations sont fortes d'une année sur l'autre comme le met en évidence l'écart-type (Tableau 4-5).

Il est intéressant de comparer l'évolution du cash à la dynamique des usages des sols et à la capacité de charge des exploitations. On constate que le ranch intensif n'investit plus dans la réforme des prairies bien qu'il dispose d'une importante disponibilité de cash et qu'il n'ait pas encore atteint son objectif de capacité de charge. Ce résultat est en fait imputable à l'épuisement de la main d'œuvre disponible (Figure 4-57). L'intensification de la conduite du système d'élevage a entraîné une hausse significative des besoins en main d'œuvre pour la manutention des parcs et du troupeau. L'intensification de nouvelles surfaces génère une demande supplémentaire en main d'œuvre qui ne peut être satisfaite par les ressources actuelles de l'exploitation. Par conséquent, faute de main d'œuvre disponible, l'éleveur ne réforme pas de nouveaux paddocks et la capacité de charge plafonne. Cette situation est également observée chez le ranch semi-intensif. Ces résultats confirment que la faible

disponibilité de main d'œuvre sur les ranchs est un facteur limitant à l'intensification de l'élevage.

Tableau 4-5 : Données statistiques relatives à la trésorerie

	Intensive Ranch	**Semi-Intensive Ranch**
MOY	886 855	355 714
MIN	333 306	229 723
MAX	1 814 913	600 000
Q1	600 000	303 718
Q3	1 164 443	403 238
Ecart-Type	438 143	87 043

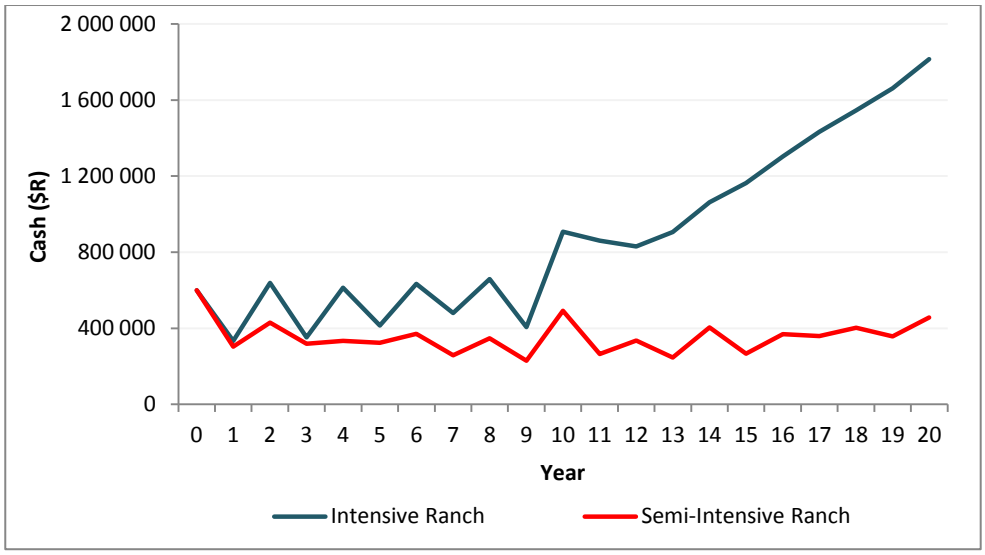


Figure 4-56 : Evolution du cash (trésorerie) des ranchs moyens de type intensif et semi-intensif

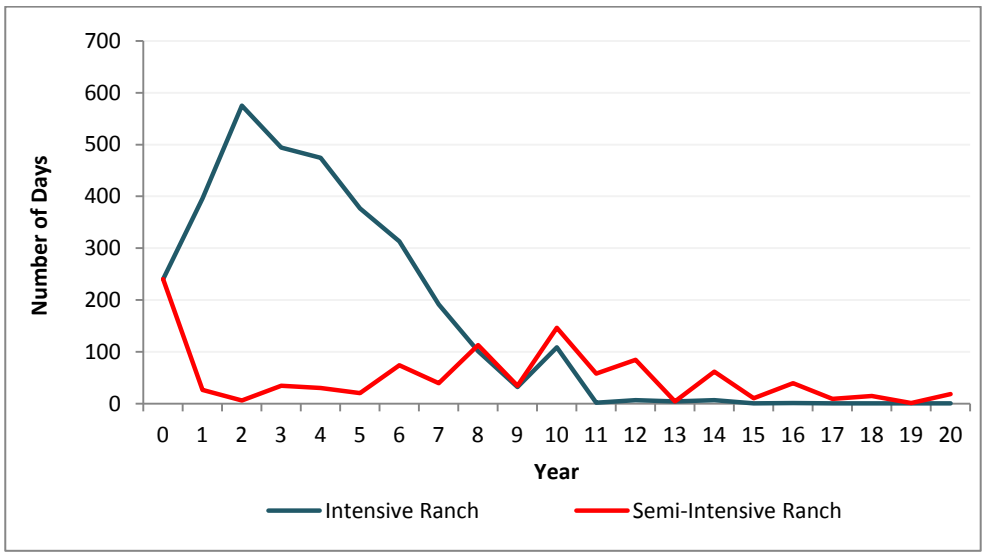


Figure 4-57 : Evolution annuelle de la main d'œuvre disponible (en nombre de jours)

4.3 Discussion et perspectives futures de développement

4.3.1 Vérification et évaluation du modèle

La thèse a permis de conceptualiser et d'implémenter une première version du modèle, et de le tester avec deux ranchs moyens de type intensif et semi-intensif. Son utilisation en l'état reste néanmoins limitée car la vérification et d'évaluation du modèle n'ont été que partiellement complétées. Ci-dessous, pour chaque étape de « *l'évaludation* » du modèle (Augusiak *et al.*, 2014) décrite dans le Chapitre 2, nous présentons les tâches déjà accomplies et évoquons plusieurs pistes d'amélioration.

i) L'évaluation des données :
La source des données est variable. Du fait de l'absence de données de recensement agricole fiables et récentes pour la région, nous avons préféré utiliser des données primaires issues de nos enquêtes, des données secondaires récoltées dans le cadre du développement de l'outil ANERPAAM à partir d'enquêtes aux producteurs et de connaissances d'experts (Clerc, 2011). Nous nous sommes aussi beaucoup appuyés sur les données utilisées par les autres SMA développés par le DP Amazonie (Bommel *et al.*, 2010 ; Bommel *et al.*, 2012 ; Bommel *et al.*, 2014). Ces données primaires et secondaires nous ont permis de paramétrer les aspects économiques (coûts de production et prix de vente), sociotechniques (besoin en main d'œuvre), la productivité (fourrages et cultures, troupeau) mais aussi de représenter un certain nombre de dynamiques sociales et écologiques (gestion du troupeau, de l'exploitation, des usages des sols, succession de la végétation, dégradation des pâturages, évolution de la productivité).
Pour la dynamique des ressources naturelles, nous ne disposions pas de données quantitatives au moment du développement du modèle. C'est pourquoi, nous avons utilisé des valeurs relatives (agrade/dégrade/pas d'effet) sur la base de connaissances d'experts. Il serait intéressant dans une future étape d'intégrer des données issues du projet ECOTERA et d'approfondir la révision bibliographique.

ii) L'évaluation du modèle conceptuel :
Par rapport à sa version initiale, le modèle conceptuel a été régulièrement ajusté afin que les sorties des simulations se rapprochent de nos observations et connaissances. A présent, il serait intéressant de consulter des scientifiques de différentes disciplines (agronomie, zootechnie, géographie, économiste, écologie du paysage, modélisation) afin de leur demander d'évaluer le modèle conceptuel et revoir éventuellement les principales hypothèses et algorithmes utilisés. Il serait ensuite pertinent de présenter cette version ajustée à un groupe d'acteurs locaux (éleveurs et techniciens). L'organisation d'ateliers serait une stratégie pertinente car ils permettraient de confronter les points de vue de différentes communautés. Par ailleurs, localement, les acteurs sont réceptifs à ce genre d'initiatives.

iii) La vérification de l'exécution :

Au cours de l'implémentation du modèle, nous avons cherché à éliminer le plus d'erreurs de codes possibles pour maintenir la cohérence entre le simulateur et le modèle opérationnel. Une révision structurée et complète du code par un autre programmeur pourrait être bénéfique. Cependant, une révision non automatisée est chronophage.

iv) La vérification des sorties du modèle :

Cette étape consiste à comparer pour certains critères les sorties du modèle aux observations et à ajuster les valeurs des paramètres (calibration). Nous constatons que les sorties obtenues avec l'outil de simulation se rapprochent des grandes tendances observées à partir de nos enquêtes (trajectoires des paysages). D'autres au contraire se montrent moins réalistes ou pour le moins surprenantes (évolution du cash, dynamiques des ressources naturelles). Il est possible que pour plusieurs paramètres, les valeurs choisies soient potentiellement à l'origine de sources d'erreurs (par exemple les coûts et produits, les variations de l'état des ressources naturelles).

Huit critères nous sembleraient pertinents à analyser pour une calibration plus fine du modèle : la surface des différents usages des sols, la localisation de ces usages dans les paysages, la vitesse à laquelle sont implantés les nouveaux usages des sols, l'évolution des valeurs des indices des ressources naturelles, la capacité de charge, la valeur du revenu et l'impact sur la main d'œuvre. Nos résultats pourraient être mis à l'épreuve par une vérification à dire d'experts (chercheurs, éleveurs, techniciens) et avec la littérature.

Par ailleurs, répliquer les simulations un plus grand nombre de fois pour un même scénario est requis pour pouvoir une interprétation plus fiable des résultats.

v) L'analyse du modèle :

C'est une étape essentielle dans la démarche de modélisation que nous n'avons pu effectuer faute de temps et d'expérience. Tester la sensibilité du modèle est très importante pour identifier les paramètres et variables d'entrée qui influencent fortement les sorties d'un modèle et caractériser les sources d'incertitudes. L'analyse de variance (ANOVA) est couramment utilisée. Avec la dernière version de Cormas (2017), il est désormais possible de piloter le logiciel depuis R et d'exécuter l'analyse de sensibilité plus facilement.

vi) La corroboration des sorties du modèle :

Il serait intéressant de comparer les résultats de notre modèle développé selon une approche *bottom-up* avec ceux d'un modèle issu d'une approche *top-down*, où les données servant à paramétrer la dynamique des paysages et à déduire les règles d'usages des sols des éleveurs seraient issues d'analyses spatiales et statistiques. Cela pourrait être possible en utilisant la base de données créée dans le cadre des projets ECOTERA et TERRACERT et qui inclut notamment des données spatialisées sur la texture des sols (Laurent *et al.*, 2017), la pluviométrie (TRMM) et la résistance des prairies à la sécheresse (Laurent *et al.*, In review), la dégradation forestière (Tritsch *et al.*, 2016 ; Bourgoin *et al.*, 2018), les usages des sols, les CAR, les routes et un zonage de géofaciès (Pimentel, 2016).

4.3.2 Intérêt et limites du modèle pour raisonner l'intensification de l'élevage dans des paysages éco-efficients

Au niveau scientifique, le développement de ce modèle multi-agents empirique apporte des nouvelles perspectives sur le processus d'intensification de l'élevage et les dynamiques de paysages en Amazonie brésilienne. Plusieurs études ont récemment montré que l'intensification peut être une solution pour améliorer les performances productives et économiques de l'élevage en Amazonie tout en épargnant des terres en forêt (Stabile *et al.*, 2016) et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (Cohn *et al.*, 2014 ; Cardoso *et al.*, 2016). Ces travaux discutent les scénarios qui optimiseraient à la fois les performances économiques ou productives et environnementales. Pour ce faire, les auteurs ont eu recours à d'autres méthodes : une analyse microéconomique (Stabile *et al.*, 2016), l'ACV (Cardoso *et al.*, 2016) et une approche de modélisation macroéconomique à l'échelle du Brésil, basée sur le modèle d'équilibre partiel GLOBIOM (GLObal BIosphere Management Model) qui analyse la compétition pour l'utilisation des terres entre les secteurs agricole, forestier et l'élevage (Cohn *et al.*, 2014). Une des nouveautés de notre approche a été de considérer la distribution spatiale des potentialités agricoles dans les paysages, en nous appuyant sur le concept d'unités géomorphologiques. Ce concept s'avère important à intégrer dans la modélisation du processus d'intensification sur le plan spatial pour pouvoir à la fois représenter les décisions spatialement explicites des éleveurs et représenter l'hétérogénéité spatiale des processus écologiques et de l'évolution des ressources naturelles.

Nous avons tenu compte des contraintes internes des exploitations liées à l'organisation du travail. L'un des résultats saillants du modèle est un plafonnement des surfaces intensifiées et donc de la capacité de charge en bovins faute de main d'œuvre disponible. Dans ces zones rurales d'Amazonie brésilienne, les difficultés d'accéder à la main d'œuvre et la faible disponibilité de main d'œuvre qualifiée est un obstacle majeur à l'adoption de pratiques plus exigeantes en main d'œuvre et à l'innovation (Vaz *et al.*, 2012 ; Bendahan, 2015).

Sur le plan opérationnel, le modèle peut aussi présenter un intérêt pour le développement local. La valorisation des ressources naturelles et l'organisation des pratiques dans le paysage constituent une nouveauté/découverte pour les acteurs locaux. Beaucoup ne maîtrisent pas encore ces domaines. Par ailleurs, le contexte actuel est très incertain et les preneurs de décision locaux ont peu d'outils de prospective. Le fait de montrer des scénarios d'évolution peut encourager une réflexion.

Le modèle que nous avons construit présente aussi plusieurs limites.

Premièrement, compte tenu du fait que nous n'avons pas réalisé une vérification et une évaluation plus poussée du modèle, ces résultats sont exploratoires et doivent être interprétés avec beaucoup de précaution, en particulier ceux qui concernent les résultats économiques et les dynamiques des ressources naturelles qui s'appuient sur une approche qualitative beaucoup plus simple que la réalité.

Une seconde limite concerne le modèle de décision des éleveurs. Premièrement, nous n'avons pas encore tenu compte dans cette version du modèle des variables extérieures au système d'exploitation (marché, climat, politiques...) qui peuvent influencer les décisions. Deuxièmement, nos enquêtes nous ont permis d'identifier les déterminants de la localisation des usages des sols ; mais nous manquons de données quantitatives pour chiffrer le poids de ces différents déterminants et leur hiérarchie. Ceci serait ultérieurement possible en collectant des données sur un échantillon plus large ou en ayant recours à une analyse SIG.

Troisièmement, il serait nécessaire de répliquer les simulations un plus grand nombre de fois car la représentation du processus de dégradation des pâturages inclut une dimension aléatoire qui pourrait faire varier les sorties du modèle.

Un autre point à améliorer est le fait que pour plusieurs sorties du modèle, nous observons assez peu de différences entre les deux types d'éleveurs (intensif et semi-intensif). Dans une phase de révision du modèle conceptuel, il faudrait chercher à caricaturer davantage ces deux types.

Enfin, la représentation des exploitations visait à être suffisamment générique pour pouvoir modéliser des exploitations familiales de petite taille (100 ha) et des fazendas de grande échelle (10 000 ha). Le choix d'une résolution de 1 ha est un compromis entre ces deux extrêmes. La multiplication du nombre de pixels ralentirait les simulations informatiques. Toutefois, cette résolution est un peu trop large pour représenter certaines unités géomorphologiques (rives de cours d'eau).

4.3.3 Simuler d'autres scénarios et mesurer d'autres indicateurs

Plusieurs perspectives de développement sont possibles. Pour l'instant, le modèle informatique simule deux types de stratégies de conduite d'élevage, semi-intensive et intensive, dans les ranchs de type moyen. Nous souhaiterions implémenter d'autres simulations informatiques en modifiant des variables internes et externes aux systèmes.

Pour les variables internes, trois perspectives de développement sont de :

- répliquer ces stratégies d'intensification dans les exploitations familiales (100 ha) et les ranchs de grande taille (10 000 ha) afin de pouvoir explorer les impacts du processus d'intensification dans cette diversité de systèmes d'élevage.
- projeter les stratégies sur d'autres configurations initiales de paysage afin de tester si le paysage initial influence les sorties des simulations.
- donner la possibilité aux exploitations d'employer de la main d'œuvre externe, si leur trésorerie leur permet, pour accroître la disponibilité en ressources humaines nécessaires pour poursuivre leur projet l'intensification de l'élevage.

Pour les variables externes au système d'exploitation, quatre types de scénario nous semblent pertinents :

- Le changement climatique : nous pourrions tester les effets d'une réduction des précipitations et/ou une plus grande variabilité temporelle des précipitations avec des saisons sèches plus marquées sur l'offre fourragère et les performances économiques. Dans ce scénario, il serait intéressant de comparer les performances entre des systèmes de gestion privilégiant l'offre fourragère en saison sèche mais assez coûteux sur le plan financier et énergétique (irrigation, production d'ensilage, arbres dans les pâturages) et des systèmes de gestion plus traditionnels.
- L'augmentation des prix des produits dérivés du pétrole : ce scénario engendrerait une hausse des coûts d'implantation et de gestion des pâturages utilisant des engrais chimiques et des produits phytosanitaires (en particulier irrigués et tournants intensifs) et donc de discuter dans le long terme la rentabilité de ces systèmes.
- La mise en place de politiques favorisant l'adoption de pratiques éco-efficientes (crédit ou subvention) : au lieu de mobiliser leur trésorerie pour financer la mise en place de telles pratiques comme c'est le cas dans cette version du modèle, les éleveurs pourraient avoir accès à du capital externe. Ces financements seraient destinés à financer par exemple l'implantation de légumineuses ou de systèmes sylvo-pastoraux (système de gestion de type écologiquement intensif).
- La révision du Code Forestier : ce scénario offrirait la possibilité de réorganiser dans l'espace la localisation de la réserve forestière. Dans ce scénario, il serait intéressant de tester de nouvelles configurations d'usages des sols et d'évaluer les agencements permettant d'optimiser les objectifs de production et de conservation.

Une autre perspective de développement serait d'évaluer les impacts des stratégies d'intensification et des changements d'usage des sols sur d'autres indicateurs :

- Le bilan énergétique et les émissions de gaz : comme l'ont montré les bilans énergétiques calculés à travers l'outil ANERPAAM, les exploitations intensives en intrants présentent un plus fort niveau de productivité, mais en contrepartie un plus fort niveau de consommation énergétique résultant de l'entretien des fourrages (achat d'engrais, de semences et de produits phytosanitaires), de la production et du stockage d'aliments (fourrages et concentrés). Mesurer ces deux indicateurs nous permettrait de mieux prendre en compte les différents *trade-offs*. Si cette option était retenue, cela nécessiterait d'adapter le modèle multi-agents pour pouvoir mesurer les quantités directes et indirectes d'énergie mobilisée pour chaque type de gestion.
- La valeur du patrimoine de l'exploitation : grâce à l'amélioration de l'outil de production (via par exemple l'amélioration génétique du troupeau, la régénération d'arbres de valeurs, la restauration de la fertilité des sols, la mise en place de nouvelles installations rurales et équipements), le processus d'intensification pourrait accroître la valeur patrimoniale des exploitations. Il serait donc pertinent de mesurer l'évolution de cet indicateur pour mieux évaluer les impacts économiques du processus d'intensification.

Conclusion du chapitre

Nous avons développé un modèle multi-agents avec deux objectifs : i) explorer les conséquences de la diversité de stratégies d'intensification sur les dynamiques de paysage et de leurs ressources ; ii) analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies sur le plan économique et humain. Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle conceptuel et les premiers résultats du simulateur pour deux ranchs de taille moyenne, l'un intensif et l'autre semi-intensif, sous le scénario *Business as Usual*.

Au niveau conceptuel, nous avons introduit deux nouveaux concepts pour mieux raisonner les liens entre système de décision et éco-efficience des paysages en Amazonie brésilienne. Le premier concept est celui d'unités géomorphologiques. Nous avons modélisé les décisions de localisation des usages des sols en fonction des potentialités agricoles de ces unités. De plus, nous avons aussi pu représenter les variations spatiales des processus écologiques en fonction de ce type d'unités. Le deuxième concept est celui de Paddock. Nous avons modélisé les interactions entre processus biophysiques (croissance et dégradation des prairies) à l'échelle du Plot et processus sociaux (décisions de gestion du pâturage) à l'échelle du Paddock.

Les résultats du simulateur révèlent des changements d'usages des sols différentiés entre le type intensif et semi-intensif. L'éleveur intensif convertit une proportion plus élevée de son exploitation en usages de sols intensifs (cultures annuelles, pâturage irrigué, pâturage tournant intensif et écologiquement intensif) que l'éleveur semi-intensif. Dans les deux cas cependant, l'expansion des surfaces intensifiées plafonne avant la fin des simulations, faute de main d'œuvre disponible. Tant chez l'intensif que le semi-intensif, nous avons aussi observé une augmentation substantielle des surfaces régénérées en forêt. En revanche, l'indice de dégradation des prairies a tendance à diminuer car elles sont mieux entretenues.

Les dynamiques d'usages des sols sont également différentes entre types d'unités géomorphologiques. Le processus d'intensification a majoritairement lieu dans les unités perçues comme ayant un meilleur potentiel agronomique (principalement les plateaux et vallées peu ondulées). Au contraire, les unités protégées par le code forestier ou peu mécanisables (versants de vallée ondulés, reliefs escarpés et rive de cours d'eau) s'enfrichent.

Les simulations montrent aussi une augmentation de l'hétérogénéité spatiale de la distribution des ressources naturelles (eau, fertilité, structure des sols). Cette hétérogénéité spatiale est liée à la réorganisation spatiale des pratiques en fonction de la distribution spatiale des unités géomorphologiques. En revanche, contrairement à ce que nous avions envisagé, les tendances d'évolution des ressources naturelles sont similaires entre types d'exploitation.

Au niveau économique, le type intensif présente de meilleurs résultats que le type semi-intensif. Cette différence s'explique par une meilleure charge animale à l'échelle de l'exploitation, ainsi que la diversification dans la production de cultures de rente.

Ces résultats sont exploratoires et doivent être interprétés avec beaucoup de précaution. En effet, un certain nombre d'analyses supplémentaires, dont une analyse de sensibilité, seraient nécessaires pour vérifier et évaluer le modèle.

Plusieurs perspectives de développement du modèle existent. Parmi elles, il serait possible de répliquer ces stratégies d'intensification (intensif *vs* semi-intensif) dans les autres types d'exploitations (exploitations familiales et ranchs de grande taille), de projeter ces stratégies sur d'autres configurations initiales de paysage ou encore tester des scénarios tels que le changement climatique ou la révision du code forestier brésilien.

Chapitre 5. Discussion générale

Présentation du chapitre

L'objectif de cette thèse était de comprendre et de modéliser les relations existant entre les stratégies d'intensification des usages des sols, l'efficience dans l'usage des ressources naturelles (les éco-efficiences) et les dynamiques de paysage à l'échelle d'exploitations d'élevage. La question à laquelle nous avons souhaité répondre était :

Comment les éleveurs des fronts post-pionniers d'Amazonie orientale brésilienne adaptent leurs pratiques et leur organisation spatiale de ces pratiques, pour reconstruire des paysages plus éco-efficients, c'est à dire qui utilisent de façon plus efficiente les ressources naturelles pour leur système d'élevage?

Deux hypothèses ont été formulées : i) Le processus d'intensification de l'élevage conduit à une reconstruction des paysages à l'échelle des exploitations, pour mieux profiter de la distribution spatialement hétérogène des ressources naturelles ; ii) La modélisation spatio-temporelle aide à raisonner l'éco-efficience des paysages.

Pour répondre à cette question et tester ces hypothèses, notre démarche s'est déroulée en trois temps :

- Nous avons tout d'abord proposé un cadre d'analyse nous permettant d'étudier les interactions entre système de décision et paysage dans le temps (Chapitre 2).
- Nous avons appliqué ce cadre d'analyse dans une diversité de fermes d'élevage, sélectionnées dans deux régions d'élevage emblématiques de l'Etat du Pará, Paragominas et Redenção. A partir d'entretiens semi-directifs, et de l'analyse des trajectoires d'exploitation et des modèles paysagers, nous avons caractérisé les projets d'intensification des éleveurs et les dynamiques de paysage associées et nous avons explicité les principaux déterminants biophysiques, topologiques et socio-économiques sous-tendant la localisation des pratiques dans les paysages à l'échelle des exploitations. Nous avons par ailleurs qualifié l'impact des pratiques sur les ressources naturelles et analysé les moteurs et les barrières à l'adoption de pratiques plus intensives et éco-efficientes (Chapitre 3).
- A partir de ces résultats, nous avons développé un modèle multi-agents empirique et spatialisé représentant la diversité des projets d'intensification des fermes d'élevage, des paysages et de leurs ressources. Nous avons utilisé ce modèle pour explorer sur le long terme les interactions entre ces composants et analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies sur le plan économique et humain (Chapitre 4).

Dans ce chapitre, nous allons discuter les principaux apports de la thèse. Nous formulerons plusieurs propositions pour encourager la construction de paysages plus éco-efficients en Amazonie orientale brésilienne et accompagner les systèmes d'élevage vers l'adoption de pratiques plus éco-efficientes. Enfin, nous évoquerons diverses perspectives de recherche.

5.1 Les apports de la thèse à la question de recherche

5.1.1 Retour sur les hypothèses

A partir de l'analyse des trajectoires des exploitations et des dynamiques de paysages dans le passé et les projets d'aménagements futurs, nous avons montré que le processus d'intensification de l'élevage génère de nouvelles dynamiques de paysages à l'échelle des exploitations. Cela est mis en évidence par des changements d'usage des sols, une intensification des pratiques et un réagencement spatial de ces usages. Ces agencements varient selon la situation agraire, le projet d'intensification (écologique, artificialisation, faible intensification) et le degré d'hétérogénéité de la distribution spatiale des ressources naturelles.

De plus, nous avons montré que dans ces nouveaux paysages, les interactions entre les systèmes d'élevage bovins et les ressources naturelles ont changé. En effet, pendant la phase de colonisation, les éleveurs ont occupé l'espace à travers des pratiques extensives et l'usage du feu pour satisfaire avant tout des objectifs sociaux, économiques et culturels telles que l'appropriation et la valorisation du foncier, la productivité du travail, la sécurité financière (revenu, santé) et la promotion sociale (Biri & Maitre d'Hotel, 2002 ; Poccard-Chapuis, 2004). La valorisation des ressources naturelles et des processus écologiques de l'agroécosystème ne faisait pas partie de leurs stratégies. La localisation des usages des sols dans les paysages et la structuration des territoires ont davantage été impulsées par des déterminants logistiques (routes, fleuves) (Arima *et al.*, 2015), qu'agronomiques ou écologiques. Ces pratiques ont eu un impact négatif sur les services écosystémiques (Grimaldi *et al.*, 2014) et ont favorisé la dégradation d'importantes surfaces de pâturages (Dias-Filho, 2011 ; Navegantes *et al.*, 2012b). Cette dynamique caractéristique des fronts pionniers n'est toutefois plus observée dans les exploitations engagées dans un processus d'intensification. Un ensemble de déterminants biophysiques et topologiques guident les décisions de localisation des éleveurs, de façon à mieux valoriser les ressources naturelles, humaines et économiques. Parmi les moteurs qui ont favorisé le changement de stratégie spatiale, deux sont mis en avant dans la thèse : l'accès à la mécanisation et les externalités négatives résultant de la dégradation des ressources naturelles.

Ces résultats valident notre première hypothèse, à savoir que le processus d'intensification de l'élevage conduit à une reconstruction des paysages à l'échelle des exploitations, dans lesquels les interactions entre les systèmes d'élevage bovins et les ressources naturelles ont changé.

En retour, ce nouvel agencement de pratiques organisées dans les paysages peut contribuer à une meilleure préservation des ressources naturelles et à améliorer les éco-efficiences. Les interactions entre pratiques et dynamiques des ressources naturelles dans les paysages et dans le temps constituent un champ de recherche encore peu investigué dans les systèmes d'élevage en Amazonie. Mieux comprendre ces interactions est pourtant essentiel pour

proposer des pistes d'amélioration favorisant la reconstruction de paysages plus éco-efficients.

Pour étudier ces interactions et leurs dynamiques, nous avons eu recours aux projections spatio-temporelles, à travers deux approches, la représentation graphique de modèles paysagers sur les exploitations et le développement d'un modèle multi-agent spatialisé.

Les représentations graphiques ont constitué un outil majeur de dialogue avec les éleveurs et nous a aidés à mieux comprendre comment les éleveurs perçoivent et se projettent dans leurs paysages. En effet, sur la base de ces projections graphiques, nous avons pu représenter les principaux changements intervenus dans les paysages depuis l'installation, et discuter les motifs de ces évolutions et les critères de décision retenus dans la localisation des pratiques. Par exemple, nous demandions aux exploitants : « *Pourquoi avoir choisi de mécaniser cette parcelle ? Où avez-vous divisé les paddocks en premier et pour quelles raisons avez-vous choisi ces paddocks ?* ». Cet exercice de projection spatiale nous a également servi à explorer les futurs projets d'intensification des exploitations en termes de choix d'usages des sols et d'agencement de ces usages dans les paysages de l'exploitation. Ceci nous a permis de formaliser différents scénarios d'évolution des paysages, qui tiennent compte des perceptions des éleveurs et des contraintes de leurs systèmes d'exploitation.

La modélisation multi-agents nous a aidés à simuler ce que pourraient devenir les paysages gérés par des exploitations d'élevage appliquant des projets d'intensification contrastés. Le modèle multi-agents représentant de façon simplifiée ces interactions entre pratiques d'élevage, ressources naturelles (eau, fertilité et structure des sols) et paysage, nous a permis de voir apparaître de possibles *trade-offs* entre intensification des pratiques et ressources humaines, qui pourraient affecter les dynamiques de paysage. En revanche, la représentation des impacts des pratiques sur les ressources naturelles est largement perfectible et il existe beaucoup d'incertitudes quant à la validité des résultats sur l'évolution des ressources naturelles (eau verte, eau bleue, fertilité et structure des sols). Nous avons simulé ces effets, à partir d'une approche qualitative qui représente de manière relative les impacts d'un type d'usage des sols et de sa localisation par rapport à un autre (améliore un peu, moyennement, beaucoup *vs* dégrade un peu, moyennement, beaucoup). Cette représentation simplifiée des processus et de leurs interactions peut biaiser les résultats du modèle.

Malgré ces incertitudes, le recours aux projections spatio-temporelles nous a aidés à raisonner sur ce que pourraient constituer des paysages éco-efficients en Amazonie orientale brésilienne et à réfléchir à des indicateurs permettant de les caractériser et de les évaluer. Cela constitue un argument favorable à notre deuxième hypothèse.

5.1.2 Apports et limites des concepts d'éco-efficience et de paysage pour analyser la durabilité de l'élevage en Amazonie

5.1.2.1 Eco-efficience

Dans la thèse, nous avons mobilisé le concept d'éco-efficience pour étudier les effets du processus d'intensification de l'élevage sur les ressources naturelles. L'éco-efficience se définit comme une optimisation de la valeur des biens produits (en termes de quantité ou de qualité) par rapport à une quantité de ressources naturelles utilisées (terre, eau, nutriments, énergie) (Keating *et al.*, 2010). L'éco-efficience d'une production agricole est donc estimée sur la base de ratios entre la quantité ou valeur des produits (output) et la quantité des intrants mobilisés (input). Même si nous n'avons pas appliqué ces calculs aux différents types de ressources naturelles, notre approche qualitative de l'éco-efficience a été bénéfique à plusieurs niveaux et nous revenons sur plusieurs avantages de ce concept.

Le design et l'évaluation de nouveaux systèmes de production animale nécessitent de sélectionner un ensemble d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour étudier les effets de ces systèmes sur le long terme (Dumont *et al.*, 2014). Ce concept, multidimensionnel et multi-scalaire, nous a permis de mettre en balance les impacts de pratiques sur différents types de ressources (eau, fertilité, structure des sols et énergie) à plusieurs échelles (pixel et exploitation), d'identifier celles qui valorisent au mieux les ressources naturelles ainsi que de potentielles marges de progrès. Cette approche multidimensionnelle propose également de renouveler l'approche d'évaluation des impacts de l'élevage souvent circonscrite dans la région au bilan carbone et aux émissions de gaz à effet de serre.

Ce concept promeut aussi une diversité de chemins pour mieux utiliser les ressources naturelles des écosystèmes (Keating *et al.*, 2013). Face à l'hétérogénéité de situations agraires et de pratiques choisies par les éleveurs, ce concept était pertinent pour étudier le processus d'intensification dans sa diversité. En effet, entre une exploitation familiale de 50 ha et une fazenda de 40 000 ha, nous avons montré que les stratégies d'intensification sont largement différentes. Si les exploitations familiales et les fazendas de taille moyenne peuvent suivre un schéma d'intensification de l'élevage basé sur un plus fort usage d'intrants, cela s'avère extrêmement plus difficile à appliquer sur d'immenses fazendas face à l'investissement financier et humain que cela nécessite. Dans notre échantillon, les deux grandes fazendas que nous avons étudiées ont donc choisi d'autres projets : vente d'une partie des terres et reconversion dans l'agriculture, et mise en place de pratiques visant à mieux valoriser les processus écologiques.

Cependant, nous pouvons aussi souligner plusieurs limites. La dimension sociale n'est pas intégrée dans le ratio d'éco-efficience. De plus, il est important de considérer que le choix du numérateur dans le ratio peut influencer les résultats. Par exemple, dans notre échantillon, l'éco-efficience énergétique (calculée en divisant la quantité de viande et de lait produite convertie en énergie par rapport à l'énergie consommée pour produire ces produits) est plus

faible chez l'exploitation familiale laitière, intensive en intrants, que la moyenne de référence des exploitations familiales. L'éleveur nous a expliqué que son objectif de production n'était pas de maximiser les volumes de lait produits mais qu'il cherchait avant tout à maximiser le taux protéique du lait pour le rémunérer à un meilleur prix sur un marché de niche (vente à un fabricant de glace). Si la mesure de l'efficience énergétique considérait les performances en termes de qualité plutôt que de quantité, les résultats seraient peut-être plus favorables à ce type de système d'élevage.

5.1.2.2 Atout d'une approche par le paysage

La mobilisation du concept de paysage nous a permis d'améliorer notre compréhension du processus d'intensification de l'élevage sur le plan spatial. Nous revenons sur ces principaux atouts.

Ce concept a constitué une portée d'entrée pour comprendre quels sont les déterminants paysagers qui guident les décisions de localisation des pratiques. Sur d'autres terrains, plusieurs études ont aussi montré que les décisions de localisation sont conditionnées par les caractéristiques des paysages (Busck, 2002 ; Thenail & Baudry, 2004 ; Thenail *et al.*, 2009) et par les perceptions que les acteurs ont de ces paysages (Burton, 2004 ; Vuillot *et al.*, 2016).

Ce concept constitue également un cadre pertinent pour analyser spatialement les interactions entre les systèmes de décision des éleveurs et l'efficience dans l'usage des ressources naturelles. La distribution des ressources naturelles dans les paysages étant spatialement hétérogène, les pratiques peuvent avoir un impact différentié sur les ressources naturelles selon leur localisation. Ainsi les décisions de localisation des pratiques dans les paysages peuvent influencer un certain nombre de processus écologiques et donc l'efficience dans l'usage des ressources naturelles. Les études sont encore peu nombreuses en Amazonie, mais dans d'autres régions du monde, il a déjà été établi le rôle du paysage sur les flux hydriques et la purification de l'eau (Gordon *et al.*, 2010), les flux de nutriments (Médiène *et al.*, 2011), l'érosion des sols (Joannon *et al.*, 2006 ; Guerra & Pinto-Correia, 2016), le stockage de carbone (Baral *et al.*, 2013 ; Chaplin-Kramer *et al.*, 2015), et la régulation des pathogènes (Bianchi *et al.*, 2006 ; Brewer & Goodell, 2012).

Le paysage permet aussi de raisonner dans l'espace les équilibres entre production et conservation (où est-il intéressant de produire et où-est-il intéressant de régénérer la forêt ?) pour maximiser les éco-efficiences.

Le concept de paysage peut être mobilisé à plusieurs échelles. Si sur les fronts pionniers et post-pionniers d'Amazonie orientale brésilienne, le concept de paysage a souvent été mobilisé à une large échelle dépassant l'exploitation agricole et intégrant une multiplicité de systèmes de décision (Mertens *et al.*, 2002 ; Laques, 2003), nous avons montré qu'il est tout à fait

complémentaire et pertinent de les étudier à une échelle plus fine, pour mieux comprendre les causes directes générant des dynamiques de paysages.

Toutefois, l'utilisation de ce concept a aussi des limites. Si d'un côté la communauté scientifique internationale s'accorde sur les opportunités des approches paysagères pour le développement durable dans le monde rural (Sayer *et al.*, 2013 ; Chavez-Tafur & Zagt, 2014 ; Minang *et al.*, 2014b), ce concept reste encore peu employé et approprié par les acteurs locaux (éleveurs et techniciens agricoles). D'après nos discussions, il semble que ces acteurs associent davantage le terme de paysage à sa valeur esthétique plutôt qu'à son rôle fonctionnel. De plus, il importe de souligner que toutes les pratiques agricoles même spatialisées ne sont cependant pas visibles dans le paysage et que tout fonctionnement n'a pas de traduction spatiale (Bonin & Houdart, 2012).

5.2 Implications pour l'aménagement des paysages et l'accompagnement des systèmes d'élevage

5.2.1 Comment favoriser un aménagement de paysages éco-efficients ?

Le processus d'intensification de l'élevage conduit à un changement des usages des sols et de leur agencement spatial à l'échelle des exploitations. Au regard des projets d'intensification des éleveurs, nous mettrons en avant les potentiels et les limites des dispositifs existants pour la construction de paysages éco-efficients. A partir de ce bilan, des propositions seront argumentées pour promouvoir un aménagement de paysages plus éco-efficients en Amazonie orientale brésilienne.

5.2.1.1 Potentiels et limites des dispositifs existants pour favoriser des paysages éco-efficients

Potentiels

Le nouveau code forestier de 2012 et les nouveaux dispositifs de régularisation environnementale créés dans ce cadre (CAR, régularisation du passif environnemental) définissent des règles de gestion de la végétation native et des forêts dans les paysages. Ils proposent aussi plusieurs mécanismes qui présentent plusieurs atouts pour la construction de paysages plus éco-efficients en Amazonie orientale brésilienne.

Imposée par le code forestier, la conservation des APP favorise la mise en place d'une trame forestière organisée en fonction du réseau hydrographique et de la topographie. Les ripisylves fournissent de multiples services écosystémiques. En jouant le rôle de corridor biologique, elle facilite les flux de gènes et d'espèces, assure la connectivité écologique dans des paysages fragmentés et préserve la biodiversité. Localisées en bordure des ressources hydriques (cours d'eau, mares, sources, zones humides...), les forêts ripariennes sont également des espaces tampons face aux pollutions causées par l'usage de produits chimiques (fertilisants, produits

phytosanitaires). Par ailleurs, le maintien d'une végétation permanente dans les APP favorise l'infiltration de l'eau et la recharge des nappes phréatiques, tout en protégeant les sols de l'érosion. Ces zones, difficilement mécanisables et facilement inondables, sont en outre peu propices à la production agricole.

La mise en place du mécanisme de compensation des ARL (réserves forestières) peut aussi être un outil efficace pour agencer de manière plus efficiente les usages des sols en fonction de la distribution spatiale des ressources naturelles. Ce mécanisme offre la possibilité aux exploitations de maintenir un taux de déforestation supérieur à 50% à partir du moment où elles compensent ailleurs (en reforestant une autre zone ou en achetant des crédits carbone par exemple). D'après Nunes *et al.* (2016), le surplus en ARL existant dans l'Etat du Pará pourrait compenser son déficit et même être commercialisé à d'autres Etats déficitaires en ARL. Pour éviter que ce mécanisme ne crée des paysages agricoles déconnectés de paysages forestiers, le code forestier recommande de restaurer les réserves forestières dans des aires prioritaires comme des bassins hydrographiques très déforestés ou dans des écosystèmes menacés.

La définition d'aires rurales consolidées et la réduction du pourcentage d'ARL de 80% à 50% dans les exploitations de ces zones nous semblent être des adaptations du code forestier plus en adéquation avec les réalités agraires locales. Sachant que sur les fronts post-pionniers d'Amazonie, les surfaces défrichées constituent déjà un pourcentage supérieur à 20%, voire 50% et plus, il était difficile d'appliquer cette mesure. Cette révision propose ainsi un équilibre entre un espace productif et une réserve forestière fournissant des services écosystémiques complémentaires.

La création du CAR constitue aussi une avancée pour la gestion des paysages car il permet de faire un diagnostic des occupations de sol (réserve forestière, APP, zone agricole) et de projeter spatialement les zones à reforester. Il sert aussi d'outil pour le contrôle et le suivi des dynamiques de changement d'occupation des sols et des projets de récupération.

La loi sur le nettoyage et la suppression des régénérations forestières de moins de 20 ans présente aussi un atout indéniable car elle offre la possibilité de ré-agencer les usages des sols pour optimiser la productivité fourragère. En effet, les régénérations forestières localisées sur des zones fertiles à fort potentiel peuvent être nettoyées et converties en pâturage, dès lors qu'elles satisfassent les critères établis par la loi.

Le contrôle du feu à l'échelle territoriale est aussi une condition importante pour la reconstruction de paysages éco-efficients. A travers le Programme « *Queimadas* », l'INPE a développé un nouvel outil SIG d'observation qui détecte les foyers et analyse les risques de feux de forêts pour l'ensemble du Brésil. Un portail web a été mis en ligne pour informer la population et mieux se préparer en cas d'alerte (INPE, 2018).

Limites

Concernant les APP, il est difficile d'obtenir un consensus sur les dimensions minimums à établir. Pour Metzger (2010), les dimensions établies dans la législation ne se fondent pas sur des études scientifiques et le maintien de corridor de 60 m de large (30 m de chaque côté des rives conformément à la législation) est insuffisant pour conserver pleinement la biodiversité du fait des effets de bordure qui peuvent fortement affecter la qualité des habitats. En Amazonie, Lees & Peres (2008) recommandent de maintenir un corridor de 400 m de large (200 m de chaque côté des rives). D'après ces chercheurs, les ripisylves étroites et peu connectées ne contiennent qu'1/3 des espèces d'oiseaux et qu'1/4 des espèces de mammifères présentes dans les forêts ripariennes de paysages forestier peu fragmentés. Cependant, la préservation d'APP sur 30 m peut aussi constituer une contrainte pour les exploitations familiales de petite dimension (Plassin, 2009).

Dépasser l'échelle de l'exploitation pour organiser une trame forestière sur de plus vastes espaces est un enjeu important pour garantir la conservation de la biodiversité notamment. La nouvelle version du code forestier préconise de localiser la Réserve Légale, en particulier lorsqu'il s'agit de la restaurer, en considérant le plan de gestion du bassin versant, le ZEE ou encore la formation de couloirs écologiques avec d'autres Réserves Légales et APP. Or, dans les faits, l'élaboration du CAR par les bureaux d'étude et la validation par la SEMA reposent principalement sur le respect des dimensions des APP et ARL à l'échelle de l'exploitation.

Le code forestier différentie les forêts secondaires des forêts primaires selon qu'il y ait eu ou pas une coupe rase. Cette classification, réalisée par l'INPE, est basée sur le traitement d'images satellites Landsat. On peut donc trouver des forêts primaires très dégradées mais toujours classées comme primaires et donc impossible à supprimer d'après l'actuelle réglementation car il n'y a jamais eu de coupe rase. Une étude réalisée sur le municipe de Paragominas montre que ces forêts de fronts post-pionniers sont dans un état de dégradation très avancé et stockent beaucoup moins de carbone qu'une forêt primaire peu dégradée (Tritsch *et al.*, 2016 ; Bourgoin *et al.*, 2018). De plus, la dynamique de régénération de ces forêts est lente ou bloquée, la matrice paysagère n'étant pas favorable à leur régénération : fragmentation et isolement des fragments[1], risques de feu, effets de lisière. Préserver des fragments forestiers très dégradés et isolés avec un faible potentiel de régénération a un faible intérêt écologique et peut aussi être pénalisant agronomiquement s'ils sont localisés sur des sols ayant un bon potentiel agronomique.

Les critères utilisés pour classer les forêts secondaires en stade initial de régénération et déclarer leur nettoyage ou autoriser leur suppression nécessite d'avoir accès à des banques d'images satellites, de réaliser un inventaire forestier et de rédiger un rapport technique. Si les exploitations capitalisées telles que les fazendas ont les moyens de solliciter les services d'un

[1] Les animaux sont des agents majeurs de dispersion des semences dans les forêts tropicales ; or, la fragmentation des patchs et l'absence de corridor peuvent empêcher leur circulation entre les patchs et donc limiter les dispersions de semences.

bureau d'étude agréé, cette réglementation est beaucoup plus difficile à appliquer pour les exploitations familiales dont les ressources économiques ne permettent pas le plus souvent de solliciter de l'assistance technique privée. De plus, l'abattis-brûlis de petits patchs de forêt primaire ou secondaire est partie intégrante de leurs pratiques agricoles.

Le code forestier cible la préservation des forêts mais sa vocation première n'est pas d'aménager les paysages. D'ailleurs, le concept de paysage est cité une seule fois dans le code forestier. Cette réglementation centrée sur un usage et excluant la dimension agricole nous semble être trop restreinte pour traiter cette question. D'autres dispositifs mobilisant une approche plus intégrée pour raisonner l'agencement des usages des sols sont nécessaires.

5.2.1.2 Propositions pour l'aménagement des paysages

Compte tenu de ces limites, des progrès sont possibles et nous proposons de discuter plusieurs pistes.

Au niveau de la recherche, la réflexion sur la construction de paysages éco-efficients ne doit pas se limiter au cadre d'analyse *land-sparing vs land-sharing*. Plusieurs auteurs ont déjà montré que les résultats peuvent varier selon les effets d'échelle, les *trade-offs* auxquels on s'intéresse (production de nourriture ou sécurité alimentaire), la façon dont est mesurée la biodiversité (Fischer *et al.*, 2014) et les éléments considérés (différents types de cultures, d'espèces, objectifs, le devenir des terres épargnées...) (Law & Wilson, 2015). A notre sens, dans les paysages de fronts post-pionniers amazoniens, il ne faut pas exclure l'une ou l'autre des stratégies mais chercher à combiner les deux.

Encourager la restauration des APP est une priorité compte tenu du rôle important qu'elles jouent dans l'éco-efficience des paysages. Une étude menée par Nunes *et al.* (2014) montre qu'en 2010, 40% des APP de type ripisylves étaient déforestées, dont 68% étaient localisées dans des exploitations de plus de 825 ha.

Des ajustements au niveau du code forestier nous semblent nécessaires afin d'élargir le champ d'application du mécanisme de compensation aux forêts très dégradées. Pour l'instant, le mécanisme de compensation est uniquement disponible pour compenser les déforestations ayant eu lieu avant juillet 2008. Or, certaines structures paysagères très fragmentées produisent peu de services écosystémiques (Metzger, 2001a). Aussi, sur des unités morphopédologiques stratégiques pour la production agricole, il peut s'avérer plus judicieux de supprimer des fragments forestiers très dégradés et peu connectés, et de compenser ces défriches par la régénération de surfaces équivalentes au niveau de zones qui seraient plus stratégiques sur le plan environnemental. La compensation de forêts très dégradées nécessiterait toutefois d'être bien encadrée afin d'éviter des défriches non justifiées. Une demande d'autorisation auprès de l'organisme environnemental compétent comprenant une étude similaire à celle réalisée pour la suppression de forêts secondaires (inventaire forestier,

images satellites historiques...) est préconisée. Elle pourrait être complétée par un zonage identifiant les forêts très dégradées et les zones prioritaires pour la compensation.

Un travail de cartographie et d'évaluation spatiale est donc recommandé afin de prioriser ces zones mais aussi des agencements des usages des sols favorables à l'éco-efficience des paysages. La méthodologie mise au point par Cassiano *et al.* (2013) à l'échelle d'un bassin versant dans la Mata Atlântica (Etat de São Paulo) pourrait être répliquée et ajustée à notre zone d'étude. Cette méthode consiste à réaliser à l'échelle locale un zonage des unités morphopédologiques les plus efficientes pour la production agricole (fertiles, mécanisables, drainées, bonne structure de sol) et des unités ayant une aptitude à fournir des services écosystémiques si elles sont couvertes de végétation naturelle (protection des sols contre l'érosion, le lessivage, la protection des habitats, stockage de carbone...). Plusieurs variables paysagères sont utilisées pour délimiter ces zones (type de sol, pente, texture du sol, distance aux cours d'eau). Ce zonage est ensuite recoupé avec des cartes de l'usage des sols, de la dégradation forestière, de la connectivité, des zones protégées (APP, réserves indigènes...) et de la distance aux routes. En croisant ces différentes données, il devient ainsi possible de localiser et quantifier les surfaces les plus aptes à l'intensification, celles enclines à la dégradation et les zones prioritaires pour la reforestation et la préservation des ressources naturelles. Cette technique d'évaluation spatiale, simple, est un outil intéressant pour les gestionnaires territoriaux et peut être utilisée pour développer des stratégies d'aménagement. Elle permet de différentier des zones stratégiques sur le plan environnemental où il faudrait prioriser des actions de régénération et restauration forestière et des zones stratégiques sur le plan agricole où des autorisations de défriche pourraient être octroyées à condition que le niveau de dégradation forestière le justifie et qu'une compensation ait lieu.

Dans le cadre du projet ECOTERA, un travail de cartographie a été engagé sur la commune de Paragominas et de nombreuses données spatialisées sont déjà disponibles : la texture des sols (Laurent *et al.*, 2017), un zonage de géofaciès (Pimentel, 2016), la pluviométrie (TRMM) et la résistance des prairies à la sécheresse (Laurent *et al.*, In review), la dégradation forestière (Tritsch *et al.*, 2016 ; Bourgoin *et al.*, 2018), les usages des sols, les CAR et les routes. La prochaine étape est de compléter, intégrer et analyser cette banque de données avec un logiciel SIG (*Poccard, communication personnelle*). Il s'agirait par la suite de reproduire ce travail sur d'autres zones. En Amazonie, une cartographie des zones disponibles pour la production agricole a déjà été engagée à l'échelle du biome par l'INPE (Martini *et al.*, 2015) à partir d'un ensemble de données spatiales (usage des sols, fertilité des sols, pente, biomasse). Cette banque de données pourrait être de nouveau mobilisée et complétée par des données sur la dégradation forestière, la résistance des pâturages à la sécheresse...

Un travail similaire de cartographie et de co-conception des paysages pourrait aussi être effectué à l'échelle de l'exploitation. Tout d'abord, il s'agirait là-aussi de quantifier et localiser les surfaces les plus aptes à l'intensification ou à la reforestation, puis de projeter

avec les agriculteurs les projets d'intensification, de diversification, de dégradation et régénération forestière. En cas d'incompatibilités, des adaptations pourraient être proposées.

La gestion des espaces marginaux dans les exploitations présente aussi plusieurs enjeux du fait de leur faible potentiel agronomique (pente, faible fertilité ou faible capacité de drainage), de leur distance et de leur difficulté d'accès. Nos résultats ont montré que les projets des éleveurs sur ces zones peuvent fortement varier d'une exploitation à une autre. Certains éleveurs préfèrent les abandonner alors que d'autres préfèrent les maintenir productives, de peur de perdre leur autonomie fourragère (ils ne souhaitent pas forcément intensifier davantage le reste de l'exploitation), ou de ne pas réduire la valeur de leur patrimoine (la valeur des surfaces couvertes d'usages agricoles étant supérieure à celle des forêts). Pour les éleveurs qui ne voudraient pas laisser régénérer ces surfaces, il serait souhaitable de réfléchir vers quels types de pratiques orienter ces espaces pour les maintenir productifs tout en fournissant d'autres services écosystémiques (systèmes sylvo-pastoraux par exemple).

Compte tenu de ces stratégies de valorisation foncière, la mise en place d'un programme de valorisation des forêts serait un moyen de rétribuer leur conservation. Les acteurs sont demandeurs. En effet, lors de la signature d'un nouveau pacte pour le développement durable et la lutte contre la déforestation illégale et la dégradation forestière à Paragominas (20 juin 2016), un représentant du SPRP (Syndicat des Producteurs Ruraux de Paragominas) a indiqué : « Aujourd'hui, la seule valeur des forêts c'est leur obligation. A Paragominas, nous avons un actif de forêt très élevé et nous ne recevons rien pour cela. Nous avons à peine réussi à faire la compensation forestière entre les propriétés du municipe »[1]. Le défi pour la mise en place d'un tel programme resterait de trouver les ressources financières et d'attribuer une valeur aux biens et services produits par la forêt.

Concernant la suppression de forêts secondaires, une modification des règles est conseillée pour les exploitations familiales car la démarche requise est trop lourde. La définition d'une taille seuil, en-dessous de laquelle les exploitations seraient exemptées de l'autorisation, serait un moyen d'assouplir la réglementation pour les petites exploitations.

Au sujet du contrôle du feu qui est une condition importante pour la reconstruction de paysages éco-efficients. La commune semble être une échelle appropriée pour coordonner un programme de prévention et de lutte contre les incendies. Le travail de prévention pourrait être réalisé à travers les associations de producteurs, les écoles et les médias. Une lutte efficace contre les incendies nécessiterait également plus de moyens humains, économiques et matériels. De tels investissements sont toutefois hors de portée pour les communes dont les zones d'intervention sont étendues. Réorienter des fonds des programmes Municipio Verde et ABC vers la lutte contre les incendies est une option à étudier.

[1] « Hoje o único valor das florestas é a obrigadade. En Paragominas, temos um ativo de floresta muito grande e não recebemos nada para isso. Conseguemos apenas fazer a compensação florestal entre as propriedades dentro do município ».

Pour les forêts qui ont été dégradées suite aux incendies dévastateurs de 2015[1], des initiatives telles que le projet « *Chama Verde* », mis en place à Paragominas lors de la signature du pacte pour le développement durable et la lutte contre la déforestation illégale et la dégradation forestière (juin 2016), seraient intéressantes à évaluer et à répliquer. Ce projet vise à protéger juridiquement les exploitations dont les surfaces d'ARL et d'APP ont été touchées par les incendies. Normalement, les surfaces de forêts qui ont été incendiées passent sous le contrôle de l'IBAMA (organisme fédéral) et de la SEMAS (l'Etat) et peuvent faire l'objet d'opérations de contrôles environnementaux débouchant sur la mise sous embargo d'exploitations. A travers le projet « *Chama Verde* », la SEMMA s'est engagée à accompagner la régularisation environnementale de ces surfaces et à assurer le suivi du processus de régénération forestière des forêts incendiées au sein de la commune. Pour ce faire, les exploitations doivent adhérer au projet, c'est-à-dire (i) signer le TAC (Terme d'Ajustement de Conduite) ; ii) s'engager à ne pas utiliser les surfaces d'APP et d'ARL touchées par les incendies iii) présenter une déclaration d'accident (*boletim de occorrência*) et prouver que les incendies n'étaient pas criminels; iv) proposer un projet de récupération des ARL et APP dégradées qui favorisent la régénération forestière de ces forêts ; (v) faire une demande de licence environnementale. Il serait intéressant d'analyser si ce type d'initiatives locales favorise des actions de restaurations par les exploitants.

Par ailleurs, d'autres textes de droit et outils sont nécessaires afin de s'orienter vers une gestion concertée et partenariale des paysages incluant la participation des différents usagers. Ailleurs dans le monde, la mise en œuvre d'une politique du paysage existe déjà, comme par exemple à travers la Convention européenne du paysage signée en 2000 par 40 Etats membres du Conseil de l'Europe. Il s'agit pour les Etats signataires d'identifier et qualifier les paysages et de sensibiliser le grand public à la nécessité de prendre en compte le paysage dans les démarches d'aménagement. Cet accord vise aussi à créer un espace de réflexion, d'échanges d'expériences, de connaissances et de travaux de recherche, et à encourager la coopération transfrontalière sur le paysage. L'entrée en vigueur de cette convention s'est traduite en France par la mise en place d'Atlas des paysages dans certains départements. C'est le cas en Île et Vilaine, où l'Atlas, élaboré sur la base d'une large concertation, présente un état des lieux des paysages et leurs dynamiques d'évolution selon ses dimensions spatiales, culturelles et sociales, dans le but de mieux en saisir les enjeux, et de mobiliser les acteurs et leviers d'action dans une perspective d'aménagement du territoire (Département d'Ille-et-Vilaine, 2016).

Les centres d'assistance technique ont un rôle très important à jouer pour pouvoir lancer de telles initiatives. Outre l'accompagnement technique, ils sont d'excellents vecteurs de l'information auprès des producteurs. Les techniciens pourraient accompagner les éleveurs

[1] D'après la SEMMA de Paragominas, 44 000 à 60 000 ha de forêts ont été dégradés par les incendies de 2015 sur le municipe.

dans la co-conception de projets de paysage, en réalisant des diagnostics et en les conseillant dans l'agencement des usages des sols en fonction de leur projet et des services écosystémiques fournis (production, stockage de carbone, lutte contre l'érosion...). La formation des animateurs et conseillers agricoles sur l'approche paysagère et la complexité des processus agro-écologiques en jeu seraient importantes pour conseiller au mieux les éleveurs. Renforcer la thématique paysage au niveau de l'enseignement technique et supérieur agricole serait aussi un moyen de préparer davantage les futurs techniciens à ces questions.

5.2.2 Implications pour l'accompagnement des systèmes d'élevage

5.2.2.1 Des processus de production plus complexes dans un environnement incertain

L'élevage bovin en Amazonie est à un tournant. Les changements que connaissent actuellement les systèmes d'élevage bovin sont nombreux et rapides et auront de profonds impacts sur les territoires. Il est donc crucial d'observer ces tendances d'évolution et de conduire une analyse prospective pour anticiper et préparer ces changements.

Dans le Chapitre 3, nous avons observé cinq tendances d'évolutions des systèmes d'élevage bovins traditionnels que nous synthétisons ci-dessous :

- Une faible intensification de l'élevage avec une diversification vers d'autres activités à plus forte valeur ajoutée par unité de surface ;
- Une spécialisation dans l'activité laitière qui s'accompagne d'une artificialisation de l'agroécosystème vers un système intensif en intrants de synthèse ;
- L'intégration agriculture-élevage à l'échelle de l'exploitation basée sur un usage intensif d'intrants de synthèse et la récupération de pâturages dégradés via la production agricole ;
- L'intensification écologique du système d'élevage qui cherche à valoriser au mieux les processus agro-écologiques et à minimiser le recours aux intrants de synthèse ;
- L'abandon de l'élevage bovin, et la spécialisation dans la production agricole de *commodities* (maïs, soja).

A l'avenir, on peut imaginer que les systèmes d'élevage vont continuer à se techniciser et à se complexifier, à utiliser davantage de matériel agricole, d'intrants et de main d'œuvre qualifiée.

Face à des épisodes de sécheresse plus fréquents et intenses (Zemp *et al.*, 2017), le principal défi à relever pour les exploitations d'Amazonie brésilienne sera la recherche d'une plus grande éco-efficience hydrique en saison sèche. Il est possible d'imaginer que de plus en plus d'exploitations vont se tourner vers l'irrigation, car malgré les coûts supplémentaires que cela peut engendrer, c'est un moyen de sécuriser une production fourragère constante durant la saison sèche. Toutefois, les prélèvements d'eau superficielle et souterraine peuvent affecter les nappes phréatiques, les débits d'eau des rivières et la qualité de l'eau à moyen et long

terme. Les projets d'irrigation nécessiteraient donc un encadrement spécifique pour limiter les externalités négatives.

Le recours à la complémentation des bovins au pâturage serait une autre stratégie pour maintenir la production en saison sèche. L'intégration agriculture-élevage pourrait se faire à l'échelle de l'exploitation ou même du territoire. En effet, il est fort possible de voir se multiplier des exploitations spécialisées dans la production de grains qui pourraient commercialiser leur production à destination des élevages locaux ou d'usines fabriquant des aliments.

Le recours à d'autres pratiques éco-efficientes telles que les systèmes sylvopastoraux (arbres dans les pâturages, haies, banques de protéines), le pâturage tournant ou encore la fertilisation à base d'amendements organiques pourraient aussi être des alternatives efficaces pour améliorer la résistance au stress hydrique mais aussi accroître la matière organique des sols.

L'adoption de ces pratiques est cependant encore timide (Piketty *et al.*, 2015a ; Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b). Le manque de connaissance et d'expérience, la difficulté d'accéder à certains types d'intrants et l'accompagnement technique encore marginal dans la plupart des exploitations constituent des freins à l'adoption de ces pratiques éco-efficientes. Néanmoins, les éleveurs se montrent réceptifs à s'orienter vers ce type de pratiques et il est important de développer des politiques publiques qui impulsent davantage cette transition.

Un autre élément important à considérer pour l'avenir des systèmes d'élevage est l'influence des facteurs externes. Malgré les incertitudes, il est pertinent d'imaginer dès aujourd'hui les différents types de scénarios qui pourraient avoir lieux dans les systèmes d'élevage pour mieux s'y préparer.

- En cas de changement climatique qui se traduirait par des évènements plus extrêmes (augmentation de la fréquence et de la durée de sécheresse), les systèmes d'élevage basés sur des pratiques plus éco-efficientes et le recours à l'irrigation pourraient tirer leur épingle du jeu. Les systèmes plus traditionnels montreraient quant à eux une faible résistance à la sécheresse.
- En cas d'une hausse du prix du pétrole et des intrants de synthèse, les systèmes d'élevage intensifs consommateurs en intrants et en énergie seraient défavorisés car cela augmenterait le coût de production des fourrages ou d'achat de l'alimentation. Les systèmes économes en intrants seraient les moins affectés.
- Une augmentation pérenne des prix et de la demande en *commodities* de type maïs et soja pourrait favoriser un attrait des éleveurs pour l'agriculture et donc une conversion des ateliers bovins vers la production de grains et céréales.
- La hausse des prix et de la demande en produits carnés pourrait soutenir le maintien de systèmes d'élevage en Amazonie. Deux scénarios peuvent être envisagés. La hausse de la demande en produits carnés bons marchés serait davantage favorable à la recherche d'une minimisation des coûts de production et à une orientation vers des

modes de production conventionnels. Toutefois, l'attrait des consommateurs pour des produits de qualité, qui pourrait se renforcer suite à des scandales sanitaires tels que celui de viande avariée en 2017 (« Carne Fraca »), pourrait encourager le développement de systèmes d'élevage plus éco-efficients privilégiant une alimentation à base d'herbe et une meilleure valorisation des ressources naturelles. Ceci nécessiterait une meilleure traçabilité de l'origine des produits, ce scandale ayant mis en lumière la faible fiabilité des données utilisées dans ce cadre (Lambin *et al.*, 2018).

5.2.2.2 Accompagner les éleveurs dans l'adoption de pratiques éco-efficientes

De récentes politiques publiques et plusieurs accords privés au sein des filières ont joué un rôle important pour ralentir la déforestation (Nepstad *et al.*, 2014 ; Gibbs *et al.*, 2015a ; Gibbs *et al.*, 2015b ; Piketty *et al.*, 2015a). Au contraire, le mouvement d'intensification et l'adoption de pratiques éco-efficientes bénéficient de peu de cadres incitatifs. Le recours à des pratiques intensives et plus écologiques se fait principalement sur la base d'initiatives des éleveurs, éventuellement encouragés par leurs réseaux (Polge *et al.*, 2016). Des mécanismes d'incitation sont nécessaires pour favoriser davantage l'intensification écologique de la production fourragère et valoriser de façon plus durable les ressources naturelles. Ces incitations pourraient inclure à la fois des programmes de subventions à destination de pratiques plus éco-efficientes, et un investissement plus conséquent dans la recherche, l'accompagnement technique et la diffusion de technologies. Plusieurs pistes sont détaillées ci-dessous.

Notre étude montre l'importance d'identifier et de considérer la diversité de comportements et d'objectifs des éleveurs vis-à-vis de l'intensification. Aussi, il convient d'adapter le conseil technique, les aides et soutiens financiers à cette diversité de stratégies et élaborer des plans d'actions qui se rapprochent des logiques des éleveurs et qui soient adaptés à leur profil (leur capacité d'innovation et d'investissement) afin que ces derniers soient réceptifs à ces projets. Par exemple, l'intensification à base de pratiques plus exigeantes en intrants, main d'œuvre, capital et savoirs n'est pas facilement accessible à toutes les exploitations. Dans les exploitations de grande taille notamment, le coût et les besoins en main d'œuvre peuvent s'avérer prohibitif renforçant encore plus l'intérêt de mieux valoriser les processus naturels dans les agroécosystèmes.

La transition vers une agriculture plus écologique nécessite des innovations technologiques et techniques, mais aussi sociales, économiques et institutionnelles (Duru *et al.*, 2014). Pour éviter des effets antagonistes, il serait plus efficace de formuler des politiques publiques plus intégrées qui permettent d'améliorer à la fois les éco-efficiences (hydrique, énergétique, de la fertilité des sols), et satisfassent des objectifs économiques (amélioration des revenus des éleveurs) et sociaux (maintien d'un tissu d'exploitations, réponse aux besoins en main d'œuvre) plutôt que de continuer à développer des politiques publiques centrées sur un type

d'enjeux (par exemple le code forestier vise la lutte contre la déforestation, le plan ABC la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le PRONAF la consolidation de l'agriculture familiale...).

Au niveau technique, les pouvoirs publics brésiliens doivent également encourager les efforts de recherche et de développement afin de développer de nouvelles technologies, mais aussi mieux comprendre, mesurer et comparer les effets de différents types de gestion sur les ressources naturelles et repérer les pratiques agricoles les plus éco-efficientes. Aujourd'hui, il existe très peu de connaissances et de références sur les performances techniques et économiques de ces systèmes, ce qui rend le conseil agricole et l'accompagnement plus difficile. Une collaboration entre chercheurs, acteurs du développement et agriculteurs permettrait d'intégrer des savoirs locaux et des connaissances scientifiques. De plus, des dispositifs de vulgarisation doivent être créés afin de favoriser la diffusion d'informations techniques auprès des éleveurs et encourager les échanges d'expériences. Ces efforts de vulgarisation doivent cibler, pour commencer, les deux défis actuels auxquels sont confrontés les systèmes d'élevage : la résistance des pâturages à la saison sèche et les alternatives à l'usage du feu notamment pour gérer les repousses. Pour une meilleure appropriation des innovations, les méthodes participatives donnant à l'agriculteur un rôle actif sont à privilégier (essai paysan, journées au bord du champ par exemple).

Sur le plan économique, le coût d'investissement et la difficulté d'accès au crédit peuvent constituer des barrières importantes à l'adoption de pratiques plus intensives (Zu Ermgassen *et al.*, 2018). Soutenir financièrement les éleveurs dans cette transition nous paraît indispensable. Deux pistes pourraient être envisagées : conditionner l'accès aux crédits existants à l'adoption de pratiques éco-efficientes ou mettre en place des lignes de crédit spécifiques avec des taux d'intérêt bonifié. La littérature et les expériences de terrains pourraient servir à élaborer une liste de pratiques éco-efficientes (division des pâturages, pâturage tournant, systèmes sylvo-pastoraux, légumineuses, techniques simplifiées de travail du sol...) qui servirait de référence dans ces programmes. Ces crédits pourraient être octroyés pour l'implantation et l'entretien des pâturages ou l'acquisition de nouveaux matériels (machines, clôtures).

Ces programmes financiers doivent définir des conditions d'éligibilité qui puissent être accessibles aux exploitations d'élevage amazoniennes, quelle que soit leur situation agraire. Le programme ABC est un exemple saillant des difficultés de mise en application des programmes fédéraux aux spécificités amazoniennes. Localement son application a été très limitée du fait d'un manque de vulgarisation, d'assistance technique et des problèmes liés à la régularisation foncière et environnementale des exploitations (Observatório do plano ABC, 2015). Les exigences sont en outre peu adaptées à l'agriculture familiale (Cialdella *et al.*, 2015).

Ces programmes de subvention pourraient aussi introduire des critères d'éco-conditionnalité notamment vis-à-vis de l'usage des produits chimiques, l'un des principaux risques associés à l'intensification de l'élevage. Un renforcement de la réglementation sur leur usage est aussi conseillé pour rendre leur mise sur le marché et leur application plus contraignante (Poccard-Chapuis *et al.*, 2015b). Au minimum, une meilleure information des conseillers techniques et des utilisateurs sur les effets nuisibles sur l'environnement et les risques pour la santé humaine sont absolument nécessaires. Plusieurs auteurs conseillent aussi de coupler ces programmes de subvention à l'intensification de l'élevage à des politiques de prévention et de lutte contre la déforestation (Bowman *et al.*, 2012 ; Strassburg *et al.*, 2012 ; Cohn *et al.*, 2014).

Des actions pourraient également être déployées dans le domaine organisationnel. Il s'agirait d'accompagner la mise en place d'associations d'agriculteurs et de coopératives qui réaliseraient des achats collectifs d'intrants et investiraient ensemble dans du matériel agricole afin de réduire les coûts et optimiser les bilans énergétiques. Pour l'acquisition d'équipements agricoles, des initiatives de ce type sont déjà en cours dans les communautés d'exploitations familiales où nous avons mené cette étude. Par exemple, à Paragominas, l'association de producteurs de Luiz Inacio (PROAGRI) s'est équipée d'un tracteur (173 ha travaillé en 2015), une charrue, deux faucheuses, une planteuse de manioc et des remorques. Plusieurs autres communautés de Paragominas ont aussi recours au tracteur prêté par le municipe. A Redenção, deux éleveurs rencontrés se sont associés pour acheter un semoir et une ensileuse. Ces agriculteurs sont demandeurs de conseil pour optimiser l'organisation et la planification de l'utilisation des outils (en tenant compte des débits de chantier et de la localisation des utilisateurs), gérer l'entretien, calculer le coût de revient et définir un coût d'utilisation horaire (ou à l'hectare). S'appuyer sur l'expérience des Cuma (Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole) en France peut être bénéfique.

L'accompagnement pourrait se faire également pour la commercialisation des produits éco-efficients, en particulier pour trouver des marchés rémunérant des viandes de qualité (élevage à l'herbe) et valorisant les produits respectueux de l'environnement (économes en intrants et respectant les règles du code forestier). La mise en place d'un système de certification territorial est à l'étude dans le cadre du projet TERRACERT (Pacheco *et al.*, 2017). Mieux valoriser l'image du produit en s'appuyant sur la relation entre qualité du produit et paysage pourrait être porteur. En France par exemple, certaines productions sous signes de qualité et les démarches d'appellation (telles que les AOC, IGP) ont recours à cette démarche (Ménadier & Michelin, 2012).

5.3 Perspectives de recherche

5.3.1 Tester d'autres approches pour comprendre et vérifier les décisions de localisation

Comprendre les décisions de localisation des pâturages et leur arrangement spatial dans les paysages sont deux voies de recherche importantes pour la durabilité de l'élevage (Gibon, 2005). Malgré les premiers apports de cette étude, nous recommandons d'enrichir le travail de recherche à ce sujet en testant des approches complémentaires à la nôtre.

Dans la thèse, nous avons appliqué une approche *bottom-up* focalisant la compréhension des décisions d'organisation des usages des sols et la caractérisation des systèmes de production à partir d'entretiens approfondis avec les éleveurs. Ceci nous a permis d'analyser avec succès les choix et comportements d'agriculteurs comme l'ont réalisé de précédentes études (Vayssieres *et al.*, 2007 ; Farmar-Bowers & Lane, 2009). Cependant, cette approche présente trois limites.

- A partir des entretiens exploratoires, nous avons construit un échantillon réunissant 6 types de stratégies d'intensification qui se différentient selon le degré d'intensification et les formes d'intensification (écologique ou artificialisante). Notre échantillonnage était motivé par la recherche d'une diversité de cas d'études mais n'est donc ni exhaustif, ni statistiquement représentatif des systèmes d'élevage en Amazonie. Ces résultats ne sont donc pas extrapolables à l'échelle d'un territoire, et ce d'autant plus que cette étude focalisée sur les systèmes d'élevage a peu considéré les systèmes de cultures présents dans la région (soja/maïs dans les fazendas, cultures vivrières et pérennes comme le poivre dans les exploitations familiales).
- Cette approche est contraignante vis-à-vis du temps requis pour la collecte des données sur le terrain, limitant donc le nombre d'exploitations étudiées (n=6), mais aussi par la méthode d'entretien qu'elle impose à savoir une immersion longue sur le terrain.
- La reconstruction *a posteriori* des trajectoires d'exploitations sur la base de la mémoire des éleveurs et de leurs familles peut présenter un certain degré d'imprécision, qui peut entraver les analyses rétrospectives et réduire la qualité des résultats (Mottet *et al.*, 2006 ; Cialdella *et al.*, 2009).

Face à ces limites, tester d'autres méthodes d'analyse des décisions des éleveurs permettrait de vérifier voire affiner les résultats présentés dans cette thèse. Trois autres approches sont proposées.

Premièrement, il s'agirait de coupler notre approche *bottom-up* avec une analyse spatiale empirique et statistique (*top-down*) (Castella *et al.*, 2007 ; Verburg & Overmars, 2009 ; Schaller *et al.*, 2012). Sur la base de données spatialisées (satellites ou photointerprétation) ainsi que des données de recensement (variables démographiques, socioéconomiques, agricoles...), l'analyse empirique pourrait permettre d'établir des corrélations entre

l'organisation des paysages et les variables potentiellement explicatives (données climatiques, pédologiques, végétation...). A partir du moment où les données sont disponibles, cette approche est facilement reproductible (Overmars *et al.*, 2007) et peut être appliquée sur de larges surfaces.

Une deuxième piste de recherche consiste à réaliser des enquêtes par questionnaire sur un plus large échantillon afin de confirmer les stratégies que nous avons identifiées et quantifier les différents types.

Troisièmement, le recours à des approches participatives est une autre option intéressante pour comprendre les décisions des acteurs et les modéliser. Le degré de participation des acteurs peut fortement varier, allant d'une faible implication (via la sensibilisation, l'information, la consultation) à une forte implication dans toutes les différentes étapes du développement du modèle (via la discussion, la co-construction, la co-décision) (Basco-Carrera *et al.*, 2017). La consultation nous semble être, dans la phase actuelle du développement du modèle, l'approche la plus appropriée pour vérifier et confirmer les stratégies individuelles représentées dans le modèle (nous y reviendrons plus en détail dans le 5.3.2).

Au-delà de l'utilisation de nouvelles approches, confronter ces résultats à d'autres régions d'Amazonie serait un moyen de monter en généricité. Paragominas et Redenção ont été sélectionnées du fait de la prédominance de l'élevage, de leurs contrastes au niveau biophysique et socio-économique, mais également de l'abondance de littérature et de données existantes depuis les années 90, en particulier à travers les équipes de recherche du DP Amazonie. Mais d'autres régions dans le Pará constitueraient des cas d'étude intéressants. En suivant la typologie établie par Thalês & Poccard-Chapuis (2014), il serait pertinent de reproduire cette analyse sur des fronts pionniers en consolidation et intensification (tels que la PA-150, Marabá) mais également sur des fronts pionniers en expansion (transamazonienne, São Felix do Xingu, BR-163).

5.3.2 Améliorer le modèle multi-agents

La construction du modèle SMA a reposé sur une démarche itérative et incrémentale (Jakeman *et al.*, 2006 ; Grimm *et al.*, 2010). Cette approche de la modélisation invite à revisiter et si besoin approfondir les étapes de conceptualisation, d'implémentation et de simulation informatique pour améliorer la représentation du système étudié et rendre le modèle plus robuste. Parmi les perspectives évoquées dans la partie 4.3, nous voudrions revenir ici sur les points d'amélioration qui nous semblent prioritaires.

La première version du modèle s'appuie sur les données de terrain récoltées pendant la thèse ainsi que sur des connaissances des chercheurs du DP Amazonie. A cette étape du développement du modèle, il serait bénéfique de consulter de nouveau des experts de

différentes disciplines (agronomie, zootechnie, géographie, écologie du paysage, économie, modélisation) en diversifiant les horizons professionnels (chercheurs, acteurs locaux du développement agricole, éleveurs familiaux et *fazendeiros*) afin de recueillir leurs appréciations et suggestions tant sur les choix réalisés dans le modèle conceptuel, que sur la pertinence des sorties du modèle. Intégrer cette pluralité de connaissances, théoriques et empiriques, locales et globales nous paraît essentielle pour la poursuite du développement du modèle et notamment pour l'exploration de scénarios. L'animation d'ateliers avec un temps de présentation et un temps d'échanges et de débats serait appropriée mais exigerait des moyens humain et financier supplémentaires.

Un aspect critique de la modélisation multi-agents concerne la simulation du processus de décision des agents. Comme dans beaucoup d'autres travaux (Deadman *et al.*, 2004 ; Bommel *et al.*, 2012), la représentation des décisions des éleveurs est ici conceptualisée sous la forme d'arbres de décision. Les données utilisées pour modéliser les stratégies d'usages des sols et de localisation, dérivées de notre travail de terrain, sont majoritairement qualitatives. De plus, même si notre échantillon d'exploitation cherchait à représenter la diversité des systèmes d'élevage, il reste limité et il est possible que d'autres variables puissent significativement influencer les comportements des éleveurs. Comparer nos résultats d'enquêtes avec une analyse spatiale top-down pourrait nous permettre de quantifier les stratégies sur une surface plus importante et nous aiderait à améliorer le modèle de décision. Pour modéliser les choix entre les différents types d'usages des sols (agriculture, pâturage, forêt), nous pourrions aussi envisager de coupler le modèle SMA avec un modèle micro-économique d'optimisation visant à maximiser les fonctions d'utilité ou de profit des agents. En fonction des prix ou de nouvelles politiques, les décisions d'usage des sols changeraient. West *et al.* (2018) ont par exemple utilisé ce type d'approche pour évaluer les effets des paiements REDD+ sur les changements d'usage des sols, les émissions de CO_2, et le bien être d'une communauté d'un front post-pionnier de l'état du Rondônia.

La représentation des paysages dans cette première version modèle est stylisée et il nous semblerait pertinent d'évoluer vers une représentation plus réaliste. Pour ce faire, nous pourrions mobiliser les jeux de données spatialisés produits dans le cadre du projet ECOTERA. En croisant les données sur la texture des sols, le relief, le drainage, et le réseau hydrographique, il serait possible de définir les différents types d'unités géomorphologiques. Pour représenter les usages des sols, nous pourrions nous appuyer sur les données satellitaires Landsat et TerrClass, mais également sur les nouvelles métriques produites dans le cadre du projet (résistance des prairies à la sécheresse, dégradation des pâturages, dégradation des forêts). Pour représenter les limites des parcelles au sein des exploitations, nous pourrions utiliser des photos aériennes. Ces données devront préalablement être traitées et converties dans un format SIG adéquat pour pouvoir être téléchargeables sous la plateforme Cormas.

La représentation des interactions entre les décisions humaines et les processus biophysiques selon une approche intégrée est un défi important pour la modélisation multi-agents

(Matthews *et al.*, 2007). Dans cette thèse, les efforts se sont surtout focalisés sur la représentation des stratégies d'intensification des éleveurs bien plus que sur les processus écologiques. La modélisation des impacts des pratiques de gestion des pâturages sur les ressources naturelles en fonction de leur localisation dans les paysages repose sur une approche qualitative, très simplifiée par rapport à la complexité des phénomènes mis en jeu. Une meilleure représentation des interactions entre les comportements des éleveurs et les dynamiques des ressources naturelles est une perspective de progrès pour la suite. Comme nous l'avons évoqué plus tôt, le manque de données au moment de la construction du modèle a entravé cette possibilité pendant le temps de la thèse. Intégrer des données quantitatives empiriques relatives aux effets des pratiques (isolées ou combinées) sur les ressources et issues des expérimentations menées dans le projet ECOTERA permettrait d'améliorer le calibrage du modèle et donc la robustesse des sorties. A partir du moment où la représentation des processus écologiques serait améliorée, il pourrait même être possible de développer des métriques évaluant les différents types d'éco-efficience à l'échelle des pixels en se basant par exemple sur un ratio entre la productivité de la parcelle et la quantité de ressources mobilisées.

Tester différents scénarios exploratoires (e.g., changement climatique, révision du Code Forestier, politique de crédit, variations de prix) et pour d'autres types de paysages et d'exploitations (agriculture familiale et ranchs de grande taille) pourrait nous aider à identifier les stratégies capables de favoriser l'éco-efficience des paysages sous différentes contraintes environnementales, sociales et économiques. La simulation de différents types de scénarios pourrait facilement être implémentée en additionnant de nouvelles entités et en ajustant les diagrammes d'activités. La collecte de données supplémentaires pourrait toutefois être nécessaire pour expliciter les décisions que prennent les éleveurs face à l'évolution de facteurs externes et renseigner les valeurs des nouveaux paramètres introduits.

Un autre élément sur lequel il serait pertinent de poursuivre les efforts de recherches est la représentation des boucles de rétroaction (*feedback loop*) (Chin *et al.*, 2014). Par exemple, une pratique de gestion des pâturages dégrade la ressource fertilité des sols qui va à terme induire un changement de pratique (compensation de la baisse de fertilité, changement d'usage des sols...). Pour être en mesure de représenter ces boucles de rétroaction dans les modèles de simulation multi-agents, il s'agit dans un premier temps d'améliorer notre connaissance sur ces phénomènes rétroactifs (ces boucles de rétroaction sont-elles positives ou négatives ? quels sont leurs effets ? quel est le seuil où elles se déclenchent ?), mais également de développer les capacités des outils informatiques pour inclure ces boucles.

La modélisation multi-agents offre une approche puissante pour formaliser des systèmes complexes, conceptualiser et simuler des interactions entre des agents et leur environnement, mais aussi entre des individus, et entre individus et groupes d'individus (Bousquet & Le Page, 2004). Or, la démarche de modélisation suivie dans la thèse s'est limitée à représenter les interactions entre un type d'individu (avec une stratégie individuelle) et leur environnement

(ressources naturelles, paysage) à l'échelle de l'exploitation agricole. Ne pas mobiliser l'ensemble des capacités de la modélisation multi-agents et notamment la possibilité de modéliser des interactions entre un ensemble d'éleveurs et l'environnement a été justifié dans la méthode (2.3.6). Néanmoins, les interactions avec les autres exploitations agricoles et collectif d'éleveurs peuvent influencer les décisions des individus (Darré *et al.*, 2004) et donc dans le cas qui nous intéresse les pratiques d'intensification et la localisation des usages des sols. Ces échanges peuvent concerner des ressources matérielles comme l'équipement ou la main d'œuvre, des informations, des savoirs et savoir-faire. Par exemple, l'existence d'un groupe d'éleveurs organisé autour de l'utilisation de matériels en commun peut faciliter la transition vers des pratiques d'intensification, mais aussi les échanges d'expériences. Autre exemple d'interaction, s'il existe un risque élevé de départ d'incendie dans une exploitation (recours aux systèmes de production abattis-brûlis ou mauvaise maîtrise de l'écobuage), cela peut décourager l'exploitation voisine à investir dans des pratiques d'intensification ou l'obliger à ne les localiser que sur certaines parcelles de l'exploitation. Intégrer ces interactions entre agents impliquerait d'adapter le cadre d'analyse pour s'intéresser à la gouvernance multi-acteurs des paysages et à représenter les interactions entre processus sociaux et écologiques à de multiples échelles spatiales emboîtées.

5.3.3 Changer d'échelle et d'entités de gestion : vers une gestion concertée des paysages

Dans cette thèse, nous avons fait le choix d'analyser les interactions entre les systèmes de décisions des éleveurs et leurs pratiques, les ressources naturelles et les paysages au niveau de l'exploitation agricole. Le manque de connaissance sur le processus d'intensification à cette échelle était l'une des principales raisons. Poursuivre l'analyse à une échelle plus large est tout aussi important afin d'intégrer d'autres processus écologiques (biodiversité par exemple) et sociaux (réseaux d'innovation, stratégies collectives de gestion de paysages). Changer de niveau d'analyse génère de nouvelles questions de recherche et fait appel à d'autres méthodes et approches pour lesquelles nous adressons des pistes de réflexion.

Une première piste de réflexion porte sur la définition des limites spatiales du système à étudier, un sujet de recherche clé dans l'étude des systèmes socio-écologiques (Martín-López *et al.*, 2017), du fait des discontinuités spatiales qui peuvent exister entre des espaces fonctionnels écologiques et des espaces sociaux (Cumming *et al.*, 2006). En Amazonie brésilienne, au-dessus de l'exploitation agricole, deux échelles d'analyse seraient adéquates pour représenter les interactions sociales entre acteurs et d'analyser les impacts de ces pratiques et de leur arrangement spatial sur les éco-efficiences : celle de la communauté locale (organisation majoritairement composée d'exploitations familiales) et celle de la commune ou d'un groupe de communes (organisation administrative qui intègre un nombre plus important d'acteurs). Ces échelles auraient a priori beaucoup de sens pour les acteurs locaux et la mise en place d'innovations à cette échelle serait envisageable. Mais pour certaines questions environnementales liées à la gestion de l'eau des rivières, de l'érosion ou encore de la

biodiversité (contrôle des ravageurs par exemple), un espace fonctionnel écologique, tel que le bassin versant (Souchère *et al.*, 2010), serait peut-être plus adapté. Cette question reste donc à approfondir.

L'étude des stratégies collectives de gestion des ressources naturelles impose de changer de cadre d'analyse pour pouvoir comprendre la gouvernance et la coordination entre les acteurs, acteurs qui peuvent avoir des intérêts divergents et contradictoires (Minang *et al.*, 2014a). Deux cadres conceptuels pourraient être mobilisés pour analyser ce niveau d'organisation supérieur. Le cadre d'analyse de la durabilité des socio-écosystèmes, proposé par Ostrom (2009) et revisité par McGinnis & Ostrom (2014), décompose le système en 4 sous-systèmes : les unités de ressource (comme par exemple les parcelles cultivées et les forêts) qui font parties de systèmes de ressources (par exemple la mosaïque paysagère) qui sont utilisées ou produites par des acteurs (des individus tels que les agriculteurs, éleveurs, forestiers) et dont les actions sont gouvernées par des règles communes issues d'un système de gouvernance (les institutions, organisation, règles, etc.). Ces différents composants interagissent entre eux par des liens directs ou des boucles de rétroaction et sont influencés par des éléments exogènes au système tels que des facteurs sociaux, économiques et politiques ainsi que des écosystèmes connexes. Cette approche, générique et systémique, se veut particulièrement bien adaptée pour étudier la gestion collective de biens communs (tels que les ressources naturelles) *via* les arrangements entre acteurs. Une autre approche beaucoup plus spécifique à l'analyse des systèmes agricoles dans le territoire a été proposée par Duru *et al.* (2014) pour aider à concevoir et organiser des systèmes agro-écologiques territorialisés à l'échelle locale. Le cadre conceptuel proposé, intégrateur et multi-niveaux, articule trois approches (le Système Famille-Exploitation, le Système Sociotechnique et le Système Socio-Ecologique) autour de deux grandes entités en interaction, Acteurs et Ressources. Le choix d'appliquer l'un ou l'autre de ces cadres et/ou de les ajuster aux spécificités de l'Amazonie nécessiterait d'approfondir l'analyse et reste donc une question ouverte.

Une troisième piste de réflexion concerne le choix des outils et des méthodes pour comprendre ces interactions entre acteurs et raisonner de façon concertée la construction de paysages éco-efficients. Les enquêtes individuelles peuvent permettre de formaliser les stratégies individuelles des acteurs ainsi que leurs interactions, en ayant recours à l'analyse de réseau par exemple (Polge *et al.*, 2016). Le recours à des démarches participatives de modélisation d'accompagnement telles que les Jeux de Rôle (JdR) est une autre piste pour modéliser les stratégies collectives dans les SMA. Les JdR permettent d'étudier les processus de décision collective et de coordination entre multiples acteurs, mais également de stimuler l'apprentissage social, d'aider à la négociation et à la médiation et d'explorer des solutions pour résoudre un problème (Voinov & Bousquet, 2010 ; Le Page, 2017). Cette approche a par exemple été mobilisée pour accompagner les acteurs locaux dans la gestion concertée du rique érosif à l'échelle d'un bassin versant (Souchère *et al.*, 2010), ou de l'enfrichement (Etienne *et al.*, 2003). Ils nécessitent cependant un investissement important des acteurs et des modélisateurs pour animer ce processus (Matthews & Selman, 2006).

Nous recommandons pour finir d'explorer davantage les perceptions des éleveurs sur les processus écologiques à des échelles dépassant celle de l'exploitation agricole. C'est un sujet que nous n'avons pas investigué pourtant, plusieurs exemples montrent que les éleveurs ont conscience qu'un certain nombre de processus écologiques ont lieu ou sont influencés par des échelles spatiales supérieures. Voici quelques exemples discutés pendant les entretiens :

- Des éleveurs pensent que l'érosion des berges et l'ensablement des cours d'eau peuvent être favorisés par des APP dégradées en amont du cours d'eau (notamment au niveau des sources). Ces éleveurs soulignent donc le besoin d'une gestion concertée pour régénérer les ripisylves. Des projets ont d'ailleurs été initiés dans certaines communautés familiales pour reforester les APP dégradées.
- Des éleveurs perçoivent une évolution du climat local avec des épisodes de sécheresse plus longs et plus intenses qui seraient d'après eux dus aux déforestations locales et régionales.
- Un éleveur de notre échantillon a observé une diminution de la faune sauvage au sein de sa communauté. D'après lui, cela serait dû à la réduction des surfaces en forêts primaires, aux incendies répétés et à des pratiques de chasse peu régulées.
- Des éleveurs ont noté que la régulation du risque incendie ne se gère pas seulement à l'échelle de l'exploitation mais à une échelle plus large. Un responsable d'une des communautés où nous avons travaillé souhaiterait élaborer et faire appliquer une loi sur l'abattis-brûlis à l'échelle de sa communauté pour réduire les risques.
- D'autres processus non évoqués au cours de ces entretiens mériteraient aussi plus d'investigations (régulation des ravageurs, pollution de l'eau...).

Il serait intéressant d'évaluer si les éleveurs perçoivent ces liens entre processus biophysiques et pratiques à de multiples échelles spatiales mais aussi temporelles.

Conclusion générale

En réponse à un ensemble de changements réglementaires, environnementaux, économiques et sociaux, l'Amazonie orientale brésilienne a initié une transition agraire, marquée par un mouvement d'intensification des usages des sols et de déforestation zéro. Orienter ce mouvement vers la construction de paysages éco-efficients, c'est-à-dire des paysages où les pratiques et l'arrangement spatial de ces pratiques optimiseraient l'utilisation des ressources naturelles et concilieraient production agricole et enjeux environnementaux, est un sujet de recherche clé à investiguer. Afin de contribuer à cette réflexion, cette thèse avait pour objectifs de : i) produire des connaissances sur les systèmes de décision des éleveurs afin de mieux comprendre, dans l'actuelle dynamique d'intensification de l'élevage, les processus de construction des paysages et leurs causes ; ii) analyser le rôle de ces nouvelles pratiques dans les éco-efficiences ; iii) construire un modèle multi-agents représentant la diversité des stratégies d'intensification et l'hétérogénéité des paysages et de leurs ressources, dans le but d'évaluer les impacts et interactions entre ces composants et analyser la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies à l'échelle de l'exploitation.

Pour ce faire, nous avons proposé un cadre d'analyse autour du triptyque paysage, système de décision et trajectoire. Cette approche conceptuelle est originale dans cette région pour deux raisons. D'une part, nous avons conceptualisé le paysage comme un agroécosystème spatialisé et dynamique où interagissent des pratiques agricoles, des ressources naturelles et des processus écologiques. Ceci nous permet de considérer l'hétérogénéité spatiale de ces interactions et offre un cadre pour raisonner dans l'espace des équilibres entre production agricole et conservation de la forêt. D'autre part, contrairement aux approches généralement suivies dans l'analyse des paysages, nous avons mobilisé ce cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation. Sur les fronts pionniers d'Amazonie brésilienne, cette unité décisionnelle, continue dans l'espace, constitue la principale entité de gestion des agroécosystèmes et des paysages et concerne des surfaces qui peuvent aller de quelques dizaines à des milliers d'hectares. Comprendre ces interactions à cette échelle de décision et les comparer entre divers types de situations agraires étaient une priorité.

Deux hypothèses ont orienté notre travail de recherche. La première hypothèse est que le processus d'intensification est associé à une reconfiguration des paysages à l'échelle des exploitations agricoles, pour mieux profiter de la distribution spatialement hétérogène des ressources naturelles. La seconde hypothèse est que la modélisation spatio-temporelle facilite les raisonnements sur l'éco-efficience des paysages. Pour tester ces hypothèses, nous avons couplé des outils d'analyse issus des sciences agraires (analyse systémique de types de fermes d'élevage, trajectoires d'exploitations), de la géographie (analyse des paysages, représentation graphique) à la modélisation multi-agents.

Les principaux résultats de la thèse peuvent se résumer en cinq points.

- **Le processus d'intensification en cours se caractérise par des changements importants de stratégies de production fourragère et donne lieu à une nouvelle imbrication forêt-prairie-cultures.**

Durant la phase de colonisation des fronts pionniers, les stratégies d'aménagement des systèmes fourragers visaient une appropriation rapide du foncier avec un minimum d'investissement humain et financier. Cela a donné lieu à un agencement des usages des sols dont la localisation des prairies était principalement guidée par la distribution spatiale de deux types de ressources naturelles, la fertilité forestière et le réseau hydrographique (eau de surface).
Le processus d'intensification en cours se caractérise par de nouvelles dynamiques spatiales. L'espace fourrager n'est pas uniformément intensifié. Dans les six cas types étudiés, les éleveurs projettent d'allouer les usages intensifs dans les zones les plus favorables à la production fourragère. Divers facteurs biophysiques tels que le relief, les caractéristiques des sols (texture, capacité de drainage, présence de pierre), l'accès à l'eau superficielle ou souterraine (pour l'abreuvement et l'irrigation), l'exposition au vent des parcelles, et des variables topologiques telles que la facilité d'accès, la taille et la forme des parcelles sont désormais pris en compte dans les décisions d'aménagement. Parallèlement à ce processus d'intensification, un processus de régénération forestière a lieu au niveau des zones de relief, faiblement drainées ou sensibles à l'érosion telles que les bas-fonds, ravines, escarpements, et versants inclinés. Ce changement d'organisation des usages est favorisé par le développement de la mécanisation mais aussi par la volonté de mieux valoriser les ressources naturelles présentes dans les paysages, la disponibilité en main d'œuvre (travailler sur des zones plus restreintes pour optimiser le temps de travail) et les ressources économiques (éviter d'investir dans des zones peu productives).

- **Néanmoins, on constate que les stratégies d'intensification et de réagencement des usages des sols sont diverses et qu'elles varient selon la situation agraire de l'exploitation et le degré d'hétérogénéité spatiale des unités géomorphologiques.**

Les exploitations sélectionnées qui représentent une grande diversité de situations agraires adoptent des stratégies d'intensification différentes. En ce qui concerne l'usage d'intrants, certains éleveurs optent pour une artificialisation de l'agroécosystème via un usage intensif d'intrants alors que d'autres privilégient des pratiques à faible niveau d'intrants. En termes d'usage des sols, quatre tendances sont observées : continuer à ne cultiver que des prairies, se diversifier dans l'intégration agriculture-élevage ou le sylvopastoralisme, se spécialiser dans l'agriculture, ou se diversifier vers d'autres productions occupant peu d'espace et générant une plus forte valeur ajoutée (par exemple poivre, pisciculture, aviculture). Les stratégies des éleveurs vis-à-vis de la régénération sont aussi variables. Certaines exploitations projettent de réduire leur surface productive et de mettre en friche des zones marginales, éloignées ou difficiles d'accès pour consacrer leurs investissements sur des surfaces intensifiées de plus

petite taille. Mais d'autres éleveurs préfèrent maintenir la même surface en prairie du fait de leur incertitude à être autonome sur des surfaces plus restreintes ou de peur de réduire la valeur du patrimoine foncier.
Cette diversité de stratégies est très influencée par la situation agraire des éleveurs (disponibilité de capital financier, de main d'œuvre, connaissances et qualification, distance aux centres urbains, etc.). De même, les stratégies d'agencement des usages des sols varient selon le degré d'hétérogénéité des unités géomorphologiques dans les paysages des exploitations. La distance et l'accessibilité deviennent des variables majeures d'organisation des usages des sols lorsque ces unités sont homogènes.

- **Ces stratégies d'intensification des usages des sols et d'organisation spatiale sont clés à connaître car elles ont des impacts différentiés sur les ressources naturelles et donc les éco-efficiences.**

La thèse s'est focalisée sur les processus écologiques ayant un impact significatif sur les systèmes fourragers, et sur lesquels les pratiques des éleveurs sont déterminantes. Ces processus sont l'évaporation/évapotranspiration, la lixiviation de l'azote, les émissions d'azote et de carbone et l'érosion hydrique. Concernant les émissions, l'efficience énergétique mesurée à l'échelle du système de production dans les six cas types étudiés varie de 0,36 à 3,48. Il est intéressant de noter que tant les exploitations ayant recours à de faibles niveaux d'intrants qu'à de hauts niveaux d'intrants sont capables d'atteindre de bons niveaux d'efficience énergétique. En revanche, le plus faible niveau d'émissions est émis par le type écologiquement intensif. Concernant les autres processus, nous avons expliqué les effets des pratiques d'élevage sur ces processus et différentié celles ayant des impacts dégradant ou aggradant. Cette liste nous a aidés à conceptualiser le modèle multi-agents et pourrait être utilisée dans des actions de développement agricole.

- **La modélisation spatio-temporelle nous a aidés à raisonner sur ce que pourraient constituer des paysages éco-efficients dans une diversité de fermes d'élevage en Amazonie orientale brésilienne.**

La modélisation des paysages des exploitations à travers des représentations graphiques ont facilité les discussions avec les éleveurs et nous ont aidés à mieux comprendre comment les éleveurs perçoivent et se projettent dans leurs paysages. Cet exercice de projection spatiale nous a également servi à formaliser différents scénarios d'évolution d'usages des sols et d'agencements de ces usages en tenant compte des différentes règles de localisation des usages des sols des éleveurs.
Le développement d'un multi-agents a permis de simuler ce que pourraient devenir les dynamiques de paysages dans des fermes d'élevage appliquant des projets d'intensification contrastés, et explorer les impacts de ces stratégies d'intensification sur les ressources naturelles, les performances fourragères et économiques. Nous avons proposé une liste d'indicateurs rendant compte des interactions entre paysages et système de décision dans ces fermes d'élevage : évolution des usages des sols (composition) et de leur distribution spatiale (configuration), de trois ressources naturelles - eau, fertilité et structure des sols, de la

dégradation des prairies, du processus de division des paddocks et du respect du code forestier (réserve légale et ripisylve).

- **Les résultats du simulateur révèlent des changements d'usages des sols différentiés entre le type intensif et semi-intensif. Mais, dans les deux cas, la disponibilité de main d'œuvre constitue une limite majeure à la faisabilité d'adoption de ces nouvelles stratégies d'intensification.**

Le modèle a été utilisé pour simuler sur une période de 20 ans deux stratégies d'intensification basées sur une gestion des fourrages intensive en intrants *vs* une gestion semi-intensive en intrants, dans deux ranchs de 1000 ha. Un paysage stylisé des fronts post-pionniers d'Amazonie orientale brésilienne, représentant la configuration spatiale des principales unités géomorphologiques dans la région, a été utilisé.
Les résultats du simulateur montrent des tendances similaires en termes d'évolution des usages des sols (expansion des surfaces intensifiées et des régénérations forestières, diminution de l'indice de dégradation des pâturages). De plus, quel que soit le type, l'expansion des surfaces intensifiées plafonne au bout d'une dizaine d'années et le processus d'intensification reste circonscrit dans l'espace, faute de main d'œuvre disponible pour satisfaire l'augmentation de la charge de travail générée par l'intensification. En revanche, le modèle met en évidence une réorganisation spatiale des usages des sols différente selon le type de stratégies. Ce réagencement en fonction du type d'unités géomorphologiques donne lieu à une évolution différentiée des ressources naturelles dans les paysages. Les performances fourragères et économiques évoluent également différemment. Le type intensif présente de meilleures performances que le type semi-intensif du fait d'une croissance plus élevée des surfaces intensifiées et d'une diversification dans les cultures de rente.

Ces résultats corroborent nos hypothèses. Cependant, nous tenons à rappeler trois limites qui existent vis-à-vis des choix conceptuels et méthodologiques effectués. Premièrement, comprendre la complexité des interactions entre paysage et systèmes de décision à travers la combinaison d'analyses systémique et diachronique a nécessité un important travail d'immersion et de collecte de données de terrain, limitant en contrepartie le nombre d'études de cas analysés. Il est possible en particulier que dans d'autres exploitations/régions, les décisions de localisation des éleveurs soient influencées par d'autres variables et critères de décision. Nos résultats sont donc difficilement extrapolables sur un territoire aussi vaste que l'Amazonie orientale brésilienne. Deuxièmement, notre analyse des paysages à l'échelle de l'exploitation ne tient pas compte des interactions entre exploitations, ni des niveaux de gouvernance supérieurs qui influencent les décisions des éleveurs. Troisièmement, les résultats du modèle multi-agents sont exploratoires car la vérification et l'évaluation du modèle sont encore incomplètes, en particulier l'évaluation du modèle conceptuel, le calibrage et l'analyse de la sensibilité. De plus, la modélisation des effets des pratiques sur les ressources naturelles en fonction de leur localisation dans les paysages repose sur une approche qualitative, très simplifiée par rapport à la complexité des phénomènes mis en jeu. Une représentation quantitative serait un point critique à améliorer.

Plusieurs perspectives de recherche sont envisagées dans la continuité de ce projet. En ce qui concerne la compréhension des décisions de localisation des éleveurs, tester d'autres méthodes d'analyse (par exemple questionnaires sur un plus large échantillon, analyse spatiale empirique), permettrait de vérifier voire d'affiner les résultats présentés dans cette thèse et de monter en généricité. Sur le plan de la modélisation, analyser les réponses du système modélisé sous différents scénarios (changement climatique, révision du Code Forestier, différentes configurations de paysage) et pour d'autres types d'exploitations permettrait d'explorer davantage cet outil de prospective et de montrer différentes trajectoires d'évolution aux acteurs locaux. Enfin, élargir l'échelle d'analyse des interactions paysages – acteurs et intégrer d'autres processus écologiques (par exemple cycle de l'eau, biodiversité) et sociaux (réseaux d'innovation, stratégies collectives de gestion de paysages) est recommandée et nécessiterait d'adapter les outils et méthodes d'analyse.

Sur le plan du développement agricole, cette thèse a identifié plusieurs leviers pour favoriser une intensification plus écologique des systèmes d'élevage et la construction de paysages éco-efficients. Il serait nécessaire de renforcer les capacités humaines, matérielles et économiques des organismes d'assistance technique locaux pour pouvoir améliorer l'accompagnement technique des producteurs sur ces questions. Favoriser les échanges de connaissances et d'expériences entre producteurs, techniciens agricoles et chercheurs à travers des présentations techniques et des visites sur le terrain est aussi une solution efficace pour accompagner les changements de pratiques. Accroître les soutiens financiers dans l'adoption de pratiques éco-efficientes à travers des prêts bonifiés pourrait encourager une meilleure diffusion et pérennité des projets. Toutefois, cela nécessite d'adapter les règles d'attribution de ces prêts aux particularités des territoires amazoniens (problématique sur le foncier, coût plus élevé des intrants, diversité des capacités d'innovation et d'investissement des éleveurs en Amazonie). Enfin, co-construire avec les acteurs locaux et sur la base des résultats des recherches des projets ECOTERA et TERRACERT des scénarios de réorganisation spatiale des usages des sols priorisant les zones à intensifier, à régénérer et à préserver à l'échelle d'une commune ou microrégion serait une action de recherche et développement bénéfique pour accompagner les acteurs locaux dans la construction de paysages éco-efficients.

Références bibliographiques

Aguiar, A.P., Vieira, I.C., Assis, T.O., Dalla-Nora, E.L., Toledo, P.M., Oliveira Santos-Junior, R.A., Batistella, M., Coelho, A.S., Savaget, E.K., Aragao, L.E., Nobre, C.A., Ometto, J.P., 2016. Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, 22 (5), 1821-1840. https://doi.org/10.1111/gcb.13134

Aguiar, D., Mello, M., Nogueira, S., Gonçalves, F., Adami, M., Rudorff, B., 2017. MODIS Time Series to Detect Anthropogenic Interventions and Degradation Processes in Tropical Pasture. *Remote Sensing*, 9 (1), 73. https://doi.org/10.3390/rs9010073

Albaladejo, C. & Tulet, J.-C., 1996. Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. La formation de nouveaux territoires. L'Harmattan, Paris, 358 p.

Aldrich, S.P., Walker, R.T., Arima, E.Y., Caldas, M.M., Browder, J.O., Perz, S., 2006. Land-Cover and Land-Use Change in the Brazilian Amazon: Smallholders, Ranchers, and Frontier Stratification. *Economic Geography*, 82 (3), 265-288. https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2006.tb00311.x

Almeida, O.T. & Uhl, C., 1998. Planejamento do uso do solo do município de Paragominas utilizando dados econômicos e ecológicos. IMAZON, Belém - PA, 46 p.

Amis de la Terre, 2010. De la forêt, à la fourchette. Ou comment les bovins, le soja et le sucre détruisent les forêts brésiliennes et les climats. Résumé du rapport. Amis de la Terre Europe, Bruxelles, Belgique, 12 p. http://www.amisdelaterre.org/IMG/pdf/de_la_foret_a_la_fourchette.pdf

An, L., 2012. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010

Andrieu, N., Josien, E., Duru, M., 2007a. Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120 (2-4), 359-369. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.10.022

Andrieu, N., Poix, C., Josien, E., Duru, M., 2007b. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55 (1), 36-48. https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.11.004

Antrop, M., 2000. Background concepts for integrated landscape analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 77 (1-2), 17-28. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00089-4

Antrop, M., 2006. Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopia? *Landscape and Urban Planning*, 75 (3-4), 187-197. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.014

Arima, E.Y., Barreto, P., Araújo, E., Soares-Filho, B., 2014. Public policies can reduce tropical deforestation: Lessons and challenges from Brazil. *Land Use Policy*, 41, 465-473. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.06.026

Arima, E.Y., Richards, P., Walker, R., Caldas, M.M., 2011. Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 6 (2). https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024010

Arima, E.Y., Walker, R.T., Perz, S., Souza, C., Jr., 2015. Explaining the fragmentation in the Brazilian Amazonian forest. *Journal of Land Use Science*, 37-41. https://doi.org/10.1080/1747423X.2015.1027797

Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., Marengo, J., 2012. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25 (2), 543-556. https://doi.org/10.1175/2011jcli4189.1

Arvor, D., 2009. Etude par télédétection de la dynamique du soja et de l'impact des précipitations sur les productions au Mato Grosso (Brésil). Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, Rennes, 393 p.

Arvor, D., Dubreuil, V., Simões, M., Bégué, A., 2013. Mapping and spatial analysis of the soybean agricultural frontier in Mato Grosso, Brazil, using remote sensing data. *GeoJournal*, 78 (5), 833-850. https://doi.org/10.1007/s10708-012-9469-3

Assuncao, J., Gandour, C., Rocha, R., 2015. Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: prices or policies? *Environment and Development Economics*, 20 (6), 697-722. https://doi.org/10.1017/s1355770x15000078

Assunção, J., Gandour, C., Rocha, R., Rocha, R., 2013. Does Credit Affect Deforestation Evidence from a Rural Credit Policy in the Brazilian Amazon. CPI Technical Report, Climate Policy Institute, Rio de Janeiro, Brazil, http://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2013/01/Does-Credit-Affect-Deforestation-Evidence-from-a-Rural-Credit-Policy-in-the-Brazilian-Amazon-Technical-Paper-English.pdf

Attonaty, J.M., 1980. Qu'est-ce que le système fourrager. *Perspectives agricoles (Spécial Systèmes Fourragers)*, 20-27.

Aubertin, C., 2015. Deforestation control policies in Brazil: Sovereignty versus the market. *Forests Trees and Livelihoods*, 24 (3), 147-162. https://doi.org/10.1080/14728028.2015.1017540

Aubry, C. & Michel-Dounias, I., 2006. Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole. In: Dore, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), L'agronomie d'aujourd'hui. Quae, Versailles, 57-75.

Augusiak, J., Van den Brink, P.J., Grimm, V., 2014. Merging validation and evaluation of ecological models to 'evaludation': A review of terminology and a practical approach. *Ecological Modelling*, 280, 117-128. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.009

Bakker, M.M. & van Doorn, A.M., 2009. Farmer-specific relationships between land use change and landscape factors: Introducing agents in empirical land use modelling. *Land Use Policy*, 26 (3), 809-817. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.10.010

Baral, H., Keenan, R.J., Fox, J.C., Stork, N.E., Kasel, S., 2013. Spatial assessment of ecosystem goods and services in complex production landscapes: A case study from south-eastern Australia. *Ecological Complexity*, 13, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2012.11.001

Barlow, J., Lennox, G.D., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A.C., Mac Nally, R., Thomson, J.R., Ferraz, S.F., Louzada, J., Oliveira, V.H., Parry, L., Solar, R.R., Vieira, I.C., Aragao, L.E., Begotti, R.A., Braga, R.F., Cardoso, T.M., de Oliveira, R.C., Jr., Souza, C.M., Jr., Moura, N.G., *et al.*, 2016. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 535 (7610), 144-147. https://doi.org/10.1038/nature18326

Barnaud, C., Le Page, C., Dumrongrojwatthana, P., Trébuil, G., 2013. Spatial representations are not neutral: Lessons from a participatory agent-based modelling process in a land-use conflict. *Environmental Modelling & Software*, 45, 150-159. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.016

Barretto, A., Berndes, G., Sparovek, G., Wirsenius, S., 2013. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975-2006 period. *Global Change Biology*, 19 (6), 1804-1815. https://doi.org/10.1111/gcb.12174

Barros, E., Curmi, P., Hallaire, V., Chauvel, A., Lavelle, P., 2001. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma*, 100 (1), 193-213. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00086-0

Basco-Carrera, L., Warren, A., van Beek, E., Jonoski, A., Giardino, A., 2017. Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. *Environmental Modelling & Software*, 91, 95-110. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.014

Basset-Mens, C., Ledgard, S., Boyes, M., 2009. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecological Economics*, 68 (6), 1615-1625. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.017

Becker, B.K., 2010. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários? *Parcerias estratégicas*, 6 (12), 135-159.

Becu, N., Barreteau, O., Perez, P., Saising, J., Sungted, S., 2005. A methodology for identifying and formalizing farmers' representations of watershed management: a case study from northern Thailand. In: Bousquet, F., Trébuil, G., Hardy, B. (Eds.), Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 41-62.

Bendahan, A.B., 2015. Système intégré Culture - Elevage - Arbre (SILPF) dans l'Etat du Roraima, Amazonie Brésilienne. Thèse de Doctorat, Ecole Abies, AgroParisTech, Paris, 415 p.

Bendahan, A.B., Carvalho, S.A., Navegantes, L., Castro, R., Carvalho, C., Martins, P., Veiga, J.B., Piketty, M.G., Tourrand, J.F., Poccard-Chapuis, R., 2013. Paragominas ou la succession de modèles controversés pour l'Amazonie. Colloque international CANAL2013 - Circulations et appropriations des normes et des modèles de l'action locale, Montpellier, France. 1-12.

Benoit, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A.C., Galli, M., Lardon, S., Rapey, H., Thenail, C., Bonari, E., 2012. Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 27 (10), 1385-1394. https://doi.org/10.1007/s10980-012-9802-8

Berenguer, E., Ferreira, J., Gardner, T.A., Aragao, L.E., De Camargo, P.B., Cerri, C.E., Durigan, M., Cosme De Oliveira Junior, R., Vieira, I.C., Barlow, J., 2014. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Global Change Biology*, 20 (12), 3713-3726. https://doi.org/10.1111/gcb.12627

Béringuier, P., Dérioz, P., Laques, A.-E., 1999. Les paysages français. Armand Colin, 95 p.

Berkes, F. & Folke, C., 1998. Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Berre, D., Vayssières, J., Boussemart, J.P., Leleu, H., Tillard, E., Lecomte, P., 2015. A methodology to explore the determinants of eco-efficiency by combining an agronomic whole-farm simulation model and efficient frontier. *Environmental Modelling and Software*, 71, 46-59.

Berthier, N., 2006. Les techniques d'enquête en sciences sociales. Méthodes et exercices corrigés. Armand Collin, Paris, 352 p.

Bertrand, G., 1968. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 39 (3), 249-272.

Bertrand, G., 1978. Le paysage entre la Nature et la Société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 49 (2), 239-258. https://doi.org/10.3406/rgpso.1978.3552

Bianchi, F.J.J.A., Booij, C.J.H., Tscharntke, T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273 (1595), 1715-1727. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3530

Biri, K.B. & Maitre d'Hotel, E., 2002. Contribution à l'étude de la durabilité de l'agriculture familiale en zone de front pionnier : exemple de la communauté de Benfica en Amazonie Orientale brésilienne. Mémoire de fin d'études, CNEARC, Montpellier, 82 p.

Boddey, R.M., Macedo, R., Tarré, R.M., Ferreira, E., de Oliveira, O.C., de P. Rezende, C., Cantarutti, R.B., Pereira, J.M., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., 2004. Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: the key to understanding the process of pasture decline. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103 (2), 389-403. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010

Bolte, J.P., Hulse, D.W., Gregory, S.V., Smith, C., 2007. Modeling biocomplexity – actors, landscapes and alternative futures. *Environmental Modelling & Software*, 22 (5), 570-579. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.033

Bommarco, R., Kleijn, D., Potts, S.G., 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in ecology & evolution*, 28 (4), 230-238.

Bommel, P., 2009. Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèle multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Montpellier, 312 p.

Bommel, P., Bonaudo, T., Barbosa, T., Veiga, J.B., Vieira Pak, M., Tourrand, J.-F., 2010. La relation complexe entre l'élevage et la forêt en Amazonie brésilienne : une approche par la modélisation multi-agents. *Cahiers Agricultures*, 19 (2), 104-111. https://doi.org/10.1684/agr.2010.0384

Bommel, P. & Lardon, S., 2000. Un simulateur pour explorer les interactions entre dynamiques de végétation et de pâturage : impact des stratégies sur les configurations spatiales. *Revue Internationale de Géomatique*, 10 (10), 107-132.

Bommel, P., Piketty, M.-G., Sist, P., Burlamaqui, A.B., Barbosa, T., 2014. New opportunities for small-scale farmers of the Amazon to strengthen hazards resilience while preserving forests - field experiments combined with agent-based modelling. In: P. Katila, G.G.W.d.J.P.P.G.M. (Eds.), Forests under pressure - Local responses to global issues. IUFRO, Vienne, Autriche, 83-96.

Bommel, P., Poccard-Chapuis, R., Burlamaqui, A.B., Coudel, E., 2012. An ABM to Monitor Landscape Dynamics and to Undertake Collective Foresight Investigations in the Amazon. In: Iee (Eds.). Third Brazilian Workshop on Social Simulation, Curitiba, Paraná, Brazil. 91-98.

Bonaudo, T., 2005. La gestion environnementale sur un front pionnier amazonien. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 354 p.

Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57, 43-51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010

Bonin, M. & Houdart, M., 2012. Organisations et dynamiques des territoires d'exploitations agricoles : études de cas dans les monts d'Ardèche et en Martinique. In: Lardon, S. (Eds.), Géoagronomie, paysage et projets de territoire : sur les traces de Jean-Pierre Deffontaines. Ed. Quae, Versailles, France, 73-92.

Bonin, M. & Lardon, S., 2002. Recomposition des exploitations agricoles et diversification des pratiques de gestion de l'espace. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 131-148.

Bonneviale, J.-R., Jussiau, R., Marshall, É., 1989. Approche globale de l'exploitation agricole : comprendre le fonctionnement de l'exploitation agricole: une méthode pour la formation et le développement. Institut national de recherches pédagogiques, Dijon, France, 90, 329 p.

Bonny, S., 2011. L'agriculture écologiquement intensive Nature et défis. *Cahiers Agricultures*, 20 (6), 451-462. https://doi.org/10.1684/agr.2011.0526

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., 2006. Scenario types and scenario techniques: Towards a user's guide to scenarios. *Futures*, 38 (7), 723–739. https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002

Boucher, D., Elias, P., Faires, J., Smith, S., 2014. Brasil: as maiores reduções de desmatamento e emissões em todo o mundo. In: Union of concerned scientists (Eds.), Histórias de sucesso no âmbito do desmatamento. Nações tropicais onde as políticas de proteção e reflorestamento deram resultado, 8-14.

Bourgoin, C., Blanc, L., Bailly, J.-S., Cornu, G., Berenguer, E., Oszwald, J., Tritsch, I., Sist, P., Gond, V., 2018. The Potential of Multisource Remote Sensing for Mapping the Biomass of a Degraded Amazonian Forest. *Forests*, 9, 303. https://doi.org/10.3390/f9060303

Bousquet, F. & Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176 (3-4), 313-332. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011

Bowman, M.S., Soares-Filho, B.S., Merry, F.D., Nepstad, D.C., Rodrigues, H., Almeida, O.T., 2012. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. *Land use policy*, 29 (3), 558-568.

Braga do Carmo, J., Andrade, C.A.d., Cerri, C.C., Cássia Piccolo, M.d., 2005. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N2O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29 (5), 735-746.

Brasil, Decreto n°23793, de 23 de janeiro de 1934. Institui o primeiro Código florestal brasileiro. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D23793.htm (accès 03.04.14).

Brasil, Lei n°1.806, de 6 de janeiro de 195. Dispõe sôbre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a Superintendência da sua execução e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/cciviL_03/Leis/1950-1969/L1806.htm (accès 13.12.13).

Brasil, Lei n°4771, de 15 de setembro de 1695. Institui o Código Florestal de 1965. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771.htm (accès 13.12.13).

Brasil, Lei n°6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm (accès 25.03.14).

Brasil, Lei n°7.754, de 14 de abril de 1989. Estabelece medidas para proteção das florestas existentes nas nascentes dos rios e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7754.htm (accès 24.04.14).

Brasil, Lei n°9393, de 19 de dezembro de 1996. Dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, sobre pagamento da dívida representada por Títulos da Dívida Agrária. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9393.htm (accès 25.03.14).

Brasil, Instrução Especial/INCRA n°541, de 26 de agosto de 1997. Estabelece o Módulo fiscal para os Municípios constantes da tabela anexa. http://incra.gov.br/media/institucional/legislacao/atos_internos/instrucoes/instrucao_especial/IE51_260897.pdf (accès 17.02.14).

Brasil, Lei n°9605, de 12 de feveireiro de 1998. Dispõe sobre os crimes ambientais. http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/leis/L9605.htm (accès 25.03.14).

Brasil, Medida provisória n°2166-67, de 24 de agosto de 2001. Acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal,. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/MPV/2166-67.htm (accès 13.12.13).

Brasil, Lei n°11.326, de 24 de julho de 2006. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11326.htm (accès 07.03.14).

Brasil, Lei nº11.284, de 02 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nos 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11284.htm (accès 05.05.14).

Brasil, Decreto n°6321, 21 de Dezembro de 2007. Dispõe sobre ações relativas à prevenção, monitoramento e controle de desmatamento no Bioma Amazônia, bem como altera e acresce dispositivos ao Decreto no 3.179, de 21 de setembro de 1999, que dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/Decreto/D6321.htm (accès 07.03.14).

Brasil, Lei n°12187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm (accès 17.07.14).

Brasil, Lei n°12651, 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm (accès 13.12.13).

Brasil, Lei n°12727, 17 de outubro de 2012. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei no 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2o do art. 4o da Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12727.htm (accès 17.12.13).

Brewer, M.J. & Goodell, P.B., 2012. Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. *Annual review of entomology*, 57, 41-59. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-144748

Brossier, J., 1987. Système et système de production. Note sur ces concepts. *Cahiers Sciences Humaines*, 23 (3-4), 377-390.

Brossier, J., Chia, E., Marshall, E., Petit, M., 1989. Recherches en gestion : vers une théorie de la gestion de l'exploitation agricole. In: Brossier, J., Vissac, B., Lemoigne, J.L. (Eds.), Modélisation systémique et système agraire. Décision et organisation. INRA, Paris, 65-92.

Brunet, R., 1974. Analyse des paysages et sémiologie. Éléments pour un débat. *Espace géographique*, 3 (2), 120-126. https://doi.org/10.3406/spgeo.1974.1460

Brunet, R., 1986. La carte-modèle et les chorèmes. *Mappemonde*, 86 (4), 2-6.

Brunet, R., Ferras, R.T., Hervé, R.B., 1992. Les mots de la géographie : dictionnaire critique. RECLUS / La Documentation française, Montpellier-Paris, 470 p.

Burel, F. & Baudry, J., 1999. Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications. Technique & Documentation, Paris, 362 p.

Burton, R.J.F., 2004. Seeing through the 'good farmer's' eyes: Towards developing an understanding of the social symbolic value of 'productivist' behaviour. *Sociologia Ruralis*, 44 (2), 195-215. https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2004.00270.x

Busck, A.G., 2002. Farmers' landscape decisions: Relationships between farmers' values and landscape practices. *Sociologia Ruralis*, 42 (3), 233-249.

Bustamante, M.M.C., Nobre, C.A., Smeraldi, R., Aguiar, A.P.D., Barioni, L.G., Ferreira, L.G., Longo, K., May, P., Pinto, A.S., Ometto, J.P.H.B., 2012. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Climatic Change*, 115 (3-4), 559-577. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3

Cabell, J.F. & Oelofse, M., 2012. An Indicator Framework for Assessing Agroecosystem Resilience. *Ecology and Society*, 17 (1). https://doi.org/10.5751/es-04666-170118

Cammelli, F., 2013. Smallholders' collective action and fire risk in the Brazilian Amazon. Master Development Economics, Universita Degli Studi Firenze, 133 p.

Capillon, A., 1993. Typologie des exploitations agricoles, contribution à l'étude regionale des problèmes techniques. Tome 1. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 48 p.

Cardoso, A.S., Berndt, A., Leytem, A., Alves, B.J.R., de Carvalho, I.D.O., Soares, L.H.D., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, 143, 86-96. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007

Caron, P., 2005. À quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Natures Sciences Sociétés*, 13 (2), 145-153. https://doi.org/10.1051/nss:2005021

Caron, P. & Hubert, B., 2000. De l'analyse des pratiques à la construction d'un modèle d'évolution des systèmes d'élevage : application à la région Nordeste du Brésil. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 53 (1), 37-53.

Carvalho, S.A., 2010. Entre opportunisme et persistance. Quelles dynamiques et perspectives d'évolution pour les exploitations laitières familiales de la Transamazonienne ? Thèse de Doctorat, ABIES AgroParisTech, Paris, 202 p.

Cassiano, C.C., Ferraz, S.F.B., Molin, P.G., Voigtlaender, M., Ferraz, K.M.P.M.B., 2013. Spatial Assessment of Water-Related Ecosystem Services to Prioritize Restoration of Forest Patches. *Natureza & Conservação*, 11 (2), 176-180. https://doi.org/10.4322/natcon.2013.027

Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96 (11), 5952-5959. https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952

Castella, J.C., 2007. Transitions agraires et dynamiques environnementales en Asie du Sud-Est : d'une gestion de projet à une gouvernance de territoires. Habilitation à Diriger les Recherches, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 218 p.

Castella, J.C., Pheng Kam, S., Dinh Quang, D., Verburg, P.H., Thai Hoanh, C., 2007. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 24 (3), 531-545. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.09.009

Castella, J.C. & Verburg, P.H., 2007. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modelling*, 202 (3-4), 410-420. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.11.011

Castello, L. & Macedo, M.N., 2016. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change biology*, 22 (3), 990-1007. https://doi.org/10.1111/gcb.13173

Caviglia-Harris, J.L., Toomey, M., Harris, D.W., Mullan, K., Bell, A.R., Sills, E.O., Roberts, D.A., 2014. Detecting and interpreting secondary forest on an old Amazonian frontier. *Journal of Land Use Science*, 10 (4), 442-465. https://doi.org/10.1080/1747423x.2014.940614

Ceddia, M.G., Bardsley, N.O., Gomez-y-Paloma, S., Sedlacek, S., 2014. Governance, agricultural intensification, and land sparing in tropical South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (20), 7242-7247. https://doi.org/10.1073/pnas.1317967111

Chaplin-Kramer, R., Hamel, P., Sharp, R., Kowal, V., Wolny, S., Sim, S., Mueller, C., 2016. Landscape configuration is the primary driver of impacts on water quality associated with agricultural expansion. *Environmental Research Letters*, 11 (7), 074012. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074012

Chaplin-Kramer, R., Sharp, R.P., Mandle, L., Sim, S., Johnson, J., Butnar, I., Milà I Canals, L., Eichelberger, B.A., Ramler, I., Mueller, C., McLachlan, N., Yousefi, A., King, H., Kareiva, P.M., 2015. Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (24), 7402-7407. https://doi.org/10.1073/pnas.1406485112

Chappell, M.J. & LaValle, L.A., 2011. Food security and biodiversity: Can we have both? An agroecological analysis. *Agriculture and Human Values*, 28 (1), 3-26. https://doi.org/10.1007/s10460-009-9251-4

Chavez-Tafur, J. & Zagt, R.J. (Eds.), 2014. Towards productive landscapes - a synthesis. Tropenbos International, Wageningen, the Netherlands, xx + 224 p.

Cheylan, J.-P., Deffontaines, J.-P., Lardon, S., Thery, H., 1990. Les chorèmes : un outil pour l'étude de l'activité agricole dans l'espace rural. *Mappemonde*, 4 (90), 2-4.

Chia, E., Petit, M., Brossier, J., 2014. Théorie du comportement adaptatif et agriculture familiale. In: Gasselin, P., Choisis, J.-P., Petit, S., Purseigle, F., Zasser, S. (Eds.), L'agriculture en famille : travailler, réinventer, transmettre, 81-100.

Chin, A., Florsheim, J.L., Wohl, E., Collins, B.D., 2014. Feedbacks in Human–Landscape Systems. *Environmental Management*, 53 (1), 28-41. https://doi.org/10.1007/s00267-013-0031-y

Choisis, J.P., Sourdril, A., Deconchat, M., Balent, G., Gibon, A., 2010. Comprendre la dynamique régionale des exploitations de polyculture élevage pour accompagner le développement rural dans les Coteaux de Gascogne. *Cahiers Agricultures*, 19 (2), 97-103. https://doi.org/10.1684/agr.2010.0375

Cialdella, N., Carvalho, S., Vaz, V., Barbosa, T., Thales, M., Mourao, M., Poccard-Chapuis, R., Tourrand, J.F., 2015. Do political changes aimed at reducing Amazonian deforestation contribute to ecological intensification? *Cahiers Agricultures*, 24 (4), 246-254. https://doi.org/10.1684/agr.2015.0761

Cialdella, N., Dobremez, L., Madelrieux, S., 2009. Livestock farming systems in urban mountain regions: Differentiated paths to remain in time. *Outlook on Agriculture*, 38 (2), 127-135. https://doi.org/10.5367/000000009788632412

Cialdella, N., Hostiou, N., Girard, N., 2010. What are the links between livestock farming and natural ecosystems? Crossed views on arid and tropical areas. *Natures Sciences Societes*, 18 (1), 24-35. https://doi.org/10.1051/nss/2010003

CIAT, 2009. CIAT Medium-Term Plan 2010-2012. Eco-Efficient Agriculture for the Poor. CGIAR, Cali, Colombia, 120 p.

CIAT, 2014. CIAT Strategy 2014-2020. Building an eco-efficient future. CIAT, Cali, Colombia, 48 p.

CIFOR, 2016. Global landscapes forum. http://www.landscapes.org/ (accès 2016, October 23).

Clerc, A.S., 2011. Efficience environnementale des productions animales. Etude de cas en élevage à Paragominas, en Amazonie brésilienne. Rapport de stage, AgroParisTech, Paris, 61 p.

Cocca, G., Sturaro, E., Gallo, L., Ramanzin, M., 2012. Is the abandonment of traditional livestock farming systems the main driver of mountain landscape change in Alpine areas? *Land use policy*, 29 (4), 878-886.

Cohn, A.S., Gil, J., Berger, T., Pellegrina, H., Toledo, C., 2016. Patterns and processes of pasture to crop conversion in Brazil: Evidence from Mato Grosso State. *Land Use Policy*, 55, 108-120. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.005

Cohn, A.S., Mosnier, A., Havlik, P., Valin, H., Herrero, M., Schmid, E., O'Hare, M., Obersteiner, M., 2014. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (20), 7236-7241. https://doi.org/10.1073/pnas.1307163111

Costa, M.H. & Foley, J.A., 1999. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104 (D12), 14189-14198. https://doi.org/10.1029/1998jd200126

Coulibaly, D., Corniaux, C., Poccard-Chapuis, R., Sidibé, S.I., Moulin, C.-H., 2007. Evolution des stratégies d'alimentation des élevages bovins dans le bassin d'approvisionnement en lait de la ville de Sikasso au Mali. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 60 (1-4), 103-111.

Cousins, S.A.O. & Aggemyr, E., 2008. The influence of field shape, area and surrounding landscape on plant species richness in grazed ex-fields. *Biological Conservation*, 141 (1), 126-135. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.09.004

Cumming, G.S., Cumming, D.H.M., Redman, C.L., 2006. Scale mismatches in social-ecological systems: Causes, consequences, and solutions. *Ecology and Society*, 11 (1), 20.

Cushman, S.A., McGarigal, K., Neel, M.C., 2008. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*, 8 (5), 691-703. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.12.002

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010a. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30 (3), 545-555. https://doi.org/10.1051/agro/2009053

Darnhofer, I., Fairweather, J., Moller, H., 2010b. Assessing a farm's sustainability: insights from resilience thinking. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8 (3), 186-198. https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0480

Darré, J.-P. & Hubert, B., 1993. Les raisons d'un éleveur sont notre raison de coopérer. *Études rurales*, 131 (1), 109-115. https://doi.org/10.3406/rural.1993.4775

Darré, J.-P., Mathieu, A., Lasseur, J., 2004. Le sens des pratiques. Conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes. INRA, Paris.

Davidson, E.A., de Araujo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., MM, C.B., Coe, M.T., DeFries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W., Soares-Filho, B.S., Souza, C.M., Jr., Wofsy, S.C., 2012. The Amazon basin in transition. *Nature*, 481 (7381), 321-328. https://doi.org/10.1038/nature10717

de Oliveira, O.C., de Oliveira, I.P., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2004. Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103 (2), 289-300. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.004

Deadman, P., Robinson, D., Moran, E., Brondizio, E., 2004. Colonist household decisionmaking and land-use change in the Amazon Rainforest: an agent-based simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31 (5), 693-709. https://doi.org/10.1068/b3098

Deakin, L., Kshatriya, M., Sunderland, T. (Eds.), 2016. Agrarian change in tropical landscapes. CIFOR, Bogor, Indonesia, 306 p. https://doi.org/10.17528/cifor/005867

Deffontaines, J.-P., 1997. Du paysage comme moyen de connaissance de l'activité agricole à l'activité agricole comme moyen de production du paysage. OSTROM, Paris, 305-322 p.

Deffontaines, J.-P., Ritter, J., Deffontaines, B., Michaud, D., 2006. Petit guide de l'observation du paysage. Editions Quae, Paris, 32 p.

Deffontaines, J.P., Thenail, C., Baudry, J., 1995. Agricultural systems and landscape patterns: how can we build a relationship? *Landscape and Urban Planning*, 31 (1-3), 3-10. https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)01031-3

Deffuant, G., Weisbuch, G., Amblard, F., Faure, T., 2003. Simple is beautiful … and necessary. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6 (1).

Dent, J.B., Edwards-Jones, G., McGregor, M.J., 1995. Simulation of ecological, social and economic factors in agricultural systems. *Agricultural Systems*, 49 (4), 337-351. https://doi.org/10.1016/0308-521X(95)00029-5

Département d'Ille-et-Vilaine, 2016. Atlas des paysages d'Ille-et-Vilaine. http://paysages-ille-et-vilaine.fr/ (accès 24/06/2016).

Dias-Filho, M.B., 2011. Degradação de pastagens : processos, causas e estratégias de recuperação. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 215 p.

Dieguez Cameroni, F.J., Terra, R., Tabarez, S., Bommel, P., Corral, J., Bartaburu, D., Pereira, M., Montes, E., Duarte, E., Morales Grosskopf, H., 2014. Virtual experiments using a participatory model to explore interactions between climatic variability and management decisions in extensive grazing systems in the basaltic region of Uruguay. *Agricultural Systems*, 130, 89-104. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.07.002

Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., Saint-Paul, L., 2003. L'Approche systémique : de quoi s'agit-il ? Synthèse des travaux du Groupe AFSCET : "Diffusion de la pensée systémique" 11 p.

Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittonell, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34 (4), 197-210. https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006

DP Amazonie, 2013. Realidades e perspectivas da agricultura familiar no municipio de Paragominas-PA. Sintese de um trabalho de diagnostico (non publié). 38 p.

Dubreuil, V., Laques, A.E., Nédélec, V., Arvor, D., Gurgel, H., 2008. Amazonian landscapes and pioneer fronts monitored by remote sensing: The case of Mato Grosso. *Espace Geographique*, 37 (1), 57-74. https://doi.org/10.3917/eg.371.0057

Dumont, B., Gonzalez-Garcia, E., Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Ducrot, C., Dourmad, J.Y., Tichit, M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal*, 8 (8), 1382-1393. https://doi.org/10.1017/S1751731114001281

Duru, M., Fares, M., Therond, O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cahiers Agricultures*, 23 (2), 84-95. https://doi.org/10.1684/agr.2014.0691

Duru, M. & Therond, O., 2014. Livestock system sustainability and resilience in intensive production zones: which form of ecological modernization? *Regional Environmental Change*, 15 (8), 1651-1665. https://doi.org/10.1007/s10113-014-0722-9

Edmonds, B. & Moss, S., 2005. From KISS to KIDS – An 'Anti-simplistic' Modelling Approach. Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, Berlin, Heidelberg.

Edwards-Jones, G., 2007. Modelling farmer decision-making: concepts, progress and challenges. *Animal Science*, 82 (06), 783-790. https://doi.org/10.1017/asc2006112

Eltahir, E.A.B. & Bras, R.L., 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120 (518), 861-880. https://doi.org/doi:10.1002/qj.49712051806

Etienne, M., Le Page, C., Cohen, M., 2003. A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6 (2).

Fairweather, J., 2010. Farmer models of socio-ecologic systems: Application of causal mapping across multiple locations. *Ecological Modelling*, 221 (3), 555-562. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.10.026

Falkenmark, M. & Rockström, J., 2006. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132 (3), 129-132. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)

FAO, 2004. Ethique et intensification agricole durable. Collection FAO : Questions d'Ethique, Rome, http://www.fao.org/3/a-j0902f.pdf

FAO, 2016. FAOSTAT: Live Animal. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA (accès 09.20.16).

FAO & ITTO, 2011. The state of forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia. A report prepared for the Summit of the Three Rainforest Basins Brazzaville, Republic of Congo | 31 May–3 June, 2011. FAO-ITTO, Rome, 80 p.

Farmar-Bowers, Q. & Lane, R., 2009. Understanding farmers' strategic decision-making processes and the implications for biodiversity conservation policy. *Journal of Environmental Management*, 90 (2), 1135-1144. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.05.002

Fearnside, P.M., 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest ecology and management*, 80 (1-3), 21-34. https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03647-4

Feola, G. & Binder, C.R., 2010. Towards an improved understanding of farmers' behaviour: The integrative agent-centred (IAC) framework. *Ecological Economics*, 69 (12), 2323-2333. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.07.023

Ferber, J., 1995. Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.

Ferreira, L.A., 2001. Le rôle de l'élevage bovin dans la viabilité agro-écologique et socio-économique des systèmes de production agricoles familiaux en Amazonie brésilienne. Le cas d'Uruará (Pará, Brésil). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 188 p.

Fischer, J., Abson, D.J., Butsic, V., Chappell, M.J., Ekroos, J., Hanspach, J., Kuemmerle, T., Smith, H.G., von Wehrden, H., 2014. Land sparing versus land sharing: Moving forward. *Conservation Letters*, 7 (3), 149-157. https://doi.org/10.1111/conl.12084

Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockstrom, J., 2010. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15 (4).

Forman, R.T. & Godron, M., 1986. Landscape ecology. John Wiley & Sons, New York, 619 p.

Forman, R.T.T., 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10 (3), 133-142. https://doi.org/10.1007/bf00133027

Frontier, S., Pichod-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D., Luczak, C., 2008. Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution. Dunod, 4ème édition., Paris, 558 p.

Galford, G.L., Soares, B., Cerri, C.E.P., 2013. Prospects for land-use sustainability on the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368 (1619). https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0171

Gallopin, G.C., 1991. Human dimensions of global change: linking the global and the local processes. *International Social Science Journal*, 130, 707–718.

Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16 (3), 293-303. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Gama, V.F., Martensen, A.C., Ponzoni, F.J., Hirota, M.M., Ribeiro, M.C., 2013. Site Selection for Restoration Planning: A Protocol With Landscape and Legislation Based Alternatives. *Natureza & Conservação*, 11 (2), 158-169. https://doi.org/10.4322/natcon.2013.025

Garcia-Martinez, A., Olaizola, A., Bernues, A., 2009. Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. *Animal*, 3 (1), 152-165. https://doi.org/10.1017/S1751731108003297

Gardner, M., 1970. « Mathematical games : The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life" ». *Scientific American*, 223, 120-123.

Gaucherel, C. & Houet, T., 2009. Preface to the selected papers on spatially explicit landscape modelling: Current practices and challenges. *Ecological Modelling*, 220 (24), 3477-3480. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.025

Geist, H., McConnell, W., Lambin, E.F., Moran, E., Alves, D., Rudel, T., 2006. Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. In: Lambin, E.F., Geist, H. (Eds.), Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 41-70.

Gibbs, H.K., Munger, J., L'Roe, J., Barreto, P., Pereira, R., Christie, M., Amaral, T., Walker, N.F., 2015a. Did Ranchers and Slaughterhouses Respond to Zero-Deforestation Agreements in the Brazilian Amazon? *Conservation Letters*, 9 (1), 1-11. https://doi.org/10.1111/conl.12175

Gibbs, H.K., Rausch, L., Munger, J., Schelly, I., Morton, D.C., Noojipady, P., Soares-Filho, B., Barreto, P., Micol, L., Walker, N.F., 2015b. Brazil's Soy Moratorium: Supply-chain governance is needed to avoid deforestation. *Science*, 347 (6220), 377-378. https://doi.org/10.1126/science.aaa0181

Gibon, A., 2005. Managing grassland for production, the environment and the landscape. Challenges at the farm and the landscape level. *Livestock Production Science*, 96 (1), 11-31. https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.05.009

Gibon, A., Sheeren, D., Monteil, C., Ladet, S., Balent, G., 2010. Modelling and simulating change in reforesting mountain landscapes using a social-ecological framework. *Landscape Ecology*, 25 (2), 267-285. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9438-5

Gibon, A., Sibbald, A.R., Flamant, J.C., Lhoste, P., Revilla, R., Rubino, R., Sørensen, J.T., 1999. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. *Livestock Production Science*, 61 (2-3), 121-137. https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00062-7

Gilbert, E.H., Norman, D.W., Winch, F.E., 1980. Farming systems research: A critical appraisal. MSU Rural Development Paper, Department of Agricultural Economics, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 6, 135 p.

Gilroy, J.J., Woodcock, P., Edwards, F.A., Wheeler, C., Uribe, C.A.M., Haugaasen, T., Edwards, D.P., 2014. Optimizing carbon storage and biodiversity protection in tropical agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 20 (7), 2162-2172. https://doi.org/10.1111/gcb.12482

Girard, N., 2006. Catégoriser les pratiques d'agriculteurs pour reformuler un problème en partenariat Une proposition méthodologique. *Cahiers Agricultures*, 15 (3), 261-272.

Girard, N., Duru, M., Hazard, L., Magda, D., 2008. Categorising farming practices to design sustainable land-use management in mountain areas. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (2), 333-343. https://doi.org/10.1051/agro:2007046

Godar, J., Gardner, T.A., Tizado, E.J., Pacheco, P., 2014. Actor-specific contributions to the deforestation slowdown in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (43), 15591-15596. https://doi.org/10.1073/pnas.1322825111

Godfray, H.C., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327 (5967), 812-818. https://doi.org/10.1126/science.1185383

Gond, V., Decaëns, T., Arnauld de Sartre, X., Grimaldi, M., Veiga, I., De Souza, S., Lavelle, P., 2012. Elaboration d'indicateurs d'éco-efficience de ferme sur des fronts pionniers Amazoniens à partir d'imagerie satellitaire à moyenne résolution. 4th International Conference on Space Applications, Toulouse, France.

Gordon, L.J., Finlayson, C.M., Falkenmark, M., 2010. Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services. *Agricultural Water Management*, 97 (4), 512-519. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.017

Grau, R., Kuemmerle, T., Macchi, L., 2013. Beyond 'land sparing versus land sharing': environmental heterogeneity, globalization and the balance between agricultural production and nature conservation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5 (5), 477-483. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.001

Green, R.E., Cornell, S.J., Scharlemann, J.P., Balmford, A., 2005. Farming and the fate of wild nature. *Science*, 307 (5709), 550-555. https://doi.org/10.1126/science.1106049

Greenpeace International, 2009. Slaughtering the Amazon. Executive Summary. 13 p. https://www.greenpeace.org/archive-international/en/publications/reports/slaughtering-the-amazon/

Griffon, M., 2013. Qu'est ce que l'agriculture écologiquement intensive ? Editions Quae, Versailles, France, 224 p.

Grimaldi, M., Oszwald, J., Doledec, S., del Pilar Hurtado, M., Miranda, I.d.S., de Sartre, X.A., de Assis, W.S., Castaneda, E., Desjardins, T., Dubs, F., Guevara, E., Gond, V., Santana Lima, T.T., Marichal, R., Michelotti, F., Mitja, D., Noronha, N.C., Delgado Oliveira, M.N., Ramirez, B., Rodriguez, G., *et al.*, 2014. Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. *Landscape Ecology*, 29 (2), 311-328. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9981-y

Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., *et al.*, 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198 (1-2), 115-126. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023

Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221 (23), 2760-2768. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019

Gritti, E.S. & Wery, J., 2015. Proceedings of the 5th International Symposium for Farming Systems Design. Montpellier, France.

Guerra, C.A. & Pinto-Correia, T., 2016. Linking farm management and ecosystem service provision: Challenges and opportunities for soil erosion prevention in Mediterranean silvo-pastoral systems. *Land Use Policy*, 51, 54-65.

Guimarães, J., Veríssimo, A., Amaral, P., Demachki, A., 2011. Municípios Verdes: Caminhos Para a Sustentabilidade. IMAZON, Belém-PA, 154 p.

Guimarães, J., Veríssimo, A., Amaral, P., Demachki, A., 2011. Municípios Verdes: caminhos para a sustentabilidade. Imazon, Belém, PA.

Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Loveland, T.R., Townshend, J.R., DeFries, R.S., Pittman, K.W., Arunarwati, B., Stolle, F., Steininger, M.K., Carroll, M., Dimiceli, C., 2008. Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (27), 9439-9444. https://doi.org/10.1073/pnas.0804042105

Hersperger, A.M., Gennaio, M.-P., Verburg, P.H., Bürgi, M., 2010. Linking Land Change with Driving Forces and Actors: Four Conceptual Models. *Ecology and Society*, 15 (4).

Hinojosa, L., Napoléone, C., Moulery, M., Lambin, E.F., 2016. The "mountain effect" in the abandonment of grasslands: Insights from the French Southern Alps. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 115-124. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.032

Holling, C.S., 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, 4 (5), 390-405. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5

Hostiou, N., 2003. Pratiques et stratégies de gestion des ressources herbagères cultivées par des éleveurs laitiers sur un front pionnier en Amazonie brésilienne : cas du municipe de Uruará. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 257 p.

Hurand, J., 2015. Métabolisme territorial d'un espace agricole amazonien en transition. Le cas de la commune de Paragominas (Brésil). Diplôme de Master 2, Ecole AgroParisTech, Paris, 134 p.

Ianni, O., 1978. A luta pela terra: Historia social da terra e da luta pela terra numa área da Amazônia,. Editora Vozes, Petrópolis, Brasil, 8, 235 p.

IBGE, 2004. Mapa de vegetação do Brasil. ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/ (accès 14.09.15).

IBGE, 2006. Mapa de Solos do Brasil. 1:5.000.000. https://www.ibge.gov.br/ (accès 30.09.18).

IBGE, 2010. Censo demográfico. https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html (accès 15.07.16).

IBGE, 2013a. Pesquisa Pecuária Municipal (PPM). https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939 (accès 28.09.15).

IBGE, 2013b. Produto Interno Bruto dos Municípios. https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html (accès 22.09.16).

IBGE, 2016a. Pesquisa Pecuária Municipal (PPM). https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939 (accès 19.09.16).

IBGE, 2016b. Produção Agrícola Mundial (PAM). https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas (accès 19.09.16).

INCRA, 2011. Perímetro dos Imóveis Rurais certificados pelo INCRA. http://www.incra.gov.br/ (accès 21.07.15).

INPE, 2008. Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites. Ministério da Ciência e Tecnologias, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 16 p. http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/pdfs/metodologia_v2.pdf

INPE, 2016. Banco de dados PRODES. http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php (accès 10.10.17).

INPE, 2018. Programa Queimadas. http://www.inpe.br/queimadas/portal (accès 20.12.17).

INPE & EMBRAPA, 2012. Projeto TerraClass. http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2012.php (accès 09.02.15).

IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, 106, FAO, Rome, Italie, 192 p.

Jakeman, A.J., Letcher, R.A., Norton, J.P., 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21 (5), 602-614. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.004

Jakovac, C.C., Peña-Claros, M., Mesquita, R.C.G., Bongers, F., Kuyper, T.W., 2016. Swiddens under transition: Consequences of agricultural intensification in the Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 116-125. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.013

Jan, P., Dux, D., Lips, M., Alig, M., Dumondel, M., 2012. On the link between economic and environmental performance of Swiss dairy farms of the alpine area. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 (6), 706-719. https://doi.org/10.1007/s11367-012-0405-z

Janssen, M.A. & Ostrom, E., 2006. Empirically Based, Agent-based models. *Ecology and Society*, 11 (2).

Joannon, A., 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques : cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 231 p.

Joannon, A., Souchère, V., Martin, P., Papy, F., 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation and Development*, 17 (5), 467-478. https://doi.org/10.1002/ldr.714

Kaimowitz, D. & Angelsen, A., 2008. Will livestock intensification help save Latin America's tropical forests? *Journal of Sustainable Forestry*, 27 (1-2), 6-24. https://doi.org/10.1080/10549810802225168

Karali, E., Brunner, B., Doherty, R., Hersperger, A.M., Rounsevell, M.D.A., 2013. The Effect of Farmer Attitudes and Objectives on the Heterogeneity of Farm Attributes and Management in Switzerland. *Human Ecology*, 41 (6), 915-926. https://doi.org/10.1007/s10745-013-9612-x

Keating, B., Carberry, P., Thomas, S., Clark, J., 2013. Eco-efficient agriculture and climate change: Conceptual foundations and frameworks. Eco-Efficiency: From vision to reality. . International Center for Tropical Agriculture (CIAT),, Cali, Colombia, 19-28.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Bindraban, P.S., Asseng, S., Meinke, H., Dixon, J., 2010. Eco-efficient Agriculture: Concepts, Challenges, and Opportunities. *Crop Science*, 50 (Supplement 1), S-109-S-119. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0594

Keating, B.A. & McCown, R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70 (2-3), 555-579. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00059-2

Kotschoubey, B., Truckenbrodt, W., Calaf, J.M.C., 2005. Evolução geológica da porção meridional da Província bauxitífera de Paragominas durante o Néogeno/Pleistoceno (Noroeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará e extreme oeste do Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, 35 (2), 263-272.

Kristensen, L.S., Thenail, C., Kristensen, S.P., 2004. Landscape changes in agrarian landscapes in the 1990s: the interaction between farmers and the farmed landscape. A case study from Jutland, Denmark. *Journal of Environmental Management*, 71 (3), 231-244. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.03.003

Lamarque, P., Meyfroidt, P., Nettier, B., Lavorel, S., 2014. How ecosystem services knowledge and values influence farmers' decision-making. *PLoS One*, 9 (9), e107572. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107572

Lambin, E.F., Geist, H.J., Lepers, E., 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-241. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459

Lambin, E.F., Gibbs, H.K., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., Morton, D.C., Rudel, T.K., Gasparri, I., Munger, J., 2013. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Global Environmental Change*, 23 (5), 892-901. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.005

Lambin, E.F., Gibbs, H.K., Heilmayr, R., Carlson, K.M., Fleck, L.C., Garrett, R.D., le Polain de Waroux, Y., McDermott, C.L., McLaughlin, D., Newton, P., Nolte, C., Pacheco, P., Rausch, L.L., Streck, C., Thorlakson, T., Walker, N.F., 2018. The role of supply-chain initiatives in reducing deforestation. *Nature Climate Change*, 8 (2), 109-116. https://doi.org/10.1038/s41558-017-0061-1

Lambin, E.F. & Meyfroidt, P., 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (9), 3465-3472. https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108

Landais, E., 1992. Les trois pôles des systèmes d'élevage. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, 32 (2), 1-5.

Landais, E., Deffontaines, J.-P., Benoît, M., 1988. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Études rurales*, 109 (1), 125-158. https://doi.org/10.3406/rural.1988.3226

Landais, E. & Lhoste, P., 1987. Concepts et méthodes pour l'analyse du fonctionnement des systèmes d'élevage. Séminaire d'économie et de sociologie rurales, Montpellier, France.

Landais, E., Lhoste, P., Milleville, P., 1987. Points de vue sur la zootechnie et les systèmes d'élevage tropicaux. *Cahiers Sciences Humaines*, 23 (3-4), 421-437.

Laques, A.-E., 2003. Paysages et modèles paysagers : des indicateurs géographiques pour l'analyse des dynamiques spatio-temporelles d'un front pionnier (le cas de São Felix do Xingu, Brésil, Etat du Pará). Actes du colloque "Objets et indicateurs géographiques", Avignon, France. 109-120.

Lardon, S. & Capitaine, M., 2008. Processing and transforming spatial representations for agronomy. *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 2 (2), 195-217. https://doi.org/10.3917/rac.004.0195

Laue, J.E. & Arima, E.Y., 2015. Spatially explicit models of land abandonment in the Amazon. *Journal of Land Use Science*, 11 (1), 48-75. https://doi.org/10.1080/1747423x.2014.993341

Laurent, F., Poccard-Chapuis, R., Plassin, S., Hasan, A.F., Piketty, M.-G., Osis, R., Messner, F., Perrier, F., Huang, L.Z., In review. Assessment of pasture drought resistance in the Brazilian Amazon by spatial analysis.

Laurent, F., Poccard-Chapuis, R., Plassin, S., Pimentel Martinez, G., 2017. Soil texture derived from topography in North-eastern Amazonia. *Journal of Maps*, 13 (2), 109-115. https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1266524

Lavelle, P., Dolédec, S., de Sartre, X.A., Decaëns, T., Gond, V., Grimaldi, M., Oszwald, J., Hubert, B., Ramirez, B., Veiga, I., de Souza, S., de Assis, W.S., Michelotti, F., Martins, M., Feijoo, A., Bommel, P., Castañeda, E., Chacon, P., Desjardins, T., Dubs, F., *et al.*, 2016. Unsustainable landscapes of deforested Amazonia: An analysis of the relationships among landscapes and the social, economic and environmental profiles of farms at different ages following deforestation. *Global Environmental Change*, 40, 137-155. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.009

Law, E.A. & Wilson, K.A., 2015. Providing Context for the Land-Sharing and Land-Sparing Debate. *Conservation Letters*, 8 (6), 404-413. https://doi.org/10.1111/conl.12168

Le Gal, P.Y., Merot, A., Moulin, C.H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, 25 (2), 258-268. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.12.013

Le Moigne, J.L., 1977. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, collection "Systèmes-Décisions", Paris, 258 p.

Le Page, C., 2017. Simulation multi-agent interactive : engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 126 p.

Le Page, C., Becu, N., Bommel, P., Bousquet, F., 2012. Participatory Agent-Based Simulation for Renewable Resource Management: The Role of the Cormas Simulation Platform to Nurture a Community of Practice. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 15 (1), 10. https://doi.org/10.18564/jasss.1928

Le Page, C., Dray, A., Perez, P., Garcia, C., 2016. Exploring How Knowledge and Communication Influence Natural Resources Management With REHAB. *Simulation & Gaming*, 47 (2), 257-284. https://doi.org/10.1177/1046878116632900

Leal, C.G., Pompeu, P.S., Gardner, T.A., Leitão, R.P., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Zuanon, J., de Paula, F.R., Ferraz, S.F.B., Thomson, J.R., Mac Nally, R., Ferreira, J., Barlow, J., 2016. Multi-scale assessment of human-induced changes to Amazonian instream habitats. *Landscape Ecology*, 31 (8), 1725-1745. https://doi.org/10.1007/s10980-016-0358-x

Lees, A.C. & Peres, C.A., 2008. Conservation value of remnant riparian forest corridors of varying quality for amazonian birds and mammals. *Conservation biology*, 22 (2), 439-449. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00870.x

Lemaire, G., Benoît, M., Vertes, F., 2003. Rechercher de nouvelles organisations à l'échelle d'un territoire pour concilier autonomie protéique et préservation de l'environnement. *Fourrages*, 175, 303-318.

Lemery, B., Ingrand, S., Dedieu, B., Dégrange, B., 2005. Agir en situation d'incertitude: le cas des éleveurs de bovins allaitants. *Économie rurale*, 288, 57-69.

Léna, P., 1986. Aspects de la frontière amazonienne. *Cahiers ORSTOM: Série Sciences humaines*, 22 (3-4), 319-343.

Léna, P., 1999. La forêt amazonienne : un enjeu politique et social contemporain. *Autrepart*, 9, 97-120.

Lhoste, P., 1984. "Le diagnostic sur le système d'élevage". *CIRAD Cahiers de la Recherche-Développement*, 3-4, 84-88.

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C.L., Schneider, S.H., Taylor, W.W., 2007. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317 (5844), 1513-1516. https://doi.org/10.1126/science.1144004

Liu, J., Mooney, H., Hull, V., Davis, S.J., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K.C., Gleick, P., Kremen, C., Li, S., 2015. Systems integration for global sustainability. *Science*, 347 (6225), 1258832. https://doi.org/10.1126/science.1258832

MacDonald, D., Crabtree, J.R., Wiesinger, G., Dax, T., Stamou, N., Fleury, P., Gutierrez Lazpita, J., Gibon, A., 2000. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 59 (1), 47-69. https://doi.org/10.1006/jema.1999.0335

Malderieux, S., Benoît, D., Dobremez, L., 2002. Modifications de l'utilisation du territoire lorsque des éleveurs cherchent à résoudre leurs problèmes de travail. *Fourrages*, 172, 355-368.

Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Pitman, N.C.A., Quesada, C.A., *et al.*, 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12 (7), 1107-1138. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x

Manoli, C., Ancey, V., Corniaux, C., Ickowicz, A., Dedieu, F., Moulin, C.-H., 2014. How do pastoral families combine livestock herds with other livelihood security means to survive? The case of the Ferlo area in Senegal. *Pastoralism - Research, Policy and Practice*, 4 (3), 11 p. https://doi.org/10.1186/2041-7136-4-3

MAPA & MDA, 2012. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura : plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). MAPA/ACS, Brasília, Brésil, 173 p.

Margulis, S., 2004. World Bank Working Paper No. 22: Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon. World Bank, Washington, DC, http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-4844225355&partnerID=40&md5=b29d11b258dbb9889405c8c0e650cf59

Marichal, R., Grimaldi, M., Feijoo, M.A., Oszwald, J., Praxedes, C., Ruiz Cobo, D.H., del Pilar Hurtado, M., Desjardins, T., da Silva Junior, M.L., da Silva Costa, L.G., Miranda, I.S., Delgado Oliveira, M.N., Brown, G.G., Tsélouiko, S., Martins, M.B., Decaëns, T., Velasquez, E., Lavelle, P., 2014. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. *Applied Soil Ecology*, 83, 177-185. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.006

Martha, G.B.J., Alves, E., Contini, E., 2012. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, 110, 173-177. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., Pare, N., Voltz, M., Biarnes, A., 2016. Modelling Management Practices in Viticulture while Considering Resource Limitations: The Dhivine Model. *PLoS One*, 11 (3), e0151952. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151952

Martín-López, B., Palomo, I., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Castro, A.J., García Del Amo, D., Gómez-Baggethun, E., Montes, C., 2017. Delineating boundaries of social-ecological systems for landscape planning: A comprehensive spatial approach. *Land Use Policy*, 66, 90-104. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.040

Martin, P., Joannon, A., Mignolet, C., Souchere, V., Thenail, C., 2006. Systèmes de culture et territoires : cas des questions environnementales. In: Dore, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), L'agronomie d'ajourd'hui. Editions Quae, Versailles, 253-284.

Martini, D.Z., Moreira, M.A., de Aragao, L., Formaggio, A.R., Dalla-Nora, E.L., 2015. Potential land availability for agricultural expansion in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 49, 35-42.

Mateo, N. & Ortiz Rios, R.O., 2013. Resource use efficiency revisited. In: Hershey C.H., P., N. (Eds.), Ecoefficiency : from vision to reality (Issues in tropical agriculture). CIAT, Cali, 1-18.

Mathieu, J., Grimaldi, M., Jouquet, P., Rouland, C., Lavelle, P., Desjardins, T., Rossi, J.-P., 2009. Spatial patterns of grasses influence soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (3), 586-593. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.020

Matthews, R. & Selman, P., 2006. Landscape as a Focus for Integrating Human and Environmental Processes. *Journal of Agricultural Economics*, 57 (2), 199-212.

Matthews, R.B., Gilbert, N.G., Roach, A., Polhill, J.G., Gotts, N.M., 2007. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 22 (10), 1447-1459. https://doi.org/10.1007/s10980-007-9135-1

McGinnis, M.D. & Ostrom, E., 2014. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19 (2). https://doi.org/10.5751/es-06387-190230

Médiène, S., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.-P., de Tourdonnet, S., Gosme, M., Bertrand, M., Roger-Estrade, J., Aubertot, J.-N., Rusch, A., Motisi, N., Pelosi, C., Doré, T., 2011. Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31 (3), 491-514. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0009-1

Ménadier, L. & Michelin, Y., 2012. Quand des producteurs d'AOC en Auvregne se penchent sur leurs paysages. Production de formes et de modèles paysagers. In: Lardon, S. (Eds.), Géoagronomie, paysage et projets de territoire. Editions Quae, Versailles, 223-241.

Mertens, B., Poccard-Chapuis, R., Piketty, M.-G., Laques, A.-E., Venturieri, A., 2002. Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon : the case of Sao Félix do Xingu in South Para. *Agricultural Economics*, 27 (3), 269-294. https://doi.org/10.1016/s0169-5150(02)00076-2

Metzger, J.P., 2001a. Effects of deforestation pattern and private nature reserves on the forest conservation in settlement areas of the Brazilian Amazon. *Biota Neotropica*, 1 (1).

Metzger, J.P., 2001b. O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotropica*, 1 (1), 1-9.

Metzger, J.P., 2002. Landscape dynamics and equilibrium in areas of slash-and-burn agriculture with short and long fallow period (Bragantina region, NE Brazilian Amazon). *Landscape Ecology*, 17 (5), 419-431. https://doi.org/10.1023/A:1021250306481

Metzger, J.P., 2010. O Código Florestal tem base científica? *Natureza & Conservação*, 8 (1), 1-5.

Meyfroidt, P., 2013. Environmental Cognitions, Land Change and Social-Ecological Feedbacks: Local Case Studies of Forest Transition in Vietnam. *Human Ecology*, 41 (3), 367-392. https://doi.org/10.1007/s10745-012-9560-x

Milestad, R., Dedieu, B., Darnhofer, I., Bellon, S., 2012. Farms and farmers facing change: The adaptive approach. Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic, 365-385.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Island Press, Washington, DC., 137 p.

Milleville, P., 1987. Recherches sur les pratiques des agriculteurs. *Les cahiers de la recherche développement*, 16, 3-7.

Minang, P.A., van Noordwijk, M., Freeman, O.E., Duguma, L.A., Mbow, C., de Leeuw, J., Catacutan, D., 2014a. Introduction and basic propositions. In: Minang, P.A., van Noordwijk, M., Freeman, O.E., Mbow, C., de Leeuw, J., Catacutan, D. (Eds.), Climate-Smart Landscapes: Multifunctionality in Practice. World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya, 3-17.

Minang, P.A., van Noordwijk, M., Freeman, O.E., Mbow, C., de Leeuw, J., Catacutan, D., 2014b. Climate-smart landscapes: multifunctionality in practice. World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya, 405 p.

Miranda, I.S., Mitja, D., Silva, T.S., 2009. Mutual influence of forests and pastures on the seedbanks in the Eastern Amazon. *Weed Research*, 49 (5), 499-505. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00719.x

Mitja, D. & Miranda, I.S., 2010. Weed community dynamics in two pastures grown after clearing Brazilian Amazonian rainforest. *Weed Research*, 50 (2), 163-173. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00767.x

MMA, 2008. Press release "Vitória do meio ambiente: boi pirata no Pará é arrematado com lance mínimo". http://www.mma.gov.br/informma/item/5035-vitoria-do-meio-ambiente-boi-pirata-no-para-e-arrematado-com-lance-minimo

MMA, 2016a. National Strategy for REDD+. Executive Summary. MMA, Brasilia - DF, 8 p. http://redd.mma.gov.br/en/the-national-redd-strategy

MMA, 2016b. Plano Operativo 2016-2020 do PPCDAm. 60 p. http://www.mma.gov.br/informma/item/616-preven%C3%A7%C3%A3o-e-controle-do-desmatamento-na-amaz%C3%B4nia.html

Morales-Grosskopf, H., 2007. L'évaluation des conséquences de décisions stratégiques en élevage extensif en Uruguay. Une approche par les systèmes multi-agents. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, Ecole doctorale ABIES, Paris, 254 p.

Morlon, P., 2005. La dimension spatiale des pratiques agricoles : une approche agronomique. In: Laurent, C., Thinon, P. (Eds.), Agricultures et territoires. Lavoisier, Paris, 175-190.

Mottet, A., Ladet, S., Coqué, N., Gibon, A., 2006. Agricultural land-use change and its drivers in mountain landscapes: A case study in the Pyrenees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114 (2-4), 296-310. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.017

Moulin, C.-H., Ingrand, S., Lasseur, J., Malderieux, S., Napoléone, M., Pluvinage, J., Thénard, V., 2008. Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations : propositions méthodologiques. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.-H., Tichit, M. (Eds.), L'élevage en mouvement : flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Editions Quae, Versailles, 9-19.

Moura, N.G., Lees, A.C., Andretti, C.B., Davis, B.J.W., Solar, R.R.C., Aleixo, A., Barlow, J., Ferreira, J., Gardner, T.A., 2013. Avian biodiversity in multiple-use landscapes of the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 167, 339-348. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.08.023

Müller, B., Bohn, F., Dreßler, G., Groeneveld, J., Klassert, C., Martin, R., Schlüter, M., Schulze, J., Weise, H., Schwarz, N., 2013. Describing human decisions in agent-based models – ODD + D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling & Software*, 48, 37-48. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.06.003

Müller, M.M.L., Guimarães, M.F., Desjardins, T., Mitja, D., 2004. The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian amazon: A case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103 (2), 279-288. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.003

Naïtlho, M., Lardon, S., Yotte, M., 2003. Approche spatiale de l'exploitation agricole. Educagri Editions, Dijon, 111 p.

Navegantes, L., 2011. Interactions entre pratiques de gestion du pâturage et envahissement par les adventices chez les éleveurs bovins en Amazonie Orientale. Thèse de Doctorat, Montpellier SupAgro, Ecole doctorale Sibaghe, Montpellier, 181 p.

Navegantes, L., Alves, Poccard-Chapuis, R., Ferreira, L.A., Moulin, C.-H., 2012a. Transformações nas práticas de criação de bovinos mediante a evolução da fronteira agrária no Sudeste do Pará. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 29 (1), 243-268.

Navegantes, L., Alves, Poccard-Chapuis, R., Huguenin, J., Ferreira, L., Moulin, C.-H., 2012b. Grassland deterioration linked to farm trajectories in the eastern Amazon. *Outlook on Agriculture*, 41 (3), 195-201. https://doi.org/10.5367/oa.2012.0100

Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Seroa da Motta, R., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O., Hess, L., 2014. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, 344 (6188), 1118-1123. https://doi.org/10.1126/science.1248525

Nepstad, D.C., Uhl, C., Pereira, C.A., da Silva, J.M.C., 1996. A comparative study of tree establishment in abandoned pasture and mature forest of eastern Amazonia. *Oikos*, 76, 25-39. https://doi.org/10.2307/3545745

Nesme, T., Doré, T., Leenhardt, D., Pellerin, S., 2016. Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ? *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 6 (1), 13-23.

Nunes, S., Gardner, T., Barlow, J., Martins, H., Salomão, R., Monteiro, D., Souza, C., 2016. Compensating for past deforestation: Assessing the legal forest surplus and deficit of the state of Pará, eastern Amazonia. *Land Use Policy*, 57, 749-758. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.022

Nunes, S.S., Barlow, J.O.S., Gardner, T.A., Siqueira, J.V., Sales, M.R., Souza, C.M., 2014. A 22 year assessment of deforestation and restoration in riparian forests in the eastern Brazilian Amazon. *Environmental Conservation*, 42 (03), 193-203. https://doi.org/10.1017/s0376892914000356

Öborn, I., Kuyah, S., Jonsson, M., Dahlin, A.S., Mwangi, H., de Leeuw, J., 2014. Landscape-level constraints and opportunities for sustainable intensification in smallholder systems in the tropics. In: Minang, P.A., van Noordwijk, M., Freeman, O.E., Mbow, C., de Leeuw, J., Catacutan, D. (Eds.), Climate-Smart Landscapes: Multifunctionality in Practice. World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya, 163-178.

Observatório do plano ABC, 2015. Análise dos Recursos do Programa ABC. Foco na Amazônia Legal – Potencial de redução de GEE e estudo de caso sobre o Programa ABC em Paragominas. Relatório 4, 21 p.

OCDE/FAO, 2015. Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2015-2024. Editions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-fr

Ostrom, E., 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325 (5939), 419-422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Osty, P.L., 1978. L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement. *Bulletin technique d'information*, 326, 43-49.

Oszwald, J., Gond, V., Dolédec, S., Lavelle, P., 2011. Identification of land-use indicators to assess changes in landscape mosaics. *Bois et Forêts des Tropiques*, 65 (307), 7-21.

Overmars, K.P., Verburg, P.H., Veldkamp, T., 2007. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. *Land Use Policy*, 24 (3), 584-599. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.09.008

Pacheco, P., Piketty, M.G., Poccard-Chapuis, R., Garcia-Drigo, I., El Husny, J.C., Gomes, M., Tourrand, J.-F., 2017. Beyond zero deforestation in the Brazilian Amazon. Progress and remaining challenges to sustainable cattle intensification. *Info Brief*, 167. https://doi.org/10.17528/cifor/006394

Pacheco, P. & Poccard-Chapuis, R., 2012. The complex evolution of cattle ranching development amid market integration and policy shifts in the Brazilian Amazon. *Annals of the Association of American Geographers*, 102, 1366-1390. https://doi.org/10.1080/00045608.2012.678040

Papy, F., 2000. Farm models and decision support: a summary review. In: J.P., C., E.W., C. (Eds.), Research on agricultural systems: accomplishments, perspective and issues, 89-107.

Pará, Decreto estadual n°1052, de 16 de maio de 2014. Dispõe sobre a obrigatoriedade do Cadastro Ambiental Rural - CAR-PA para a emissão da Guia de Transporte Animal no Estado do Pará - GTA e concessão de outras licenças e serviços estaduais. https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=270371 (accès 17.04.15).

Pará, Instrução normativa n°02, de 26 de fevereiro de 2014. Define procedimentos administrativos para a realização de limpeza e para a obtenção de autorização de supressão, a serem realizadas nas áreas de vegetação secundária em estágio inicial de regeneração, localizadas fora da Reserva Legal e da Área de Preservação Permanente – APP dos imóveis rurais, no âmbito do Estado do Pará, e dá outras providências. https://www.semas.pa.gov.br/2014/02/26/ordem-de-servico-no-022014-de-26-de-

fevereiro-de-2014-publicada-no-doepa-no-32594-de-28022014-caderno-5-paginas-6-8/ (accès 20.05.14).

Pará, Decreto n°1379, de 03 de setembro de 2015. Cria o Programa de Regularização Ambiental dos Imóveis Rurais do Estado do Pará - PRA/PA. https://www.semas.pa.gov.br/2015/09/08/decreto-no-1-379-de-3-de-setembro-de-2015/ (accès 26.10.15).

Pará, Instrução Normativa n°08, de 28 de outubro de 2015. Define procedimentos administrativos para a realização de limpeza e autorização de supressão, a serem realizadas nas áreas de vegetação secundária em estágio inicial de regeneração, localizadas fora da Reserva Legal e da Área de Preservação Permanente – APP dos imóveis rurais, no âmbito do Estado do Pará, e dá outras providências. https://www.semas.pa.gov.br/2015/11/03/instrucao-normativa-no-08-de-28-de-outubro-de-2015/ (accès 04.12.15).

Pará, Resolução PMV/COGES n°17, de 11 de junho de 2015. Dispõe sobre o Cronograma de Operações Internas para a vinculação da emissão da Guia de Transporte Animal no Estado do Pará - GTA ao Cadastro Ambiental Rural - CAR-PA. https://www.jusbrasil.com.br/diarios/103838551/doepa-11-06-2015-pg-38 (accès 30.10.15).

Pará, 2018. SICAR/PA: Cadastro Ambiental Rural do Estado do Pará. In: SEMAS/PA (Ed.), Belém.

Park, S.E., Howden, S.M., Crimp, S.J., Gaydon, D.S., Attwood, S.J., Kokic, P.N., 2010. More than eco-efficiency is required to improve food security. *Crop Science*, 50, S-132-S-141. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0566

Parker, D.C., Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M.J., Deadman, P., 2003. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93 (2), 314-337. https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302004

Peres, C.A., Gardner, T.A., Barlow, J., Zuanon, J., Michalski, F., Lees, A.C., Vieira, I.C.G., Moreira, F.M.S., Feeley, K.J., 2010. Biodiversity conservation in human-modified Amazonian forest landscapes. *Biological Conservation*, 143 (10), 2314-2327. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.01.021

Petit, M., Deffontaines, J.P., Osty, P.L., 1975. Vos bonnes raisons de décider, les connaissez-vous ? *Entreprises agricoles*, 6-10.

Piketty, M.-G., Poccard-Chapuis, R., Drigo, I., Coudel, E., Plassin, S., Laurent, F., Thâles, M., 2015a. Multi-level Governance of Land Use Changes in the Brazilian Amazon: Lessons from Paragominas, State of Pará. *Forests*, 6 (5), 1516-1536. https://doi.org/10.3390/f6051516

Piketty, M.-G., Veiga, J.B., Poccard-Chapuis, R., Tourrand, J.-F., 2002. Le potentiel des systèmes agroforestiers sur les fronts pionniers d'Amazonie brésilienne. *Bois et Forêts des Tropiques*, 272 (2), 75-87. https://doi.org/10.19182/bft2002.272.a20157

Piketty, M.-G., Veiga, J.B., Tourrand, J.-F., Negreiros Alves, A.M., Poccard-Chapuis, R., Thales, M., 2005. Les déterminants de l'expansion de l'élevage bovin en Amazonie orientale : conséquences pour les politiques publiques. *Cahiers Agricultures*, 14 (1), 90-95.

Piketty, M.G., Poccard-Chapuis, R., Garcia-Drigo, I., Gomes, M., Pacheco, P., 2017. Zero-deforestation commitments in the Brazilian Amazon: Progress, limits and proposal for a jurisdictional approach. XVI Biennal IASC Conference, Utrecht, the Netherland.

Piketty, M.G., Veiga, J.B., Tourrand, J.F., Thales, M., Poccard-Chapuis, R., 2015b. Reflexões sobre a pecuária e o desmatamento na Amazônia : grandes fazendeiros no Sul do Pará, Brasil. In: Wood, C.H.,

Tourrand, J.F., Toni, F. (Eds.), Pecuária, uso da terra e desmatamento na Amazônia : um estudo comparativo do Brasil, do Ecuador e do Peru. UNB, Brasília, 49-72.

Pimentel, G.M., 2016. Mapeamento das paisagens de Paragominas : uma abordagem geossitêmica. Diplôme de Master, UFPA, Belém-PA, 96 p.

Pinto, A., Amaral, P., Souza Jr., C., Veríssimo, A., Salomão, R., Gomes, G., Balieiro, C., 2009. Diagnóstico Socioeconômico e Florestal do Município de Paragominas. Relatório Técnico. IMAZON, Belém, PA, 65 p.

Piveteau, V. & Lardon, S., 2002. Chorèmes et diagnostics de territoire : une expérience de formation. *Mappemonde*, 2002 (4), 1-6.

Plassin, S., 2009. Maintenir des aires de protection permanente dans les exploitations agricoles familiales d'un front pionnier amazonien : étude de cas dans la commune brésilienne d'Uruará. Mémoire de fin d'études, Ecole d'ingénieurs de Purpan, Toulouse, 146 p.

Plieninger, T., Draux, H., Fagerholm, N., Bieling, C., Bürgi, M., Kizos, T., Kuemmerle, T., Primdahl, J., Verburg, P.H., 2016. The driving forces of landscape change in Europe: A systematic review of the evidence. *Land Use Policy*, 57, 204-214. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.040

Poccard-Chapuis, R., 2004. Les réseaux de la conquête : rôle des filières bovines dans la structuration de l'espace sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale brésilienne. Thèse de Doctorat, Université de Paris X - Nanterre, Paris, 441 p.

Poccard-Chapuis, R., Alves, L.N., Grise, M.M., Ba, A., Coulibaly, D., Ferreira, L.A., Lecomte, P., 2014. Landscape characterization of integrated crop-livestock systems in three case studies of the tropics. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29 (3), 218-229. https://doi.org/10.1017/s174217051400009x

Poccard-Chapuis, R., Bonaudo, T., Pachoud, C., Duverger, A., Ribeiro, C., Clerc, A.S., Castro, R., 2015a. Cattle ranching in the Amazon: quantifying synergies between intensification, mitigation and profitability. Climate-Smart Agriculture 2015, Montpellier.

Poccard-Chapuis, R., Carvalho, S., Burlamaqui, A., Navegantes, L., Plassin, S., El Husny, J.C., Piketty, M.G., Tourrand, J.F., 2015b. Des cendres de la forêt à l'économie verte, l'évolution agraire en Amazonie Orientale traduit-t-elle un mouvement d'intensification écologique ? *Fourrages*, 222, 125-133.

Poccard-Chapuis, R., Ferreira, L.A., Nahum, B.S., Carvalho, S.A., Tourrand, J.-F., 2010. Cattle production in the Amazon Rainforest: reasons for the success, challenges for ecological intensification. *Advances in Animal Biosciences*, 1, 520. https://doi.org/10.1017/s2040470010001342

Poccard-Chapuis, R., Thales, M., Venturieri, A., Piketty, M.-G., Mertens, B., Veiga, J.B., Tourrand, J.-F., 2005. La filière viande : un levier pour contrôler les dynamiques pionnières en Amazonie brésilienne? *Cahiers Agricultures*, 14 (1), 53-58.

Poccard-Chapuis, R. & Thales, M.C., 2011. Système d'information sur la déforestation en Amazonie : la filière bovine sous surveillance. In: Duteurtre, G., Bonnet, P., Dutilly, C., Napoléone, M., Touré, I. (Eds.). Atelier de formation collective "Systèmes d'information et outils de pilotage du secteur élevage dans les pays du Sud : postures et méthodes", Montpellier. 107-109.

Polge, E., Poccard-Chapuis, R., Piraux, M., 2015. Territoires émergents d'Amazonie : analyse comparée des dynamiques territoriales dans le Baixo Amazonas et le Nordeste Paraense. *Confins*, 24.

Polge, E., Wallet, F., Torre, A., 2016. Vers une transition agraire en Amazonie orientale ? Coexistence et hybridation des modèles agricoles au sein de la filière laitière dans la « commune verte » de Paragominas. 10èmes Journées de Recherches en Sciences Sociales, Paris.

Pretty, J. & Bharucha, Z.P., 2014. Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of botany*, 114 (8), 1571-1596.

Pretty, J., Sutherland, W.J., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M., Bentley, J., Bickersteth, S., Brown, K., Burke, J., Campbell, H., Chen, K., Crowley, E., Crute, I., Dobbelaere, D., Edwards-Jones, G., Funes-Monzote, F., Godfray, H.C.J., Griffon, M., Gypmantisiri, P., *et al.*, 2010. The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8 (4), 219-236. https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0534

Primdahl, J. & Kristensen, L.S., 2011. The farmer as a landscape manager: Management roles and change patterns in a Danish region. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 111 (2), 107-116. https://doi.org/10.1080/00167223.2011.10669527

Programa Municípios Verdes - PMV, 2018. Banco de dados do Programa Municípios Verdes. http://www.municipiosverdes.pa.gov.br/ (accès 01.03.18).

Quesada, C.A., Lloyd, J., Anderson, L.O., Fyllas, N.M., Schwarz, M., Czimczik, C.I., 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8 (6), 1415-1440. https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011

Ramankutty, N., Gibbs, H.K., Achard, F., Defries, R., Foley, J.A., Houghton, R.A., 2007. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. *Global Change Biology*, 13 (1), 51-66. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01272.x

Resilience Alliance, 2010. Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners. Version 2.0. 54 p. http://www.resalliance.org/3871.php

Richards, P.D., Walker, R.T., Arima, E.Y., 2014. Spatially complex land change: The Indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. *Global Environmental Change*, 29, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.011

Rizzo, D., Marraccini, E., Lardon, S., Rapey, H., Debolini, M., Benoît, M., Thenail, C., 2013. Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 113 (2), 71-86. https://doi.org/10.1080/00167223.2013.849391

Rodrigues, T.E., Silva, R.d.C., da Silva, J.M.L., Oliveira Júnior, R.C.d., Gama, J.R.N.F., Valente, M.A., 2003. Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Paragominas, Estado do Pará. Documentos 162, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, 1-49 p.

Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., 2006. Effets des systèmes de cultures sur l'évolution du milieu cultivé. In: Doré, T., Martin, P., Le Bail, M., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), L'agronomie aujourd'hui. Editions Quae, Versailles, 169-176.

Rosa, A.d.N.F. & Alva, R.C., 2017. 40 anos da Embrapa Gado de Corte em memória. Documentos n°230, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, 168 p. http://www.cnpgc.embrapa.br/publicacoes/doc/DOC230.pdf

Rueff, C., Choisis, J.-P., Balent, G., Gibon, A., 2012. A Preliminary Assessment of the Local Diversity of Family Farms Change Trajectories Since 1950 in a Pyrenees Mountains Area. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36 (5), 564-590. https://doi.org/10.1080/10440046.2012.672547

Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J.P., Gibon, A., 2013. Paths to last in mixed crop-livestock farming: lessons from an assessment of farm trajectories of change. *Animal*, 7 (4), 673-681. https://doi.org/10.1017/S1751731112002091

Sabatier, R., Doyen, L., Tichit, M., 2014. Heterogeneity and the trade-off between ecological and productive functions of agro-landscapes: A model of cattle-bird interactions in a grassland agroecosystem. *Agricultural Systems*, 126, 38-49. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.008

Sanchez, X.C.C. & Navegantes, L.F.A., 2016. Aspectos históricos relacionados à adoção de práticas agroecológicas: análise retrospectiva no Oeste maranhense. *Novos Cadernos NAEA*, 19 (1), 123-142. https://doi.org/10.5801/ncn.v19i1.2282

Sane, M., Vayssières, J., Grillot, M., Bah, A., Ickowicz, A., 2016. Simulating spatial changes in vegetation-livestock interactions under different landscape structures: a multi-agent system applied to agro-pastoral territories. 8th International congress on environmental modelling and software, Toulouse, France.

Sayer, J., Sunderland, T., Ghazoul, J., Pfund, J.-L., Sheil, D., Meijaard, E., Venter, M., Boedhihartono, A.K., Day, M., Garcia, C., van Oosten, C., Buck, L.E., 2013. Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (21), 8349-8356. https://doi.org/10.1073/pnas.1210595110

Schaller, N., Lazrak, E.G., Martin, P., Mari, J.-F., Aubry, C., Benoît, M., 2012. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology*, 27 (3), 433-446. https://doi.org/10.1007/s10980-011-9691-2

Schelling, T.C., 1971. Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143-186.

Schmink, M. & Wood, C.H., 2012. Conflitos sociais e a formação da Amazônia. EDUFPA, Belém, PA, 496 p.

Schneider, C., Coudel, E., Cammelli, F., Sablayrolles, P., 2015. Small-scale farmers' needs to end deforestation: insights for REDD+ in São Felix do Xingu (Pará, Brazil). *International Forestry Review*, 17 (1), 124-142. https://doi.org/10.1505/146554815814668963

Schulze, J., Müller, B., Groeneveld, J., Grimm, V., 2017. Agent-Based Modelling of Social-Ecological Systems: Achievements, Challenges, and a Way Forward. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20 (2), 8. https://doi.org/10.18564/jasss.3423

Schwartzman, S., Moutinho, P., Hamburg, S., 2012. Amazon deforestation and Brazil's forest code: a crossroads for climate change. *Carbon Management*, 3 (4), 341-343. https://doi.org/10.4155/cmt.12.34

Sebillotte, M., 1990. Système de culture : un concept opératoire pour les agronomes. In: Combe, L., Picard, D. (Eds.), Les systèmes de culture. INRA, Paris, 165-196.

Sheeren, D., Lefèbvre, J., Ladet, S., Balent, G., Brame, A., Bray, F., Capitaine, M., Gibon, A., Lasseur, R., Lasseur, J., Dobremez, L., 2015. Coévolution des paysages et des activités agricoles dans différents territoires d'élevage des montagnes françaises : entre intensification et déprise agricole. *Fourrages*, 222, 103-113.

Silva, D.S. & Barreto, P., 2014. O aumento da produtividade e lucratividade da pecuária bovina na Amazônia: o caso do Projeto Pecuária Verde em Paragominas. IMAZON, Belém, PA.

Silva, J.M.C., Rylands, A.B., Fonseca, G.A.B., 2005. The Fate of the Amazonian Areas of Endemism. *Conservation Biology*, 19 (3), 689-694.

Simon, H.A., 1959. Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science. *The American Economic Review*, 49 (3), 252-283.

Smajgl, A. & Barreteau, O., 2017. Framing options for characterising and parameterising human agents in empirical ABM. *Environmental Modelling & Software*, 93, 29-41. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.011

Soares-Filho, B., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., Dietzsch, L., Merry, F., Bowman, M., Hissa, L., Silvestrini, R., Maretti, C., 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (24), 10821-10826. https://doi.org/10.1073/pnas.0913048107

Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., Alencar, A., 2014. Cracking Brazil's Forest Code. *Science*, 344 (6182), 363-364. https://doi.org/10.1126/science.1246663

Soteriades, A.D., Faverdin, P., Moreau, S., Charroin, T., Blanchard, M., Stott, A.W., 2016. An approach to holistically assess (dairy) farm eco-efficiency by combining Life Cycle Analysis with Data Envelopment Analysis models and methodologies. *Animal*, 10 (11), 1899-1910. https://doi.org/10.1017/S1751731116000707

Souchère, V., Millair, L., Echeverria, J., Bousquet, F., Le Page, C., Etienne, M., 2010. Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environmental Modelling and Software*, 25 (11), 1359-1370. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.002

Spies, T.A., White, E., Ager, A., Kline, J.D., Bolte, J.P., Platt, E.K., Olsen, K.A., Pabst, R.J., Barros, A.M.G., Bailey, J.D., Charnley, S., Morzillo, A.T., Koch, J., Steen-Adams, M.M., Singleton, P.H., Sulzman, J., Schwartz, C., Csuti, B., 2017. Using an agent-based model to examine forest management outcomes in a fire-prone landscape in Oregon, USA. *Ecology and Society*, 22 (1). https://doi.org/10.5751/es-08841-220125

SPRP, 2014. Pecuária Verde: produtividade, legalidade e bem-estar na fazenda. Sindicato dos Produtores Rurais de Paragominas Pecuária Verde, Paragominas, 120 p.

Stabile, M.C.C., Simões, C.G., Azevedo, A.A., Woldmar, R., 2016. Oportunidades da intensificação da bovinicultura de corte em Mato Grosso. IPAM, Brasília, DF, 8 p.

Steckel, J., Westphal, C., Peters, M.K., Bellach, M., Rothenwoehrer, C., Erasmi, S., Scherber, C., Tscharntke, T., Steffan-Dewenter, I., 2014. Landscape composition and configuration differently affect trap-nesting bees, wasps and their antagonists. *Biological Conservation*, 172, 56-64. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.02.015

Steinfeld, H. & Gerber, P., 2010. Livestock production and the global environment: consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (43), 18237-18238. https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107

Strassburg, B.B.N., Latawiec, A.E., Barioni, L.G., Nobre, C.A., da Silva, V.P., Valentim, J.F., Vianna, M., Assad, E.D., 2014. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, 28, 84-97. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001

Strassburg, B.B.N., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Kerry Turner, R., Brooks, T.M., 2012. Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*, 2 (5), 350-355. https://doi.org/10.1038/nclimate1375

Sutherland, L.A., Burton, R.J., Ingram, J., Blackstock, K., Slee, B., Gotts, N., 2012. Triggering change: towards a conceptualisation of major change processes in farm decision-making. *Journal of Environmental Management*, 104, 142-151. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.013

Tambosi, L.R. & Metzger, J.P., 2013. A Framework for Setting Local Restoration Priorities Based on Landscape Context. *Natureza & Conservação*, 11 (2), 152-157. https://doi.org/10.4322/natcon.2013.024

Teissier, J.-M., 1979. Relations entre techniques et pratiques. *Bulletin INRAP*, 38, 19.

Teixeira, J.F., Simão-Neto, M., Couto, W.S., Dias-Filho, M.B., Silva, A.B.D., M. L. R., Albuquerque, F.C., 2000. Prováveis causas da morte do capim-braquiarão (Brachiaria brizantha cv. Marandu) na Amazônia Oriental: Relatório Técnico. Embrapa Amazônia Oriental, Belém-PA, 36, 20 p.

Thalês, M. & Poccard-Chapuis, R., 2014. Dinâmica espaço-temporal das frentes pioneiras no Estado do Pará. *Confins*, 22. https://doi.org/10.4000/confins.9860

Thales, M.C., Alves, A.M., Oliveira, J.R.D., Piketty, M.-G., Veiga, J.B., Poccard-Chapuis, R., Tourrand, J.-F., 2003. Les stratégies d'acteurs dans la construction de paysages sur le front pionnier du Sul do Para en Amazonie orientale brésilienne. In: Dugué Patrick, J.P. (Eds.). Colloque international sur l'organisation spatiale et gestion des ressources et des territoires ruraux, Montpellier, France. 350-359.

Thenail, C. & Baudry, J., 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a case study in northeast Brittany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101 (1), 53-72. https://doi.org/10.1016/s0167-8809(03)00199-3

Thenail, C., Joannon, A., Capitaine, M., Souchère, V., Mignolet, C., Schermann, N., Di Pietro, F., Pons, Y., Gaucherel, C., Viaud, V., Baudry, J., 2009. The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131 (3-4), 207-219. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.015

Thompson, J. & Scoones, I., 2009. Addressing the dynamics of agri-food systems: an emerging agenda for social science research. *Environmental Science & Policy*, 12 (4), 386-397. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.03.001

Tilman, D., 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96 (11), 5995-6000. https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5995

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (50), 20260-20264. https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418 (6898), 671-677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Tollefson, J., 2015. Battle for the Amazon. *Nature*, 520 (7545), 20-23.

Tourrand, J.-F., Valarié, F., Dias de Oliveira, J.R., 2007. Monopoly amazonien. *Cahiers Agricultures*, 16 (5), 423-427. https://doi.org/10.1684/agr.2007.0134

Tourrand, J.-F., Vaz, V., Veiga, J.B., Carvalho, S.A., Quanz, D., Poccard-Chapuis, R., 2013. Pionniers d'Amazonie : une vision particulière de l'incertitude. In: Ancey Véronique, A.I.D.B. (Eds.), Agir en situation d'incertitude en agriculture : regards pluridisciplinaires au Nord et au Sud. 17, Bruxelles, 213-228.

Tourrand, J.F., Piketty, M.G., Oliveira, J.R.D., Thales, M.C., Alves, A.M., Veiga, J.B., Poccard-Chapuis, R., 2004. Cattle farming, deforestation and regional development: A case study in southern Para, Brazilian Amazon. *Bois et Forêts des Tropiques*, 280 (2), 5-16.

Tritsch, I., Sist, P., Narvaes, I., Mazzei, L., Blanc, L., Bourgoin, C., Cornu, G., Gond, V., 2016. Multiple Patterns of Forest Disturbance and Logging Shape Forest Landscapes in Paragominas, Brazil. *Forests*, 7 (12), 315. https://doi.org/10.3390/f7120315

Tscharntke, T., Klein, A.M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., Thies, C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8, 857-874. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x

Turner Ii, B.L., Esler, K.J., Bridgewater, P., Tewksbury, J., Sitas, N., Abrahams, B., Chapin, F.S., Chowdhury, R.R., Christie, P., Diaz, S., Firth, P., Knapp, C.N., Kramer, J., Leemans, R., Palmer, M., Pietri, D., Pittman, J., Sarukhán, J., Shackleton, R., Seidler, R., *et al.*, 2016. Socio-Environmental Systems (SES) Research: what have we learned and how can we use this information in future research programs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 19, 160-168. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.04.001

Valbuena, D., Bregt, A.K., McAlpine, C., Verburg, P.H., Seabrook, L., 2010a. An agent-based approach to explore the effect of voluntary mechanisms on land use change: A case in rural Queensland, Australia. *Journal of Environmental Management*, 91 (12), 2615-2625. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.041

Valbuena, D., Verburg, P.H., Bregt, A.K., 2008. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128 (1-2), 27-36. https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.015

Valbuena, D., Verburg, P.H., Veldkamp, A., Bregt, A.K., Ligtenberg, A., 2010b. Effects of farmers' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: An agent-based approach. *Landscape and Urban Planning*, 97 (2), 98-110. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.001

Valeriano, M.M. & Rossetti, D.F., 2012. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*, 32 (2), 300-309. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004

Valle, E.R., 2011. Boas Práticas Agropecuárias bovinos de corte. Manual de Orientações. 2a edição revista e ampliada. Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, 69 p.

Van Campenhoudt, L. & Quivy, R., 2011. Manuel de recherche en sciences sociales. Dunod, Paris, 262 p.

Van Noordwijk, M., 2002. Scaling trade-offs between crop productivity, carbon stocks and biodiversity in shifting cultivation landscape mosaics: the FALLOW model. *Ecological Modelling*, 149 (1–2), 113-126. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00518-X

Van Vliet, J., de Groot, H.L.F., Rietveld, P., Verburg, P.H., 2015. Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 133, 24-36. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.09.001

Van Vliet, N., Adams, C., Vieira, I.C.G., Mertz, O., 2013. "Slash and Burn" and "Shifting" Cultivation Systems in Forest Agriculture Frontiers from the Brazilian Amazon. *Society & Natural Resources*, 26 (12), 1454-1467. https://doi.org/10.1080/08941920.2013.820813

Vayssieres, J., Lecomte, P., Guerrin, F., Nidumolu, U.B., 2007. Modelling farmers' action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island. *Animal*, 1 (5), 716-733. https://doi.org/10.1017/S1751731107696657

Vaz, V., Carvalho, S., Barbosa, T., Thales, M.C., Mourão, M., Cialdella, N., Poccard-Chapuis, R., Tourrand, J.-F., 2012. A pecuária na agenda ambiental da amazônia brasileira : Percepções e representações dos atores locais. In: Almeida, J., Gerhardt, C., Magalhães, S.B. (Eds.), Contextos rurais e agenda ambiental no Brasil: Práticas, políticas, conflitos, interpretações. Dossiê 3. Rede de Estudos Rurais, Belém - PA, 65-90.

Vedoveto, M., Ortega, V., Veríssimo, A., 2014. Gestão Ambiental Rural : Custos e receitas do controle ambiental em doze municípios do Pará. IMAZON, Belém, 97 p.

Veiga, J.B., Burlamaqui, A.B., Oliveira, D.J.R., Tourrand, J.-F., Poccard-Chapuis, R., Piketty, M.-G., 2010. L'Amazonie, le nouvel Eldorado des éleveurs brésiliens. In: Sayago, D., Tourrand, J.-F., Bursztyn, M., Drummond, J.A. (Eds.), L'Amazonie, un demi-siècle après la colonisation. Editions Quae, Versailles, 207-223.

Veiga, J.B., Tourrand, J.-F., Piketty, M.-G., Poccard-Chapuis, R., Alves, A.M., Thales, M.C., 2004. Expansão e trajetórias da pecuária na Amazônia : Pará, Brasil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.

Veiga, J.B. & Tourrand, J.F., 2001. Pastagens cultivadas na Amazônia Brasileira: Situação Atual e Perspectivas. Documentos n°83, Embrapa Amazônia Oriental, Belém-PA, 36 p.

Venturieri, A., 2003. A dinâmica da ocupação pioneira na rodovia Transamazônica : uma abordagem de modelos de paisagem. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 167 p.

Verburg, P.H., Kok, K., Pontius Jr, R.G., Veldkamp, A., 2006. Modeling land-use and land-cover change. Land-use and land-cover change. Springer, 117-135.

Verburg, P.H. & Overmars, K.P., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 24 (9), 1167-1181. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7

Verburg, P.H. & Veldkamp, A., 2005. Introduction to the Special Issue on Spatial modeling to explore land use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (2), 99-102. https://doi.org/10.1080/13658810410001713362

Viana, C., Coudel, E., Barlow, J., Ferreira, J., Gardner, T., Parry, L., 2016. How Does Hybrid Governance Emerge? Role of the elite in building a Green Municipality in the Eastern Brazilian Amazon. *Environmental Policy and Governance*. https://doi.org/10.1002/eet.1720

Voinov, A. & Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, 25 (11), 1268-1281. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007

Von Bertalanffy, L., 1968. General Systems Theory, Foundation, Development, Applications. George Braziller, New York, 289 p.

Von Thünen, J.H., 1966. Von Thünen's Isolated State : an english version of Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie (1826). Pergamon Press, Oxford.

Vuillot, C., Coron, N., Calatayud, F., Sirami, C., Mathevet, R., Gibon, A., 2016. Ways of farming and ways of thinking: do farmers' mental models of the landscape relate to their land management practices? *Ecology and Society*, 21 (1). https://doi.org/10.5751/ES-08281-210135

Walker, R., 2003. Mapping process to pattern in the landscape change of the amazonian frontier. *Annals of the Association of American Geographers*, 93 (2), 376-398. https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302008

Walker, R., 2014. Sparing Land for Nature in the Brazilian Amazon: Implications from Location Rent Theory. *Geographical Analysis*, 46 (1), 18-36. https://doi.org/10.1111/gean.12024

Walker, R., Browder, J., Arima, E., Simmons, C., Pereira, R., Caldas, M., Shirota, R., Zen, S.d., 2009. Ranching and the new global range: Amazônia in the 21st century. *Geoforum*, 40 (5), 732-745. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2008.10.009

Walker, R., Moran, E., Anselin, L., 2000. Deforestation and cattle ranching in the Brazilian Amazon: External capital and household processes. *World Development*, 28 (4), 683-699. https://doi.org/10.1016/S0305-750X(99)00149-7

Walker, R., Perz, S., Caldas, M., Silva, L.G.T., 2002. Land use and land cover change in forest frontiers: The role of household life cycles. *International Regional Science Review*, 25 (2), 169-199. https://doi.org/10.1177/016001702762481230

West, T.A.P., Grogan, K.A., Swisher, M.E., Caviglia-Harris, J.L., Sills, E., Harris, D., Roberts, D., Putz, F.E., 2018. A hybrid optimization-agent-based model of REDD+ payments to households on an old deforestation frontier in the Brazilian Amazon. *Environmental Modelling & Software*, 100, 159-174. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.007

Williams, M.R., Fisher, T.R., Melack, J.M., 1997. Solute dynamics in soil water and groundwater in a central Amazon catchment undergoing deforestation. *Biogeochemistry*, 38 (3), 303-335. https://doi.org/10.1023/a:1005801303639

Wood, C.H., 2015. Introdução metodológica ao estudo da pecuária, do uso da terra e do desmatamento no Brasil, no Peru e no Equador. In: Wood, C.H., Tourrand, J.F., Toni, F. (Eds.), Pecuária, uso da terra e desmatamento na Amazônia : um estudo comparativo do Brasil, do Equador e do Peru. Universidade de Brasília, Brasília, 15-48.

Wood, C.H., Tourrand, J.F., Toni, F. (Eds.), 2015. Pecuária, uso da terra e desmatamento na Amazônia : um estudo comparativo do Brasil, do Equador e do Peru. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 281 p.

World Bank, 2008. World Development Report 2008: Agriculture for Development. World Bank, Washington, DC, 365 p.

World Business Council for Sustainable Development, 2000. Eco-efficiency: creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development 225 p.

Wu, J., 2013. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28 (6), 999-1023. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9

Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., Rammig, A., 2017. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, 8, 14681. https://doi.org/10.1038/ncomms14681

Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64 (2), 253-260. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024

Zu Ermgassen, E., Alcântara, M., Balmford, A., Barioni, L., Neto, F., Bettarello, M., Brito, G., Carrero, G., Florence, E., Garcia, E., Gonçalves, E., da Luz, C., Mallman, G., Strassburg, B., Valentim, J., Latawiec, A., 2018. Results from On-The-Ground Efforts to Promote Sustainable Cattle Ranching in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, 10, 1301. https://doi.org/10.3390/su10041301

Annexes

Annexe 1.Le Plan Opérationnel du PPCDAm 2016-2020

Annexe 2.Aire de Protection Permanente (APP) et Réserve Légale (ARL)

Annexe 3.Objectifs à atteindre pour devenir Municipe Vert

Annexe 4.Etude bibliographique sur les facteurs biophysiques et topologiques influençant la localisation des pratiques dans les exploitations d'élevage

Annexe 5.Liste des acteurs clés interviewés

Annexe 6.Exemples de guide pour les entretiens semi-directifs avec les acteurs clés

Annexe 7.Liste des réunions sur des thèmes liés à notre recherche auxquelles nous avons assisté

Annexe 8.Guide pour les entretiens semi-directifs exploratoires avec les producteurs

Annexe 9.Analyse systémique des six cas d'étude

Annexe 10. Trajectoires d'exploitation et dynamiques de paysage

Annexe 11. Liste des variables utilisées dans le modèle

Annexe 12. Paramètres utilisés pour l'initialisation du modèle

Annexe 13. Description des activités des éleveurs dans le modèle

Annexe 14. Paramètres utilisés pour représenter l'évolution des ressources naturelles

Annexe 1. Le Plan Opérationnel du PPCDAm 2016-2020

Le tableau ci-dessous présente les principaux objectifs et résultats attendus du Plan de Prévention et d'Action contre la déforestation en Amazonie légale (PPCDAm). Les objectifs sont classés selon les quatre axes du PPCDAm : l'aménagement foncier et territorial (rose), le suivi et le contrôle des usages des sols (bleu), la promotion de pratiques durables (vert) et plus récemment la création d'instruments économiques et normatifs (orange).

Objectifs	**Résultats escomptés d'ici 2020**
1. Promouvoir la régularisation foncière	1.1 Allocation du passif des terres publiques fédérales 1.2 Attribution de 26.000 titres fonciers qui demeurent sous la gestion du programme Terra Legal
2. Promouvoir l'aménagement territorial et renforcer les zones protégées	2.1 Augmentation jusqu'à 30% du pourcentage des surfaces protégées comme Unités de Conservation 2.2 Gérer efficacement les Unités de Conservation 2.3 Garantir les droits à la terre des peuples indigènes (déclaration des Terres indigènes) 2.4 Améliorer la gestion environnementale et territoriale dans les terres indigènes 2.5 et 2.6 Etablir des orientations pour l'usage et l'occupation durable des terres sur la base des initiatives des ZEE fédérales et des ZEE des Etats
3. Promouvoir la responsabilité pour les crimes et infractions environnementales	3.1 Augmentation de la responsabilité pénale pour les crimes et infractions environnementales commises 3.2 Augmentation de l'application de mesures répressives contre les actions environnementales illicites dans les terres indigènes et les Unités de Conservation 3.3 Réduction de la surface de forêt dégradée par extraction illégale de bois
4. Rendre effective la gestion forestière commune	4.1 Intégration des actions des Etats sur la gestion forestière dans le SINAFLOR 4.2 Mise en place et opérationnalisation du CAR
5. Prévenir et lutter contre les incidents de feux de forêt	5.1 Réduction de la surface affectée par les feux de forêt
6. Améliorer et renforcer le suivi des usages des sols	6.1 Amélioration du système de Détection et de Cartographie de la déforestation et dégradation forestière en temps réel (DETER : A, B et C) 6.2 Amélioration du système de cartographie de la déforestation et dégradation forestière en temps réel par images radar (SIPAM-SAR) à travers la détection et l'alerte de déforestation sous nuage 6.3 Suivi par satellite des surfaces sous embargo 6.4 Mise en place du système d'estimation annuelle des surfaces incendiées avec une résolution de ~ 30 m et 1 km 6.5 Amélioration du suivi des foyers d'incendie de végétation en temps quasi réel
7. Promouvoir la gestion forestière durable	7.1 Augmentation de la production de bois par gestion forestière durable 7.2 Renforcement des filières productives de sociobiodiversité
8. Promouvoir la durabilité des systèmes de production agricoles	8.1 et 8.2 Réduction de l'expansion des activités agricoles et d'élevage au détriment des zones naturelles 8.3 Augmentation de l'adoption de pratiques agricoles durables
9. Implémenter (créer et perfectionner) les instruments normatifs et économiques de contrôle	9.1 Amplifier l'accès au crédit pour des activités de gestion forestière durable (entrepreneur, petits producteurs et gestion communautaire), pour la régularisation et la récupération

de la déforestation illégale	environnementale 9.2 Promouvoir l'intégration d'informations et de critères socio-environnementaux pour améliorer l'analyse de la conformité environnementale des filières consommant des produits forestiers dans le cadre de financement 9.3 Favoriser de nouvelles initiatives de collecte de fonds auprès des marchés financiers pour le secteur productif durable 9.4 Utiliser les marchés publics pour encourager les achats de produits issus de la gestion durable des forêts, de l'agroécologie et de la siocio-biodiversité 9.5 Elaborer ou réviser les actions normatives visant la réduction de la déforestation (liste noire, pacte contre déforestation) 9.6 Elaborer ou réviser les pactes et accords pour favoriser le développement de filières d'approvisionnements de produits exempts de déforestation

Source : MMA (2016b)

Annexe 2. Aire de Protection Permanente (APP) et Réserve Légale (ARL)

Les Aires de Protection Permanentes - APP

Définition

Les APP correspondent à des zones naturellement fragiles où une couverture de végétation (native de préférence) doit être maintenue en permanence.

Type et largeur des APP

Localisation de l'APP	Caractéristiques physiques de la zone à protéger	Bandes de végétation minimum	Evolution p/r 1965
Rive des cours d'eau (temporaire ou permanent)	0 à 10 m	30 m	=
	10 à 50 m	50 m	=
	50 à 200 m	100 m	=
	200 à 600 m	200 m	=
	Supérieur à 600 m	500 m	=
Source d'eau	Permanente ou temporaire	50 m	=
Lac naturel	Inférieur à 20 ha	50 m	=
	Supérieur à 20 ha	100 m	=
	Zone urbaine	30 m	=
Réservoir artificiel	Barrages ou retenues de cours d'eau naturels	Largeur définie par la licence environnementale	≠
Veredas (zone marécageuse)	Inondée en permanence	50 m	=
Mangrove	Ecosystème littoral	Toute la surface	=
Dépôt de sable (restinga)	A partir du niveau le plus haut de la marée	300 m	=
Versant	Pente > 45°	Toute la surface	=
Plateau tabulaire ou "chapada"		100 m depuis la dépression	=
Sommet de collines et de montagnes	altitude > 100 m ; pente moyenne > 25°	1/3 supérieur	=
Végétation en haute altitude	altitude > 1800 m	Toute la surface	=

Sont exemptés d'APP : les bordures des lacs artificiels qui ne sont pas issues d'un barrage ou d'une retenue d'un cours d'eau naturel ; les bordures des réserves d'eau naturelle ou artificielle de moins de 1 ha ; les activités piscicoles développées sur les cours d'eau et les lacs dans les exploitations de moins de 15 modules fiscaux.

Les activités autorisées dans les APP

Dans un certain nombre de cas reconnus d'utilité publique, d'intérêt social ou de faible impact environnemental, le code forestier autorise des interventions et suppression de la végétation native. Parmi l'ensemble des possibilités, six peuvent particulièrement intéresser les éleveurs :

- Construction et manutention de clôtures dans l'exploitation agricole ;
- Ouverture de petites voies d'accès, ponts, permettant l'accès des personnes et des animaux à l'eau ou le retrait de produits issus d'activités de gestion agroforestière durable ;

- Implantation d'installations nécessaires au captage et l'acheminement de l'eau et des effluents traités à condition de posséder un droit d'usage de l'eau ;
- Collecte de produits non ligneux à des fins de subsistance et pour la production de plants ;
- Plantations d'espèces natives productrices de fruits, semences, châtaignes et autres produits végétaux, dès que cela n'implique pas la suppression de la végétation existante et que cela ne porte pas préjudice au rôle environnemental de l'APP ;
- Exploitation agroforestière et gestion forestière durable, communautaire et familiale, incluant l'extraction de produits forestiers non ligneux, à condition de ne pas dénaturer la couverture végétale existante et le rôle de l'APP.

L'Aire de Réserve Légale - ARL

Définition

C'est « *une aire localisée à l'intérieur d'une exploitation agricole, qui a diverses fonctions : assurer une valorisation économique durable des ressources naturelles de la réserve, contribuer à la conservation et à la réhabilitation des processus écologiques et promouvoir la conservation de la biodiversité, tant en en jouant un rôle d'abri qu'en protégeant la faune sauvage et la flore native* » (Brasil, 2012a).

Surface

La dimension de la RL correspond à un pourcentage de l'exploitation agricole qui varie selon les régions et le type de biome. En Amazonie légale, il s'élève à 80 % en aire forestière, 35 % en zone de « cerrado » et 20 % en zone de « campo ». Dans le reste du pays, ce pourcentage est de 20 % de la surface de l'exploitation. Les producteurs sont autorisés à inclure les APP dans le calcul du pourcentage de la Réserve légale.

Activités possibles soumises à autorisation ou déclaration

1) Plantations d'espèces forestières natives ou exotiques.
2) Exploitation des produits ligneux dans un but commercial à condition de réaliser un plan de gestion forestière durable et de demander une autorisation à l'organisme compétent. Ceci ne s'applique pas pour les exploitations familiales qui utilisent le bois à des fins d'autoconsommation (usages domestiques et énergétiques) à condition que le prélèvement ne dépasse pas 2 m^3/ha/an (avec une limite maximale de 15 m^3/an) et ne concerne pas plus de 15 % de la Réserve Légale.
3) Collecte des produits non ligneux (fruits, lianes, feuilles, semences, plantes médicinales) à condition de respecter les périodes de collectes et les volumes fixés par des règlements spécifiques.

Annexe 3. Objectifs à atteindre pour devenir Municipe Vert

Ces objectifs sont (Guimarães *et al.*, 2011):

1. Mettre en place un pacte contre la déforestation avec la société civile et le gouvernement municipal ;
2. Créer un groupe de travail municipal de combat à la déforestation illégale ;
3. Vérifier sur le terrain les foyers de déforestation illégale ;
4. Maintenir le taux de déforestation annuel en dessous de 40 km² ;
5. Cadastrer plus de 80% de la surface du territoire en CAR ;
6. Construire une politique municipale de gestion environnementale : établir et structurer un organisme de gestion environnemental municipal ; prévenir et fiscaliser la déforestation illégale ; communiquer, sensibiliser, et éduquer les citoyens à la protection de l'environnement ;
7. Reforester et récupérer les zones dégradées ; faire de la gestion forestière ;
8. Adopter de bonnes pratiques agricoles

Annexe 4. Etude bibliographique sur les facteurs biophysiques et topologiques influençant la localisation des pratiques dans les exploitations d'élevage

Source	Zones d'étude	Objectif	Méthodologie	Déterminants biophysiques	Déterminants topologiques	Déterminants socio-économiques
Climat tempéré / Europe						
Cocca *et al.* (2012)	Alpes du Nord - Italie, région montagneuse	Investiguer les déterminants de l'enfrichement des parcelles agricoles	Modèle de régression multiple Données : usage des sols (photointerprétation), recensement agricole et de la population	Pente difficile ou impossible à mécaniser (> 10°)		- Disparition de l'élevage - Intensification (abandon des terres inappropriées) - Industrialisation : + (favoriserait enfrichement) - Tourisme : - (attractivité pour l'esthétisme des paysages ouverts)
Choisis *et al.* (2010)	Coteaux de Chalosse – France, zone défavorisée	Investiguer les déterminants du maintien de la polyculture-élevage	Enquêtes spatialisées et exhaustives de la population Analyse factorielle multiple	- Géomorphologie : Vallée : grandes cultures Coteaux : prairie - Exposition : coteaux nord : prairie	- Taille et dispersion du parcellaire : étendu et grand : grandes cultures ; petit et regroupé : élevage - Proximité du siège de l'exploitation	
Sheeren *et al.* (2015)	5 territoires de montagne (Pyrénées, Alpes, Jura, Massif Central) - France	Comparer les effets de l'intensifcation et de l'extensification sur l'évolution du paysage	Analyse semi-automatique de photographies aériennes, données du recensement agricole			- Extensification : enfrichement ; - Intensification : recours à l'achat de concentrés, conversion des parcelles (non visible)
Mottet *et al.* (2006)	Hautes-Pyrénées - France	Investiguer les déterminants du changement de l'usage des sols	SIG (modèle numérique de terrain et cadastre), enquêtes	- Pente et altitude Faible : intensification (culture) Forte : extensification - abandon	- Distance-temps au siège de l'exploitation et au village : Loin : gestion traditionnelle, abandon - Accessibilité aux parcelles (voirie, accès direct)	- Facteurs traditionnels, culturels, instituionnels
Andrieu *et*	Massif central,	Analyser les relations	Analyse de régression,	- Pente et altitude :	- Taille des parcelles :	

***al.* (2007a)**	France	entre la diversité floristique des pâturages, les pratiques (choix entre pâturage ou récolte, fertilisation) et les déterminants biophysiques et topologiques	enquêtes	Elevée : pâturage des génisses et vaches taries Faible : pâturage des vaches traites, stock fourrage (car mécanisable) et fertilisation - Exposition (N, S, W, E) : pas d'effet significatif	Grandes : génisses et vaches taries ; Petites : vaches traites - Distance au corral : Loin : génisses et vaches taries ; Proche : vaches traites	
MacDonald *et al.* (2000)	24 régions montagneuses, Europe	Comprendre les déterminants de l'abandon des terres agricoles	Révision bibliographique	- Qualité du sol : faible - Pente : abrupte	- Accès : difficile - Distance : éloignement	- Main d'œuvre : forts besoins - Âge et santé de l'exploitant
Bommel & Lardon (2000)	Grands Causses, France	Impact des stratégies et configurations spatiales sur les dynamiques d'embrouissaillement	Modélisation système multi-agents	- Hétérogénéité des usages de sol (voisinage) : embrouissallement plus rapide lorsque les usages de sol sont dispersés (land-sharing) plutôt qu'en bloc (land-sparing)		- Aggrégat : gestion par aggrégat plus efficiente que par unité élémentaire
Thenail & Baudry (2004)	Nord-est de la Bretagne, France	Comparer les patrons spatiaux d'usage spatial des sols selon un gradient de densité de bocage (réseau de haies)	Enquêtes, SIG, analyse statistiques	- Drainage : Hydromorphe : prairies permanentes pâturées par génisses (faible besoin). Bien drainées : grandes cultures, Intégration cultures/prairies temporairse pâturées par lots de vaches à fort besoin (vaches laitières) - Proximité rivières : pâturage, friche, forêt	- Distance au siège : Parcelles proches : culture de rente, fourrages récoltés, prairies pâturées par vaches laitières. - Taille des parcelles : Large : cultures de rente Petite : prairies permanentes pâturées par génisses. - Accessibilité : Difficile : prairies permanentes pâturées par génisses.	
Thenail et al. (2009)	5 territoires contrastés (paysage	Evaluer la contribution des fermes à la mosaïque des cultures	Recherche de corrélations stastiques entre les caractéristiques socio-	- Risque d'inondation - conditions de drainage - Structure du sol	- Configuration spatiale du territoire de la ferme (si conditions	- Caractéristiques socio-économiques des fermes (statut, âge du chef

	mosaïqués), France	dans les paysages	économiques des fermes, leur configuration spatiale (territoire) et leurs caractéristiques biophysiques et les mosaïques de cultures	- Pente - Pierrosité	biophysiques homogènes)	d'exploitation, disponibilité de main d'œuvre et résultats économiques)
Amazonie brésilienne, zone d'étude de la thèse						
Laue & Arima (2015)	Biome Amazonie	Identifier les facteurs biophysiques et socioéconomiques associés à l'enfrichement des terres	Recherche de corrélations par analyse statistique à partir de données biophysiques, socio-économiques (IBGE) et d'usage des sols (fournies par TerraClass)	- Précipitations : enfrichement plus élevé où les précipitations sont plus élevées. Explication possible : moins de rendement car plus de maladies et ravageurs, recolonisation rapide par végétation native. - Pente > 30° difficile ou impossible à mécaniser	- Distance : terres près des routes tendance à être perpétuellement cultivées. Plus la distance augmente, plus de risque d'abandon. Terres près des larges rivières et loin des routes : tendance à être abandonnées	- Prix d'achat la viande. - Type de colonisation : propension à l'abandon plus forte dans les assentamentos communautaires.
Caviglia-Harris *et al.* (2014)	6 communes au Sud-ouest de l'état de Rondonia	Spatialiser le phénomène de régénération de forêts secondaires et investiguer les facteurs prédictifs (données géophysiques et socioénomiques)		- Pente et sol : corrélation positive	- Distance à la ville : + de forêts secondaires dans les lots loin des marchés	- Âge de colonisation : + de forêts secondaires dans les exploitations formées récemment. - Orientation productive : + il y a de prairies, moins il y a de forêts secondaires - Taille de la famille : + elle est grande, + il y a de forêts secondaires. - Âge de l'exploitant : + il est âgé, + il y a de forêts secondaires car moins de gestion du lot - Education : corrélation positive - Santé financière du foyer : + l'exploitation est en bonne santé, - il y a de forêts

						secondaires (investissement dans le nettoyage)
Cohn *et al.* (2016)	Mato Grosso	Investiguer les patrons et processus de conversion des pâturages en cultures	Analyse par télédétection, statistiques, interviews d'experts et de groupes représentatifs	Capacités agronomiques : corrélation positive mais faible (seulement 1/7 des pâturages aux bonnes capacités agronomiques sont convertis). Facteur non déterminant car abondance de terres aux bonnes capacités agronomiques	- Distance aux infrastructures agricoles - Caractéristiques des parcelles voisines	

Annexe 5. Liste des acteurs clés interviewés

Thèmes	**Institution**	**Interviewés**
Dynamiques agraires (élevage et grains), Municipe vert et politiques environnementales	Sindicato Rural dos Produtores de Paragominas	Vice-président
	Sindicato Rural de Redenção	Président et ex président
	Sindicato dos Produtores Rurais de Santana do Araguaia	Président
Dynamiques agraires dans les systèmes familiaux, Municipe Vert et politiques environnementales	EMATER - Redenção	Coordinateur
	Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Redenção	Président
	AGROPARA - Redenção	Directeur et technicien
Ligne de crédit rurale et conditions d'acceptation	Banque - BASA	Gestionnaire des relations
Emission du CAR, application du code forestier (récupération APP et ARL) et de la loi sur les juquiras	SEMA - Gerência de geotecnologia et gerência de Projetos Agrosilvipastoris	3 ingénieurs
	SEMA - Unité régionale Rio Capim	Coordinateur et technicien
Emission du CAR, accompagnement pour l'application du code forestier (récupération APP et ARL)	EMATER - Paragominas	Coordinateur
	Bureau étude environnemental - Paragominas	Directeur
	Bureau étude environnemental - Redenção	Directeur
Décentralisation de la gestion environnementale, émission du CAR, application du code forestier (récupération APP et ARL) et de la loi sur les juquiras	SEMMA - Redenção	Coordinateur
Techniques de recomposition des APP et ARL en Amazonie orientale	ESALQ – LERF	Chercheur
Normes relatives au PRA (Plano de Recuperação Ambiental) du Pará	SEMA - PPCDAM et PRA	Coordinateur de l'aménagement environnemental et 2 ingénieurs

Annexe 6. Exemples de guide pour les entretiens semi-directifs avec les acteurs clés

a) A propos des dynamiques agraires, avec les leaders de syndicats et conseillers agricoles

Parte 1 : Identificação da instituição ou da organização

1. Nome do entrevistado: **.....**……
2. Data: ……**.....**
3. Nome da instituição ligada:……
4. Missões da instituição: ……..……
   ……
   ……..
5. Localização: ……..……
6. Função do entrevistado: …….
7. Contatos: ( )……..@:……

Parte 2 : Dinâmica da pecuária na região

8. Histórico (ano de chegada na região, migração espontânea e planejada pelo governo federal, pecuária, madeira):

9. Houve mudanças nos sistemas produtivos com a politica do desmatamento zero (2008: Arco do fogo, programa Carne legal…)?

10. Os produtores desenvolviram novas técnicas alternativas ao sistema extensivo corte e queima? Quais são essas práticas?

11. Quais são os freios à intensificação da produção na região?

12. Os produtores se sentem acompanhados pelos órgãos de apoio (assistência técnica, pesquisa...) para encontrar alternativas à pecuária extensiva e intensificar?

13. E pelas cadeias (soja, frigorifico, cadeia de leite...)?

14. Tem dificuldades para encontrar mão de obra qualificada?

15. Tem linhas de crédito agrícola especiais?

16. Como é a situação fundiária nessa região?

17. A agricultura familiar está envolvida nesse processo de intensificação?

Parte 3 : Dinâmica dos grãos

18. A produção de soja está desenvolvido-se bastante. Em Paragominas, os produtores plantam ou arrendem parte da propriedade o que serve para custear a reforma da outra parte. E o mesmo esquema nesse polo?

19. Sobre que tipo de solo a soja está sendo plantada?

20. A produção de soja está plantada para ser integrada com a pecuária (para reforma de pastos)? Ou é plantada em áreas dedicadas?

Parte 4 : Política ambiental

21. O município já é esse objetivo Municipio Verde (80% de CAR e menos de 40 km² de desmatamento por ano)? Quem liedera esse projeto?

22. Os produtores se adequam as regras ambientais? Eles mantem ou recompoem as ARL e as APPs? Eles declaram a SEMMA as áreas a ser queimadas?

23. Quais são os freios ao respeito da lei ambiental?

b) A propos de l'émission des CAR et l'application des nouvelles normes environnementales, avec les employés des SEMMA, SEMA et bureaux d'études

Identificação do entrevistado

1. Nome do entrevistado: ……
2. Data e localização: ……..
3. Nome da instituição:……
4. Função do entrevistado: …….
5. Telefone: ( )…….. Email:……

CAR

6. Qual é a proporção da área já cadastrada (CAR) em Paragominas/Redenção?

7. A SEMMA é habilitada para validar os Cars provisorios? Qual é o procedimento (geoprocessamento, vistoria…) ?

8. Existem critérios para avaliar a localização da ARL (paísagem, connetividade, tipo de solo…)?

Licencimanto

9. Os processos de licenciamento de atividades urbanas e rurais (licença prévia, de instalação e operação) e a emissão do LAR foram descentralizados para a SEMMA?

10. Número de LAR concedidos o último ano: .....

11. Qual é o prazo médio?

12. Existe uma derogação para as propriedades de menos de 4 MF?

Limpeza de pasto

13. A instrução normativa 02 do 26 fevereiro 2014 autoriza a limpeza de pasto sob autorização. Em Paragominas/Redenção, quem está habilitada para autorizar a limpeza de pasto?

14. Qual é o processo a seguir para o produtor?

15. "Considera-se vegetação secundária em estágio inicial de regeneração aquela resultante dos processos naturais de sucessão, após supressão total da vegetação primária por ações

antrópicas ou causas naturais, que tenham sofrido conversão total: do solo nos últimos 5 (cinco) anos; ou entre 5 (cinco) e 20 (vinte) anos, cuja a área basal total seja menor que 10 m2/ha em municípios com mais de 50% (cinquenta por cento) de cobertura de floresta primária original; ou 5 m2/ha em municípios com menos de 50% (cinquenta por cento) de cobertura de floresta primária original". Como verifica isso?

16. Número de autorizações concedidas o ultimo ano: .....

Queimadas controladas

17. Quem está habilitado para autorizar as queimadas controladas?

18. Qual é o processo?

19. Tem uma derogação para os pequenos?

20. Número de autorizações concedidas em 2013: ..... em 2014: .....

Monitoramento e fiscalização

21. A SEMMA é habilitada para realizar atividades de fiscalização e o monitoramento ?

22. Existe um monitoramento da recomposição das ARL e das APPs?

23. Enquanto o PRA não foi validado, a SEMA/SEMMA se refere à IN n°5 de 8 de setembro de 2009?

24. Como é realizado? Geoprocessamento? Campo?

25. Se sim, o que é verificado?
- Localização ( )
- tamanho ( )
- Tipo de espécies ( )
- Metodologia para a condução da regeneração:
  Proteção das espécies nativas () ( )
  adoção de medidas de prevenção aos fatores de degradação (fogo, invasoras, isoleamento, cercamento) ( )
  adoção de medidas de prevenção, combate e contrôle ao fogo ( )
  acesso ao animais domésticos ( )

26. Derogação para a agricultura familiar : os pequenos agricultores podem explorer economicamente as APPs? Existem controle?

27. Têm controles referente ao uso de produtos químicos (fertilizantes, herbicidas…)?

Politica ambiental

28. Existe um microzoneamento ecológico e econômico em Paragominas/Redenção?

29. Existe um plano de bacia hidrografica ou um plano diretor municipal na cidade?

c) A propos des lignes de crédit avec les banques

Identificação do entrevistado

1. Nome do entrevistado: ……
2. Data e localização: ……..…
3. Nome da instituição:……..…
4. Função do entrevistado: …….
5. Telefone: ( )…….. Email:……..

Acesso ao credito

6. Quais são os documentos que a BASA exige aos grandes produtores que pedem um crédito?

7. Quais são as exigências para os pequenos produtores (menos de 4 modulos fiscais)?

8. Essas exigências são garantias do banco ou obrigação do governo federal?

9. Existe financiamentos específicos para recuperação dos passivos ambientais?

10. Existe financiamentos específicos para sistemas de produção inovadores (recuperação de pastagens degradados, pastejo rotacionado, integração agricultura-pecuária, sistemas silvopastorils? No caso que é, quais são as linhas? Programa Agricultura de Baixo Carbono? Outros?

Annexe 7. Liste des réunions sur des thèmes liés à notre recherche auxquelles nous avons assisté

Réunion	Organisateur	Intervenants	Sujets abordés	Date	Lieu
Intensification et durabilité de l'élevage					
Caravane sur la gestion de *Helicoverpa armigera*	Embrapa	Embrapa, Aprosoja	Techniques de contrôle de ce nuisible	18/03/2014	Paragominas
« Pecuária Verde »	SPRP	USP, UNESP	Résultats tecnico-économiques, environnementaux et de bien être animal	30/05/2014	Tomé Açu
« Pecuária Verde »	SRR	USP, UNESP, SPRP	Présentation de l'exemple de Paragominas	22/10/2014	Redenção
Mécanisation	Association des producteurs de Mandacaru	SEMAGRI, SEDAP	Organisation de la prochaine campagne de mécanisation (tracteur commune) et distribution de plants	15/04/2015	Mandacaru (Paragominas)
Mécanisation	Association des producteurs de Luiz Inacio	SEDAP	Organisation de la prochaine campagne de mécanisation (tracteur association) et distribution de plants	01/11/2015	Nova Paragonorte et Gleba 22 (Paragominas)
Paragominas 2030	Gouvernement du Pará	FAPESPA	Lancement du projet et présentation du diagnostic de durabilité réalisé par la FAPESPA	03/03/2016	Paragominas
Gestion environnementale					
Gestion environnementale dans les exploitations	Syndicat des Producteurs Ruraux de Paragominas	Mauricio Sarto (avocat impliqué dans l'élaboration des BPA)	Présentation des règles du nouveau code forestier (APP, ARL, CAR, LAR), nettoyage des pâturages enfrichés	29/04/2014	Paragominas
4ème PPCDAm 2016-2020	SEMA	SEMA	Co-construction du plan d'action 2016-2020 avec les acteurs locaux (producteurs, Embrapa, Emater, Incra, Semma…)	23 et 24/09/2014	Paragominas
Audience publique sur l'exigence du CAR pour l'émission du GTA en agriculture familiale	INCRA / ADEPARÁ	INCRA, ADEPARÁ, acteurs agricoles	Demande d'extension des délais et d'un appui financier et humain supplémentaire pour réaliser les CAR dans les assentamentos	17/04/2015	Paragominas
enouvellement du pacte contre la Déforestation	Gouvernement du Pará, PMV	Floram, SEMMA, prefeitura, SPRP	Diagnostic des résultats obtenus (% CAR, km² de déforestation), présentation du projet Chama Verde (récupérer forêts dégradées par le feu)	21/06/2016	Paragominas
Audience publique sur l'application du nouveau code forestier	Commission de l'Environnement et du Développement Durable de la chambre des députés	MAPA, CNA, Observatoire du Code Forestier, WWF, ISA, IPAM, TNC, ICV	Débat sur les résultats obtenus deux ans après l'application du nouveau code forestier	27/05/2014	Brasília

Annexe 8. Guide pour les entretiens semi-directifs exploratoires avec les producteurs

Identificação do entrevistado

1. Nome do entrevistado: ……..……
2. Propriedade: ……..……..……
3. Ponto GPS: ……..……..……
4. Data e localização: ……..……..…
5. Função do entrevistado: …….
6. Telefone: ( )…….. Email:……

Parte 2 : Apresentação da propriedade

7. Historico :

Chegada, evolução do gado, do tamanho da propriedade, compra de material, construção

8. Principais dados (cifras) da propriedade:
   - Gado: ……..……
   - Matriz: ……..……
   - Bois: ……..……
   - Area total: ……..……
   - Area pastos: ……..……
   - Area lavouras: ……..……
   - Area juquira: ……..……
   - Area floresta: ……..……
   - Matas ciliares: ……..……

Parte 3 : Sistema de produção :

9. Como foram instalados os pastos?

10. Quando foi instalado o último pasto?

11. Os pastos ja foram reformados? Como?

12. Como maneja as invasivas?

13. Qual (quais) espécies de capim são usadas?

14. Qual é o sistema de pastejo (continuo, rotacionado)?

15. Usa fertilizantes? coloca calcario e fosfato regularmente?

16. Usa ILPFs?

17. Usa barreiras? os pastos foram divididos há pouco tempo?

Parte 4 : localização dos usos do solo :

18. Onde são localizados os pastos? Porque?

19. Onde são localizados as areas de florestas? Porque?

20. Onde são localizados as areas de lavouras? Porque?

Parte 5 : Apps :

21. Como o gado tem acesso a água? ja instalou bebedouro?

22. Tem matas nas beiras dos igarapés?

Parte 6: Projetos da propriedade :

23. Quais são os projetos da propriedade? Vai continuar de produzir da mesma maneira?

Annexe 9. Analyse systémique des six cas d'étude

Pour chaque cas d'étude, nous décrirons les caractéristiques du milieu naturel, les facteurs de production, l'accompagnement technique et financier, les usages des sols, la conduite du système animal et végétal. Pour garder l'anonymat des exploitations suivies, nous avons modifié les noms des producteurs.

Type 1 : Exploitation familiale pionnière

Activité principale : subsistance
11 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 44 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 18%
Réserve légale et APP : 66 %
Nombre UTH : 0,3
Localisation : Paragominas – PA / Oriente

Cette exploitation a été sélectionnée dans la situation agraire n°1 « Front pionnier, agriculture itinérante sur brûlis ». L'exploitation est gérée par un jeune couple (José 32 ans et Maria 38 ans) qui ont une fille de 2 ans. Le système de production est basé sur l'élevage d'une dizaine de têtes de bovins croisés alimentés au pâturage, la culture de maïs et de manioc sur abattis-brûlis. La situation de l'exploitation est caractéristique des fronts pionniers qui présentent encore une importante couverture forestière.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel

Cette exploitation se localise dans la communauté d'Oriente, à 65 km du centre urbain de Paragominas (50 km de route goudronnée-PA-256 et 15 km de piste praticable toute l'année), soit à environ 1 h en voiture. Ce lot se situe dans la zone de vallée du fleuve Capim, en bordure d'un affluent le Potiritá. L'accès au lot depuis le village est rendu difficile en véhicule motorisé car il est nécessaire de traverser le fleuve Potiritá, soit en canoë puis de marcher 1km à pied (10km en tout), soit en moto mais cela double la distance à parcourir (18 km).
La communauté s'étend sur deux types d'unités géomorphologiques : les plateaux du Centre-Est et les vallées du fleuve Rio Capim. Nous distinguons plus précisément trois unités pédo-géomorphologiques : bordure du réseau hydrographique, fond de vallée, versant peu à moyennement découpé (zone de glacis et zone moyennement découpée par le réseau hydrographique). Les sols sont des latosols sablo-argileux chimiquement pauvres et lessivés. Ces sols sont caractérisés par une structure en macro-agrégats qui permet un bon drainage en saison humide mais ne permet pas une bonne rétention de l'eau en saison sèche.

Les facteurs de production

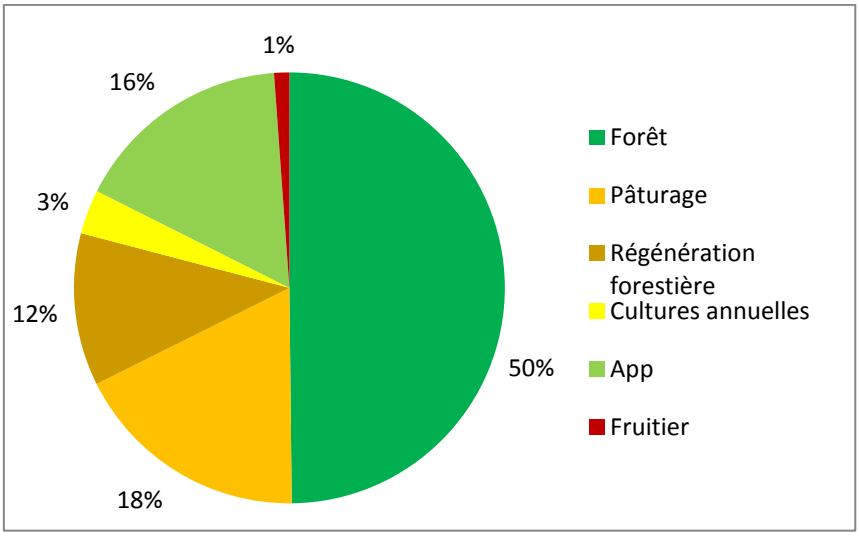
Les facteurs de production sont très limités : 0,3 UTH (Unité de travail humain), peu d'équipements motorisés (une moto, une tronçonneuse, une débroussailleuse), peu d'infrastructures (un corral en construction).

L'accompagnement technique et financier

Du fait de la situation litigieuse sur le foncier, les exploitations d'Oriente n'ont pas de document foncier leur permettant d'accéder au crédit. La communauté n'étant pas officiellement reconnue, elle dispose de très peu d'accompagnement technique. Pour la première fois en 2016, l'exploitation a eu accès au tracteur à pneus de la mairie. Elle a travaillé le sol sur 5 ha.

Les usages des sols

1/3 des forêts présentes initialement a été converti en usage productif : 7,8 ha de pâturage, 2 à 3 ha de culture annuelle (maïs, haricot, fève, patate douce en association avec du manioc), 5 ha de régénération dans le système abattis-brûlis. Sur 0,5 ha de jardin autour de la maison, l'exploitation a aussi implanté de nombreux arbres fruitiers pour l'autoconsommation de la famille (cupuaçu, orangers, citronniers, noix de caju, cacao, cocotiers, poivre, etc.). Le reste est recouvert de forêt : 50% en réserve légale et 16% en APP, soit 29 ha.



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Systèmes de cultures

- Itinéraire technique

Type	**Avant 2014 : Traditionnel**	**2015-2016 : Mécanisé**
Cultures	Maïs x manioc x légumes Variétés population	Maïs x capim
Précédent	Jachère (friche régénérée de plus de 3 ans) ou forêt	Jachère (friche régénérée de plus de 3 ans)
Préparation du sol	Abattis-brûlis manuel	Passage d'un tracteur à chenille Brûlis de la végétation "sur place"
Amendement de fond	Non	Non
Plantation	1) maïs (en quinquonce) 2) manioc 15 jours après	1) maïs (en quinquonce) 2) manioc 15 jours après
Gestion adventices	3 sarclages manuels : 1) 20 jours après semis 2) après formation de l'épi de maïs, 3) août/septembre (étaler paille de maïs)	3 sarclages manuels : 1) 20 jours après semis 2) après formation de l'épi de maïs, 3) août/septembre (étaler paille de maïs)
Irrigation	Non	Non
Récolte (kg/ha)	Manuelle	Manuelle
Rendement	Maïs : 750 kg/ha Manioc : 3600 a 4500 kg/ha Haricot : 300 kg/ha	Maïs : 750 kg/ha
Culture suivante	Friche (régénération) ou pâturage	Pâturage

- Vente

Autoconsommation du maïs et des légumes.
Vente du manioc racine ou en farine : 120 caisses/tarefa x 4 R$/caisse (moyenne) x 8 tarefa = 3840 R$

- Hiérarchie des critères de décisions de localisation :

1) Terre avec peu de relief (éviter érosion du fait du sol nu entre les rangs)
2) Parcelles avec régénérations de plus de 3 ans. S'il n'y en a pas il choisit des forêts (préférence pour régénérations car cela demande moins de travail : moins de souches, de racines …).

- Devenir des cultures annuelles

La production de farine de manioc a permis à la famille de subvenir à ses besoins jusqu'à aujourd'hui (achat moto, investissement dans le troupeau) et d'ouvrir petit à petit le lot. Ils aimeraient continuer de fabriquer le nécessaire pour les besoins de la famille (transformer 1 à 2 tarefas/an) et vendre le reste « sur pied ». Ils estiment que le prix actuel de la farine ne compense pas la main d'œuvre investie pour la fabriquer (nécessité de payer de la main d'œuvre extérieure avec la baisse de la main d'œuvre familiale).

Système d'élevage

- Structure du cheptel bovin

L'exploitation possède en 2015 12 têtes issues d'un métissage viande x lait. Comme il y a peu d'animaux, l'éleveur regroupe toutes les têtes en un seul lot (même avec le reproducteur).

Animal	**Nombre de têtes**	**Poids Vif**	**Nombre jours exploitation**	**Equivalents UA**	**Nombre UA**
Troupeau lait					
Vaches en lactation	2	380	365	1	2
Vaches taries	1	380	365	1	1
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	3	135	365	0,25	0,75
Génisses (1-2 ans)	3	250	365	0,5	1,5
Taureau	1	600	365	1,25	1,25
Equins					
Chevaux	2	300	365	0,75	1,5
Total	**12**				**8,0**
Charge / ha	**1,54**				**1,02**

- Reproduction

Un taureau (race *Tabapuã*) assure la reproduction par monte naturelle. Le reproducteur est en métayage sur la ferme. Les vêlages ont lieu toute l'année. L'âge des génisses au premier vêlage est de 36 mois. L'IVV (Intervalle Vêlage Vêlage) n'est pas mesuré.

- Vente et renouvellement

Le troupeau sert d'épargne pour le couple. Tous les veaux mâles sont vendus au sevrage (8 mois) à un poids vif de 180 kg à 4 R$/kg. Toutes les velles sont conservées pour accroître la taille du cheptel. Cependant, en fonction des nécessités, l'exploitation peut décapitaliser (en 2015 par exemple, ils ont échangé leur ancienne moto une vache et un veau contre une moto).
Les vaches sont traites deux fois par semaine pour l'autoconsommation de la famille (4 L/traite).
La mortalité est variable.

- Alimentation et gestion sanitaire

Le troupeau est au pâturage toute l'année (7,8 ha) et reçoit et 125 g/jour/tête de sel minéral (500/365/11). Il est vacciné contre la fièvre aphteuse (20 doses / an).

- Volailles

L'exploitation élève aussi 20 poules pour la consommation personnelle (viande et œufs).

Système fourrager

- Gestion des pâturages

Le pâturage est formé d'une association de graminées *Brachiaria Brizantha* et *Panicum Maximum cv Mombaça*. L'éleveur implante des plants avec une canne planteuse. Le mode de pâturage est alterné (déplacement du troupeau en fonction de la hauteur d'herbe – seuil de 30 cm).

- Formation des pâturages

Les pâturages ont été formés par abattis-brûlis. Entre 2007 et 2015, il a implanté en moyenne 1 ha/an. 3 parcs ont été clôturés (fil de fer).

Parc	**1**	**2**	**3**
Taille	2,4 ha	1,6 ha	3,4 ha
Année de formation	2007	2009	2012
Précédent	maïs/manioc	maïs/manioc	maïs/pâturage

- Gestion de la fertilité

Le système d'abattis-brûlis et les déjections animales mettent à disposition les éléments nutritifs pour le pâturage. L'éleveur n'apporte aucun intrant supplémentaire.

- Gestion des adventices

Le nettoyage est manuel (faucille) et se fait 3 fois par an (2 fois en hiver, 1 en été). Il a acheté une débroussailleuse portative (à fil) mais ne s'en sert pas dans les pâturages à cause de la présence d'arbustes ligneux. L'éleveur n'utilise pas le feu de manière volontaire. Cependant, des feux accidentels se sont régulièrement propagés dans ces pâturages (récemment en 2015, 2016).

- Réforme et division des pâturages

Les pâturages sont récents et n'ont jamais été réformés (brûlis régulier mais pas de surpâturage).

- Abreuvement

Le cheptel s'abreuve au niveau d'affluents du fleuve principal. En saison sèche, l'exploitation doit laisser les clôtures des parcs ouvertes pour que les bovins puissent accéder aux sources superficielles. En saison humide, une retenue d'eau sert d'appoint.

Gestion des zones environnementales

- APP

La seule zone classée en APP dans l'exploitation correspond à la bordure du cours d'eau. Les exploitants ont laissé régénérer la ripisylve sur 300 m de large et y ont planté de l'açaí et du buriti. Cette zone marécageuse n'a pas de potentiel agronomique pour l'éleveur. De plus, ils considèrent important de maintenir des forêts ripariennes pour la préservation de l'eau (éviter l'envasement) et maintenir de l'ombre pour le bien être de la famille et du troupeau.

- Réserve légale

50% du lot est encore couvert de forêt même si elle est dégradée (exploitation par les forestiers dans le passé, feu en particulier en 2015). L'exploitation y prélève du bois (Tiriba, Jacana, Biurana, Sapucaia) pour la construction (maison, corral, clôtures). Il voudrait obtenir une autorisation pour défricher plus et implanter davantage de surfaces en pâturage.

- Adéquation environnementale

L'exploitation respecte les deux règles les plus importantes du code forestier pour l'agriculture familiale : elle respecte l'APP et n'a pas déforesté de forêt native depuis 2008. En 2015, elle a aussi fait un CAR pour satisfaire les exigences relatives à l'obtention du GTA et des vaccins.

Type 2 : Exploitation familiale consolidée sans feu

Activité principale : viande
105 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 135 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 91%
Réserve légale et APP : 9%
Nombre UTH : 1
Localisation : Paragominas – PA / Cacimbão, Luiz Inacio

Cette exploitation a été sélectionnée dans la situation agraire n°2 « Agriculture familiale diversifiée en périphérie ». L'exploitation est gérée par un couple de 56 ans (Silvio et Silvia). Le système de production est basé sur l'élevage viande de type naisseur et des techniques de production traditionnelles (sarclage manuel, aucun intrant, implantation avec feu). La situation de l'exploitation est caractéristique des élevages en fronts post-pionniers qui ont défriché la quasi-totalité de leur couverture forestière et n'ont plus de réserve forestière source de fertilité naturelle.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel
Cette exploitation se localise dans l'assentamento de Luiz Inacio, plus précisément dans la communauté de Cacimbão, au Nord-Est de la commune. Elle est distante de 100 km du centre urbain de Paragominas (40 km sur la BR-010 et 60 km de piste difficilement praticable en hiver), soit environ 2h30 en voiture. Les habitants du Nord de Luiz Inacio utilisent davantage les services de la commune de Nova Esperança do Piriá (30 km au Nord). L'exploitation est située à 200 mètres du village de Cacimbão.
L'assentamento s'étend sur trois types d'unités géomorphologiques : les plateaux du Centre-Est, les vallées et dépression du fleuve Gurupi. Nous distinguons plus précisément quatre unités pédo-géomorphologiques : bordure de réseau hydrographique, fond de vallée avec des latossols sablo-argileux, versant découpé (pente moyenne), plateau argileux.

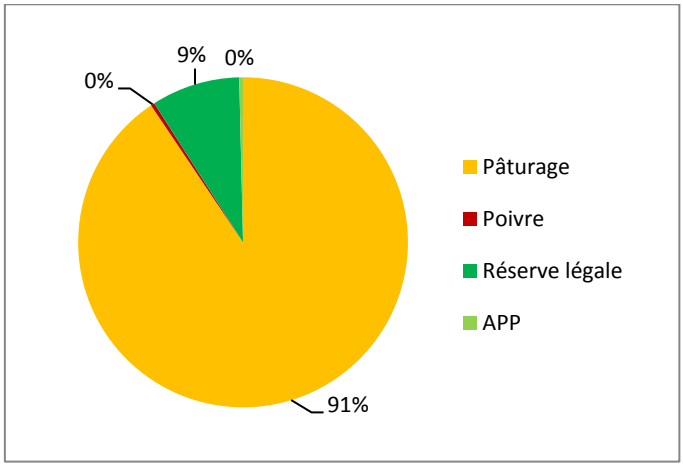
Les facteurs de production
Main d'œuvre : 1 UTH
Equipement(s) motorisé(s) : débroussailleuse portative, 2 véhicules (une moto et une voiture)
Infrastructures : un corral en terre non couvert (2004), un puit creusé (28 m de profondeur)

L'accompagnement technique et financier
L'assentamento est officiellement reconnue depuis 2006, toutefois les limites foncières de l'exploitation n'ont pas encore été démarquées par l'INCRA, elle ne possède pas de titre foncier officiel. L'exploitation n'a jamais contractualisé de crédit PRONAF et n'a pas pour projet de le faire. Elle a reçu une aide de l'INCRA de R$ 15.000 pour construire sa maison.
Silvio et Silvia n'ont pas reçu d'assistance technique depuis qu'ils sont installés. « On produit avec notre propre savoir. Nous sommes nés à la ferme ». Depuis la création de

l'assentamento, l'INCRA a sous-traité cette mission à trois entreprises d'assistance technique. Mais du fait des retards ou défauts de paiements, elles n'ont pas continué dans le temps leur mission.

Les usages des sols

Le paysage de l'exploitation est majoritairement fourrager avec 122 ha de pâturage. En 2015, l'exploitation s'est diversifiée dans le poivre et a implanté 500 pieds (0,5 ha). Elle possède encore 11,7 ha de forêt primaire bien que dégradée et a commencé à régénérer la ripisylve en bordure du cours d'eau (moins de 0,5 ha).



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Système d'élevage

- Productions animales

Animaux	Effectif moyen annuel	Débouché
Bovins	105	Vente viande, autoconsommation lait
Volailles	25	Autoconsommation d'oeufs et poules caipiras
Porcs	A arrêté en 2014	
Equins	2	1 cheval, 1 jument

- Structure du cheptel bovin

L'exploitation possède en 2015 un total de 105 têtes : 83 têtes de race allaitante zébu Nelore et 22 têtes de race laitière. Le troupeau est divisé en deux lots (lait, viande). Le laitier pâture les parcs à proximité du corral car la nuit les veaux sont séparés des mères et restent dans le corral.

L'exploitation a eu un plus grand cheptel (150 têtes en 2014), mais elle a dû vendre 58 têtes pour payer des fais médicaux.

Animal	Nombre de têtes	Poids Vif	Nombre jours exploitation	Equivalents UA	Nombre UA
Troupeau viande					
Vaches (naissance)	0	440	365	1	40
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	25	135	365	0,25	6,25
Génisses (1-2 ans)	10	190	365	0,5	5
Génisses (2-3 ans)	7	300	365	0,75	5,25
Taureau	1	700	365	1,25	1,25
Troupeau laitier					
Vaches en lactation	7	400	365	1	7
Vaches taries	4	400	365	1	4
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	6	130	365	0,25	1,5
Génisses (2-3 ans)	2	300	365	0,75	1,5
Taureau	1	700	365	1,25	1,25
Equins					
Chevaux	2	400	365	0,75	1,5
Total	**105**				**74,5**
Charge / ha	**0,86**				**0,61**

- Reproduction

Un taureau Nelore (acheté) et un taureau Tabapuã (né sur l'exploitation) assurent la monte naturelle. Les vêlages sont échelonnés dans l'année. Les taureaux sont renouvelés tous les 5 ans. Pour réduire la production laitière et éviter la consanguinité (taureau croisé avec les mères ou velles), les éleveurs croisent le Nelore avec les laitières et le Tabapuã avec les allaitantes.

- Vente et renouvellement

Hormis la décapitalisation exceptionnelle de bovins, le taux de réforme des mères est de 20% par an. Elles sont vendues à un poids vif de 440 kg à 3,80 R$/kg. Tous les veaux mâles ainsi que les velles qui ne servent pas au renouvellement du troupeau sont vendus au sevrage (8 mois, poids vif de 190 kg) entre 4,20 R$/kg à 4,40 R$/kg. L'exploitation vend également le surplus de lait qui n'est pas autoconsommé (rendement = 6 vaches x 4 L/vache/jour en saison humide).

- Alimentation et gestion sanitaire

Le troupeau est au pâturage toute l'année et reçoit 100 g/jour/tête de sel minéral (un mélange de 50% de sel minéral de croissance et de 50% de sel minéral basique).
Le troupeau est vacciné contre la fièvre aphteuse (250 doses/an), la brucellose (30 doses), et la rage (140 doses). Il reçoit également un traitement anti-vermifuge.

Système fourrager

- Gestion des pâturages

Le pâturage est formé de graminées de *Brachiaria Brizantha*, ou *Panicum Maximum cv Mombaça* ou de *Massaï*. Le mode de pâturage est alterné (déplacement du troupeau en fonction de la hauteur d'herbe). Toutefois en saison sèche, le cheptel pâture de façon continue s'il manque d'herbe.

- Formation des pâturages

Les 122 ha de pâturages ont été implantés derrière une association maïs/manioc ou directement après abattis-brûlis des régénérations. Entre 2004 et 2015, ils ont implanté en moyenne 11 ha/an et ont formé 7 parcs.

N° parc	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Surface	18 ha	14 ha	9,7 ha	24,7 ha	21 ha	13,2 ha	22 ha
Espèces	Mombaça / Brachiara B	Brachiara B	Brachiara B	Brachiara B	Mombaça	Mombaça / Massaï	Brachiara B /Mombaça
Lot	viande	lait	lait	viande	viande	viande	viande
Année implantation	2007-2008	2005	2006	2009	2013	2013-2014	2007
Précédent	Maïs x manioc	Jachère	Maïs x herbe	Maïs x herbe	Maïs x manioc	Jachère	Maïs x manioc
Clôture	2008	2005	2007	2010	2013	0	2008
Enfrichement	0	0	0	Localisé pente	0	Enfriché (sans clôture)	Localisé fond du parc
Passage feu	2014	2007	2015	2014	2015	2014	2014
Abreuvement	Retenue	Retenue	Retenue + abreuvoir (été)	Retenue	Retenue	Retenue	Cours d'eau
Unité géomorphologique	Fond vallée	Fond vallée	Fond vallée	Plateau, cuirasse, versant escarpé	Fond vallée	Versant peu ondulé	Fond vallée

- Gestion de la fertilité

L'éleveur n'apporte aucun intrant. Les pâturages bénéficient encore des résidus de la fertilité naturelle apportée par le brûlis de la couverture forestière.

- Gestion des adventices

Planter dense : Il plante plus que ce qui est recommandé (40 kg/ha) afin que le pâturage couvre le sol et ne laisse pas d'espace vide où les adventices pourraient pousser. Il considère de plus que le *Brachiaria Brizantha* germine mieux quand il est planté plutôt que semé à la volée.
Désherbage : Le nettoyage se fait à la faucille quand les repousses sont ligneuses, avec la débroussailleuse portative si elles sont encore herbacées. Selon les années, cela lui coûte entre 5000 et 8000 R$ de nettoyer toute la propriété (entre 100 et 160 journées de travail pour nettoyer 122 ha, soit en moyenne 1 journée/ha/an). Il n'a jamais utilisé d'herbicide mais pourrait en appliquer de façon localisée dans deux parcs.
Usage du feu : L'exploitation n'utilise plus le feu pour nettoyer les pâturages depuis 2008. Cependant, régulièrement le feu entre de manière accidentelle (ces trois dernières années, il est entré deux fois). Avec le vent, le feu se propage rapidement. Le préjudice économique est élevé : location de pâturage (R$ 4000 en 2014-2015), re-semis du pâturage, surveillance (paiement à la journée d'une personne), réorganisation du travail (impossible de sortir du lot entre octobre et décembre).

- Réforme et division des pâturages

Jusqu'aux deux épisodes consécutifs de sécheresse de 2015 et 2016 combinés à une invasion de *lagarte* (chenille), les pâturages étaient productifs. Mais, ces trois évènements ont fortement dégradé la couverture fourragère, et ont conduit à l'envahissement des pâturages par des adventices herbacées ou des recrus forestiers.

Gestion des zones environnementales

- APP

L'exploitation est bordée par un cours d'eau de 2 m de large. La ripisylve est en processus de régénération naturelle bien que régulièrement dégradée par le feu. L'objectif est de protéger l'eau et le sol (maintenir le débit d'eau et éviter des envasements), et fournir de l'ombre au troupeau. Mais Silvio est conscient qu'une action de conservation à un niveau collectif (en amont et en aval) est nécessaire pour maintenir le débit de la rivière.

- Réserve légale

Les exploitants ont acquis la ferme avec moins de 10% du lot en forêt primaire. Les exploitants n'ont jamais voulu défricher ce fragment de forêt primaire. Ce fragment a été régulièrement dégradé par le feu. L'exploitation n'y prélève ni bois, ni produits forestiers non ligneux.

- Adéquation environnementale

L'exploitation respecte les règles du code forestier de 2012 : pas de nouvelle déforestation après juillet 2008 et recomposition de l'APP. L'exploitation n'a pas encore de CAR.

Type 3 : Exploitation familiale intensive en intrants, lait

Activité principale : lait
100 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 127,84 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 64%
Réserve légale et APP : 35 %
Nombre UTH : 3
Localisation : Redenção – PA / Arraiaporã I

Cette exploitation a été sélectionnée dans la situation agraire n°3 « Agriculture familiale se spécialisant dans le lait - intensification ». L'exploitation est gérée par un couple d'une quarantaine d'années (Manoel et Rosa) qui ont deux enfants (16 et 7 ans). La situation de l'exploitation est caractéristique des élevages en fronts post-pionniers présentant des ressources fourragères et des sols dégradés du fait d'une mauvaise gestion de la charge de bovins et d'un excès de l'usage du feu. Après une expansion du système d'élevage allaitant au détriment de la forêt, l'exploitation a trouvé une voie de sortie en se reconvertissant dans l'élevage laitier intensif et la vente directe.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel

Recanto da Serra est localisée dans l'assentamento Arraiaporã I, à 40 km du centre urbain de Redenção (30 km de route goudronnée-BR-155 et 10 km de piste praticable toute l'année). Le lot se situe sur une unité géomorphologique de type pénéplaine en bordure de la Serra.
Nous distinguons trois unités pédo-géomorphologiques : le réseau hydrographique bordé de bas fond (présence d'eau résiduelle dans le sol), des fonds de vallées avec affleurement rocheux, des collines marquées, et des versants escarpés sur la Serra. D'après la classification du Pará Rural, il existe deux types de sol : des latosols sablo-argileux et des néosols constitués d'une faible épaisseur de matière minérale et organique au niveau des affleurements rocheux avec un fort risque d'érosion. Ces deux types de sols sont acides avec une faible fertilité naturelle.

Les facteurs de production

3 UTA : le couple, leur fils plus âgé et un frère de la famille
Equipements :
- Propriétaire (100%) : charrue (14 disques), tracteur 75 CV, débroussailleuse tractée (1,3 m), système d'irrigation par aspersion.
- En société : semoir 4 rangs et ensileuse (acheté en copropriété avec un autre agriculteur familial de la communauté).

Infrastructures : corral, salle de traite avec deux postes, tank à lait, 3 abreuvoirs

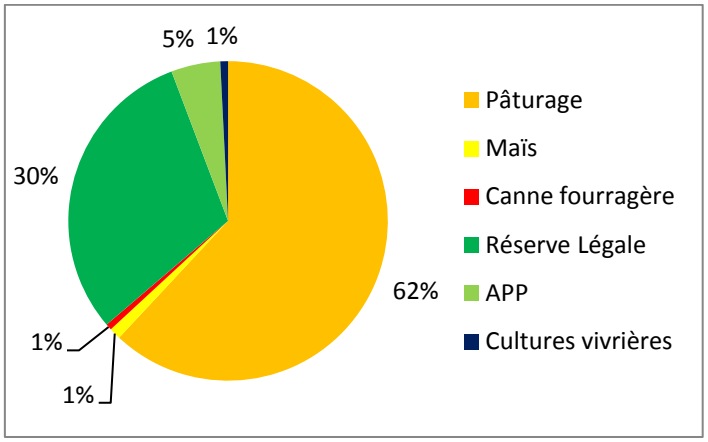
L'accompagnement technique et financier

Les exploitants ont été enregistrés au registre des bénéficiaires du programme de réforme agraire et possède un titre foncier avec géoréférencement des limites de l'exploitation.

L'exploitation a ainsi pu contractualiser deux crédits PRONAF : un PRONAF A en 2005 (achat de 10 vaches laitières métissées) et un PRONAF Mais Alimentos en 2014 (achat de 32 vaches laitières à R$ 2500 / vache soit un total de 80000 R$).
L'exploitation est intégrée dans les réseaux techniques. Elle est accompagnée techniquement par l'AgroPará, une entreprise d'Assistance Technique et d'Extension Rurale (ATER) contractualisée par l'INCRA (visites, formation, journées au bord du champ, séminaire…) et par les laiteries.

Les usages des sols

64% des terres sont en usage fourrager : 79 ha de pâturage, 2,5 ha de maïs grain, 0,8 ha de canne fourragère. Les 35% restant sont constitués de la réserve légale (39 ha) et en APP (6,4 ha).



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Systèmes de cultures

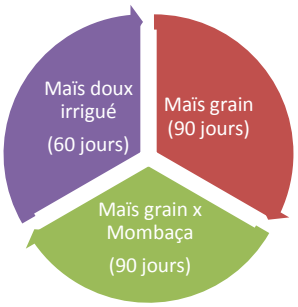
- Itinéraire technique

	Maïs ensilage	**Maïs x Mombaça ensilage**	**Maïs doux irrigué**	**Canne fourrragère permanente**
Préparation du sol	Disques	Disques	Disques	Disques
Calcaire	0	0	0	1200 kg/ha
Plantation (période et densité)	Fin octobre 20 kg/ha	Maïs : Janvier Mombaça : 3 semaines après 20 kg/ha maïs 15 kg/ha mombaça	A partir du mois de mai. 0,1 ha tous les 8 jours 30 kg/ha	Plantation en 2013 Préconisé : entre 10 et 15 T/ha
Fertilisation annuelle (kg/ha)	5.25.15 : 200 kg/ha Urée : 150 kg/ha 20.0.20 : 200 kg/ha	5.25.15 : 200 kg/ha Urée : 150 kg/ha 20.0.20 : 200 kg/ha	5.25.15 : 200 kg/ha Urée : 150 kg/ha 20.0.20 : 200 kg/ha	Superphosphate[1] : 200 kg/ha et 70 kg/ha de chlorure de potassium[2]

[1] 16% de P_2O_5
[2] 60% de P_2O_5

	---------- N : 119 P_2O_5 : 50 K_2O : 70	---------- N : 119 P_2O_5 : 50 K_2O : 70	---------- N : 119 P_2O_5 : 50 K_2O : 70	Urée : 100 kg/ha ---------- N : 46 P_2O_5 : 32 K_2O : 42
Gestion adventices	Sarclage manuel	Pas de désherbage	Sarclage manuel	Sarclage manuel
Irrigation	0	0	10 mm/jour	0
Date récolte	Janvier	Avril	Échelonné entre juillet et septembre/octobre	
Rendement	38,7 T/ha d'ensilage avec épis	38,7 T/ha d'ensilage de maïs avec épis et pâturage	18000 épis/ha + ensilage sans épis (non évalué)	Année 2 : 72,5 T/ha d'ensilage
Cycle	90 jours	90 jours	60 jours	Jusqu'à 11 récoltes

- Rotation dans l'année



- Hiérarchie des critères de décision de localisation des cultures fourragères

1: Pierrosité à la surface du sol : absence d'affleurements rocheux (sinon impossibilité de passer les outils)
2 : Topographie : peu pentu (mécanisable)
3 : Distance : près de la salle de traite (ensilage stocké au champ sous bâche, autoconsommé par les vaches en lactation) et de la route (écoulement de la production)
4 : Etat de la végétation : derrière un pâturage dégradé ou une régénération. Jamais dans la réserve légale ni en APP.

- Vente

L'ensilage de maïs et de canne fourragère est autoconsommé par le troupeau. Les épis de maïs sont vendus directement aux supermarchés de Redenção, en saison sèche, à R$ 50,00 pour 100 épis.

- Futur des cultures annuelles

L'exploitation planifie de continuer à produire de l'ensilage de maïs et de canne pour l'autoconsommation du troupeau en saison sèche et du maïs doux pour le vendre en direct aux supermarchés.

Système d'élevage

- Productions animales de l'exploitation

Animaux	Effectif moyen annuel	Débouché
Bovins	99	Vente
Volailles	80-150	Autoconsommation et vente d'œufs et poules caipiras
Porcs	6	Autoconsommation
Equins	4	2 juments, 2 chevaux pour la conduite du troupeau
Pisciculture	1500 tambaquis	Autoconsommation et vente dans la commaunuté

- Structure du cheptel bovin

L'exploitation possède en 2015 99 têtes de race laitière. Initialement, le troupeau était orienté vers la production de race à viande, zébu (jusqu'à 225 têtes en propriété et en métayage). Mais petit à petit l'exploitation s'est spécialisée dans la production laitière. En 2014, elle a vendu ses dernières têtes de race à viande.

Animal	Nombre de têtes	Poids Vif	Equivalents UA	Nombre UA
Vaches en lactation	21	450	1	21
Vaches taries	23	450	1	23
Taureaux	3	700	1,25	3,75
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	32	180	0,25	8
Génisses (1-2 ans)	10	300	0,5	5
Génisses (2-3 ans)	10	400	0,75	7,5
Total	**99**			**68**

- Reproduction

De 1998 à 2012 : Monte naturelle.
2012 : IATF (Insémination Artificielle de Temps Fixe) via le projet de l'industriel LBR (« 300 balde »).
2013-2014 : IA car taux de réussite à la première IATF faible (45%) et coût élevé.
Depuis 2015 : Monte naturelle (suite à un cambriolage qui a démotivé les exploitants).
Le taureau est de race Girolando, un croisement 5/8 de zébu Gir et de Prim'Holstein. La race Gir apporte la résistance aux conditions tropicales (chaleur, pluies, maladies) et la race hollandaise la productivité laitière.
Les vêlages sont étalés dans l'année afin de maintenir la production laitière. L'âge du premier vêlage pour les génisses est de 3 ans. L'IVV est en moyenne de 1 an et 3 mois avec la monte naturelle.

- Alimentation

L'alimentation est différentiée entre l'hiver et l'été et entre les types d'animaux. Le troupeau est divisé en deux lots avec des besoins différents : les vaches en lactation et les vaches taries/génisses.

	Hiver *Novembre à mai*	**Eté** *Juin à octobre*
Vaches en lactation	Pâturage tournant 150 g sel	30 kg/jour d'ensilage de maïs (ou de canne) 2 kg/jour de ration (1 le matin et 1 l'après midi) et 150 g sel
Vaches taries et génisses	Pâturage alterné + sel	Pâturage alterné + sel

L'exploitation achète les matières premières et fabrique la ration avec 41% de maïs, 35% de tourteau de soja, 20% de tourteau de coton, 2% de calcaire, 1% de phosphate bicalcique et 1% d'urée. Pendant la saison sèche, le coût de l'alimentation (ration et ensilage) est supérieur au produit de la vente du lait. C'est pour cela que l'exploitation a décidé de produire du maïs doux afin de pouvoir payer le coût de la ration avec la valeur ajoutée apportée par la vente des épis de maïs. Le maïs sans épi est par ailleurs ensilé ce qui permet d'accroître les stocks d'ensilage (bien que cela nécessite d'équilibrer la ration car l'ensilage sans épis est moins riche en énergie).

- Gestion sanitaire

Le troupeau est vacciné contre la fièvre aphteuse (200 doses/an), la brucellose (20 doses), la clostridiose (100 doses) et la rage (200 doses). Il reçoit également un traitement antivermifuge.

- Traite

Eduardo fait la traite 1 fois par jour entre 6h30 et 8h00. A partir de midi, il sépare les veaux des mères (corral) et ne tire le lait que de trois trayons. En 2012, l'exploitation est s'équipée d'une salle de traite de 2 postes (valeur : R$ 5600) et d'un tank à lait.

- Vente et renouvellement

Lait : Après avoir vendu le lait aux laiteries (Leite Bom jusqu'en 2005, puis LBR jusqu'en 2012, puis Lanos et Nobre), depuis 8 mois, l'exploitation vend le lait à R$ 1,25/litre à une glacerie de Redenção. Les avantages de ce nouveau débouché sont : la rémunération de la qualité du lait, la fréquence de paiement (tous les 15 jours). L'exploitation assure les livraisons deux fois par semaine avec un conteneur de transport non refroidissant. Les quantités de lait varient entre été (100 litres/jour/20 vaches) et hiver (120 litres/jour/27 vaches).

Veaux et vaches de réforme : Tous les veaux mâles sont vendus (en moyenne R$ 850/veau). Les velles femelles sont conservées sur l'exploitation pour le renouvellement des mères. Le taux de réforme des mères est de 17% par an. La mortalité atteint 1 veau par an en moyenne.

Système fourrager

- Gestion des pâturages

Trois types d'espèces de graminées sont utilisées : *Brachiaria Brizantha*, le *panicum Maximum cv mombaça* et dans les bas fond le *Brachiara humidicola* (quicuio da Amazônia). On distingue trois types de conduite de pâturage dans l'exploitation.

Mode de pâturage	Alterné	Tournant	Tournant intensif
Nombre de parcs	5	6	1 divisé en 24
Taille moyenne	8 ha	3 ha	1 ha
Espèces de graminées	Brachiaria Brizantha ou Mombaça	Brachiaria Brizantha	Mombaça
Lot d'animaux	Génisses et vaches taries, taureau	Génisses et vaches taries, taureau Vaches en lactation	Vaches en lactation (14)
Charge animale	Moins de 1 UA/ha		Hiver : 14,31 UA/ha Eté : 0 UA/ha
Nombre de jours / parc	Variable selon hauteur de l'herbe (minimum : 25 cm)	Variable selon hauteur de l'herbe (minimum : 25 cm)	1 jour/parc
Année formation	De 1998 à 2002	De 1998 à 2002	2012
Densité semis	15 kg/ha	15 kg/ha	15 kg/ha
Fertilisation implantation	0	0	Calcaire : 1200 kg/ha Fumier : 50 T/ha[1] Super simple phosphate : 350 kg/ha Urée : 72 kg/ha Chlorate de potassium : 150 kg/ha
Fertilisation d'entretien	0	0	Super simple phosphate: 2 x 350 kg/ha Chlorate de potassium: 2 x 150 kg/ha Urée: 3 kg/parc/jour x 180 jours = 540 kg/ha **N** : 250 **P2O5** : 112 **K2O** : 180
Accès à l'eau	Cours d'eau, retenue	Abreuvoir / cours d'eau	Abreuvoir
Type de clôtures	Fil de fer	Fil de fer	Electrique, couloir

- Formation des prairies

Les prairies ont été implantées directement après abattis-brûlis de jachère ou après des cultures vivrières (riz/maïs/haricots/citrouilles) entre 1998 et 2005. Le rythme d'implantation a été de 11 ha/an.

- Réforme et division des pâturages :

[1] % de N nas dejeições : 6,4% (segundo os calculos realizados por Hurand, 2015)

Les prairies n'ont jamais été réformées, excepté le pâturage tournant. Les prairies à l'avant du lot ont seulement été divisées en petits parcs de 1 ha pour mieux gérer l'herbe. Toutefois plusieurs pâturages sont relativement dégradés (dégradation écologique) et mériteraient d'être réformés :

Parc	Type de pâturage	Etat de dégradation du pâturage
1 - 2	Mombaça	Problème de cicadelle, besoin de le resemer
3 - 4	Brachiaria Brizantha	Invasion de capim-sapé, Imperata brasiliensis (les plus dégradés)
5 - 6	Brachiaria Brizantha	Invasion de assapeixe (Vernonia polyanthes), melosa (Conyza bonariensis), malva (mauve)

- Gestion des adventices

Le désherbage est manuel. L'éleveur n'utilise plus le feu depuis 10 ans. Le dernier feu accidentel qui est entré dans l'exploitation date de 2011. Il a brûlé deux pâturages.

Gestion des zones environnementales

- APP

Trois cours d'eau traversent l'exploitation : deux permanents et un intermittent. Quand ils se sont installés sur le lot, ils ont tout déforesté pour faciliter l'accès du troupeau au cours d'eau. En 2007, face à un processus d'envasement du cours d'eau, ils ont commencé à récupérer les ripisylves via la régénération naturelle et l'implantation de pieds de buriti. « A cette époque, nous devions mettre des sacs pour maintenir les berges et éviter l'érosion. Aujourd'hui, nous avons retrouvé un débit normal ». Ils ont également installé deux abreuvoirs et clôturer la bordure pour empêcher l'accès du troupeau et éviter le piétinement de la bordure du cours d'eau. L'eau de l'abreuvoir est filtrée ce qui est recommandé en production laitière.

- Réserve légale

30% de la réserve forestière du lot a été maintenue mais le bois a déjà été exploité. Aujourd'hui, les exploitants n'ont plus de bois pour renouveler les poteaux des clôtures qui se sont dégradés. Ils le regrettent car les poteaux de bois d'eucalyptus traités se vendent aujourd'hui R$ 15/unité.

- Adéquation environnementale

L'exploitation respecte les deux règles les plus importantes du code forestier pour l'agriculture familiale : l'APP et l'absence de déforestation depuis 2008. Elle a aussi 2 CAR : un élaboré en 2010 par une entreprise privée (suite aux mesures de répression Arc de Feu) et un élaboré en 2014 par l'AgroPará. Le CAR lui a été utile pour accéder à des crédits mais n'a pas été nécessaire pour vendre des produits.

Type 4 : Fazenda extensive de grande échelle bas niveau d'intrants

Activité principale : naisseur-éleveur-engraisseur de Nelore
2200 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 9955 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 43%
Réserve légale et APP : 53 %
Nombre UTH : 7
Localisation : Paragominas / PA 125, km 204, 22 km

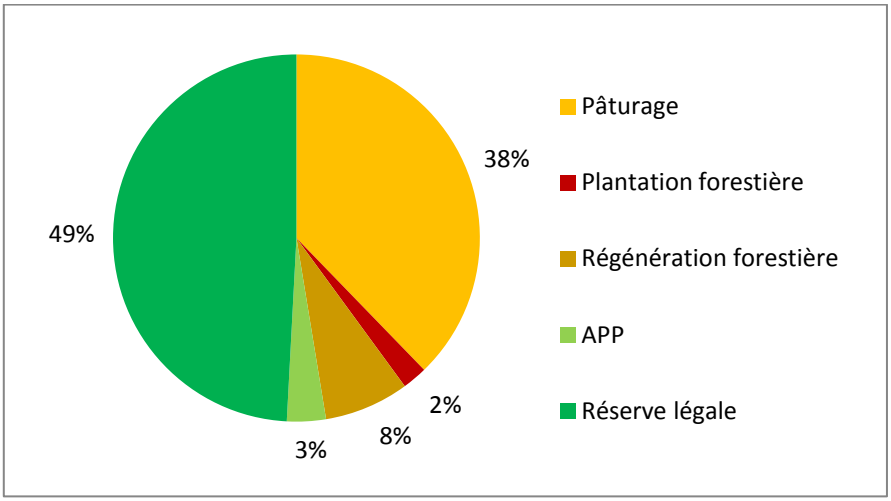
Ce cas type est en réalité un groupe de quatre fazendas. Il a été sélectionné dans la situation agraire n°4 « Elevage extensif en périphérie – déforestation zéro ». Cette exploitation est caractéristique des exploitations de grande échelle en début d'intensification. Le système d'élevage allaitant extensif est de type naisseur, éleveur, engraisseur. Elles totalisent 9955 ha de foncier et près de 2000 UA pour 7 UTA. Le propriétaire Breno est aussi chef d'une entreprise à Belém et emploie un gérant qui habite sur la fazenda.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel
Les 4 fazendas sont localisées dans la Dépression du fleuve Gurupi, dans le Sud-Est de la commune de Paragominas. Elle se situe dans une large vallée à fond plat où s'écoule le réseau de drainage du fleuve Gurupi. Les unités pédo-géomorphologiques de l'exploitation sont relativement homogènes : des versants de très faibles pentes avec des sols de type latosol sablo-argileux et quelques basses collines en processus d'érosion (présence de gravillons). Il n'y a aucun plateau argileux.

Les facteurs de production
7 UTH : un gérant (présent depuis 2010), 4 vachers, un conducteur de tracteur et un ouvrier. Le gérant assure la gestion opérationnelle quotidienne, le fazendeiro prend les décisions stratégiques et tactiques et s'occupe de la partie commerciale (achat et vente).
Equipement : 4 tracteurs (75 à 118 CV), 4 débroussailleuses, 2 charrues à disques, épandeur d'engrais, rouleau agricole.
Infrastructures : corrals, 2 bâtiments de stockage, abreuvoirs, logements pour les salariés.

L'accompagnement technique et financier
La fazenda paie un bureau d'études privé en cas de besoin. La fazenda a déjà bénéficié de financements FNO pour l'acquisition de cheptel et prétend faire un autre crédit pour réformer des pâturages et acquérir de nouvelles têtes.

Usages des sols
Sur les quatre exploitations, les surfaces cumulées en réserve forestière et APP représentent 52% de la surface totale, les pâturages 38%, les pâturages très dégradés (en régénération forestière) 8% et les plantations forestières 2%.



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Système d'élevage

- Structure du cheptel bovin

Animal	Nombre de têtes	Poids Vif	Nombre jours fazenda	Equivalents UA	Nombre UA
Vaches (naissance)	600	450	365	1	600
Vaches achetées et engraissées	400	450	180	1	197
Veaux mâles et femelles (0-8 mois)	480	200	240	0,25	79
Taurillons (8 mois -2 ans)	740	400	490	0,5	497
Bovins (2-3 ans)	740	550	200	0,75	304
Génisses (1-2 ans)	150	350	490	0,5	101
Génisses (2-3 ans)	150	400	365	0,75	113
Taureaux	13	500	365	1,25	16
Juments	75	400	365	0,6	45
Chevaux	25	400	365	0,75	19
Total	**3373**				**1970**

- Reproduction

13 taureaux assurent la monte naturelle (race Nelore ou Guzerá). L'accouplement se fait en hiver pour que les vêlages aient lieu à la fin de la saison sèche/début de saison humide pour bénéficier de la pousse de l'herbe pour l'allaitement des veaux et pour que les taurillons engraissés en 30 mois puissent être prêts à la fin de la saison humide, avant que la production d'herbe ne diminue. L'IVV moyen est de 13 mois environ. L'âge du premier vêlage est de 27 mois. Les femelles qui ne sont pas gestantes après la deuxième phase de monte naturelle sont réformées. L'exploitation a déjà utilisé l'IATF pour faire des croisements industriels (Nelore x Charolais et Nelore x Aberdeen Angus) et l'IA pour le renouvellement des mères. Le taux de réussite était de 80%. Mais par manque de main d'œuvre qualifiée et de peu de présence dans la fazenda, l'IATF a mal fonctionné.

- Allotement

Pour une meilleure gestion et logistique, les 4 fazendas sont spécialisées :
- A : mères avec les veaux non sevrés et bœufs engraissés de 18 à 30 mois (meilleur corral pour l'embarquement des bovins, balance, pâturages réformés et de meilleure qualité)
- B : Elevage des taurillons jusqu'à 18 mois
- C et D : Vaches gestantes, génisses et engraissement des vaches pour l'abattoir

- Alimentation

Le troupeau est au pâturage toute l'année et reçoit 55 g/jour/tête de sel minéral (sel minéral de croissance). Les taurillons consomment aussi un complément protéique.

- Gestion sanitaire

Le troupeau est vacciné contre la fièvre aphteuse (4000 doses), la brucellose (300 doses), la clostridiose (1000 doses) et la rage (2000 doses). Il reçoit également un traitement vermifuge et antiparasitaire. Le vétérinaire passe une fois tous les mois.

- Vente et renouvellement

Le taux de réforme des mères est de 20%. L'exploitation garde autour de 150 velles, les 100 autres sont vendues après le sevrage (8 mois). De plus, la fazenda vend 740 taurillons par an (R$ 4,30 /kg) et 520 femelles allaitantes engraissées (R$ 4,50 - 5 /kg) aux abattoirs ou à l'export (au meilleur prix). Le taux de mortalité est d'environ 5%.

Système fourrager

- Gestion des pâturages

Le pâturage est formé de graminées de *Brachiaria Brizantha* ou de *Panicum Maximum cv Mombaça*. Elles sont pour Breno les deux graminées les plus adaptées aux conditions d'Amazonie. En moindre proportion, il y a aussi du Quicuio, Tioneiros, Andropogon et Massaï. L'éleveur ne mélange pas les espèces de graminées dans les parcs. Il y a trois modes de pâturages en fonction du type d'animaux :
- Pâturage alterné pour les vaches, génisses, et jeunes taurillons : les animaux sont déplacés en fonction de la hauteur d'herbe (hauteur variable selon l'espèce) ;
- Pâturage fixe pour les taurillons engraissés (de plus de 18 mois) : les bœufs engraissés sont pesés régulièrement. Ils restent dans un rayon de 500 à 1000 m autour du corral et dans le même parc. L'objectif est d'éviter de les faire marcher et qu'ils ne perdent du poids (au-delà de 2 km, il y a un risque).
- Pâturage tournant pour les chevaux (unité de 4 parcs).

- Formation des pâturages

Quand la famille de Breno a acquis l'exploitation, 3000 ha avaient déjà été défrichés et implantés en pâturage. Entre 1988 et 2005 (date de la dernière défriche), l'exploitation a défriché par abattis-brûlis 1600 ha de plus soit en moyenne 90 ha/an. Sur les 4640 ha ouverts, 755 ha sont dégradés ou en processus de régénération (soit 20 % de la surface en pâturage).

- Réforme et division des pâturages

- Intégration agriculture-élevage : 500 ha de pâturages dégradés ont déjà été réformés via l'intégration agriculture-élevage au début des années 2000. Il a choisi des terres près de la route (logistique) et du corral (pâturages destinés à l'engraissement des taurillons). Son père a payé cette réforme. Cela a permis de nettoyer le pâturage, de réduire la pression en repousses les années suivantes et de fertiliser les sols. L'itinéraire technique a été le suivant : semis de riz en année 1 ; semis de maïs en association avec du Mombaça en année 2. A chaque semis, ils ont passé les disques et un rouleau. Le sol a été amendé et fertilisé avec 80 kg/ha de calcaire, 120 kg de phosphate naturel d'Arad, 10 kg/ha de 20.00.20, et d'urée. Entre 2005 et 2015, Breno a cherché à louer de nouveau ces pâturages dégradés mais il n'a pas trouvé d'agriculteur intéressé (ils préfèrent les plateaux argileux et plus près du goudron[1]).

- Mécanisation sans fertilisation : L'exploitation a réformé progressivement les pâturages dégradés ou envahis par la cicadelle. Il reste encore 15% des pâturages à réformer (570 ha). L'itinéraire technique varie selon l'état de dégradation du pâturage. S'il est très dégradé, il est nécessaire de passer un tracteur à chenille pour défricher les régénérations et regrouper les débris ligneux (décomposition), travailler le sol (deux passages de disques, rouleaux), puis semer le pâturage (20 kg/ha). Sinon ils ne font que supprimer les régénérations avec le tracteur, puis ils ressèment le pâturage.

- Divisions des pâturages : Les parcs des fazendas A et B (les plus près de la route principale) ont déjà été divisés en parcs de 34 et 47 ha en moyenne alors que ceux des parcs plus éloignés ont été encore peu divisés (certains parcs mesurent plus de 200 ha). Les parcs sont divisés de façon à maintenir un accès à l'eau pour le troupeau.

	A	**B**	**C**	**D**
Nombre de parcs	61	5	19	5
Surface moyenne par parc (ha)	34	47	76	129
Taille du plus grand parc (ha)	105	51	217	237

[1] Les agriculteurs paient 3 à 10 sacs par hectare (R$ 200 à 600 / ha) en fonction de la distance au goudron et du type de sol (sablo-argileux / argileux).

- Gestion de la fertilité

Hormis la réforme via l'intégration agriculture-élevage, il n'a jamais fertilisé ces pâturages avec des engrais chimiques. Les résidus végétaux des régénérations sont les seuls apports au sol.

- Gestion des adventices

- Eviter le surpâturage : pour éviter que le sol soit mis à nu et que les adventices en ayant accès à la lumière se développent.
- Débroussaillage mécanisé : au début de la saison humide, la fazenda nettoie les pâturages soit avec une débroussailleuse quand les régénérations sont fines, soit avec une chaîne entre deux tracteurs si les régénérations sont ligneuses. Les pâturages sont nettoyés une fois tous les deux ans sinon il y a un risque de fragiliser les pâturages et la disponibilité en pâturage serait insuffisante.
- Herbicide : il en a appliqué une fois pour désherber les pâturages. Le résultat a été satisfaisant mais il n'a pas recommencé à cause du prix (R$ 500/ha). Aujourd'hui, il utilise seulement des herbicides en bordure des clôtures (où ne passe pas la débroussailleuse).
- Feu : la fazenda n'utilise plus le feu depuis 1999. Economiquement, l'usage du feu était plus viable que le passage de la débroussailleuse. Mais quand c'est devenu un « crime environnemental », la fazenda a arrêté. Le gérant pense que l'usage du feu a plus d'inconvénients, car son usage réduit la disponibilité en fourrage nécessitant d'attendre au moins 3 mois avant de pouvoir introduire à nouveau le troupeau dans les parcs.

- Abreuvement

Le troupeau s'abreuve au niveau des cours d'eau qui traversent la fazenda, des retenues d'eau et de 4 réservoirs (qui acheminent l'eau vers une zone sans accès à l'eau superficielle).

Gestion des zones environnementales

- APP

Historiquement, la fazenda a déforesté les ripisylves pour permettre l'abreuvement du troupeau dans les rivières. Depuis que les prairies sont nettoyées mécaniquement, les ripisylves se régénèrent naturellement. La largeur est variable et dépend de la topographie. Les APP ne sont pas clôturées car le troupeau continue d'y accéder pour l'abreuvementr. Outre la volonté de respecter le code forestier, propriétaire et gérant estiment que les ripisylves ont plusieurs bénéfices tels que protéger l'eau (d'après le gérant, la déforestation des ripisylves favoriserait l'assèchement des cours d'eau) et fournir de l'ombre au troupeau.

- Réserve légale

Le bois de la réserve forestière de la fazenda A a été exploité il y a plus de 20 ans à l'époque où son père avait la scierie et l'exploitation prélève pontuellement du bois pour la

construction des clôtures (espèces utilisées : maçaranduba, sapucaia, jarana). Dans les autres fazedndas, le propriétaire voudrait exploiter le bois à travers un Plan de Gestion Forestière Durable.

- Adéquation environnementale

La fazenda a obtenu son CAR en 2009. Breno a mobilisé le mécanisme de compensation forestière et respecte de cette façon les 50% d'ARL sur les quatre fazendas. Le risque d'incendie est néanmoins élevé. Des zones de forêts et d'APP de l'exploitation ont déjà été dégradées de cette façon.

Type 5 : Fazenda dans un processus d'intensification écologique de grande échelle

Activité principale : naisseur-éleveur-engraisseur de Nelore ou croisé Angus
20000 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 38914 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 45%
Réserve légale et APP : 55 %
Nombre UTH : 60
Localisation : Redenção / PA 277, 20 km du centre de Redenção

Ce cas d'étude a été sélectionné dans la situation agraire n°5 « Grandes fazendas spécialisées dans l'élevage ». Elles se composent en réalité de deux fazendas totalisant 38914 ha de foncier (une à Redenção et une à Cumaru do Norte, distantes de 100 km). Le système d'élevage bovin allaitant extensif est de type naisseur, éleveur, engraisseur. Le cheptel compte 12240 UA. Le propriétaire (65 ans) est régulièrement sur la fazenda. Un ingénieur zootechnicien assure la gestion globale. La fazenda est divisée en unités de gestion, chacune étant spécialisée dans une étape de l'élevage (naisseur, éleveur ou engraisseur) et ayant sa propre autonomie (bâtiments d'élevage, main d'œuvre) et avec à sa tête un responsable vacher.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel

Les fazendas se localisent sur les pénéplaines à l'Ouest de la commune de Redenção. Les unités géomorphologiques de l'exploitation sont relativement homogènes : des versants de pentes faibles à moyennes avec des sols de type latosol sablo-argileux mécanisables, des bas-fonds avec présence d'eau résiduelle en saison sèche et des bordures de réseau hydrographique escarpées.

Les facteurs de production

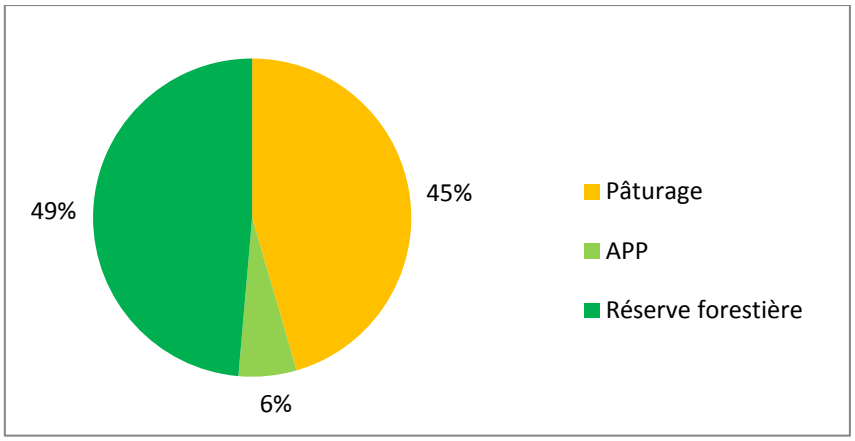
Main d'œuvre : 60 UTH.
Equipement : l'exploitation est bien équipée car toutes les surfaces sont mécanisées : 14 tracteurs dont 6 amortis (65 à 180 CV), 9 débroussailleuses, 4 charrues à disques, 2 semoirs, 2 herses rotatives, 4 citernes, épandeur à calcaire….
Infrastructures : plusieurs corrals, bâtiments de stockage du matériel, logements pour les salariés.

L'accompagnement technique et financier

La fazenda possède un titre foncier et peut donc accéder au crédit.
Elle reçoit un accompagnement technique pour la gestion du troupeau : visite hebdomadaire du vétérinaire pendant la saison des vêlages (1 à 3 fois par mois hors de cette époque) et participation à un programme d'amélioration génétique, le GAFP (Groupe d'Evaluation par Phénotype de Production) qui accompagne la croissance des veaux « élites » (pesée tous les 3 mois).

Les usages des sols

En additionnant la réserve forestière légale et les APP, la surface en forêt cumulée des deux fazendas dépasse 50% de la surface de l'exploitation.



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Systèmes de cultures

A court terme, la fazenda a l'intention de réformer un pâturage sensible à la cicadelle (*Brachiaria Ruziziensis*) en y implantant du maïs en association avec du pâturage (système *Barreirão*).

- Itinéraire technique

Type	Maïs en association avec pâturage
Préparation du sol	Désherbage du Brachiaria avec du glyphosate Semis direct du maïs
Amendement de fond	Déjà réalisé il y a plusieurs années
Plantation	Maïs, puis pâturage lors de l'apport d'azote
Fertilisation	Phosphate naturel d'Arad + Azote
Gestion adventices	Herbicides
Culture suivante	Après récolte du maïs, maintenir le pâturage

- Hiérarchie des critères de décision de localisation des cultures fourragères

1) L'aptitude à la mécanisation (sans APP, ni relief, ni marécage)
2) Proximité piste et siège de l'exploitation (facilité d'accès avec le matériel pour la conduite de la culture et la récolte)
3) Pâturage dont la production fourragère est dégradée.
4) Pâturage sans souches

- Futur des cultures annuelles

La fazenda aurait un potentiel pour l'agriculture de 5000 ha. Mais le propriétaire n'a pas l'intention d'exploiter ce potentiel à court terme et compte limiter la production aux besoins pour l'engraissement des bœufs. Il pense faire de la farine ou de l'ensilage qu'il distribuerait

dans les pâturages ou sur une surface de confinement. Produire 5000 ha de cultures annuelles nécessiterait d'investir dans plus d'équipements spécialisés (séchage et stockage, moissonneuse-batteuse…), et donc de s'endetter. Le soja est la culture qui lui permettrait de rentabiliser rapidement ces investissements, toutefois, il n'est pas intéressé par ce produit car zootechniquement, il ne peut pas être valorisé directement dans la ration sans passer par un processus de trituration.

Le gérant serait davantage favorable que le propriétaire à développer le système d'intégration agriculture-élevage pour réformer les pâturages dégradés.

Système d'élevage

- Structure du cheptel bovin

Animal	Nombre de têtes	Poids Vif	Nombre jours fazenda	Equivalents UA	Nombre UA
Troupeau viande					
Vaches (naissance)	4193	450	365	1	4193
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	4096	135	365	0,25	1024
Taurillons (1 -2 ans)	3478	200	365	0,5	1739
Taurillons (2-3 ans)	2852	400	365	0,75	2139
Bœufs	107	490	365	1	107
Génisses (1-2 ans)	2344	190	365	0,5	1172
Génisses (2-3 ans)	2746	400	365	0,75	2060
Taureaux	149	700	365	1,25	186
Troupeau laitier					
Vaches en lactation	69	430	365	1	69
Vaches taries	58	430	365	1	58
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	69	130	240	0,25	11
Génisses (1-2 ans)	19	190	365	0,5	10
Génisses (2-3 ans)	24	310	365	0,75	18
Mulets	242	400	365	0,6	145
Chevaux	51	400	365	0,75	38
Ânes	98	400	365	0,6	59
Total	**20595**				**13028**

- Reproduction

La fazenda utilise l'IA depuis 12 ans et l'IATF depuis 3 ans. Le gérant a préféré recourir à cette technologie pour synchroniser les chaleurs et regrouper la période des vêlages pour une meilleure surveillance. Des taureaux assurent également la monte naturelle en cas d'échec après deux IATF. Le taux de réussite à la première IATF est de 56%, de 75% à la seconde et de 86% après la monte naturelle. Les femelles qui ne sont pas gestantes après la monte

naturelle et la 2ème IATF sont réformées. La fazenda sépare aussi les velles issues de la monte naturelle (facilement repérées car elles naissent plus tard) qui sont engraissées (10 mois après le sevrage pour celles nées de taureaux Angus et 18 mois après le sevrage pour celles nées de taureaux Nelore) et ne sont pas utilisées pour la reproduction du troupeau.
L'IATF est réalisée en saison humide (d'octobre à janvier) car la production fourragère est importante, la tendance pour les mères est d'entrer facilement dans la période des chaleurs. De plus, la période de mise-bas, de fin juillet à début novembre, est moins favorable aux maladies (par exemple la pneumonie).
L'âge de la première IATF est autour de 20/24 mois pour un premier vêlage autour de 30 mois. L'IVV est d'environ 12 mois.
La fazenda utilise deux types de race de taureau : Nelore et Angus. Les meilleures mères (80 à 85%) sont inséminées avec des semences de Nelore (5 à 6 différentes) pour le renouvellement du troupeau. Les autres mères sont inséminées avec des semences d'Angus (3 à 4 différentes) afin de produire des veaux de boucherie. Les semences sont sélectionnées selon les qualités bouchères du mâle et la précocité.

- Allotement

Avant la 1ère IATF, les mères sont séparées en 4 groupes et restent dans 4 unités de gestion différentes :
- Les mères élites Nelore du groupe n°1. Elles sont inséminées avec des taureaux Nelore pour le renouvellement du troupeau. Les veaux sont pesés tous les 3 mois dans le cadre du programme d'amélioration génétique GAFP. Ce groupe est élevé au niveau de l'unité de gestion du siège de l'exploitation (pour un meilleur suivi) et sur les meilleurs pâturages.
- Les mères Nelore du groupe n°2. Elles sont inséminées avec des taureaux Nelore « complémentaires » dans le but d'améliorer leur génétique. Les velles sont utilisées pour le renouvellement du troupeau.
- Les mères Nelore du groupe n°3 sont inséminées avec des taureaux de race Angus. Tous les veaux (mâles et femelles) sont vendus pour la boucherie
- Les femelles métisses (Nelore x Angus) du groupe n°4 sont destinées à la réforme.

Les mâles engraissés sont aussi divisés en fonction :
- de l'âge : Deux unités de gestion pour les jeunes bovins de 8 à 18 mois et un pour les jeunes bovins de plus de 18 mois ;
- de la race : les jeunes bovins croisés (½ Red-Angus et ½ Nelore) ont un GMQ plus élevé que les Nelore.

- Maternité

La fazenda a installé des maternités à proximité des corrals. Au moment des vêlages, tous les matins, les vachers se rendent à la maternité pour observer les mères et suivre les mises-bas. Chaque veau qui naît reçoit une boucle numérotée à l'oreille (même numéro que la mère jusqu'au sevrage). Les mères et leurs veaux restent 1 mois dans la maternité le temps que le

veau se fortifie et puisse courir plus rapidement en cas d'attaque de félins. Les mères qui mettent bas tôt (juillet et août) retournent ensuite dans les parcs plus éloignés. Celles qui mettent bas en septembre/octobre vont directement être inséminées par IATF.

- Suivi du troupeau

Depuis 3 ans, la fazenda utilise un programme informatique pour le suivi de chaque animal du troupeau. Toutes les opérations sont enregistrées : date de naissance, sexe, poids de naissance, remède, vaccins, généalogie, date de l'insémination… Tous les responsables ont accès à ce programme et doivent l'actualiser après chaque intervention. D'après le gérant, ce programme rend la gestion du troupeau plus efficiente. L'objectif de cette traçabilité est de pouvoir sélectionner les meilleures femelles.

- Alimentation

Le troupeau est au pâturage toute l'année et est supplémenté avec du sel minéral de croissance (70 à 90 g/jour/tête). Quand commencent les chaleurs, les femelles ont accès à un sel plus concentré.
La fazenda achète et distribue un complément protéiné aux taurillons en phase d'engraissement (à partir de 18 mois ou 380 kg). Le type de complément varie selon la saison :
- En saison sèche, de mai à octobre, la fazenda distribue en moyenne tous les jours 700 g/tête d'une ration composée de 50% de maïs, 39,2% de son de soja, 10% d'urée et 0,8% de sel minéral. L'objectif est d'engraisser rapidement les bœufs pour qu'ils arrivent au poids de 530 kg avant Noël. Le coût de revient de la ration est élevé, autour de R$ 100/tête (R$ 800/T x 0,7 kg x 30 jours x 6 mois). Ils utilisent cette ration depuis 8 ans.
- En saison des pluies, d'octobre à fin avril, la fazenda distribue un autre type de complément protéiné 3 fois par semaine à hauteur de 100 g/tête (R$ 2267T x 0,1 kg x 30 jours x 6 mois).
En phase d'engraissement (à partir de 18 mois), le GMQ (gain de poids moyen quotidien) est de 700 g/animal (800 g en saison humide et 600 g en saison sèche).

- Gestion sanitaire

Le troupeau est vacciné contre la fièvre aphteuse (40400 doses), la brucellose (2200 doses), la rage (24300 doses), la clostridiose (8200 doses). Le troupeau reçoit aussi des anti-vermifuges et antiparasitaires.

- Vente et renouvellement

Comme la fazenda veut accroître le nombre de mères, elle sélectionne autour de 80% des velles pour le renouvellement et après le premier vêlage n'en garde que 60%. Les critères de sélection sont : la prolificité, facilité de mise-bas, qualités maternelles. Ce taux de renouvellement est élevé car la fazenda a pour objectif de substituer les mères de moyenne qualité par des velles de meilleure qualité génétique.

La fazenda commercialise les taurillons engraissés aux abattoirs (généralement JBS à Redenção). Les jeunes bovins sont vendus à un poids vif de 520/530 kg à R$ 4,4/kg PV, pour rendement carcasse d'en moyenne 52 à 53%. Les vaches de réforme sont vendues R$ 4,1/kg PV.

- Activité laitière

La fazenda a aussi développé une activité laitière (127 vaches laitières). Aujourd'hui, la production est uniquement utilisée pour l'autoconsommation de la fazenda (salariés et familles).
La fazenda achète des embryons croisés Girolando (Gir x hollandais). Ils sont ensuite transférés chez des mères porteuses, des vaches de race Nelore ayant de bonnes qualités maternelles.

Système fourrager

- Gestion des pâturages

On trouve deux types de graminées :
- 50% des parcs sont couverts de *Brachiaria brizantha* cv Marandu (braquirarão).
- 50% des parcs avec du *Brachiaria brizantha cv*. Xaraés (MG5) en association avec du panicum Maximum cv Mombaça sur les versants et avec du *Brachiaria humidicola* (quicuio da Amazônia) dans les bas-fonds (c'est le seul pâturage qui résiste aux excès d'eau). Le *Brachiaria* brizantha *cv*. Xaraés (MG5) a une moins bonne appétence que le *Brachiaria Brizantha* c'est pourquoi la fazenda préfère le mélanger avec du Mombaça. Ces parcs ont été réformés quand le nouveau gérant est arrivé (en 2010).

Il y a aussi 5 ou 6 espèces de légumineuses telles que la puerária (*Pueraria phaseoloides*) semée par le propriétaire, le calopogonium (*Calopogonio muconoides*), etc. Le propriétaire cherche à les maintenir car elles sont riches en énergie et protéines.

Le mode de pâturage est alterné (le critère d'entrée et sortie est la hauteur d'herbe), excepté pour les bœufs d'embouche qui est fixe (il reste dans le même pâturage pour ne pas perdre de poids).

- Formation des pâturages

Les pâturages ont été implantés entre 1965 et 1986. Il y a eu trois phases sur l'exploitation :

1) Les pâturages ont été initialement formés avec du *Panicum maximum* cv colonião et du jaguará (en monoculture). Ces graminées de haute valeur nutritive sont exigeantes. Leur usage a donc révélé des limites face à une faible fertilité naturelle des sols et une gestion extensive, sans fertilisation. Les pâturages se sont rapidement dégradés.

2) En réponse à la dégradation des pâturages, l'exploitation a réformé les pâturages les plus dégradés avec deux autres types de graminées : le *Brachiaria humidicola* (quicuio

da Amazônia) et le *Brachiara decumbems*. Ces graminées plus rustiques, de moins bonne valeur nutritive, présentent une forte capacité de couvrir le sol rapidement et de concurrencer les adventices. Elles sont toutefois sensibles à la cicadelle du pâturage (*Deois incompleta*). Dans les années 80, la fazenda opte pour le *Brachiaria brizantha* cv Marandu (braquirarão), sélectionné par l'Embrapa, qui résiste à la cicadelle et étant stolonifère a une forte capacité de couverture du sol.

3) Le *Brachiaria brizantha* a souffert du syndrome de la mort subite et les pâturages se sont dégradés. La fazenda a réformé 50% des pâturages avec du Brachiaria cv MG5 en association avec du *Panicum maximum* cv Mombaça sur les versants et en association avec du *Brachiaria humidicola* dans les bas-fonds.

- Réforme des pâturages

Entre 2010 et 2015, 9 000 ha de pâturages dégradés (adventices, syndrome de la mort subite) ont été réformé. Plusieurs techniques ont été utilisées selon le niveau de dégradation.

Technique de réforme	Problème	Surface (ha)	Surface (alq)
2 passages de disques + rouleau + semis	Pâturage sale	484	100
2 passages de disques + rouleau + semis + fertilisants	Fertilité du sol dégradée	1453	300
Tracteur chenille + brûlis des recrus en ligne + Semis	Pâturage très sale, recrus forestiers	3875	800
1 passage de disques + Herbicides + Semis	Infestation de capim duro (*Axonopus leptostachyus*)	3391	700
Total		9204	1900

Coût des intrants	Coût (R$/ha)
Fertilisation	1652
Herbicide	310

Tous les pâturages réformés ont été semés à la volée. La densité de semis a été :
- Sur les versants : de 40 kg/alq de *Panicum maximum* cv mombaça et 40 kg/alq de *Brachiaria* MG5.
- Dans les bas-fonds : de 60 kg/alq de quicuio et de 20 kg/alq de *Brachiaria* MG5.
Du fait du coût élevé des semences de haute technologie, la fazenda opte pour une bonne densité de semis qui soit à la fois suffisante pour couvrir le sol et limiter les coûts. Le semis est plus dense dans les pâturages envahis d'adventices.

Pour la réforme, la fazenda a acheté un tracteur plus puissant (180 cv) et une charrue de 18 disques et 32 pouces pour pouvoir travailler le sol plus rapidement.

- Division des pâturages

La division des pâturages est un processus constant dans la fazenda pour améliorer la conduite du pâturage en particulier avec le Mombaça. Initialement certains parcs mesuraient plus de 200 ha.
La division s'est faite de manière homogène entre les unités de gestion. Dans la fazenda de Redenção, on compte 250 parcs d'une taille moyenne de 45 ha. Le parc le plus petit mesure 8 ha, le plus grand 90 ha. Entre unités de gestion, la taille moyenne des parcs varie entre 39 et 48 ha. Dans la fazenda de Cumaru, on compte 80 parcs d'une taille moyenne de 66 ha. Le plus grand parc mesure 154 ha.
La fazenda utilise uniquement des clôtures en fil de fer. L'usage de clôtures électriques n'est pas adapté à cause de l'entretien que cela nécessiterait et des risques de vol des panneaux solaires (compte tenu des surfaces, il n'est pas possible de surveiller, ni d'acheminer l'énergie électrique du réseau à chaque pâturage).

- Gestion de la fertilité

Les pâturages qui ont été réformés avec fertilisation ont reçu :
- 1T/ha d'amendement calcaire (après le premier passage des disques)
- 300 kg/ha de phosphate naturel d'Arad (après un second passage de disques)
Les prairies ont reçu le même type de fertilisation malgré les variations de la qualité chimique des sols (mises en évidence à travers les analyses de sol), et des exigences différentes selon le type de graminées (MG5 en association avec Mombaça ou quicuio).

- Gestion des adventices et ravageurs

Débroussaillage mécanique : une fois tous les 2 ans. Autrefois l'exploitation attendait 3 à 4 ans avant de nettoyer les pâturages, mais cela était insuffisant pour gérer les recrus forestiers. La fazenda a investi dans plusieurs tracteurs (5 depuis 2010) pour accroître le travail réalisé. Comme la surface est très grande, le débroussaillage se fait tout au long de l'année : sur les versants en saison humide, dans les bas-fonds en saison sèche. Le propriétaire demande aux salariés de faire un débroussaillage sélectif et de conserver certains arbres pour l'ombre et leur valeur : ipê, amarelão, samauma, orelha de macaco... La densité d'arbres dans les pâturages est importante.

Herbicides : Le recours aux herbicides vise à mieux contrôler le capim duro. Comme il n'existe pas d'herbicide sélectif, la fazenda est obligée de réformer le pâturage quand le niveau d'infestation est élevé. Elle suit l'itinéraire technique suivant : passage des disques avant le début des pluies pour faire un faux semis (créer les conditions favorables à la germination du capim duro), application d'un herbicide de pré-semis, semis du pâturage. L'application de l'herbicide se fait par avion ou tracteur.

Le propriétaire veut éviter le plus possible d'utiliser des herbicides car ils sont aussi défavorables aux légumineuses. Le propriétaire voudrait réduire les doses utilisées d'ici 2 ou 3 ans une fois que le capim duro sera maîtrisé.

Usage du feu : La fazenda ne nettoie plus les pâturages avec le feu depuis les années 80. Le feu est seulement utilisé pour brûler de façon contrôlée les amas de racines et débris végétaux issus des nettoyages des régénérations. Mais, il existe encore des problèmes de feu accidentel dans la région. 2900 ha ont été brûlés accidentellement en 2010/2011. Le préjudice économique est grand : immobilisation du matériel (citerne, tracteurs) et des ouvriers pour contrôler l'avancée du feu.

Lutte biologique : Pour contrôler la cicadelle des pâturages, en 2013, ils ont utilisé un champignon le *Metarhizium anisopliae* (500 g/ha). Le coût de revient du produit est de R$ 45,00/ha et le coût de l'application (mélange avec l'eau puis pulvérisation) s'élève à R$ 40,00/ha. Pour le propriétaire, ce produit est intéressant car il est moins agressif qu'un insecticide mais l'efficacité est limitée sur pâturage (produit développé pour la canne à sucre).

- Abreuvement

Le troupeau s'abreuve au niveau des cours d'eau et des retenues. La fazenda n'a pas les conditions financières ni matérielles (accès à l'électricité) pour installer des abreuvoirs dans tous les pâturages.

- Cartographie des parcs

En 2005, la fazenda a réalisé une carte localisant les surfaces de réserve légale, d'APP, parcs, corral et retenues. A l'époque, les parcs avaient été délimités avec un GPS mais pour les APP, ils avaient utilisé des photos aériennes et des images satellites. Cette carte est en train d'être actualisée par un salarié de la fazenda. Pour que le relevé soit plus précis, cette fois ci toutes les APP sont délimitées au GPS sur le terrain. En 2012, elle a édité d'autres cartes : géomorphologie, formation pédologique, géologique, biome forestier.

- Hiérarchie des critères de décision de localisation

- Allotement : Les parcs près du corral sont utilisés pour l'engraissement, les plus loin pour l'élevage.
- Réforme des pâturages :
1 : Etat du pâturage et du sol : la fazenda commence par les pâturages les plus sales et par ceux où la fertilité des sols est dégradée.
2 : Distance : puis elle sélectionne d'abord les parcs les plus près du corral et utilisés pour l'engraissement. La fazenda réforme tous les pâturages dégradés indépendamment de leur distance aux installations.

Gestion des zones environnementales

- APP

Au moment de la formation des pâturages, les ripisylves ont été brûlées pour l'abreuvement du troupeau. La fazenda a laissé les ripisylves se régénérer naturellement à partir du moment où elle a commencé à mécaniser les pâturages (milieu des années 80). Aujourd'hui, toutes les sources et bordures des cours d'eau sont protégées. La largeur est variable. La fazenda ne se réfère pas aux largeurs établies par le code mais au dénivelé en bordure du réseau hydrographique qui empêche la mécanisation.

- Réserve légale

Cette fazenda possède l'une des plus grandes réserves forestières de la région. La fazenda ne l'exploite pas. Il y a quelques années, elle a fait un inventaire forestier pour faire un PMFS (Plan de Gestion Forestière Durable). Mais avec le développement de la sylviculture, ce projet ne s'avérait plus rentable (coût d'extraction élevé). L'éleveur n'a pas l'intention de défricher plus et espère que le marché des crédits carbone va se développer pour rémunérer la non valorisation en usage agricole de ses forêts à hauteur de la rentabilité d'une culture de soja ou de l'élevage (500 R$/ha/mês).

- Adéquation environnementale

La fazenda respecte les règles du code forestier : 50% de réserve légale, aucune déforestation non autorisée après 2008 (les dernières défriches de forêts primaires ont eu lieu avant 1985), CAR définitif et LAR.
Pour le nettoyage des pâturages dégradés (défriche des régénérations avec un tracteur à chenille et brûlis des amas végétaux), la fazenda demande l'autorisation à la SEMA de Marabá (obligée de passer par l'Etat car la SEMMA de Redenção n'est pas habilitée à émettre ces autorisations). Ils respectent les conditions pour éviter que le feu ne se propage : coupe feu le long des clôtures et des APP et brûlis en fin d'après midi (moins de vent, moins chaud).

Type 6 : Fazenda viande intensive en intrants

Activité principale : naisseur de Nelore
1050 têtes de bovins
Surface de l'exploitation : 1080 ha
Surface destinée à l'élevage (pâturage, fourrage, grain…) : 48%
Réserve légale et APP : 52 %
Nombre UTA : 4,5
Localisation : Paragominas / PA 256, km 8

La fazenda a été sélectionnée dans la situation agraire n°6 « Couloir d'Intensification ». Cette exploitation de taille moyenne (< 2000 ha) est un cas type de fazendas engagées dans un processus d'intensification avancé. Le système d'élevage allaitant, de type naisseur, est de haute qualité génétique. Les meilleurs veaux sont vendus comme reproducteurs. La fazenda compte 1090 ha de foncier et 690 UA de pâturage. Les propriétaires, père et fils, possèdent d'autres fazendas spécialisées dans l'élevage allaitant ou l'agriculture. Dans cette fazenda, ils embauchent 4 UTA.

Localisation et caractéristiques du milieu naturel

La fazenda est située à 8 km du centre urbain de Paragominas. Elle s'étend sur deux types d'unités géomorphologiques : les plateaux du centre-Est et les vallées ondulées du fleuve Gurupi. Les versants découpés par un dense réseau de drainage sont légèrement à moyennement ondulés. Les bordures des cours d'eau sont accidentées et non mécanisables. Les sols sont de type latosol sablo-argileux. Les plateaux présentent une texture argileuse très favorable à la production agricole (argile de Belterra) et les bas de versants et fonds de vallées une texture sablo-argileuse beaucoup moins propice.

Les facteurs de production

4 UTA. Un vacher est responsable de la gestion quotidienne de l'atelier troupeau (déplacement du troupeau, soins à apporter), et les fazendeiros prennent les décisions tactiques et stratégiques (choix des reproducteurs, des pâturages à réformer, des investissements à réaliser).
Equipement : un tracteur amorti (75 CV), emprunt du matériel aux fazendas d'agriculture, cellules de stockage et séchage pour maïs et soja.
Infrastructures : un corral réformé en 2013, plus de 20 places d'alimentation, abreuvoirs, logements pour les salariés.

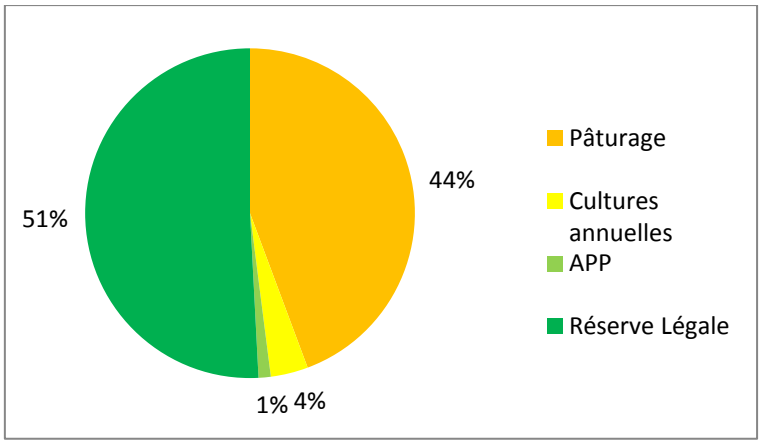
L'accompagnement technique et financier

La fazenda est proche des institutions de recherche et de développement. Elle a expérimenté de nouvelles technologies de l'Embrapa dès les années 80, a participé au programme BPA (Bonnes Pratiques Agricoles), puis au projet Pecuária Verde avec l'USP et l'Imazon.

La fazenda a déjà bénéficié de financements FNO. Mais suite au classement de Paragominas dans la liste rouge, la fazenda a vu son accès au crédit bloqué même pour les crédits de campagne (avances de trésorerie).

Les usages des sols

La surface en forêt de l'exploitation, incluant la réserve légale et les APP, est supérieure au pourcentage exigé par la législation. Des 6 exploitations suivies, elle présente le pourcentage en cultures annuelles le plus élevé.



Assolement (%) de l'exploitation en 2015

Systèmes de cultures

- Activités

Sur une autre fazenda spécialisée dans le grain, les exploitants produisent 1080 ha de cultures annuelles (1000 ha de soja et 80 ha de maïs). Le grain est séché, stocké et commercialisé. Derrière le soja, les exploitants prévoient de faire une double culture : (i) sur le soja semé tôt (300 ha) semer du sorgho éventuellement en association avec du pâturage (le grain pourra être valorisé dans l'alimentation animale) ; (ii) sur le soja semé tard (700 ha), semer du millet. Les objectifs de la couverture du sol sont multiples : protéger le sol de l'érosion, réalimenter la matière organique du sol, maintenir le sol plus humide, protéger la microfaune, éviter le réchauffement du sol mis à nu.

- Hiérarchie des critères de décision de localisation

1 : Le relief : plaines et versants de faible pente

2 : La position dans la toposéquence : les exploitants ont déjà produit des cultures annuelles dans les vallées sablo-argileuses. Mais, il est nécessaire de semer et récolter à des moments précis, au risque de s'embourber avec les machines. De plus, la forme et la taille des parcelles découpées par les APP n'est pas aussi favorable que sur les plateaux.

- Futur des cultures annuelles

L'exploitant pense continuer car l'agriculture est complémentaire de l'élevage. L'agriculture permet de financer la réforme des prairies et à travers la rotation de lutter contre les adventices. Toutefois, il pense aussi que l'agriculture génère plus d'anxiété que l'élevage (travailler aux bonnes dates, avances en trésorerie importantes).

Système d'élevage

- Structure du cheptel bovin

Animal	**Nombre de têtes**	**Poids Vif**	**Nombre jours exploitation**	**Equivalents UA**	**Nombre UA**
Vaches (naissance)	500	500	365	1	500
Vaches laitières	10	450	365	1	10
Veaux mâles et femelles (0-1 an)	370	240	240	0,25	60,82
Génisses (1-2 ans)	75	300	365	0,5	37,5
Génisses (2-3 ans)	75	450	365	0,75	56,25
Chevaux	15	400	365	0,75	11,25
Total	**1050**				**675**
Charge / ha	**2,01**				**1,29**

- Reproduction

- Pour le renouvellement des mères : l'IA. Les meilleures femelles du troupeau (environ 50% en 2017) sont inséminées avec des taureaux de race Nelore. Ces femelles sont choisies au moment de la mise-bas selon les critères physiques de la race Nelore, les qualités maternelles de la mère, l'IVV (entre 12 et 13 mois) et le taux de fertilité. L'exploitation recourt à trois types de taureaux selon les qualités des femelles (génisses, mères de groupe 1 ou 2) pour améliorer la descendance. Aujourd'hui, l'un des objectifs de l'exploitation est d'améliorer la précocité du troupeau en réduisant l'IVV. Pendant des années, l'exploitation a investi dans l'amélioration génétique de la conformation mais aujourd'hui, le troupeau est peu précoce. Le coût des doses d'insémination est variable, de 40 à 70 R$/dose. Malgré l'investissement que cela représente, l'exploitation pense qu'il est important d'investir dans la génétique et de produire ses propres veaux sinon, elle risquerait de réduire la qualité génétique de son troupeau. L'exploitation conserve entre 80 et 90 génisses pour le renouvellement du troupeau (soit un taux de renouvellement d'environ 20 %). Si les femelles ne sont pas gestantes après la seconde IA, l'exploitation utilise le croisement industriel et vend la descendance. Le taux de réussite est de 80% après la seconde IA.

- Pour les veaux destinés à l'engraissement : le croisement industriel. Les autres femelles du troupeau sont inséminées via l'IATF avec des taureaux de race Aberdeen Angus ou Hereford. Hereford produit une viande plus persillée. Ce croisement permet

de réduire le cycle de production car les veaux croisés sont plus précoces et sont engraissés en 22 à 24 mois, alors que les Nelore sont engraissés en 30 mois.

La saison des mises-bas s'étale de juin à janvier. La saison sèche est privilégiée à la saison humide car il y a moins de problèmes pour les veaux. L'âge des premières mises-bas est de 24 à 30 mois.

- Allotement

1) la maternité : les vaches et veaux jusqu'à 30 jours
2) l'observation des chaleurs : les vaches et veaux jusqu'à 60 jours après la mise-bas
3) les génisses pour le renouvellement du troupeau
4) les gestantes
5) les femelles destinées à l'abattoir.

- Alimentation

Le troupeau est alimenté au pâturage et au sel (80 g/animal/jour). Pour faciliter le retour des chaleurs, l'exploitation distribue aux vaches de la maternité un complément protéiné acheté dans le commerce ou fabriqué à la ferme selon les disponibilités.

- Suivi du troupeau et gestion sanitaire

L'exploitation effectue un suivi individuel des vaches du troupeau et annote tous les évènements importants (date des IA, des mises-bas, poids individuel). Le troupeau est vacciné contre la fièvre aphteuse, la clostridiose et la brucellose. Les veaux reçoivent également un traitement vermifuge.

- Vente

L'exploitation vend les veaux issus de croisement industriel en vif pour l'engraissement. Les veaux mâles et femelles issus des croisements de race Nelore et qui ne servent pas au renouvellement du troupeau sont vendus pour la reproduction à un prix différentié.

Système fourrager

- Gestion des pâturages

Les pâturages sont formés de graminées, soit de *Brachiaria Brizantha* soit de *Panicum Maximum cv Mombaça*. En moindre proportion, il y a aussi du Quicuio dans les bas-fonds et de l'Aruana, une graminée très productive implantée près du corral pour les ovins et les chevaux.
L'exploitation utilise le pâturage tournant sur l'ensemble des parcs. Aujourd'hui, la taille moyenne des parcs est d'environ 8 ha mais certains parcs mesurent à peine 2,5 ha. Le critère d'entrée et de sortie des animaux est la hauteur d'herbe. En saison humide, les vaches restent

entre 3 et 5 jours dans chaque parc. En saison sèche, la rotation du troupeau entre parcs peut être plus rapide du fait d'une baisse de l'offre en fourrages (durant l'été 2016, en raison de la sécheresse drastique et des attaques de chenilles, les vaches devaient changer de parcs toutes les demi-journées).
La charge instantanée moyenne est de 1,3 UA/ha. La capacité de charge peut dépasser 2 UA/ha en période humide, toutefois, l'exploitation est en situation de sous-charge à cette période. Considérant l'effectif et l'aire total en pâturage, la charge moyenne de la propriété est de 2 têtes par hectare.

- Formation des pâturages

Quand les exploitants ont acheté la fazenda, les pâturages étaient déjà formés de *Panicum maximum* cv colonião. Les parcs mesuraient à l'époque de 50 à 60 ha.

- Réforme

La première phase de réforme des pâturages a démarré à partir des années 85, avec implantation de nouvelles graminées assurant une meilleure couverture des sols (Brachiaria Brizantha et quicuio) et application de phosphore. La seconde phase de réforme des pâturages a débuté au début des années 2000, via l'intégration agriculture-élevage. La réforme se fait en deux étapes : semis de riz en année 1, semis d'un système « barreirão » (maïs-pâturage Mombaça) en année 2.

Opérations culturales	**Riz (année 1)**	**Maïs – Pâturage (année 2)**
Préparation du sol	Simplifié (1 passage déchaumeur, 2 passages de herse)	
Amendement	1 T/ha de calcaire	200 kg/ha de phosphate naturel de roche (arade)
Période semis	entre 10 janvier et fin février	10 décembre au 10 janvier
Densité semis	80-100 kg/ha	16000 gr/ha
Fertilisation au semis	250 kg/ha de 10-30-10 (25 u N, 75 u P_2O_5, 25 u K_2O)	400 kg/ha de 10-30-10 (40 u N, 120 u P_2O_5, 40 u K_2O)
Fertilisation de couverture	-	400 kg/ha de 20-0-20 (80 u N, 0 u P_2O_5, 80 u K_2O) + Semis de 20 kg/ha de Mombaça à la volée
Désherbage	(2,5 L/ha 2,4 D et 2,5 L/ha Ronstar)	-
Période récolte	juin/juillet	Fin mars à début avril
Rendement grain (T/ha)	3,6 T/ha	1,6 T/ha

- Division des pâturages

La taille des parcs, égale en moyenne à 8 ha, varie de 2,5 à 20 ha. Presque tous les parcs ont un abreuvoir. Cela permet de fournir une eau filtrée de meilleure qualité pour le troupeau (par rapport à l'eau du cours d'eau), de réduire les distances et donc les dépenses énergétiques. L'exploitation a investi dans des clôtures électriques.

- Gestion de la fertilité

Les prairies réformées ont été amendé et fertilisé. Sur la majorité des parcelles, il n'a appliqué du calcaire qu'une seule fois. Il voudrait augmenter la fréquence d'application de calcaire et phosphore (une fois tous les 5 à 6 ans) pour accroître les niveaux de productivité fourragère et améliorer la résistance du pâturage aux attaques de chenilles. Mais, le coût élevé du calcaire (200 R$/T) constitue un facteur limitant important. Dans le cadre du projet Pecuária Verde, des parcs de pâturage tournant ont été fertilisés avec un engrais minéral (200 kg/ha) après chaque passage de bovins pendant la saison humide (5 fois entre février et juin). Cela a permis de multiplier par 3 la charge animale par rapport aux pâturages non fertilisés en saison humide. Malgré les résultats positifs, l'exploitation n'a pas poursuivi l'expérience car les gains de productivité fourragère nécessitent un accroissement du troupeau pour amortir le coût supplémentaire de la fertilisation. Or, en saison sèche, la surface fourragère ne serait pas insuffisante et la fazenda serait obligée d'investir dans d'autres alternatives coûteuses pour satisfaire les besoins d'un troupeau de plus grande taille (par exemple l'irrigation ou la production d'ensilage) ce qui constituerait un investissement additionnel conséquent.

- Gestion des adventices

Débroussailleuse, et si besoin herbicides (2,4 D et Ronstar).

- Critères de décision de localisation

- Allotement

- Distance : les parcs près du corral sont utilisés pour la maternité et l'observation des chaleurs, les plus éloignés sont utilisés pour les génisses et les gestantes.
- Type de graminées : Les mères avec les veaux pâturent les parcs de Mombaça (moins de risques d'intoxication par photosensibilisation qu'avec du *Brachiaria brizantha*). Les animaux à plus faibles besoins (gestantes, génisses) pâturent les parcs de *Brachiaria Brizantha*.
- Potentiel de production du sol : les gestantes et les génisses pâturent les parcs qui ont un plus faible potentiel de production (présence de pierre).
- Dégradation du pâturage : animaux à faibles besoins dans les parcs les plus dégradés.

- Entretien des pâturages

1 : Type de pâturage : la fazenda commence par les parcs les plus productifs où elle a réalisé le plus d'investissement (tournant intensif, tournant, irrigué), puis les autres (bonnes pratiques).
2 : Etat de dégradation : elle priorise les parcs les plus dégradés.

- Réforme des pâturages

1 : Relief : abandon des zones de pâturages ayant un relief trop accidenté

2 : Texture des sols : réforme différente au niveau des zones d'affleurement de pierres (recours au Brachiaria brizantha), pas d'investissement dans du pâturage tournant intensif.
3 : Etat de dégradation : réforme les parcs les plus dégradés.

Gestion des zones environnementales

- APP

Les ripisylves étaient déforestées lorsque la famille a repris l'exploitation. Aujourd'hui, toutes les ripisylves sont régénérées et clôturées (fil de fer). La largeur varie de 20 à 100 m en fonction de la topographie (c'est la rupture de qui détermine la largeur de l'APP).

- Réserve légale

Elle prélève sporadiquement du bois pour la rénovation des clôtures.

- Adéquation environnementale

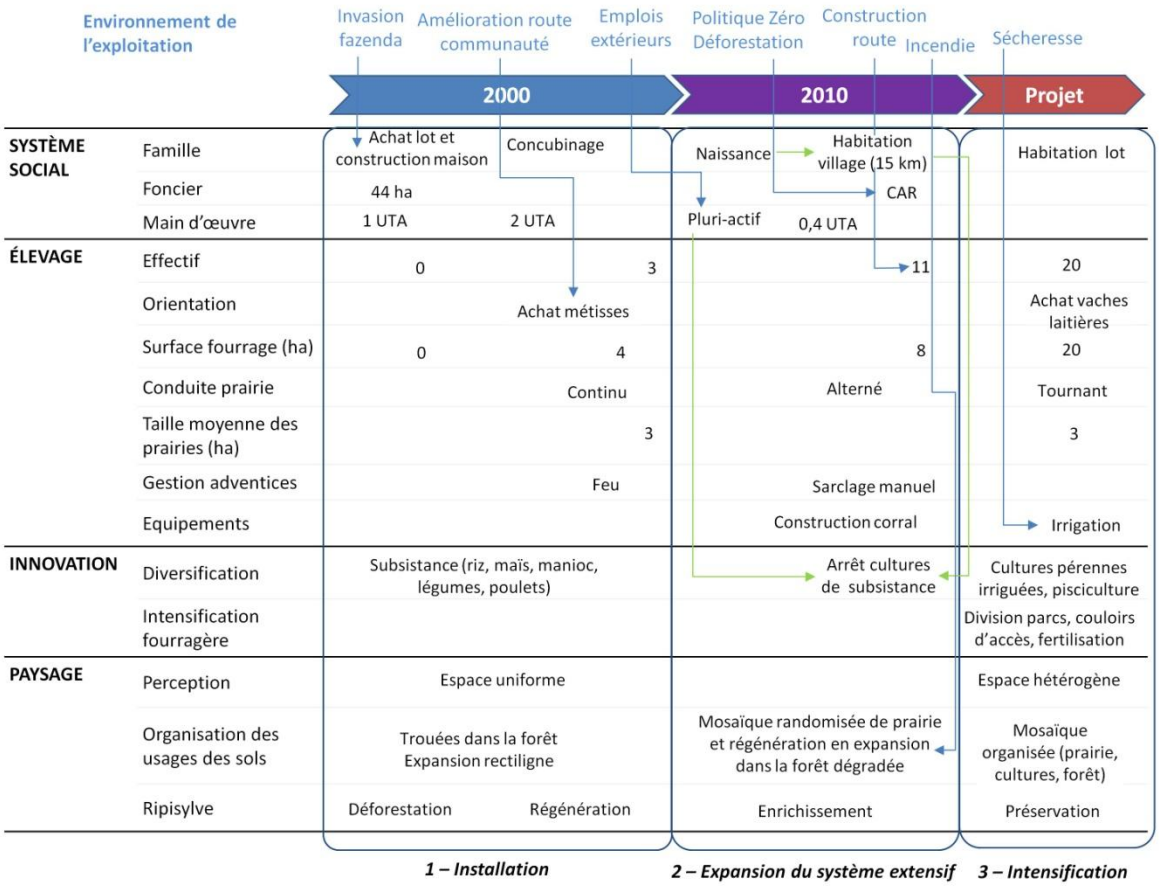
L'exploitation n'a plus déforesté après 2008 (dernière ouverture en 1984). Elle a régénéré les APP et protégé la Réserve Légale. Elle a obtenu son CAR en 2009 (mis à jour en 2012).

Annexe 10. Trajectoires d'exploitation et dynamiques de paysage

Dans cette annexe, nous présentons les résultats de l'analyse croisée des trajectoires d'exploitation et des dynamiques de paysage pour chaque cas d'étude. Nous analysons les adaptations et les projets des éleveurs sur trois composantes : les pratiques de conduite du système fourrager et du système d'élevage et l'organisation spatiale de ces pratiques. Pour chaque phase de cohérence mise en évidence dans les trajectoires, nous expliquons les principaux déterminants de l'organisation spatiale des usages des sols.

Type 1 : Exploitation familiale pionnière : avancée des pâturages et diversification des usages des sols

La trajectoire de l'exploitation familiale de type pionnier se caractérise par une expansion lente du système d'élevage via l'agriculture sur brûlis, générant une mosaïque de cultures, prairie et de régénération en expansion dans la forêt primaire dégradée. Nous distinguons trois phases de cohérence.



Trajectoire de l'exploitation familiale de type pionnière

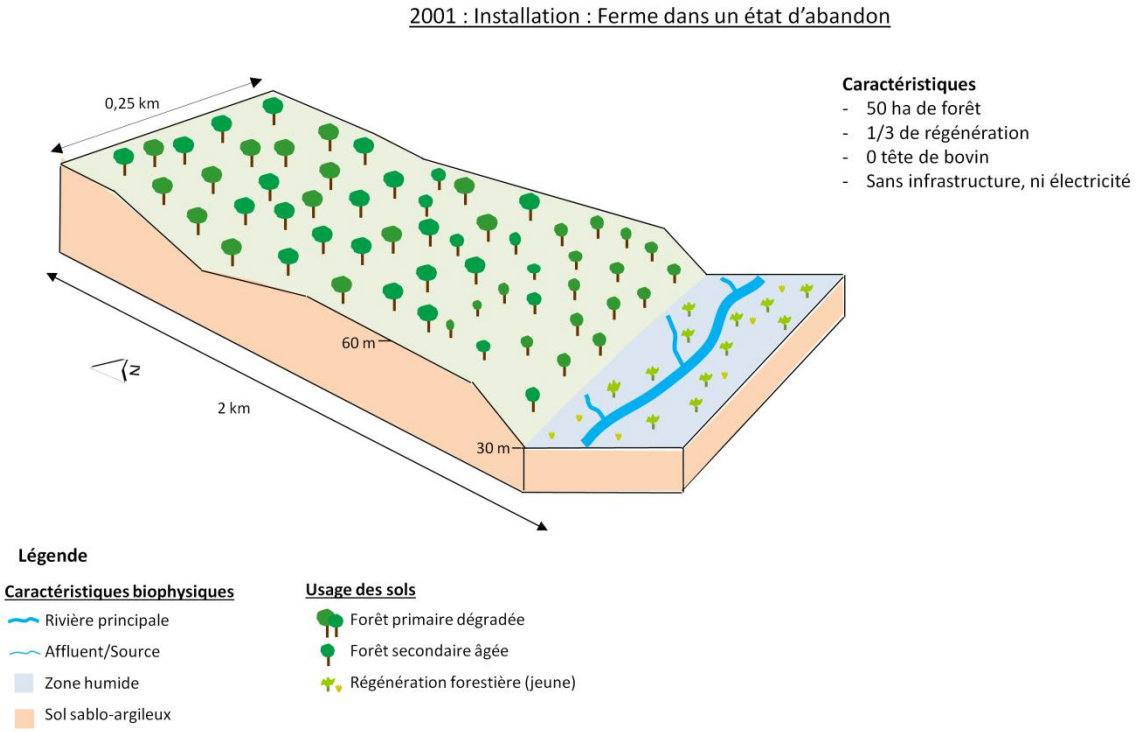
- ***Phase 1 : Installation et capitalisation*** : L'agriculteur, José, a acquis le lot quelques mois après l'invasion de la fazenda Oriente en 2001. Il avait à l'époque 18 ans. Le lot (44 ha) était à

l'abandon, sans infrastructure, ni habitation, ni électricité, accessible uniquement par canoë. 1/3 des surfaces étaient en friche (ancien pâturage dégradé implanté en bordure du cours d'eau) et 2/3 étaient couverts de forêt primaire dégradée (exploitation du bois par des forestiers).
José rencontre sa compagne quelques mois plus tard. L'isolement, la faible disponibilité de capital initial et de main d'œuvre les amènent à développer un système de production de subsistance basé sur la production et l'autoconsommation de cultures vivrières (riz, maïs, légumes), et la fabrication et vente de farine de manioc, peu utilisateur d'espace (défriche de 3 ha/an de forêt secondaire avec retour 3 ou 4 an après). La vitesse d'expansion est faible. L'agriculteur travaille aussi à l'extérieur (à la journée) pour améliorer la rente de la famille.
A cette époque les exploitants considèrent trois types de ressources dans leurs décisions d'organisation spatiale :
- l'eau bleue (de surface et souterraine) : ils installent leur maison près du cours d'eau pour faciliter l'accès à l'eau.
- l'état de la végétation : les exploitants préfèrent commencer par exploiter les surfaces en friche car elles sont moins exigeantes en main d'œuvre que celle de forêt primaire en arrière. La forêt est vue comme une réserve d'espace et de fertilité naturelle.
- le drainage : les surfaces de bordure de cours d'eau sont abandonnées du fait de la présence d'eau résiduelle qui rend inapte la production de cultures annuelles.

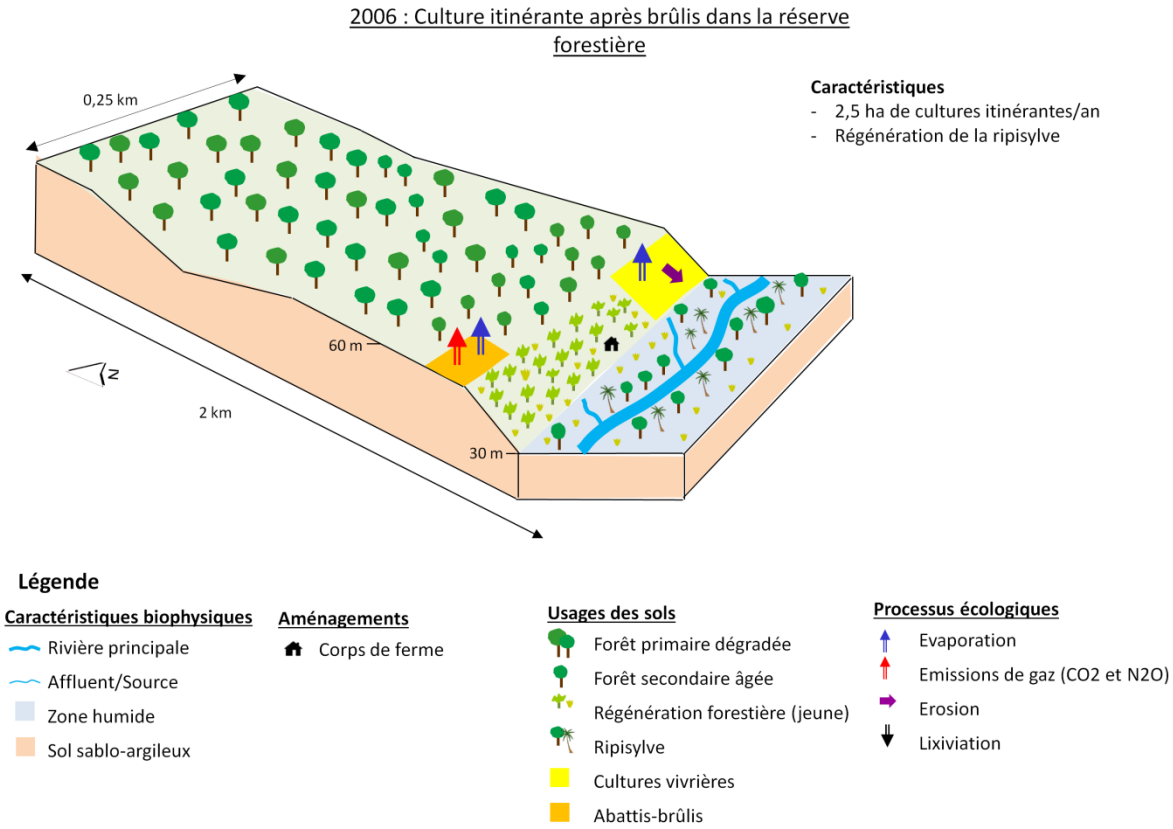
- ***Phase 2 : Expansion du système extensif*** : La transition vers une autre logique de cohérence a eu lieu lorsque les éleveurs ont commencé à investir dans l'élevage bovin. A la fin des années 2000, avec l'amélioration des infrastructures routières pour accéder à la communauté, le capital accumulé avec la vente de la farine de manioc et la réalisation de travaux temporaires dans les fazendas voisines est réinvesti dans l'implantation progressive de pâturage (8 ha) et l'achat des premières têtes métisses.
En 2014, la naissance de leur fille a généré plusieurs changements dans le fonctionnement de l'exploitation : déménagement dans le village car la vie sur le lot est très rudimentaire (pas d'électricité, pas de route), réduction de la main d'œuvre familiale disponible (pluriactivité pour VL qui préfère travailler hors de la ferme pour avoir une rente régulière, tandis que ML s'occupe du foyer). La distance et la réduction de la main d'œuvre familiale (0,4 UTA) rendent difficiles les travaux sur les cultures vivrières. De plus, le couple se dit « fatigué » de fabriquer de la farine de manioc sans garantie de revenu régulier. Ils adaptent donc leur système de production à ces nouvelles conditions. Ils abandonnent le système de subsistance et se tournent davantage vers l'élevage extensif, bien moins exigeant en main d'œuvre. Cette diversification est favorisée par la construction en 2014 d'un pont leur permettant d'accéder à leur lot par la route (20 km), et facilitant donc les entrées et sorties de cheptel (en échange de bois, un fazendeiro a construit un pont et leur a fourni des heures de tracteur dans les exploitations). En 2015, le troupeau compte 11 têtes.
La gestion de l'élevage est extensive et repose sur une faible charge à l'hectare. Les pâturages sont sujets à dégradation (enfrichement, baisse de la matière organique des sols) du fait des incendies réguliers qu'il leur est difficile de surveiller (éloignement, peu de matériel).

En termes de perception des ressources et des unités de paysages, on observe un changement. Les éleveurs ont choisi d'implanter du pâturage sur les versants ondulés pour assurer une couverture permanente du sol et limiter les problèmes d'érosion hydrique. Les paysages se transforment en mosaïque de prairie et régénération randomisée en expansion dans la forêt dégradée.

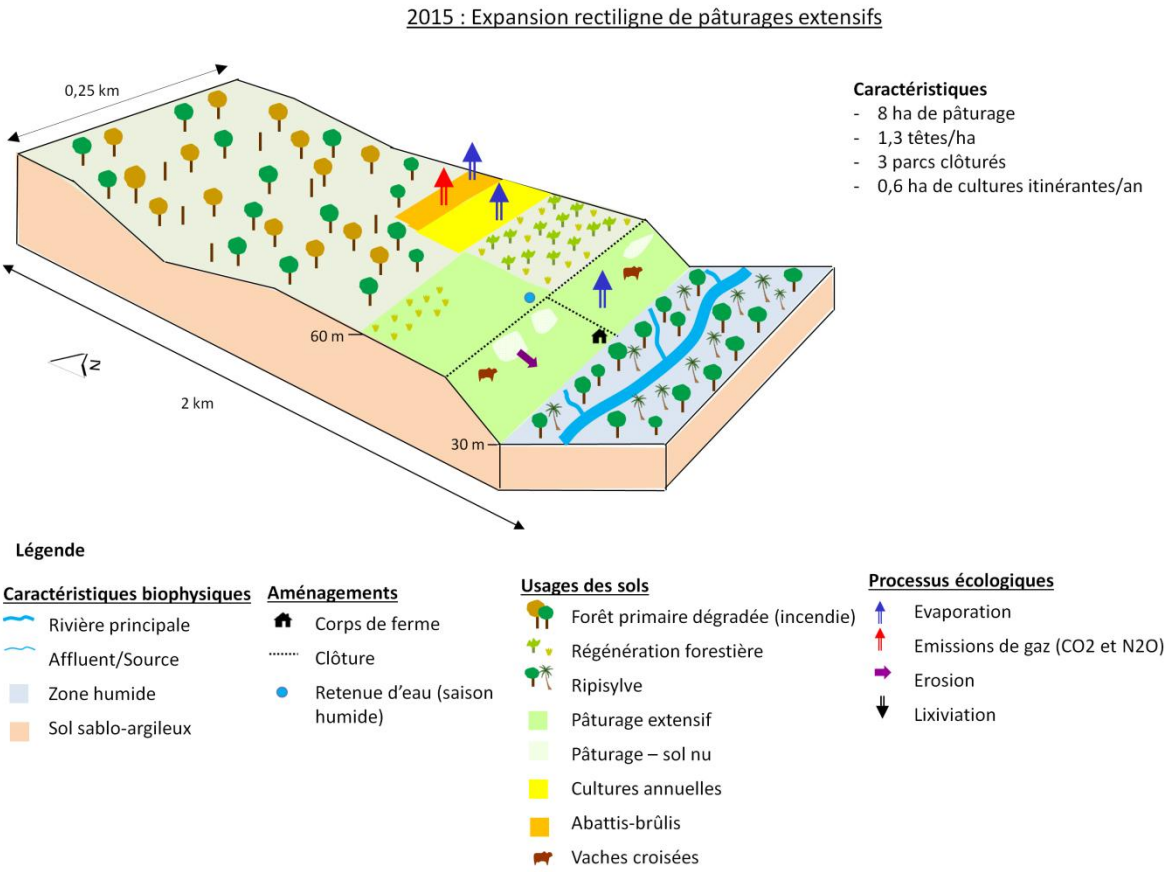
- ***Phase 3 : Projet d'intensification :*** A terme les exploitants projettent d'intensifier la gestion du système fourrager (travail du sol, fertilisation, division des parcs, couloir d'accès au cours d'eau, construction d'un corral).
De plus, du fait de la faible taille de l'exploitation, ils planifient de diversifier l'usage des sols vers des activités plus exigeantes en main d'œuvre et à plus forte valeur ajoutée (pisciculture, maraîchage irrigué, cultures pérennes telles que le poivre et les fruits de la passion, lait). Enfin, ils souhaitent agrandir l'espace productif (jusqu'à 20 ha de pâturage) dans la réserve forestière dégradée car ils n'ont pas suffisamment d'espace pour produire. Cette stratégie aboutit à une réduction de la surface en forêt d'environ 66% à 30% (en incluant les ripisylves).



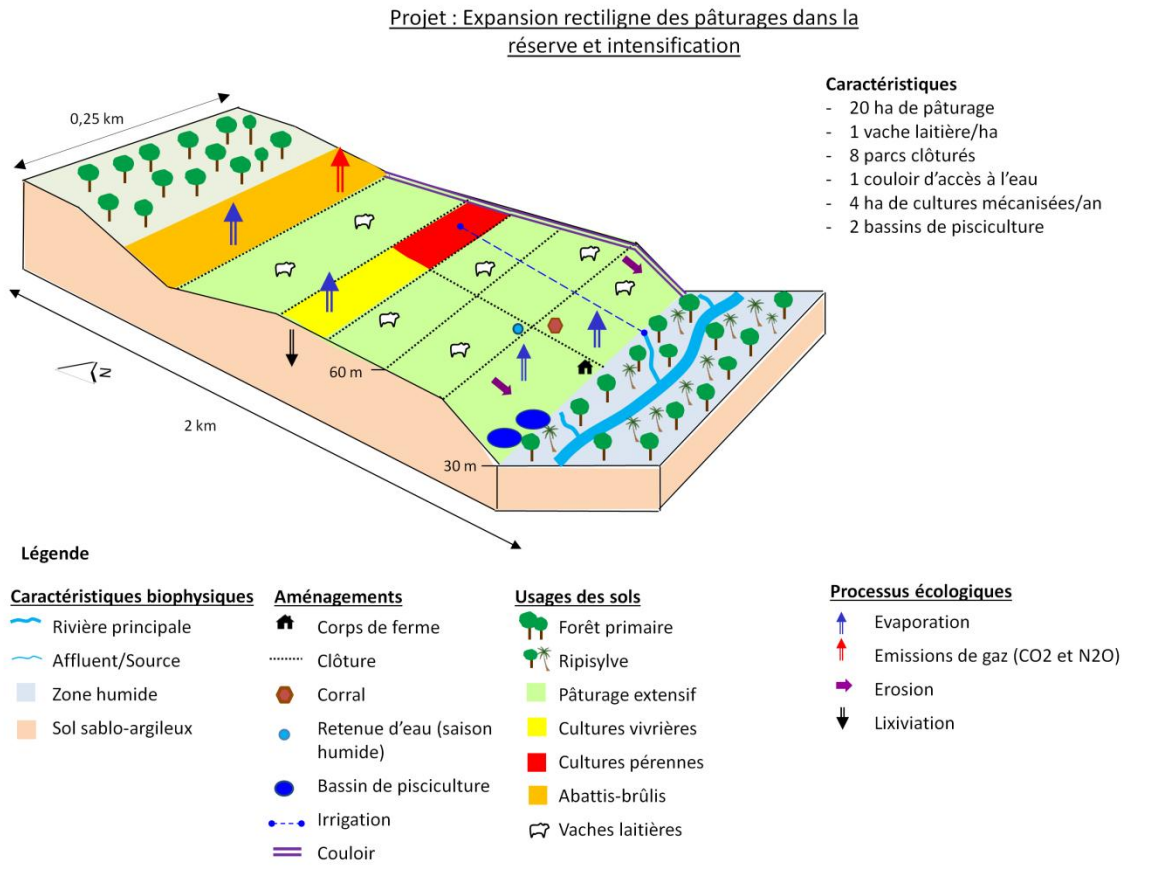
Modèle graphique de l'exploitation familiale de type pionnière en phase d'installation



Modèle graphique de l'exploitation familiale de type pionnière en phase de capitalisation



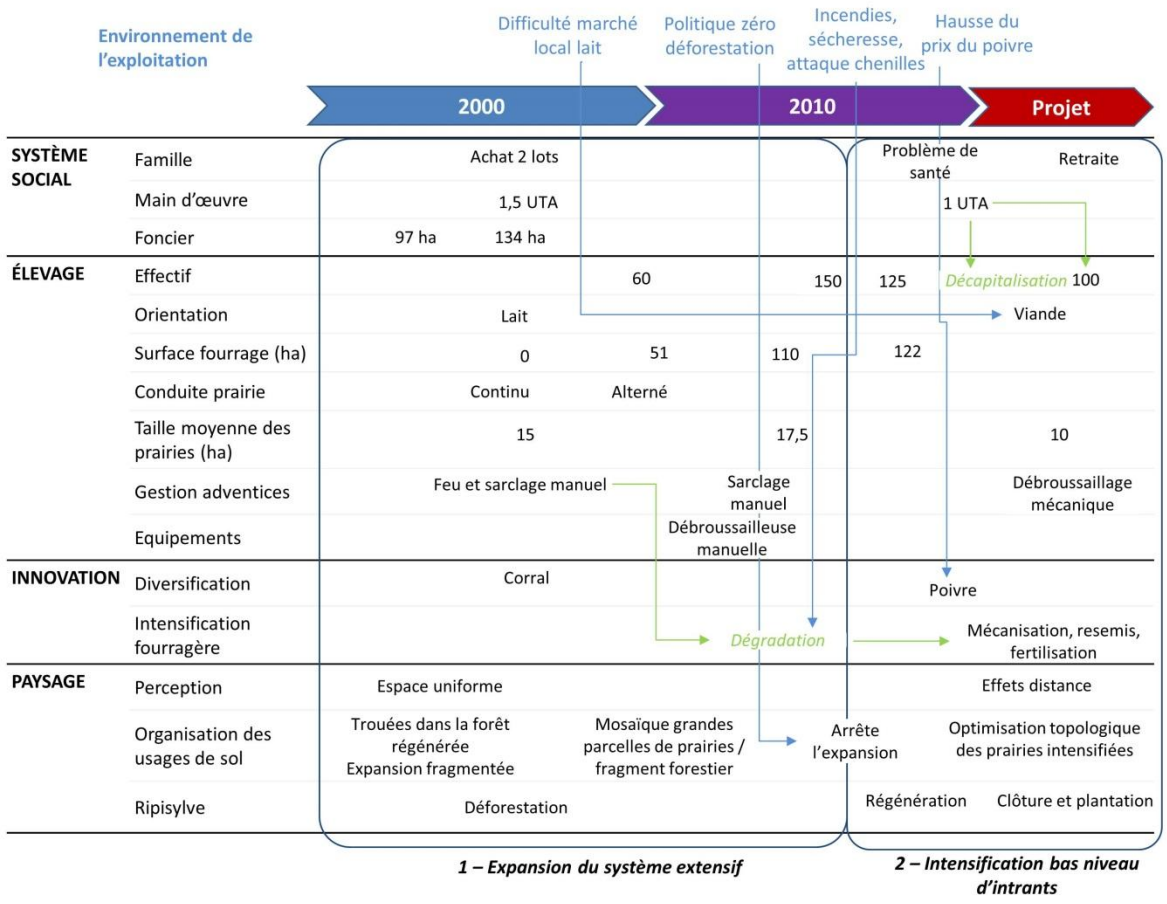
Modèle graphique de l'exploitation familiale de type pionnière en phase d'expansion



Modèle graphique de l'exploitation familiale de type pionnière en phase d'intensification

Type 2 : Extensive consolidée : Intensification bas niveau d'intrants

Pour ce cas type, nous distinguons deux phases de cohérence.



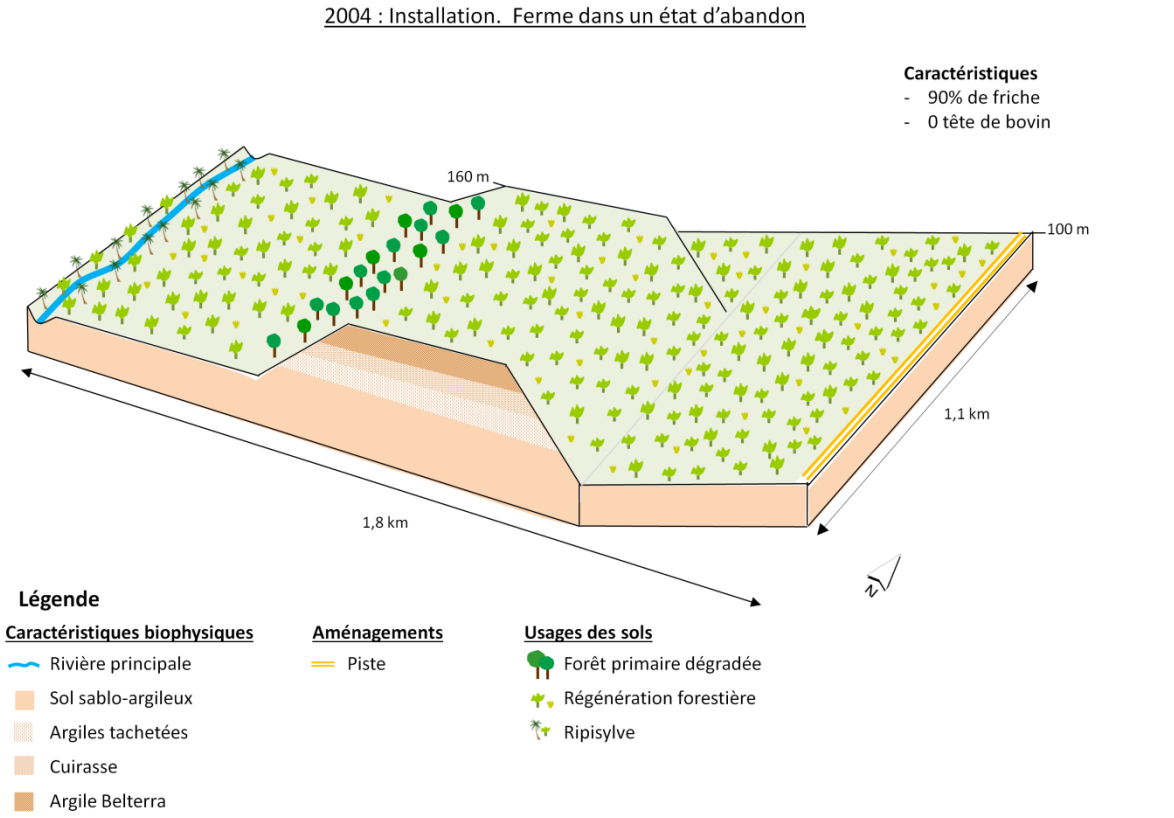
Trajectoire de l'exploitation familiale extensive consolidée

Phase 1 : Expansion du système extensif : Originaire du Sergipe, cette famille a quitté le sertão aride à la recherche d'une région plus humide. Après une tentative à Dom Eliseu à la frontière avec le Maranhão, ils se sont installés à Cacimbão en 2004 avec le capital issu de la vente de leurs terres et du bétail. Leurs deux enfants (30 et 34 ans aujourd'hui) ne les ont pas suivis et sont restés dans l'Etat du Sergipe pour leurs études. Quand la famille est arrivée, il n'y avait quasiment rien, aucune infrastructure. Les exploitants achètent un premier lot de 97 ha d'un producteur de manioc. Pratiquement tout le lot avait été défriché et était dans un processus de régénération. Il subsistait à peine 10 ha de forêt sur une pente. Les exploitants ont préféré un lot en régénération qu'en forêt primaire pour la plus grande facilité à défricher. En 2006, les exploitants achètent un lot adjacent de 38 ha ce qui totalise une surface totale de 135 ha.

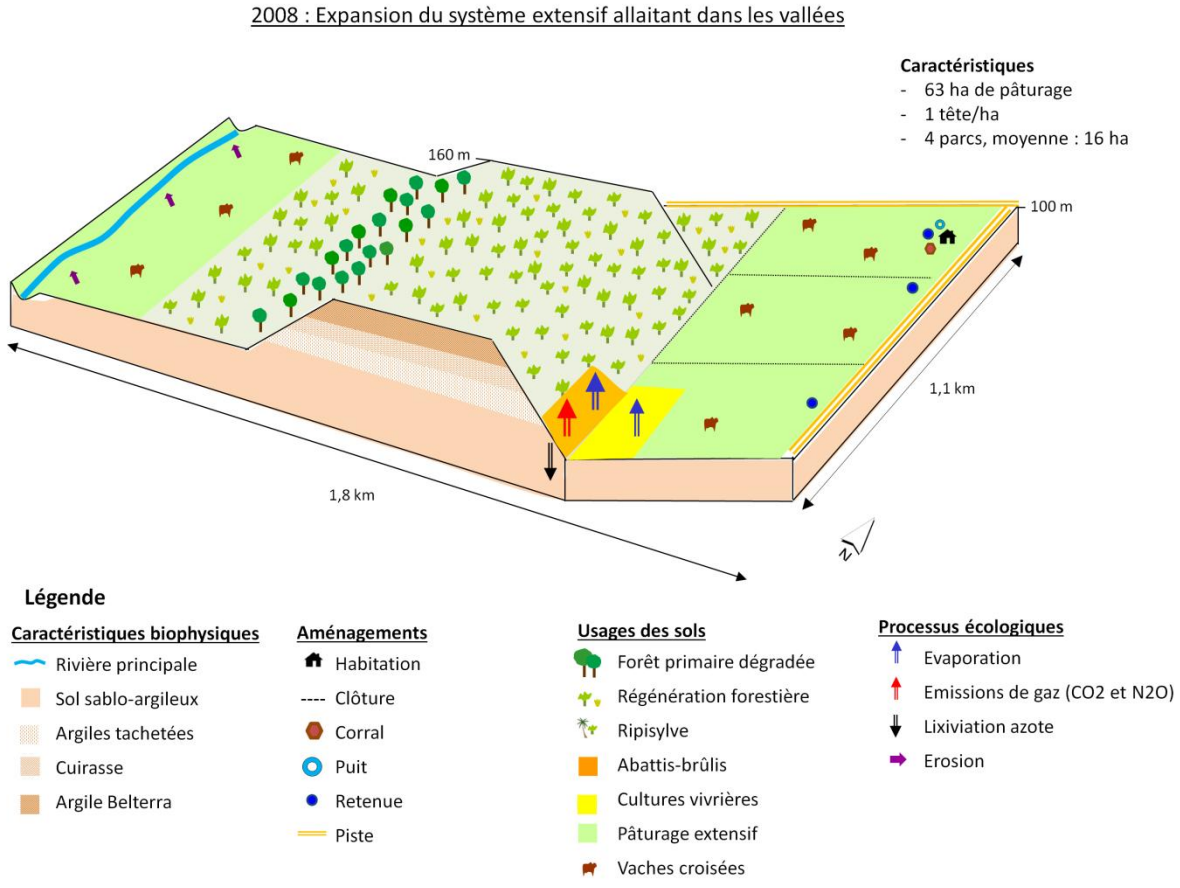
La disponibilité de capital leur permet de convertir rapidement les régénérations en cultures vivrières (riz, maïs, manioc) puis en pâturage (rythme de défriche de 10 ha/an). Ils investissent également progressivement dans la constitution d'un cheptel bovin qui atteint 150 têtes. Les 10 premières années, les exploitants ont orienté leur système de production vers la production laitière et la fabrication de fromage (jusqu'à 20 à 25 vaches traites par jour). La

gestion des prairies est extensive et repose sur l'usage du feu (jusqu'en 2008), le sarclage manuel et le pâturage alterné.
Les décisions d'expansion des prairies sont dictées par l'accès à l'eau bleue pour les bovins. Les exploitants commencent par défricher les fonds de vallées où il leur est possible de construire un puit ou de creuser des retenues artificielles et la bordure du cours d'eau (cette exploitation ne possède qu'un seul cours d'eau en limite du lot). Ils convertissent ensuite les versants concaves de moyenne pente, et la zone de plateau. Le relief n'est pas pris en compte à l'époque.

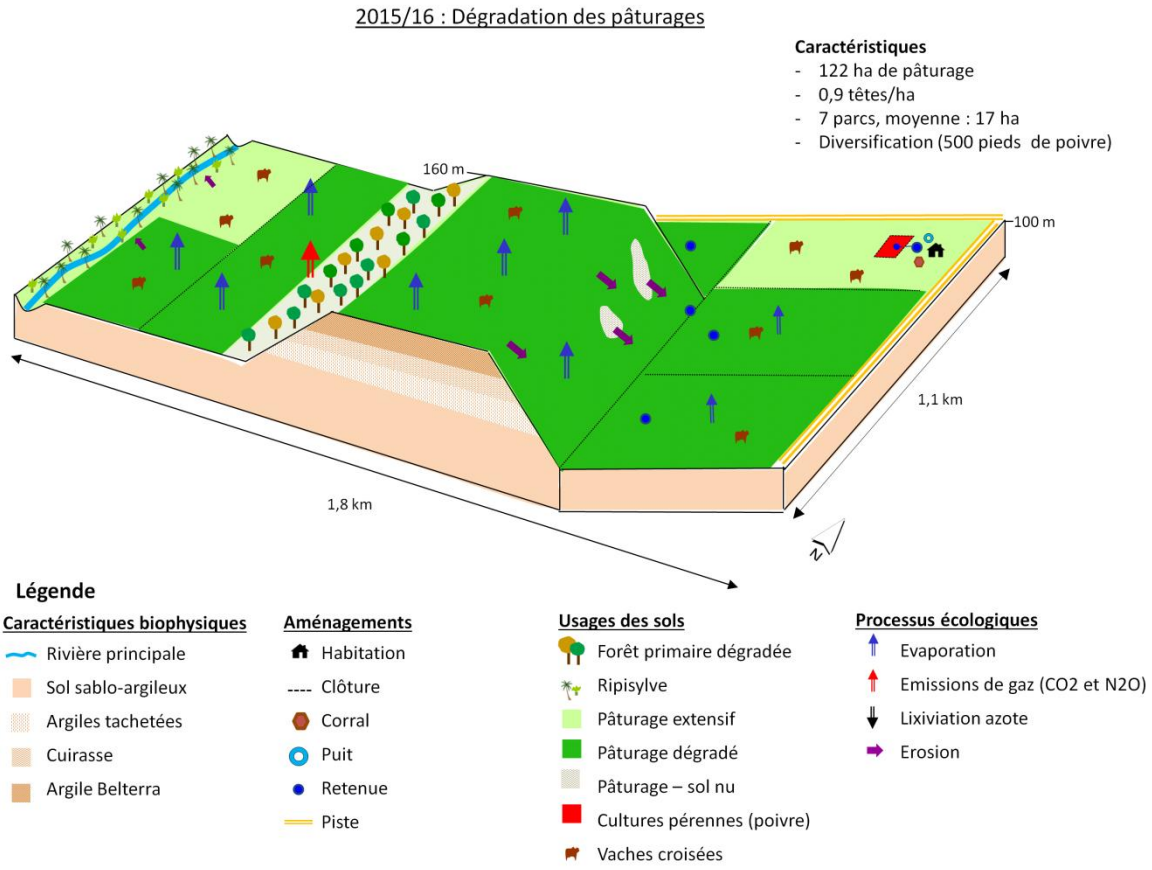
Phase 2 : Intensification bas niveau d'intrants : L'exploitation a changé de cohérence lorsqu'elle a décidé de faire évoluer son troupeau vers la production de viande (2014-2015). L'exploitation a réduit l'activité laitière et ne traie plus que 6 vaches par jour pour la consommation de la famille. Deux raisons expliquent cette évolution : des problèmes de santé et des difficultés d'accès à un marché local pour le lait (faible demande locale, absence de laiterie). Elle a aussi dû décapitaliser une partie du cheptel pour financer des frais médicaux (le bétail sert d'épargne). Afin de ne pas mettre « tous les œufs dans le même panier » et compte tenu des prix élevés du poivre et du développement local de la filière, l'exploitation a investi dans la plantation de poivre (500 pieds).
Les pâturages jusqu'alors productifs se sont rapidement dégradés suite à plusieurs incendies, des épisodes de sécheresse répétés, une invasion de chenille et une mauvaise gestion de la charge (pâturage des repousses par manque de fourrage sur l'exploitation). Les sols mis à nu ont alors été colonisés par des adventices.
Le projet de la famille serait donc de réformer progressivement les pâturages dégradés, en travaillant le sol, fertilisant et semant une graminée. Mais pour l'instant le manque de ressources ne leur permet que de débroussailler. Si les étés continuent à être aussi secs, les exploitants nous ont confié qu'il faudrait irriguer certains paddocks, produire ou acheter du fourrage (tels que du maïs, sorgho, herbe à éléphant) et diviser davantage les prairies. Ils envisagent également de mieux protéger la ripisylve (clôture et plantation d'espèces natives telles que l'açaí et graviola). Mais l'impossibilité d'accéder au crédit et le faible capital dont ils disposent les obligent à limiter leurs investissements. De plus, les risques élevés d'incendie et la proximité de la retraite (sans reprise familiale prévue) rend incertain le retour sur investissement. C'est pourquoi, ils préfèrent opter pour des pratiques peu chères à bas niveau d'intrants d'autant plus.



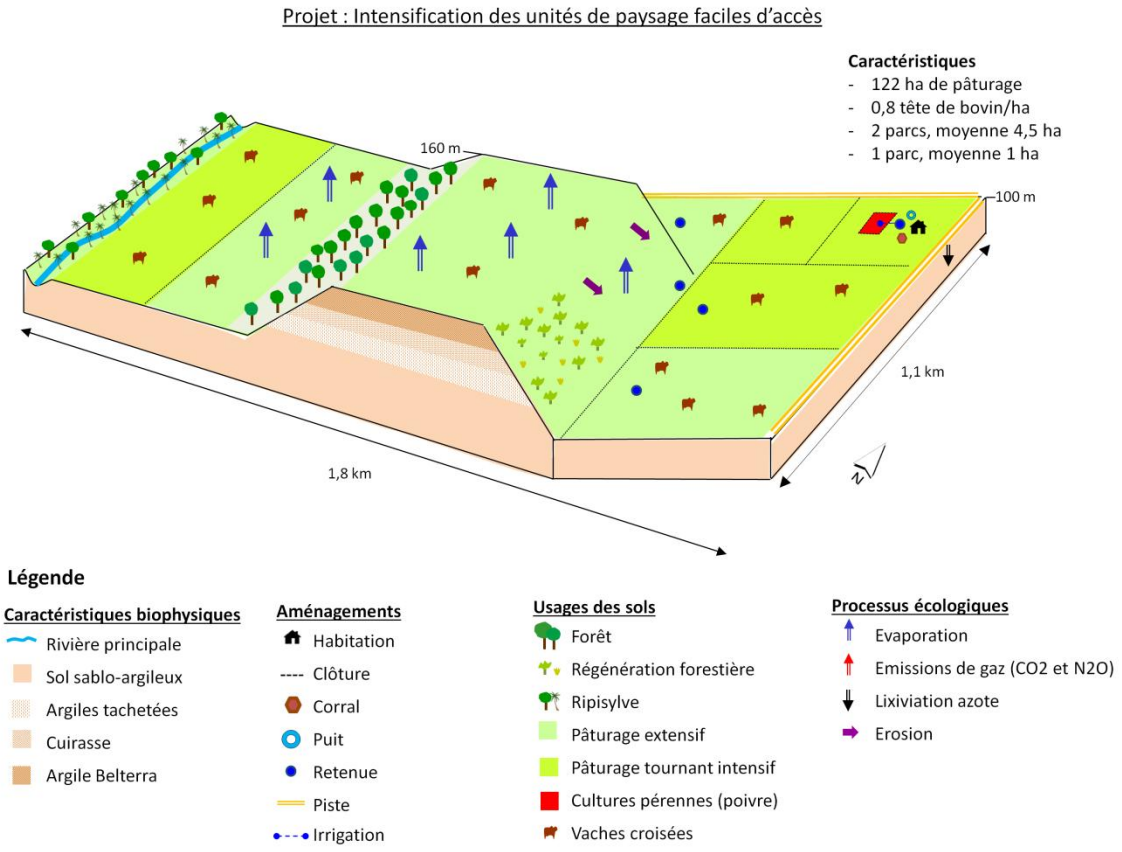
Modèle graphique de l'exploitation familiale extensive en phase d'installation



Modèle graphique de l'exploitation familiale extensive en phase d'expansion



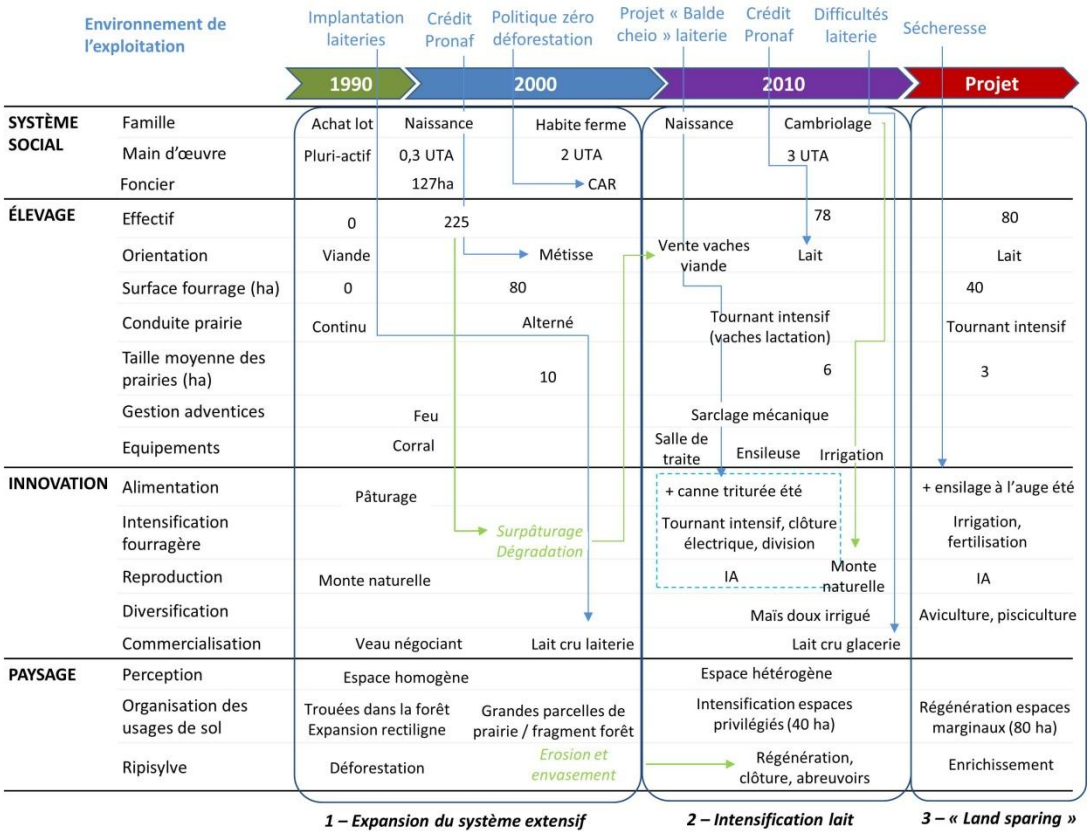
Modèle graphique de l'exploitation familiale extensive face à la dégradation des pâturages



Modèle graphique de l'exploitation familiale extensive en phase d'intensification

Type 3 : Intensif en intrants lait

Nous distinguons trois phases de cohérence.



Trajectoire de l'exploitation familiale laitière intensive

Phase 1 : Expansion du système extensif : Originaire du Rio Grande do Sul et né d'une famille d'agriculteurs, l'exploitant est arrivé à Redenção en 1994. Il a acheté ce lot en 1996, c'est le second occupant. A l'époque, la moitié du lot avait déjà été défrichée mais était en situation de régénération. Il n'y avait aucune infrastructure.

De 1996 jusqu'à 2008, l'exploitant travaille comme pluri-actif. Il vit en ville avec sa famille et investit son revenu dans le développement de l'exploitation ce qui permet un développement rapide de l'exploitation : installation de pâturage (11 ha/ an entre 1996 et 2005), achat et métayage de cheptel allaitant (jusqu'à 225 têtes), construction d'un corral. Les pâturages sont installés après abattis-brûlis de forêt ou de régénérations sur 80 ha. Le paysage étant perçu comme un espace transparent, l'expansion des pâturages dans la forêt est réalisée de manière rectiligne, de l'avant vers l'arrière de la propriété. La gestion des pâturages est extensive (sans fertilisation, peu d'entretien, pâturage dans des grands parcs de 10 ha, abreuvement au niveau du cours d'eau) avec un chargement à l'hectare élevé (2,8 têtes/ha).

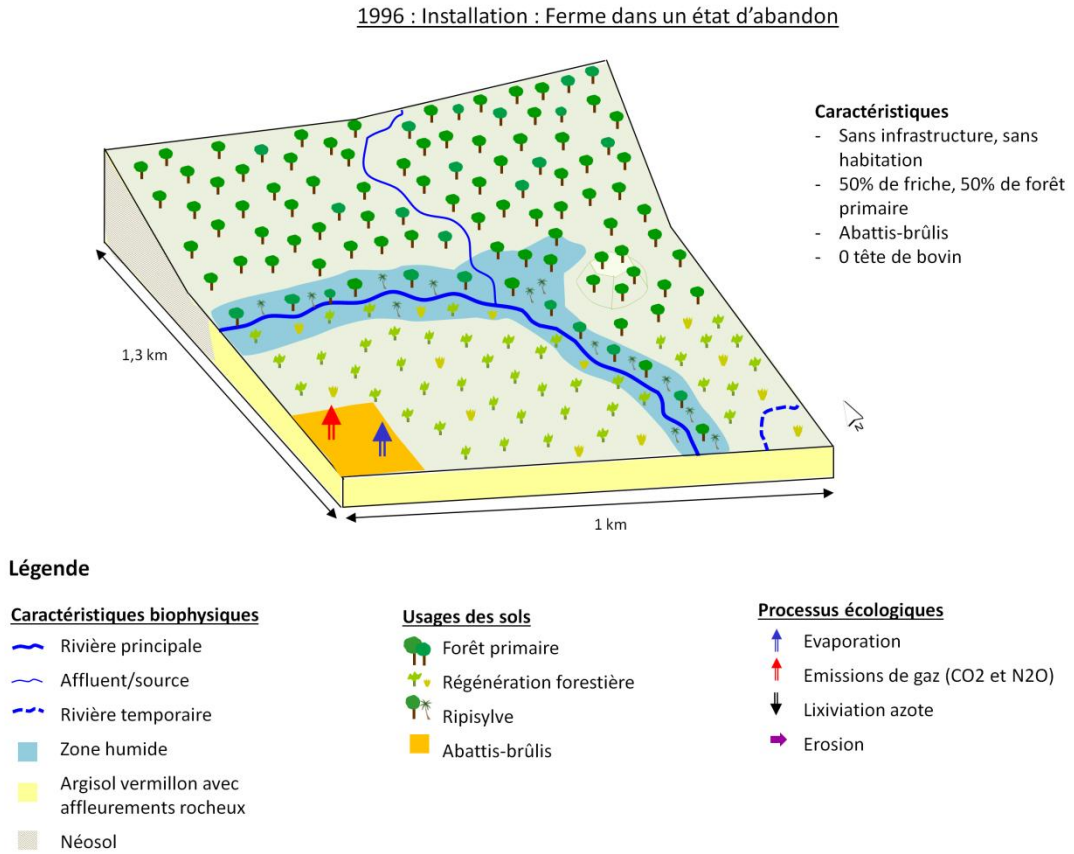
En 2005, après régularisation de la situation foncière de l'exploitation, elle accède à un crédit Pronaf A et achète 10 vaches métisses pour produire du lait. Le lait est collecté par la laiterie implantée à Conceição do Araguaia (100 km).

Phase 2 : Intensification lait : A partir de 2008, la famille décide de se dédier à temps plein à l'activité laitière, elle quitte la ville et s'installe sur le lot. Deux principaux facteurs encouragent cette reconversion dans le lait. Premièrement, un excès de l'usage du feu et le surpâturage entraînent une dégradation des ressources fourragères (développement d'adventices herbacées et arbustives) et des sols (baisse de la fertilité) et une diminution de la productivité des pâturages, nécessitant de réduire la taille du cheptel. La reconversion dans l'élevage laitier lui permet de maintenir le revenu avec un plus petit troupeau. Deuxièmement, en 2012, elle bénéficie du programme « 300 Balde cheio » à travers la laiterie et implémente de nouvelles technologies visant à accroître la productivité par unité animale : IA, implantation de pâturage tournant intensif (24 micro-parcelles sur 1 ha), clôtures électriques, plantation de canne fourragère pour la complémentation des vaches en lactation en saison sèche (0,8 ha de canne triturée), investissement dans une salle de traite avec deux postes, refroidissement du lait dans un tank à lait de 1000 litres.
L'intensification s'accompagne d'investissements dans le cheptel (achat de 32 génisses laitières à travers un autre crédit Pronaf « Mais Alimentos »), la mécanisation (tracteur, débroussailleuse, disque, semoir 4 rangs, ensileuse), l'irrigation pour produire des épis de maïs vendus aux commerces locaux et de l'ensilage en double culture durant la saison sèche sur 1 ha).
Elle trouve aussi un nouveau marché pour le lait (vente directe à un glacier), plus stable et rémunérateur que la collecte par la laiterie.
Ce processus d'intensification a généré une nouvelle organisation spatiale des usages des sols.
(i) Les parcs à l'avant ont été divisés et le pâturage devient tournant en saison humide (pas en saison sèche car la production fourragère est trop faible), alors qu'il reste alterné dans les parcs de l'arrière de l'exploitation. La distance au corral et la facilité d'accès (près de la route) explique ce choix.
(ii) Les usages des sols qui nécessitent d'être mécanisés et fertilisés (le module de pâturage tournant, le maïs et canne fourragère) sont implantés sur les seules unités de paysage de pénéplaine aptes à la mécanisation, c'est-à-dire sans relief ni affleurement rocheux et avec une bonne capacité de drainage.
(iii) Les cultures destinées à être irriguées (maïs) sont implantées à proximité du cours d'eau.
(iv) Les fourrages destinés à être stockés (ensilage) sont implantés dans un rayon proche de certains aménagements clés (corral, salle de traite) pour faciliter les flux de fertilité (épandage des déjections) et leur distribution (alimentation).
(v) Les ripisylves sont régénérées naturellement, enrichies avec des espèces natives (buriti) et clôturées afin d'éviter l'accès et le piétinement par les bovins et maximiser le débit du cours d'eau (qui a baissé dû à un envasement). Deux abreuvoirs sont installés.

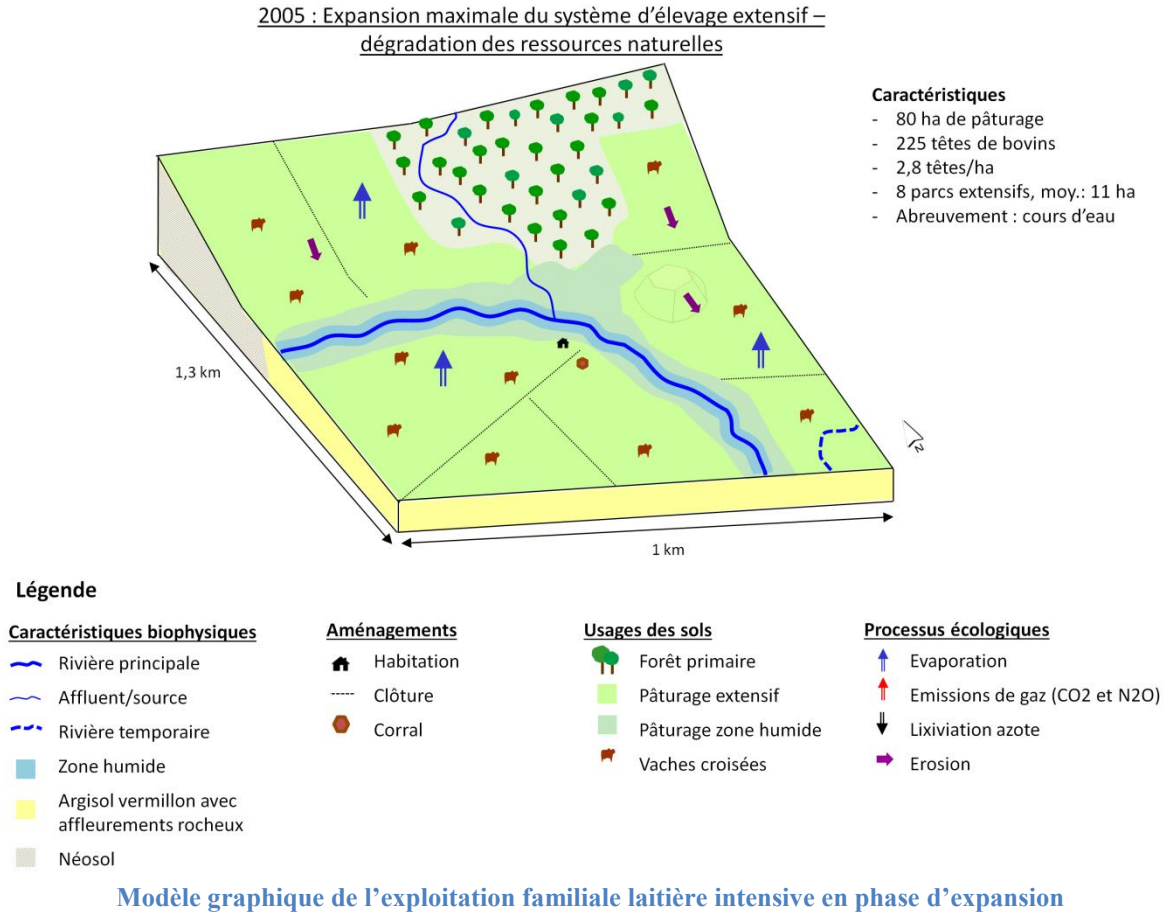
Phase 3 : « Intensification de type Land sparing » : L'exploitation élève aujourd'hui 100 têtes sur 80 ha avec un chargement de 0,86 UA/ha. Après une courte période d'incertitude sur l'avenir de l'exploitation (suite à un cambriolage), l'exploitation a décidé de continuer à tester de nouvelles pratiques afin d'accroître la productivité par animal et par unité de surface (par 2,5 ou 3) et d'intensifier la production sur les espaces à plus fort potentiel (30% de la taille de

l'exploitation) et de protéger des zones dégradées ou à plus faible potentiel (sur une surface équivalente à 70%).
Les exploitants envisagent une adaptation des pratiques de conduite du système fourrager : implanter une autre unité de pâturage tournant ; semer des graminées avec une haute teneur en protéines (22%) ; amender et fertiliser tous les pâturages ; fertirriguer le pâturage tournant pour accroître la production fourragère en saison sèche et réduire les besoins en fertilisants (en récupérant les eaux de lavage de la salle de traite) ; diviser davantage les parcs ; installer plus de clôtures électriques. Au niveau du troupeau, ils vont travailler sur la génétique du troupeau pour améliorer la qualité du lait et la quantité produite (tripler la production par vache de 5 à 15 litres/jour/vache) et utiliser de nouveau l'IA. Ils envisagent enfin de se diversifier dans la pisciculture et la production de volailles.
Les déterminants de la localisation des pratiques d'intensification sont de deux types :
- la valorisation des ressources naturelles : l'exploitation prévoit d'abandonner les surfaces les moins productives, c'est-à-dire les marécages, les pentes des versants, les zones d'affleurement rocheux et d'accès difficile (zone nécessitant de traverser une APP avec présence d'eau résiduelle et de *sucuri amarela*, anacdona jaune) et d'y préserver la forêt et la biodiversité ;
- la valorisation des ressources humaines : elle préfère gérer une plus petite surface dans un rayon autour de la salle de traite afin de réduire les déplacements du troupeau laitier, assurer une meilleure surveillance et réduire les coûts d'entretien des clôtures et du pâturage. L'abandon de surfaces devient nécessaire pour compenser les besoins en main d'œuvre supplémentaires de l'intensification.

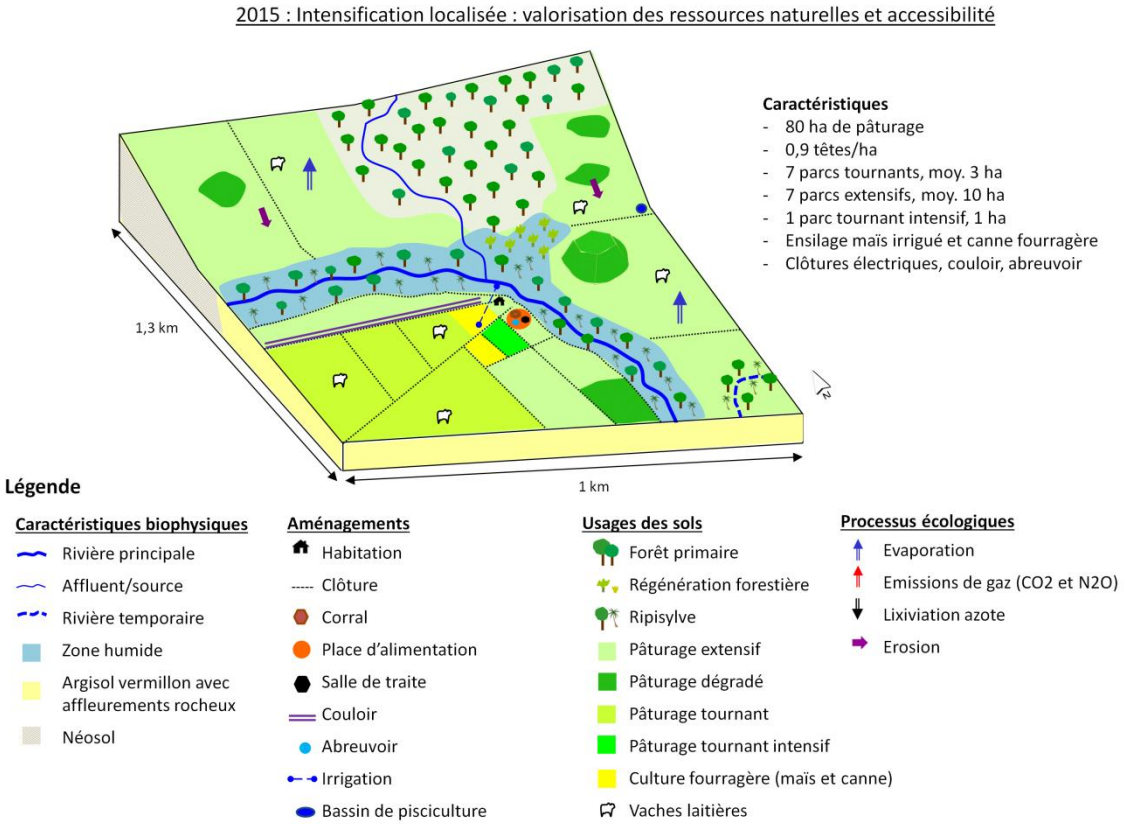
Cette stratégie se rapproche de ce qui est qualifié dans la littérature comme land-sparing.



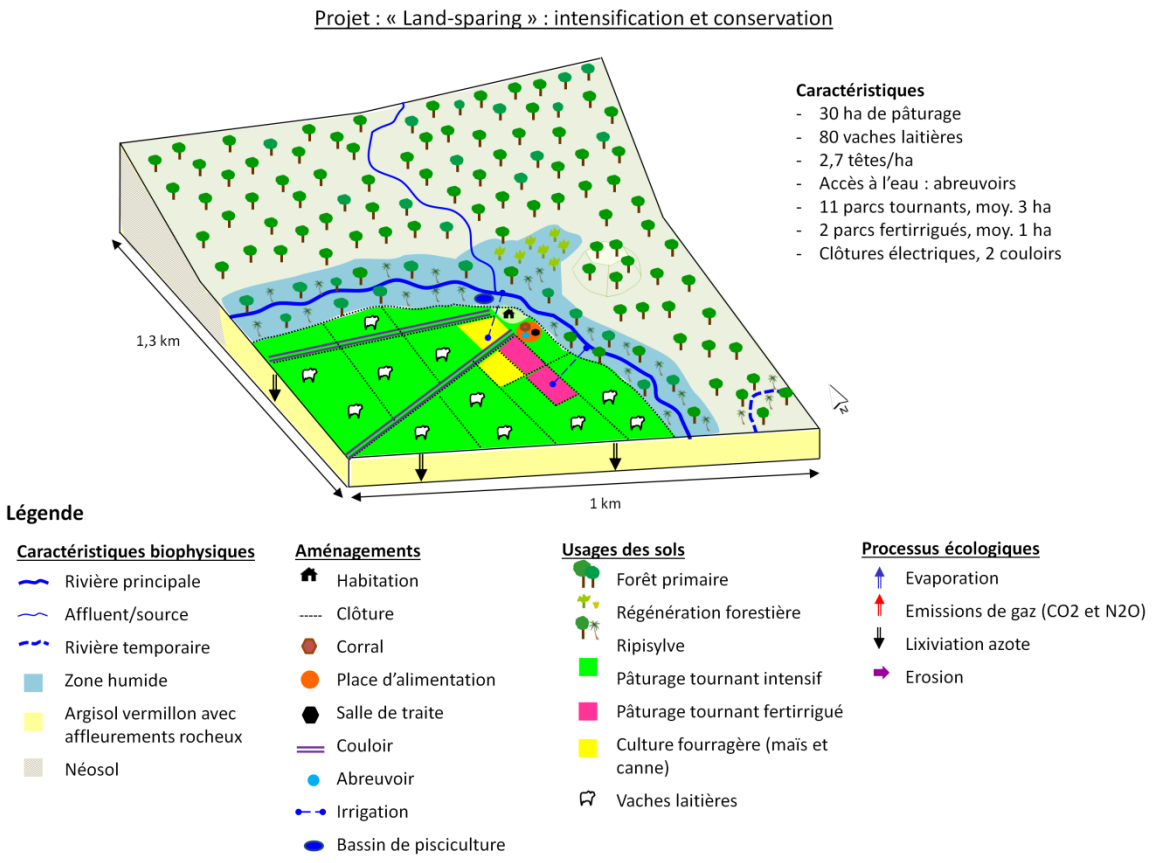
Modèle graphique de l'exploitation familiale laitière intensive en phase d'installation



Modèle graphique de l'exploitation familiale laitière intensive en phase d'expansion



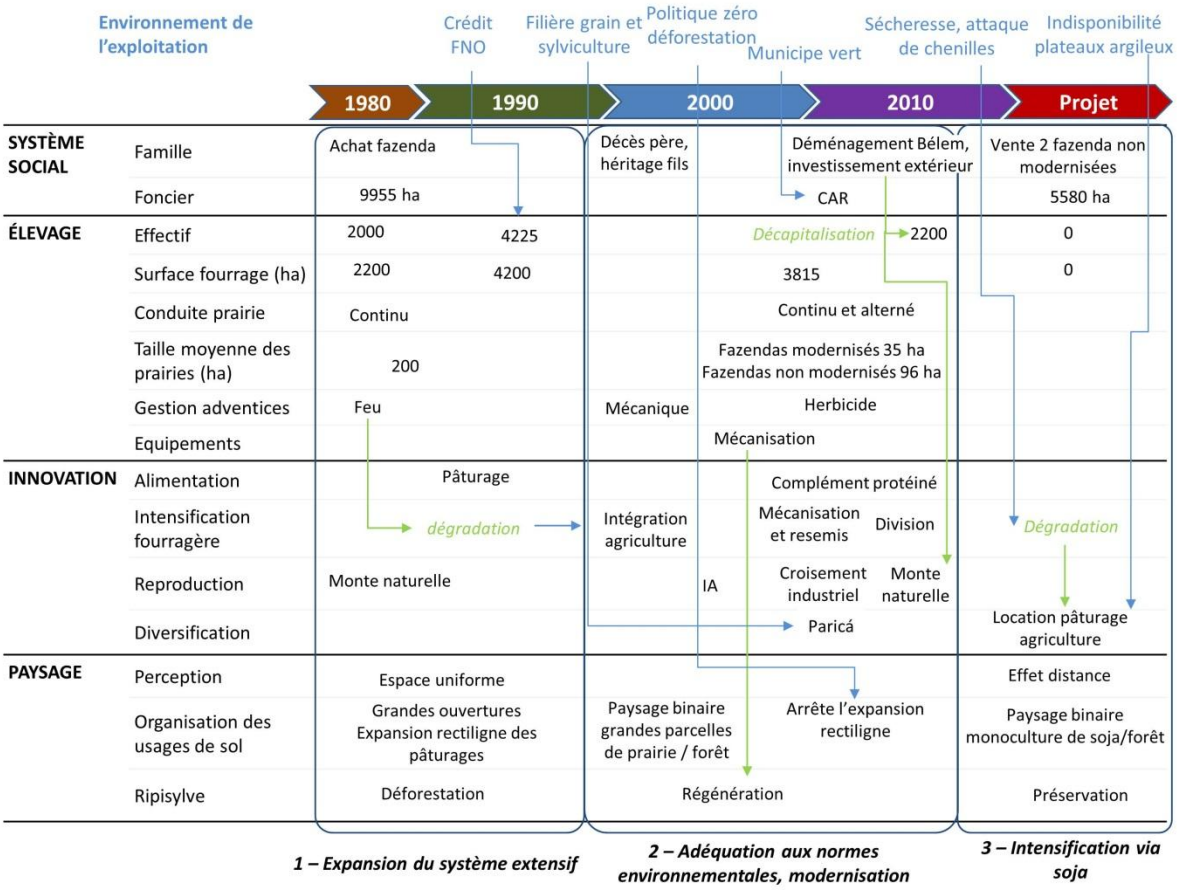
Modèle graphique de l'exploitation familiale laitière intensive en phase d'intensification



Modèle graphique de l'exploitation familiale laitière intensive en phase d'intensification de type « land-sparing »

Type 4 : Fazenda traditionnelle extensive sans feu

Nous avons décomposé la trajectoire en trois phases de cohérence.



Trajectoire de la fazenda traditionnelle extensive

Phase 1 : Expansion du système extensif : Le père de l'exploitant, originaire du Minas Gerais, est un pionnier arrivé à Paragominas en 1971. Il a commencé à travailler avec le commerce de bœufs, puis le transport puis le bois et crée deux scieries. L'argent économisé est investi dans l'achat de fazendas à Paragominas et Ulianópolis (fin des années 80, début 90), dont 4 fazendas limitrophes, totalisant 9955 ha dans le bassin versant du Rio Gurupi à Paragominas.

Les fazendas étaient encore occupées par 70 % de réserve forestière. Grâce au soutien financier des banques d'investissement en Amazonie, il convertit rapidement de larges surfaces forestières en pâturage (190 ha/an) avec un minimum d'investissement humain et financier (monte naturelle, mode de pâturage continu, feu, parcs immenses de 200 ha en moyenne).

Les paysages étant perçus comme des espaces homogènes, l'expansion des pâturages se fait de manière rectiligne depuis la route, sans considérer les ressources naturelles exceptée la localisation des cours d'eau. Les ripisylves sont déforestées pour permettre l'abreuvement des bovins.

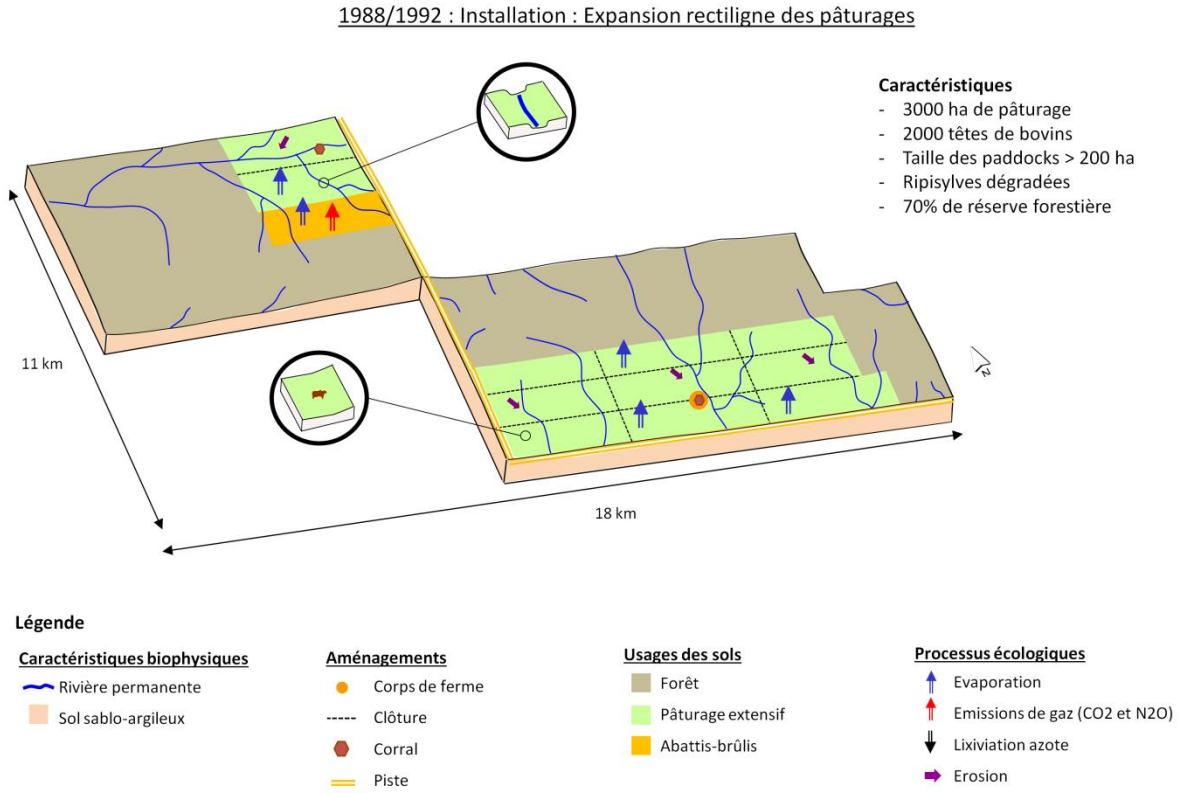
Phase 2 : Adéquation aux normes environnementales et modernisation : A partir des années 2000, le père de l'exploitant concentre ses investissements dans la réforme des pâturages. Il passe un contrat avec des agriculteurs et intègre 500 ha de pâturages dégradés avec du maïs. La fazenda arrête d'utiliser le feu pour nettoyer les pâturages et recourt à la mécanisation. Les zones qui ne sont pas aptes à la mécanisation (relief en bordure des cours d'eau) ne sont plus nettoyées et se régénèrent naturellement.

En 2005, au décès de son père, l'exploitant hérite des quatre fazendas. Au départ, il suit la même stratégie et continue à moderniser l'élevage par des pratiques simples : réforme des pâturages dégradés (semis de Mombaça), division des parcs, recours à l'IA, au croisement industriel et à l'IATF sur 30% des mères. Il se diversifie également dans la sylviculture (plantation de Paricá).
Les paysages évoluent. Si la bipolarité pâturage vs forêt se maintient, nous observons au sein des pâturages une différentiation de l'espace avec coexistence de pâturages modernisés et de pâturages dégradés. Les déterminants de la localisation des pratiques de gestion du système fourrager sont principalement topologiques et visent à rationaliser le travail. La localisation des ressources naturelles et des contraintes biophysiques (différence de texture de sol, relief, versant exposé au vent en saison sèche) est secondaire. Dans les paysages, on observe ainsi un gradient d'intensification selon la distance aux éléments clés du système d'élevage, visible à travers la taille des parcs (les parcs plus distants ou moins accessibles sont trois fois plus grands), et la dégradation des pâturages (les plus éloignés sont moins entretenus).

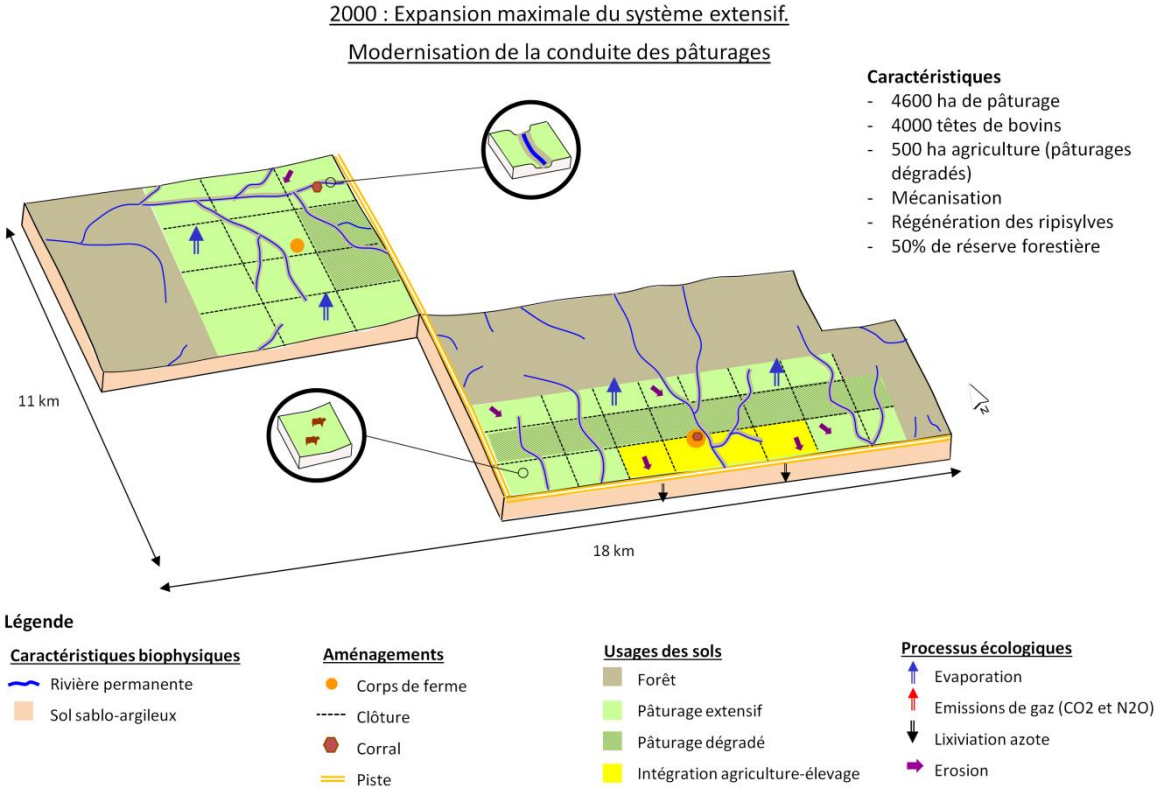
Phase 3 : Intensification via la location à des sojeiros : Initialement (fin 2014), l'exploitation avait pour projet de réformer petit à petit les pâturages qui se dégradaient (fertilisation, division) et d'améliorer la génétique et la taille du troupeau. Toutefois, l'exploitation ne veut pas prendre trop de risques et veut donc minimiser les investissements. « Je préfère apprendre petit à petit. Je ne suis pas pionnier, je laisse faire les autres en premier ».
Après avoir décapitalisé la moitié du cheptel (2000 têtes) pour investir dans une activité extra-agricole à Belém, plusieurs évènements ont conduit le fazendeiro à abandonner totalement l'élevage (2016). Deux sécheresses successives (été 2015 et 2016) couplées à des invasions de *lagarte* (chenille) ont dégradé de façon irréversible les pâturages, nécessitant de réformer l'ensemble des pâturages (près de 4.000 ha). Le coût des réformes a été chiffré et s'est avéré bien trop élevé. L'éleveur ne pourrait le financer qu'à travers l'intégration agriculture-élevage. Toutefois, l'indisponibilité de plateaux argileux dans le couloir d'intensification a amené les producteurs de soja à investir dans cette zone plus éloignée et moins propice à l'agriculture (dans la dépression du fleuve Gurupi la texture des sols sablo-argileuse est moins favorable que celle des argiles de Belterra et la forte densité en APP rend la forme des parcelles plus délicate à mécaniser).
Le fazendeiro décide donc de vendre les deux fazendas les plus éloignées et les moins modernisées (4375 ha) et de louer les terres des fazendas les plus proches (soit 2300 ha de pâturage dégradé) à un producteur de soja pendant 10 ans. Il recevra un loyer bisannuel, sans

risque financier (sans investissement) et « *sans rien faire* ». Il estime également que la culture de soja améliorera la fertilité de ces terres. Le paysage des fazendas évoluerait vers un paysage binaire soja/forêt. Les principaux déterminants de l'organisation spatiale de l'intensification sont d'ordre topologique.

Avec le capital de la vente et de la location, le fazendeiro préfère investir dans des fazendas de taille plus modeste et des activités à plus forte valeur ajoutée (açaí, pisciculture).

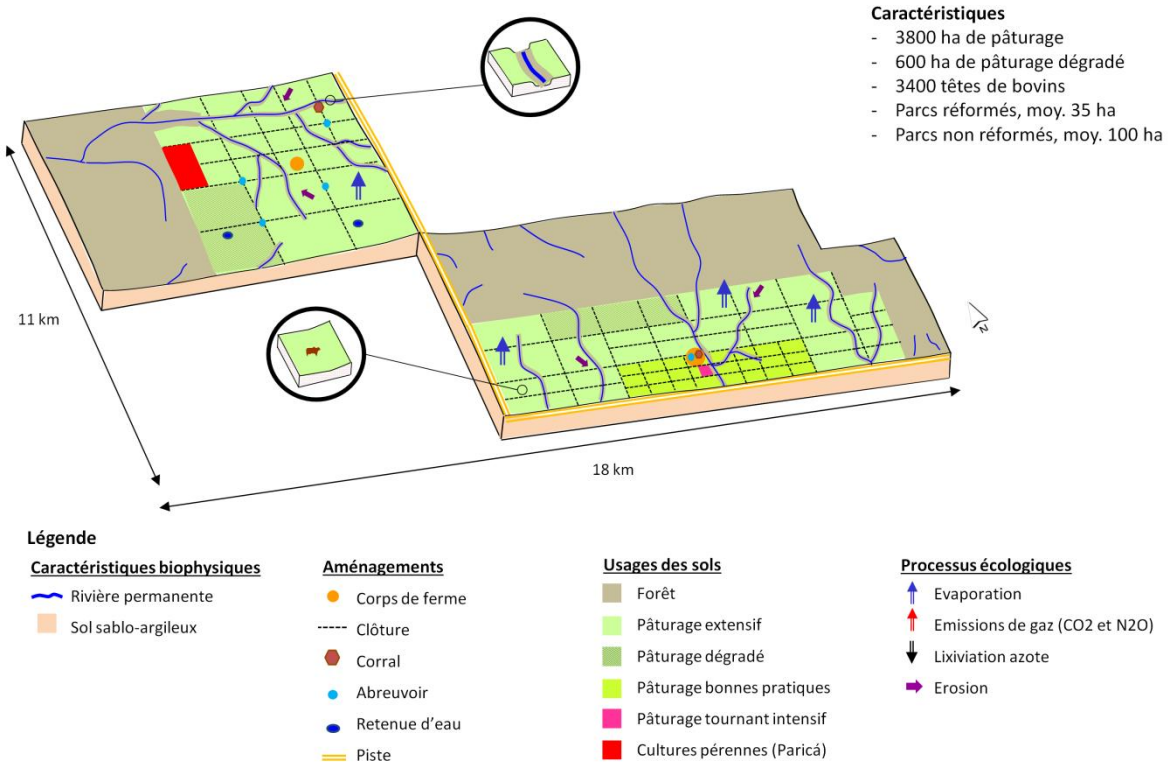


Modèle graphique de la fazenda traditionnelle extensive en phase d'expansion



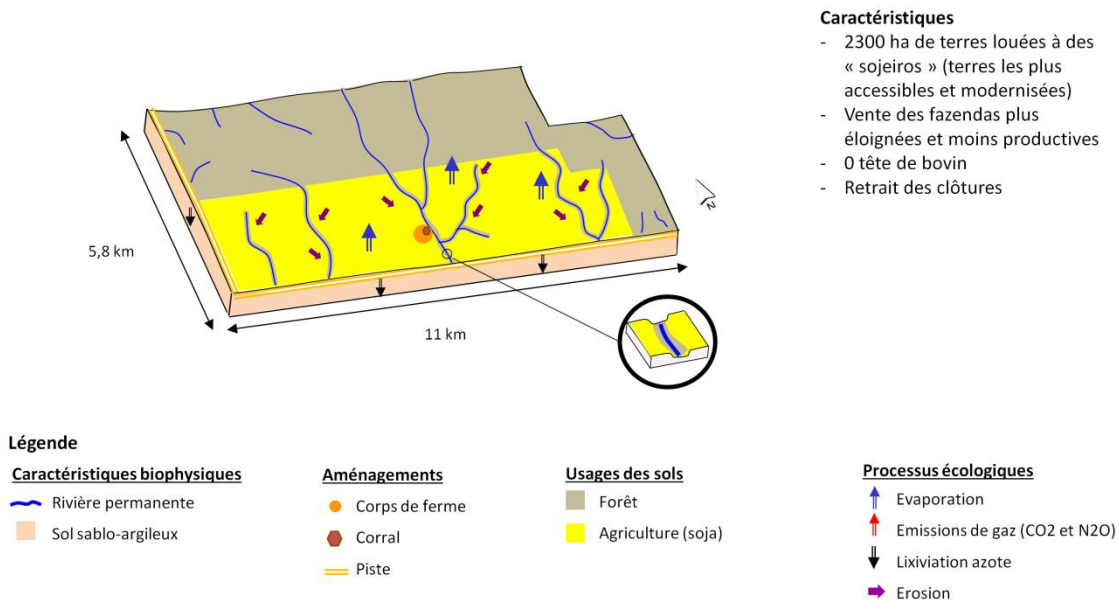
Modèle graphique de la fazenda traditionnelle extensive en phase de modernisation (1)

2015 : Intensification des pâturages autour du siège de la ferme



Modèle graphique de la fazenda traditionnelle extensive en phase de modernisation (2)

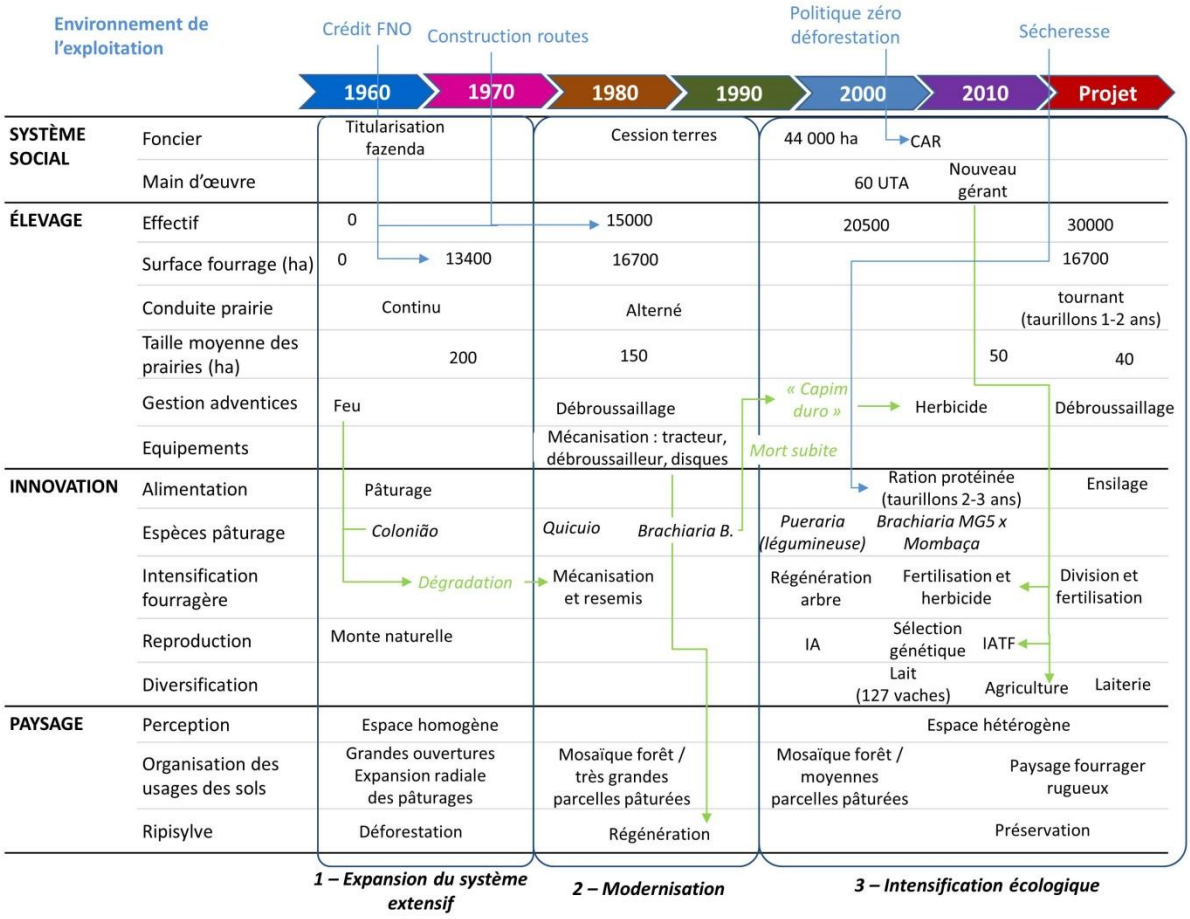
Projet : Intensification via l'intégration agriculture



Modèle graphique de la fazenda traditionnelle extensive en phase d'intensification

Type 5 : Intensification écologique et land-sharing

Trois phases de cohérence jalonnent la trajectoire de cette fazenda :



Trajectoire de la fazenda écologiquement intensive

Phase 1 : Expansion du système extensif : Le père du propriétaire, originaire du Sud-Est du Brésil est arrivé à la fin des années 50 dans la région de Conceição de Araguaia, avant que la BR-010 ne soit achevée. Il a acquis des terres pour y créer plusieurs ranchs. Entre 1965 et 1975 il implante 80% des prairies, puis 20% entre 1975 et 1985. Grâce aux soutiens financiers de la SUDAM, le rythme de défriche est élevé les premières années (1000 ha/an en moyenne). Les prairies ont été implantées en fonction de la localisation du réseau hydrographique (détection par photo interprétation) et de façon à être entremêlées avec la réserve forestière.
A cette époque, la gestion des pâturages est extensive. Le feu sert à défricher et nettoyer les prairies composées de *Panicum maximum* cv colonião. La surface des parcs est en moyenne de 200 ha.

Phase 2 : Modernisation : A partir des années 80, la gestion des pâturages évolue. Le colonião, non fertilisé, couvre mal le sol et les pâturages se dégradent. La fazenda réforme progressivement les pâturages dégradés en les remplaçant par du *Brachiaria humidicola* (quicuio) bien adapté dans les zones de bas-fond et du *Brachiaria Brizantha* cv Marandu sur

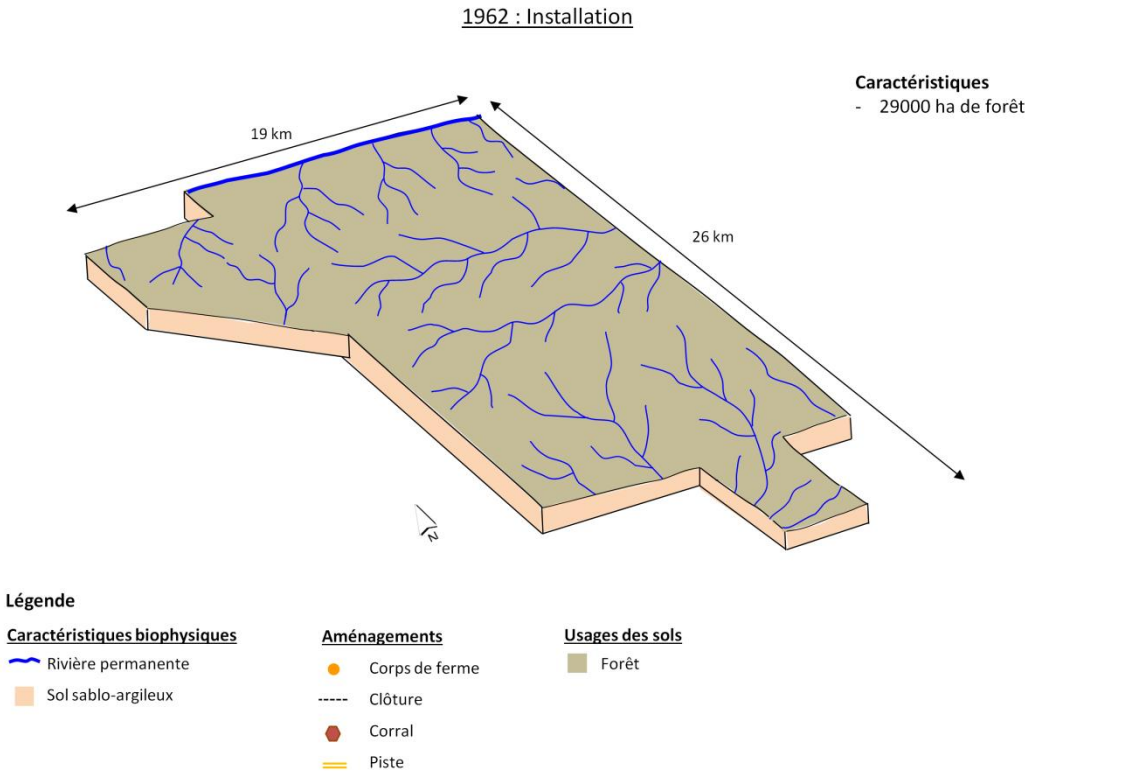
les versants. De plus, elle abandonne l'usage du feu et s'équipe en tracteur, débroussailleuse, semoir pour défricher, semer et nettoyer les pâturages.
Les principaux déterminants dans la localisation des pâturages à réformer sont : (i) l'état de dégradation de la végétation, (ii) la topographie et (iii) l'hydromorphie des sols puisque le recours à la mécanisation empêche de travailler les surfaces abruptes et marécageuses. Les bordures des cours d'eau et les pentes difficilement mécanisables sont régénérées naturellement. Elle commence également à diviser les parcs pour améliorer leur gestion.

Phase 3 : Intensification écologique : La surface de l'exploitation est d'une telle dimension que le recours à des techniques intensives en intrants aurait des conséquences notables sur la gestion de la trésorerie, les besoins en main d'œuvre et l'amélioration des infrastructures. De plus, l'exploitant n'a pas l'intention d'intensifier une zone au détriment d'autres. Il veut maintenir en production toutes les parcelles qui ont un bon potentiel agronomique pour ne pas réduire la valeur foncière de la fazenda (la valeur foncière des surfaces utilisées pour la production agricole étant plus élevée que celle des forêts). Par conséquent, la conduite du système fourrager privilégie des pratiques écologiques nécessitant peu d'intrants telles que l'usage de légumineuses (recyclage chimique de l'azote, qualité du fourrage), la régénération d'arbres natifs pour l'ombre et leur valeur économique et une gestion fine de la hauteur d'herbe résiduelle après pâturage pour maintenir l'activité biologique des sols et le protéger de l'érosion.
L'exploitation a également mis en place un vaste programme de réforme pour améliorer la production fourragère (9 000 ha de pâturage ont été réformés en 5 ans) et pouvoir ainsi accroître la taille du troupeau. De plus, les épisodes de sécheresse toujours plus marqués conduisent l'exploitation à utiliser des rations protéinées pour la phase d'engraissement des bœufs. Elle projette donc de cultiver du maïs et du sorgho sur une surface lui permettant de devenir autonome en saison sèche.

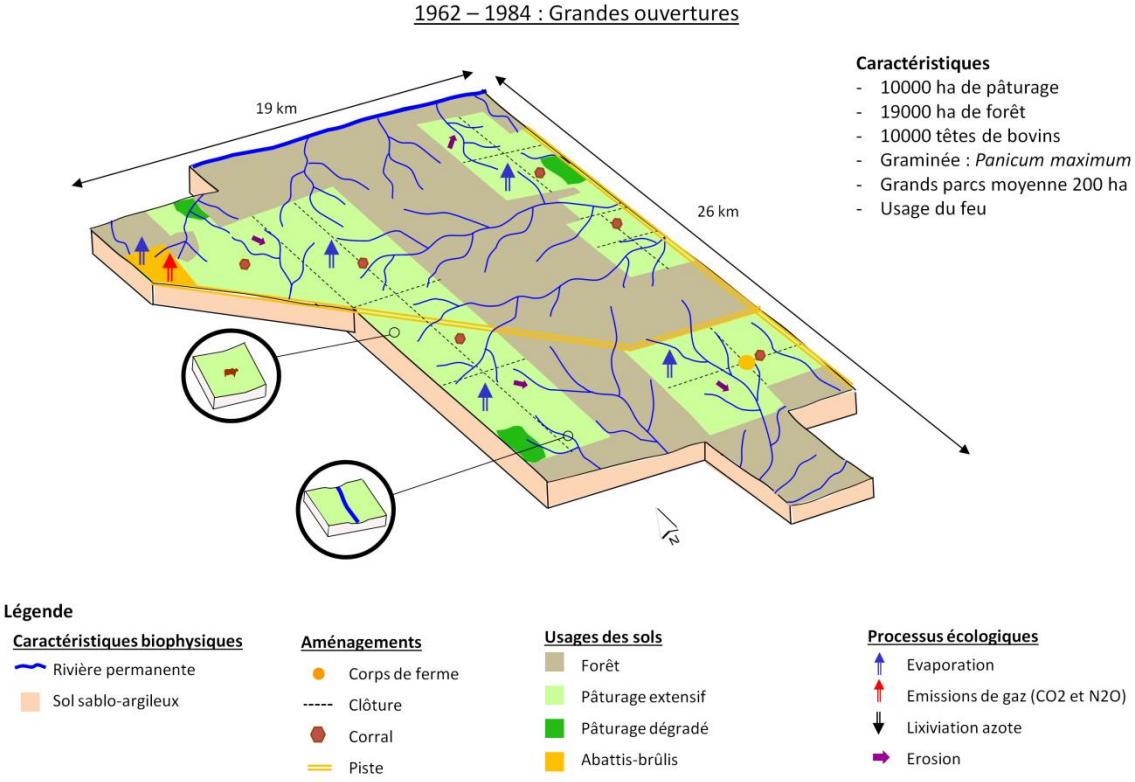
A terme, les objectifs sont de passer à une gestion individualisée des parcs (enregistrement des pratiques), tester le pâturage tournant pour l'élevage des jeunes bovins (de 8 à 18 mois), implanter du maïs en double culture avec du sorgho ou prairie et le valoriser dans l'alimentation des bovins engraissés. Au niveau du troupeau, l'objectif est d'accroître la taille (objectif 30000 têtes d'ici 5 ans, 10000 matrices soit + 50%) et de continuer à augmenter le GMQ des animaux par la génétique (IA depuis 2005 et IATF depuis 2013). Enfin, la fazenda souhaite développer l'activité laitière (atteindre 200 vaches en lactation) et éventuellement créer une laiterie/fromagerie.

Cette stratégie d'intensification vise une production homogène dans l'espace fourrager et grâce à la forte densité d'arbres dans les parcs la construction de paysages « rugueux », freinant le vent et le ruissellement. Elle se rapproche du land-sharing. Les décisions de réformes priorisent les parcs les plus dégradés et les plus grands. On compte 250 parcs d'une taille moyenne de 45 ha dans les différentes unités de gestion. Le plus grand parc mesure 90 ha, le plus petit 8 ha et l'écart type est de 15. Excepté les bordures de cours d'eau non

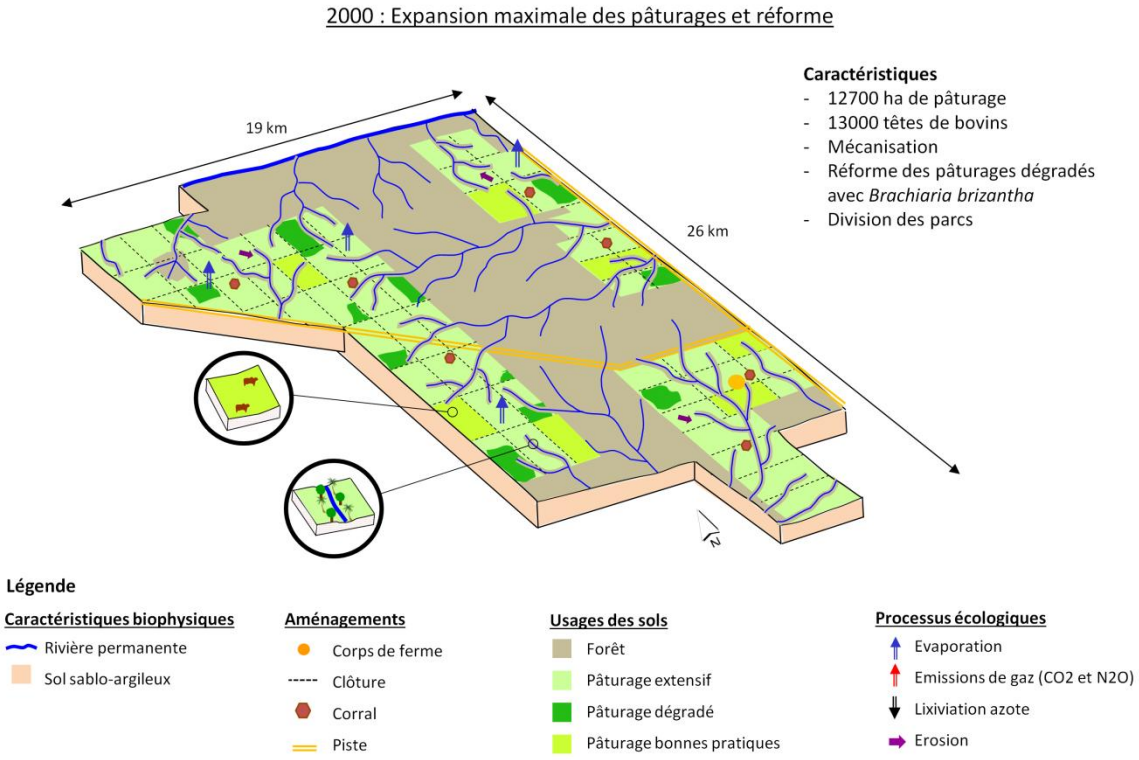
mécanisables, l'espace fourrager présente peu de contraintes biophysiques. L'exploitation adapte le choix des espèces fourragères aux différences d'ordre topographique (versant *vs* bas-fond), et de capacité de drainage (versants bien drainés *vs* bas-fonds inondables en saison humide et qui servent de réserve fourragère pour la saison sèche). Pour les pratiques intensives de type intégration avec l'agriculture, elle tient compte de l'aptitude à la mécanisation (sans APP, ni relief, ni marécage), la proximité au siège de l'exploitation et la qualité de la piste (facilité d'accès avec les machines agricoles pour l'entretien et la collecte), l'absence de souche et le niveau de dégradation du pâturage. Les unités de pâturage tournant seraient installées à proximité du siège pour faciliter le travail.



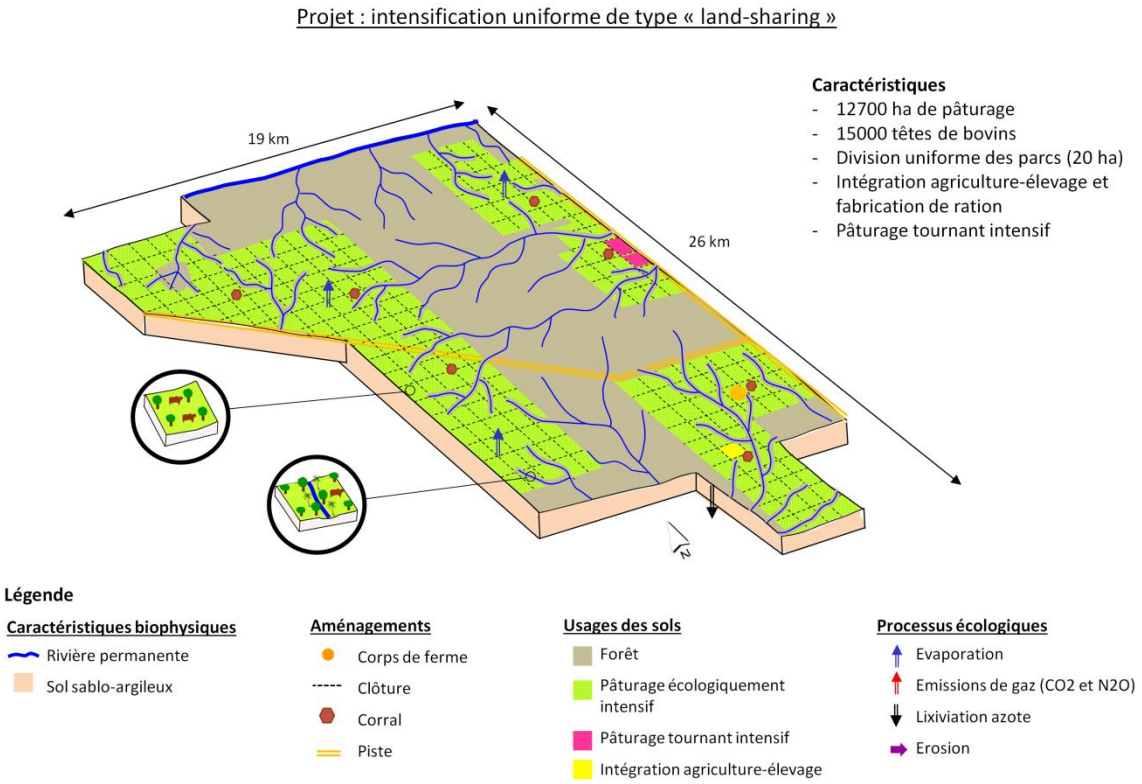
Modèle graphique de la fazenda écologiquement intensive en phase d'installation



Modèle graphique de la fazenda écologiquement intensive en phase d'expansion



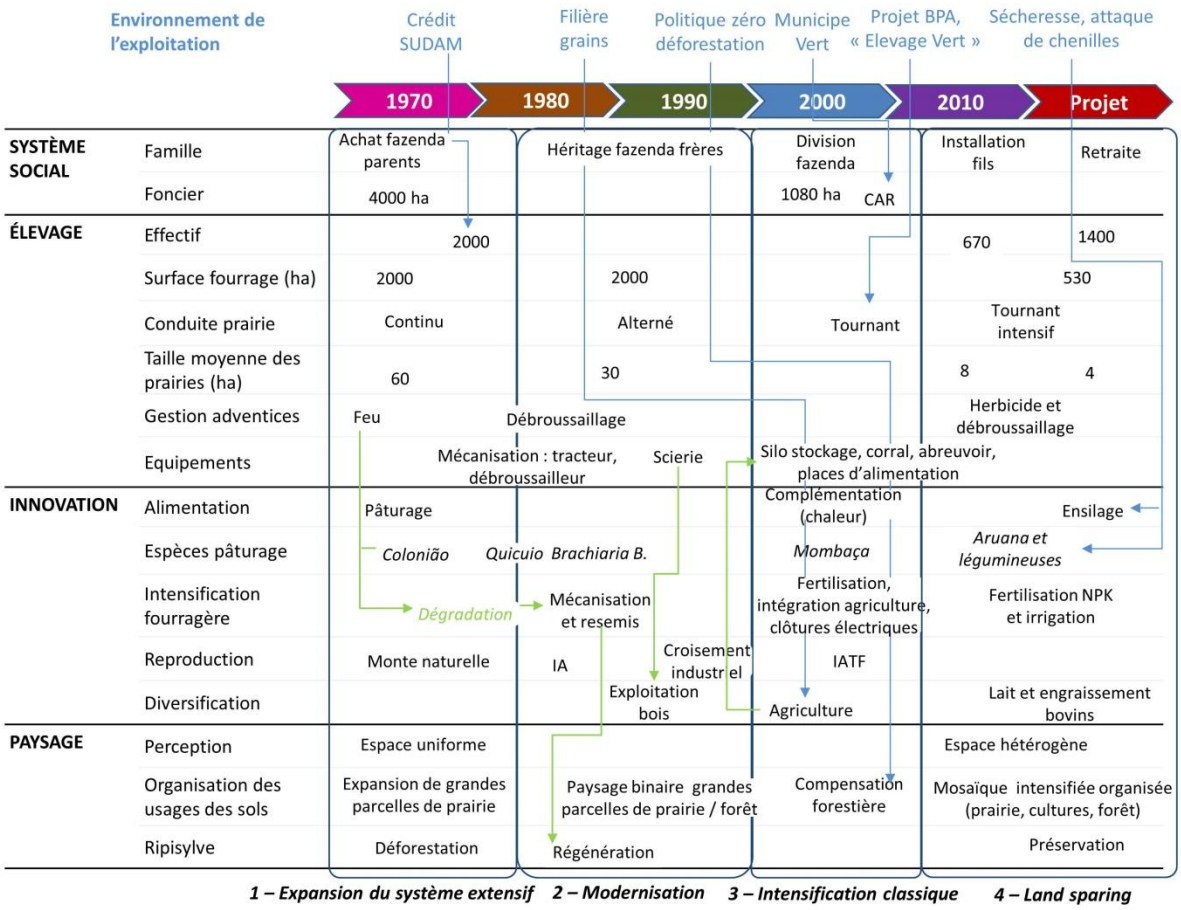
Modèle graphique de la fazenda écologiquement intensive en phase de modernisation



Modèle graphique de la fazenda écologiquement intensive en phase d'intensification de type « land-sharing » (2)

Type 6 : Fazenda intensive haut niveau d'intrants

Nous distinguons 4 phases de cohérence.



Trajectoire de la fazenda intensive – haut niveau d'intrants

Phase 1 : Expansion du système extensif : Les parents de l'exploitant sont originaires du Sud-Est du Brésil, où ils étaient propriétaires d'une petite fazenda orientée vers l'élevage et la production de bois. Ils sont venus en Amazonie au début des années 70, à Manaus, puis à Belém. De Belém, un ami qui avait une fazenda à Paragominas les a encouragés à venir et à investir dans la région. La famille voyant peu de perspectives pour ses fils dans le Sud-Est a décidé d'investir dans la région et a acheté deux fazendas, dont une de 4000 ha en périphérie de la ville. Cette fazenda de 4000 ha était déjà défrichée à moitié. A cette époque, le prix de la terre était très faible, « 1 ha de terre valait un hamburger ».

Les pâturages ont été installés par les anciens propriétaires dans les fonds de vallée et les glacis pour permettre l'abreuvement des bovins au niveau des cours d'eau. Toutes les ripisylves ont été défrichées pour faciliter l'accès des animaux à l'eau bleue. Les zones de plateaux sont restées couvertes en forêt. La conduite du système d'élevage est extensive, avec usage du feu pour nettoyer les prairies et pâturage continu sur de grands parcs (60 ha en moyenne).

Phase 2 : Modernisation : Tous les enfants ont étudié à l'université dans le Sud-Est, puis sont revenus s'installer avec leurs parents à la fin des années 70 avant d'en hériter en 1987. Ils la gèreront en commun jusqu'au milieu des années 2000.
Dès les années 80, la fazenda se modernise. Elle recourt à de nouvelles technologies telles que l'IA (1984), le croisement industriel avec des races allaitantes européennes pour gagner en précocité (1997), puis l'IATF. Elle réforme les prairies dégradées (mécanisation, semis de nouvelles espèces de graminées telles que *Brachiaria brizantha*, quicuio et usage de phosphore). La fazenda entretient des liens étroits avec les organismes de développement et de recherche, et met en œuvre de nombreuses expérimentations.
L'état de dégradation de la végétation est le principal déterminant dans le choix de la localisation des parcs à réformer, puis le relief et l'hydromorphie des sols. L'arrêt de l'usage du feu et la mécanisation du nettoyage l'amènent effectivement à abandonner les zones non mécanisables (relief accidenté, marécage) favorisant la régénération des ripisylves.
A cette époque, le propriétaire exploite les ressources en bois de ces différentes fazendas et construit une scierie en 1991 qui fermera 10 ans plus tard, du fait de l'épuisement de cette ressource.

Phase 3 : Intensification : La fazenda modifie progressivement ses pratiques vers une augmentation de la productivité (en moyenne 1,31 UA/ha), l'intégration agriculture-élevage, le respect de l'environnement et une amélioration du bien être animal. Elle participe à plusieurs programmes de recherche et développement (BPA - Bonne Pratiques Agricoles, Pecuária Verde) et teste de nouvelles alternatives : conduite tournante des parcs (parc de taille moyenne de 8 ha), utilisation de produits phytosanitaires installation de clôtures électriques, installation d'un réseau de distribution d'eau, abreuvoirs et places d'alimentation, construction de couloirs d'accès aux abreuvoirs, clôture des ripisylves (pour empêcher l'accès aux bovins) réforme du corral pour réduire le stress dans la conduite du troupeau, amélioration des pistes sur l'exploitation. Elle se spécialise dans un système naisseur et elle recourt à la complémentation pour les vaches en chaleur.

Les interactions élevage-paysage se complexifient. L'état de dégradation des prairies et le relief ne sont plus les seuls déterminants dans la localisation des pratiques d'intensification. Elle considère davantage l'eau bleue sous toutes ces formes (de surface ou souterraine pour alimenter le réseau d'abreuvoirs) et les sols (texture, pierrosité). La fazenda implante des graminées plus productives et exigeantes sur les sols sablo-argileux mécanisables (*panicum Maximum cv Mombaça*), alors qu'elle maintient des graminées plus rustiques (*Brachiaria brizantha*) sur les affleurements de cuirasse latéritique.

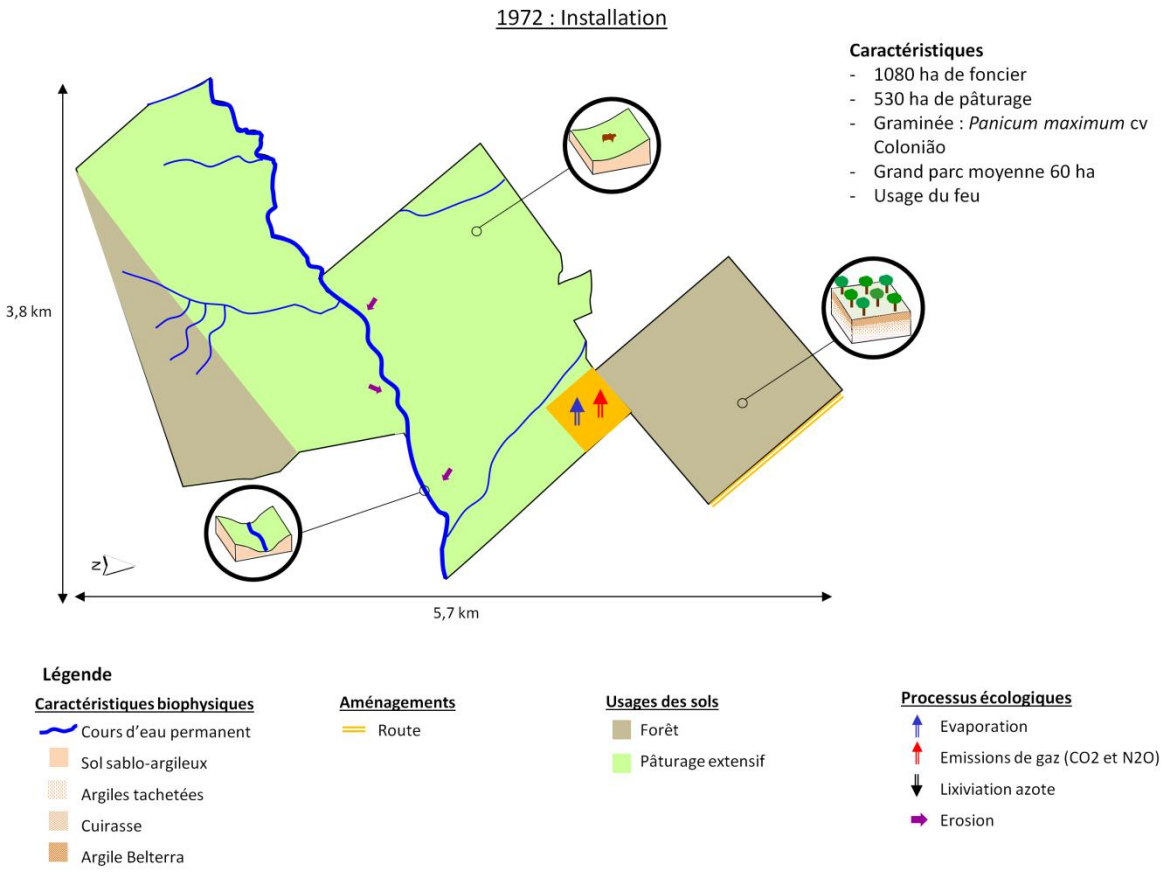
Phase 4 : Intensification « land-sparing » : Le projet à terme pour la fazenda est d'atteindre une capacité de charge de 2 UA/ha[1] (jusqu'à 5 UA/ha en saison humide) et de diversifier son système naisseur vers l'engraissement (600 jeunes taurillons) et l'élevage laitier (200 vaches

[1] Soit 1200 têtes dont 600 bœufs, 300 vaches et 300 veaux et génisses

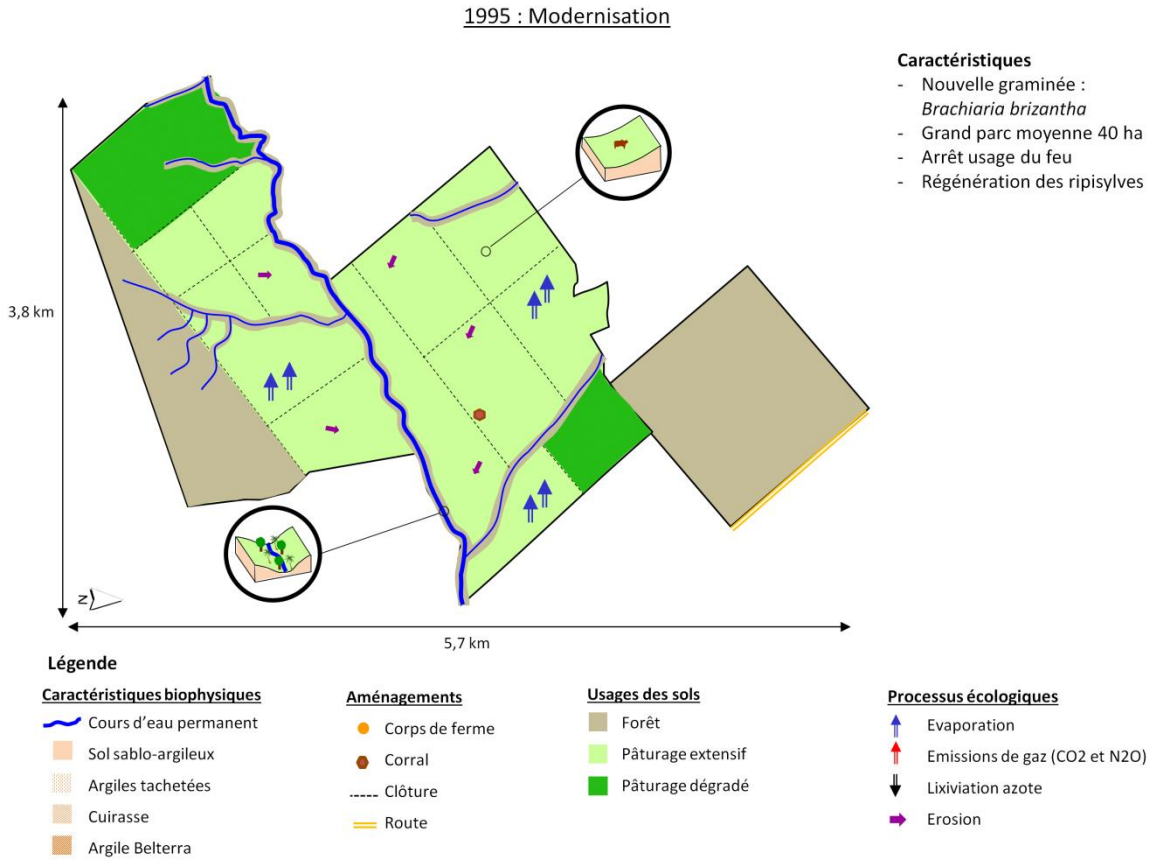
laitières, salle de traite et laiterie) pour approvisionner le marché local. « L'objectif est d'améliorer l'usage de la surface en pâturage en saison humide qui est sous-utilisée. Toutefois, je ne veux pas intensifier plus que cela, car cela va devenir plus stressant ».
Pour accroître sa capacité de charge, l'exploitation projette de mettre en place des pratiques de gestion des fourrages plus intensives, adaptées à la localisation des ressources naturelles et visant une plus grande optimisation des ressources humaines et économiques. Nous en avons distingué six :
i) Mettre en place du pâturage tournant intensif sur de plus petites parcelles (118 parcs de 3-4 ha en moyenne) et installer davantage d'abreuvoirs.
ii) Implanter des graminées plus productives (comme par exemple l'Aruana), et des espèces riches en protéines ou plus résistantes à la sécheresse (certaines légumineuses). Le choix des espèces serait effectué en fonction de la texture, de la pierrosité et fertilité des sols. Pour l'instant le projet est de les installer à proximité du corral pour faciliter le suivi.
iii) Implanter un module de système sylvo-pastoral (association arbres et pâturage).
iv) Irriguer 30 ha de pâturages (composé de 33 paddocks de 0,9 ha) pour maintenir la productivité fourragère en été (il serait possible d'atteindre 5,33 têtes par hectare). Pour que l'investissement soit rentabilisé, il envisage de se diversifier dans l'élevage laitier (200 vaches laitières). Cette pratique serait installée à proximité du cours d'eau pour faciliter l'irrigation et de la salle de traite pour limiter les déplacements du troupeau laitier.
v) Produire l'ensilage et les grains nécessaires à l'embouche des taurillons sur les plateaux argileux (environ 30 ha).
vi) Installer un parc d'engraissement (15.000 m²) et un silo d'ensilage pour la finition des jeunes taurillons à l'auge. La localisation est prévue à proximité du corral, sur un affleurement de cuirasse latéritique de faible pente. Ces sols bien drainés seraient peu propices la formation de boue et le relief va permettre la récupération des déjections par gravité. Le confinement va servir d'artifice pour réduire la pression sur les prairies en saison sèche.
vii) Installer des arbres coupe-vent (2200 plants) en bordure et/ou dans les parcs pour réduire l'évapotranspiration dans les pâturages exposés au vent en saison sèche.
Au niveau du troupeau, l'objectif est de poursuivre le travail d'amélioration génétique pour réduire l'IVV.

L’éleveur a chiffré les investissements à hauteur de 3 millions de reais.

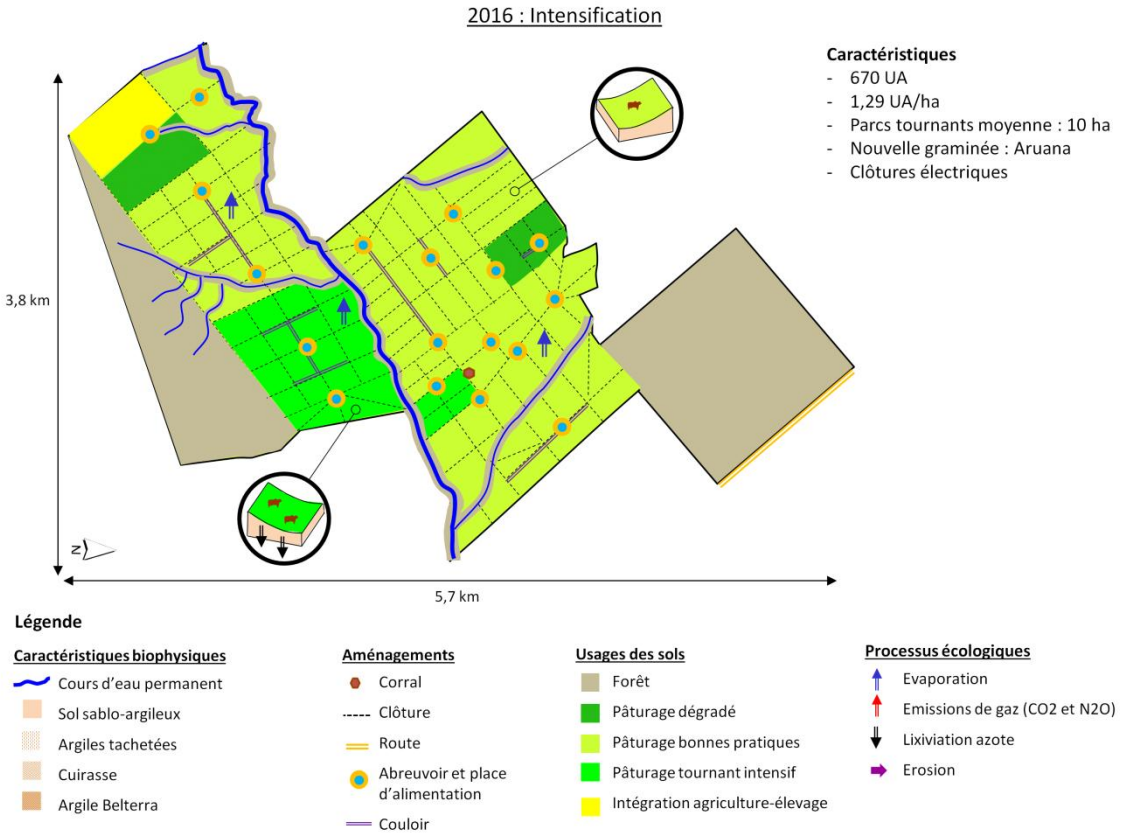
Activité	Investissement (R$)
Canne fourragère (30 ha)	150.000
Aire de confinement	100.000
Silo-tranché (stockage ensilage)	50.000
Tracteur et outils	180.000
Salle de traite	220.000
Laiterie	550.000
Irrigation	150.000
Troupeau laitier (200 génisses pleines)	800.000
Troupeau d’engraissement (400 bœufs)	500.000
Amélioration des infrastructures	50.000
Engrais	170.000
Plants	80.000
Total	3.000.000



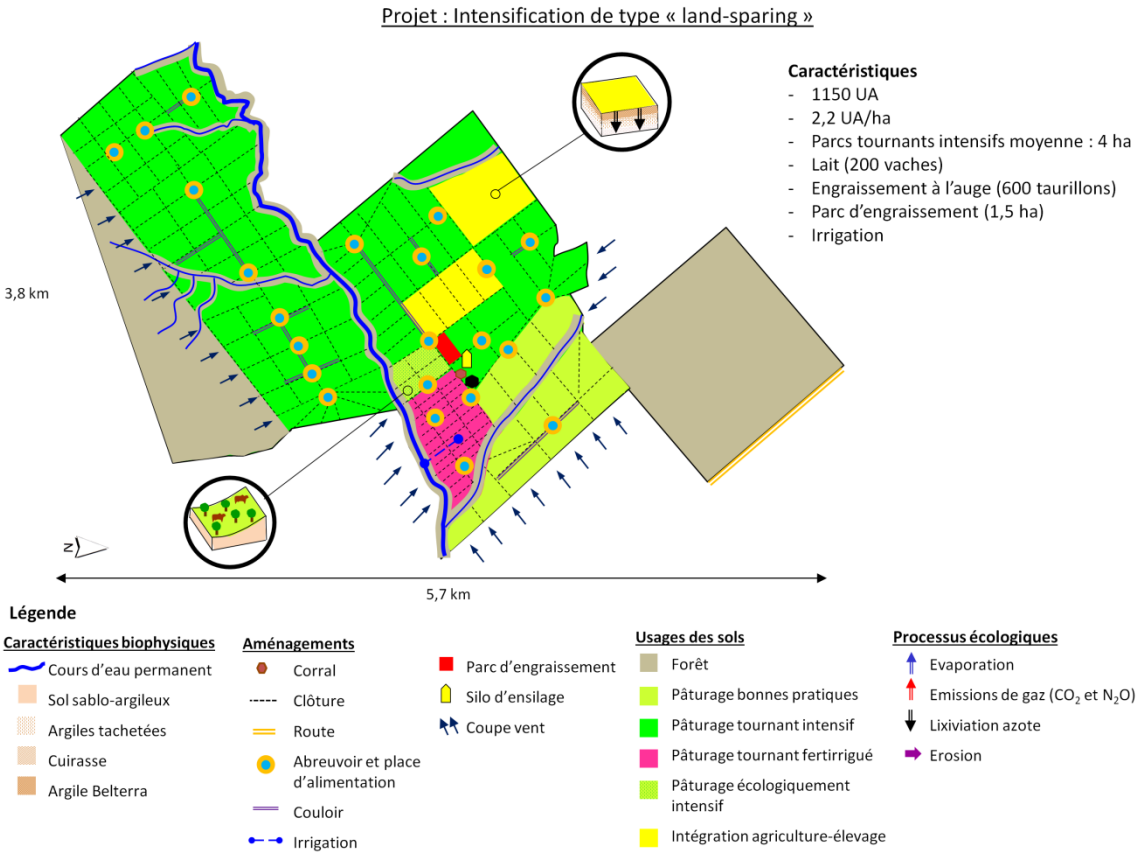
Modèle graphique de la fazenda viande intensive en intrants en phase d'expansion



Modèle graphique de la fazenda viande intensive en intrants en phase de modernisation



Modèle graphique de la fazenda viande intensive en intrants en phase d'intensification



Modèle graphique de la fazenda viande intensive en intrants en phase dans un projet land-sparing

Annexe 11. Liste des variables utilisées dans le modèle

Class	Attribute	Value
AnualCrop class	biomassProduction	4000
AnualCrop class	costCutMeca	400
AnualCrop class	costHarvest	500
AnualCrop class	costImplant	800
AnualCrop class	costMaintenance	500
AnualCrop class	daysCutFire	0.5
AnualCrop class	daysHarvest	0.5
AnualCrop class	daysImplant	0.5
AnualCrop class	daysMaintenance	1
AnualCrop class	rateVarPotential	0
AnualCrop class	sellPrice	1
AnualCrop class	transitionAge	0.9
BasicPasture	initialDegradation	20
BasicPasture class	carryingCapacityMaxi	1.4
BasicPasture class	costClean	250
BasicPasture class	costCutMeca	400
BasicPasture class	costImplant	400
BasicPasture class	costMaintenance	0
BasicPasture class	daysClean	0.5
BasicPasture class	daysCutFire	0.5
BasicPasture class	daysCutMeca	0.2
BasicPasture class	daysImplant	0.2
BasicPasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
BasicPasture class	rateVarPotential	-5
BasicPasture class	transitionLimite	100
BasicPasture class	varDegradationImplant	10
Corral class	costMinManutentionCorral	1
Corral class	daysMinManutentionCorral	0.2
CropPasture class	biomassProduction	4000
CropPasture class	costCutMeca	400
CropPasture class	costHarvest	500
CropPasture class	costImplant	1000
CropPasture class	costMaintenance	500
CropPasture class	daysCutFire	0.5
CropPasture class	daysHarvest	0.5
CropPasture class	daysImplant	0.5
CropPasture class	daysMaintenance	1
CropPasture class	rateVarPotential	0.05
CropPasture class	sellPrice	1
CropPasture class	transitionAge	0.9
EcologicalIntensivePasture	initialDegradation	5
EcologicalIntensivePasture class	carryingCapacityMaxi	2
EcologicalIntensivePasture class	costClean	300
EcologicalIntensivePasture class	costCutFire	0
EcologicalIntensivePasture class	costCutMeca	400
EcologicalIntensivePasture class	costHarvest	0
EcologicalIntensivePasture class	costImplant	1000
EcologicalIntensivePasture class	costMaintenance	100
EcologicalIntensivePasture class	daysClean	0.5
EcologicalIntensivePasture class	daysCutFire	0.5
EcologicalIntensivePasture class	daysCutMeca	0.2
EcologicalIntensivePasture class	daysImplant	2

EcologicalIntensivePasture class	daysMaintenance	0.1
EcologicalIntensivePasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
EcologicalIntensivePasture class	rateVarPotential	10
EcologicalIntensivePasture class	transitionLimite	100
EcologicalIntensivePasture class	varDegradationImplant	5
ExtensivePasture	initialDegradation	20
ExtensivePasture class	carryingCapacityMaxi	1.2
ExtensivePasture class	costClean	0
ExtensivePasture class	costCutMeca	400
ExtensivePasture class	costImplant	200
ExtensivePasture class	costMaintenance	0
ExtensivePasture class	daysClean	3
ExtensivePasture class	daysCutFire	0.5
ExtensivePasture class	daysCutMeca	0.2
ExtensivePasture class	daysImplant	0.2
ExtensivePasture class	daysMaintenance	0
ExtensivePasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
ExtensivePasture class	rateVarPotential	-10
ExtensivePasture class	transitionLimite	100
ExtensivePasture class	varDegradationImplant	10
Fallow class	costCutFire	100
Fallow class	costCutMeca	400
Fallow class	daysCutFire	2
Fallow class	daysCutMeca	0.5
Fallow class	indiceDegradation	100
Fallow class	initialStockFertility	0
Fallow class	rateVarPotential	10
Fallow class	transitionAge	5
GeomorphologicalUnit	geomporphology	"
GoodPracticePasture	initialDegradation	10
GoodPracticePasture class	carryingCapacityMaxi	1.8
GoodPracticePasture class	costClean	300
GoodPracticePasture class	costCutMeca	400
GoodPracticePasture class	costImplant	800
GoodPracticePasture class	costMaintenance	100
GoodPracticePasture class	daysClean	0.5
GoodPracticePasture class	daysCutFire	0.5
GoodPracticePasture class	daysCutMeca	0.2
GoodPracticePasture class	daysImplant	0.4
GoodPracticePasture class	daysMaintenance	0.1
GoodPracticePasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
GoodPracticePasture class	transitionLimite	100
GoodPracticePasture class	varDegradationImplant	5
InitialSecondaryForest class	costCutFire	200
InitialSecondaryForest class	costCutMeca	800
InitialSecondaryForest class	daysCutFire	4
InitialSecondaryForest class	daysCutMeca	0.7
InitialSecondaryForest class	daysMaintenance	0
InitialSecondaryForest class	indiceDegradation	100
InitialSecondaryForest class	initialStockFertility	0.2
InitialSecondaryForest class	rateVarPotential	10
InitialSecondaryForest class	transitionAge	15
IntensivePasture	initialDegradation	0
IntensivePasture class	carryingCapacityMaxi	2.5
IntensivePasture class	costClean	500
IntensivePasture class	costCutMeca	400
IntensivePasture class	costImplant	1500
IntensivePasture class	costMaintenance	750

IntensivePasture class	daysClean	1
IntensivePasture class	daysCutFire	0.5
IntensivePasture class	daysCutMeca	0.2
IntensivePasture class	daysImplant	2
IntensivePasture class	daysMaintenance	4
IntensivePasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
IntensivePasture class	rateVarPotential	5
IntensivePasture class	transitionLimite	100
IntensivePasture class	varDegradationImplant	5
IrrigatedPasture	initialDegradation	0
IrrigatedPasture class	carryingCapacityMaxi	4
IrrigatedPasture class	costClean	500
IrrigatedPasture class	costCutMeca	400
IrrigatedPasture class	costImplant	5000
IrrigatedPasture class	costMaintenance	1000
IrrigatedPasture class	daysClean	1
IrrigatedPasture class	daysCutFire	0.5
IrrigatedPasture class	daysCutMeca	0.2
IrrigatedPasture class	daysImplant	2
IrrigatedPasture class	daysMaintenance	1
IrrigatedPasture class	increaseDegradationUnderstocking	5
IrrigatedPasture class	rateVarPotential	5
IrrigatedPasture class	transitionLimite	100
IrrigatedPasture class	varDegradationImplant	5
Livestock class	autoconsumption	36
Livestock class	costManagementAUBasic	20
Livestock class	costManagementAUIntensive	40
Livestock class	daysManagementAUBasic	20
Livestock class	daysManagementAUIntensive	40
Livestock class	demographicRateAverage	20
Livestock class	price	2000
MediumExtensive	carryingCapacityObjective	800
MediumExtensive	needs	100000
MediumExtensive	remainingDaysAvailable	240
MediumExtensive	salary	1200
MediumExtensive	worker	3
MediumExtensive class	cashInitial	600000
MediumExtensive class	daysAvailable	240
MediumExtensive class	distanceCorralIntensiveUse	10
MediumExtensive class	distanceThreshold	15
MediumExtensive class	maxAreaCrop	0
MediumExtensive class	maxAreaEcological	200
MediumExtensive class	maxAreaEcologicalAnual	30
MediumExtensive class	maxAreaGoodPractice	500
MediumExtensive class	maxAreaGoodPracticeAnual	30
MediumExtensive class	maxAreaIntensiv	100
MediumExtensive class	maxAreaIntensivAnual	20
MediumExtensive class	maxAreaIrrigation	0
MediumExtensive class	maxSizeIrrigatedPaddock	6
MediumExtensive class	minPaddockArea	5
MediumExtensive class	reducingDegradationByBasicClean	30
MediumExtensive class	slaughterRate	10
MediumExtensive class	thresholdDivisionPaddock	0.05
MediumIntensiveHighInput	carryingCapacityObjective	1200
MediumIntensiveHighInput	needs	100000
MediumIntensiveHighInput	remainingDaysAvailable	240
MediumIntensiveHighInput	salary	1200
MediumIntensiveHighInput	worker	5

MediumIntensiveHighInput class	autoconsumePercent	20
MediumIntensiveHighInput class	cashInitial	600000
MediumIntensiveHighInput class	daysAvailable	240
MediumIntensiveHighInput class	distanceCorralIntensiveUse	10
MediumIntensiveHighInput class	distanceThreshold	15
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaCrop	100
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaEcological	400
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaEcologicalAnual	50
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaGoodPractice	500
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaGoodPracticeAnual	300
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaIntensiv	300
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaIntensivAnual	20
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaIrrigation	100
MediumIntensiveHighInput class	maxAreaIrrigationAnual	10
MediumIntensiveHighInput class	maxSizeIrrigatedPaddock	10
MediumIntensiveHighInput class	minPaddockArea	2
MediumIntensiveHighInput class	minSizeAnuCrop	6
MediumIntensiveHighInput class	reducingDegradationByBasicClean	30
MediumIntensiveHighInput class	slaughterRate	10
MediumIntensiveHighInput class	thresholdDivisionPaddock	0.1
OldSecondaryForest class	costCutFire	400
OldSecondaryForest class	costCutMeca	1500
OldSecondaryForest class	daysCutFire	6
OldSecondaryForest class	daysCutMeca	1
OldSecondaryForest class	indiceDegradation	100
OldSecondaryForest class	initialStockFertility	0.8
OldSecondaryForest class	rateVarPotential	10
Paddock class	costInstalFence	300
Paddock class	costInstalFenceSup	600
Paddock class	costManutentionFenceSup	20
Paddock class	costMinManutentionFences	10
Paddock class	daysInstalFence	4
Paddock class	daysInstalFenceSup	2
Paddock class	daysManutentionFenceSup	1
Paddock class	daysMinManutentionFences	1.5
Paddock class	divisionThreshold	0.1
Plot class	area	1
Plot class	decreaseFertility	-10
Plot class	decreasePotentialInfra	0.1
Plot class	decreasePotentialOverstocking	5
Plot class	indiceFertilityMax	150
Plot class	indicePotentialMax	150
Plot class	indiceSoilStructureMax	150
Plot class	indiceSoilStructureMin	0
Plot class	indiceWaterMax	150
Plot class	waterEvaporation	-5
PrimaryForest class	costCutFire	1600
PrimaryForest class	daysCutFire	20
PrimaryForest class	indiceDegradation	100
PrimaryForest class	rateVarPotential	10

Annexe 12. Paramètres utilisés pour l'initialisation

Etat des ressources naturelles

Eau

L'indice eau de départ est défini selon le type d'unité géomorphologique. Excepté les plateaux dont l'indice est égal à 100, toutes les autres unités présentent un indice égal à 90.

Unité géomorphologique	***Indice initial eau***
UG1 Plateau	100
UG2 Versant de vallée peu à légèrement ondulée	90
UG3 Versant de vallée moyennement à fortement ondulée	90
UG4 Fonds de vallée inondable	90
UG5 Rive des cours d'eau	90
UG6 Bordure convexe de plateau - escarpé	90

Fertilité des sols

L'état de départ de la fertilité du sol est défini selon le type de sol des unités géomorphologiques et d'usage des sols.

Usage du sol	***Valeurs paramètre végétation***	**Argile (UG1)**	**Argilo-sableux (UG2, UG3, UG4, UG5)**	**Autre (UG6)**
Valeur paramètre type de sol (unité géomorphologique)		100	90	80
Forêt primaire ou secondaire > 10 ans	100	100	90	80
Forêt secondaire < 10 ans ou jeune régénération	90	90	81	72
Pâturage extensif ou basique > 10 ans	70	70	63	56
Pâturage extensif ou basique < 10 ans	90	90	81	72
Pâturage Bonnes Pratiques, Intensif, Irrigué, Ecologiquement intensif	100	100	90	80
Cultures	95	95	85.5	76

Exemple : Un pâturage extensif de plus de 10 ans localisé sur une unité géomorphologique de type UG3 versant de vallée moyennement à fortement ondulée présente un indice de fertilité initial de 63.

Structure des sols

L'état de départ de la structure du sol est défini selon le type d'unités géomorphologiques et d'usage des sols.

Usage du sol	***Valeurs paramètre végétation***	**UG1**	**UG2, UG4**	**UG3, UG5, UG6**
Valeur paramètre type de sol (unité géomorphologique)		100	90	80
Forêt primaire ou secondaire > 10 ans	100	100	90	80
Forêt secondaire < 10 ans ou jeune régénération	90	90	81	72
Pâturage extensif ou basique > 10 ans	70	70	63	56
Pâturage extensif ou basique < 10 ans	80	80	72	64
Pâturage Bonnes Pratiques, Intensif, Irrigué,	90	90	80	72
Pâturage écologiquement intensif	100	100	90	80
Cultures annuelles	80	80	72	64
Cultures x Pâturage	85	85	76.5	68

UG1 Plateau ; UG2 Versant de vallée peu à légèrement ondulée ; UG3 Versant de vallée moyennement à fortement ondulée ; UG4 Fonds de vallée inondable ; UG5 Rive des cours d'eau ; UG6 Bordure convexe de plateau - escarpé

Exemple : Un pâturage extensif de plus de 10 ans localisé sur une unité géomorphologique de type UG3 versant de vallée moyennement à fortement ondulée présente un indice de structure du sol initial de 56.

Etat du potentiel du sol

L'état de départ du potentiel du sol est défini selon le type d'unités géomorphologiques et d'usage des sols.

Usage du sol	***Valeurs paramètre végétation***	**UG1**	**UG2**	**UG3**	**UG4**	**UG5**	**UG6**
Valeur paramètre type de sol (unité géomorphologique)		100	95	85	90	80	75
Forêt primaire ou secondaire > 10 ans	100	100	95	85	90	80	75
Forêt secondaire < 10 ans ou jeune régénération	95	95	90.25	80.75	85.50	76	71.25
Pâturage extensif ou basique > 10 ans	80	80	76	68	72	64	60
Pâturage extensif ou basique < 10 ans	85	85	80.75	72.25	76.50	68	63.75
Pâturage Bonnes Pratiques, Intensif, Irrigué,	90	90	85.50	76.50	81	72	67.50
Pâturage écologiquement intensif	95	95	90.25	80.75	85.50	76	71.25
Cultures	90	90	85.50	76.50	81	72	67.50

UG1 Plateau ; UG2 Versant de vallée peu à légèrement ondulée ; UG3 Versant de vallée moyennement à fortement ondulée ; UG4 Fonds de vallée inondable ; UG5 Rive des cours d'eau ; UG6 Bordure convexe de plateau – escarpé

Exemple : Un pâturage extensif de moins de 10 ans localisé sur une unité géomorphologique de type UG3 versant de vallée moyennement à fortement ondulée présente un potentiel du sol initial de 72.25.

Annexe 13. Description des activités des éleveurs dans le modèle

Les activités des éleveurs, quel que soit le type, ont lieu dans l'ordre suivant :

1) Activités essentielles
2) Gestion du troupeau et des infrastructures d'élevage
3) Gestion des pâturages
4) Vente et bilan comptable

1) Activités essentielles : Consommation et paiement des salariés

Avant de mettre en œuvre toute activité productive, l'éleveur devra satisfaire ses besoins primaires (consommer)[1], et payer les salaires (quand il a des salariés). Le fait de les mettre au début du diagramme d'activité signifie que nous leur donnons une priorité maximum.
La réalisation de ces activités correspond à une baisse du cash disponible. Il n'y a pas d'arbre de décision à ce niveau car l'éleveur commence nécessairement l'année avec un cash supérieur à ces dépenses essentielles.

2) Gestion du troupeau et des infrastructures d'élevage

A la suite des activités essentielles, l'éleveur gère le troupeau puis les infrastructures d'élevage. Ces deux activités sont conditionnées à la disponibilité de cash et de main d'œuvre.
Pour la gestion du troupeau (vaccination, reproduction, supplémentation minérale), le coût et la main d'œuvre nécessaire à cette activité sont proportionnels au nombre d'animaux et au type de conduite. La conduite intensive génère deux fois plus de travail et de dépenses que la conduite standard (basique). Le management du troupeau a un impact sur la croissance démographique du troupeau (cf. sous modèle dynamique du troupeau).
Pour la gestion des infrastructures (corral et clôtures), le coût et les besoins en main d'œuvre sont proportionnels au nombre d'animaux dans le cas du corral et à la longueur en clôtures installées dans le cas des clôtures. Le coût unitaire pour le corral et les clôtures est le même quel que soit le type d'éleveur. Pour les pâturages de type irrigués et tournants intensifs, il existe un coût supplémentaire de manutention car elles sont divisées en plus petites parcelles. La non-manutention des infrastructures affecte négativement la croissance du troupeau (cf. sous modèle dynamique du troupeau).
Les calculs des besoins en main d'œuvre et des dépenses sont explicités ci-dessous :

$$Coût_{troupeau} = Coût_{\ unitaire} \times N$$

[1] Dans la réalité, certains producteurs familiaux produisent des cultures de subsistance sur leur exploitation ce qui leur permet de réduire leurs dépenses de consommation. Cette activité peut entrer en concurrence avec d'autres activités d'élevage en termes de main d'œuvre. Pour deux raisons, nous n'avons toutefois pas intégré cette activité. Premièrement, les profils que nous représentons sont ceux d'éleveurs qui privilégient avant tout le développement de l'élevage. Deuxièmement, l'inclusion de cette activité n'apportait pas d'élément supplémentaire pour répondre à notre question.

Avec **Coût troupeau** : coût de gestion total du troupeau ; **Coût unitaire** : coût de gestion par Unité Animale (20 R$/UA pour une gestion standard, 40$/UA pour une gestion intensive) ; **N** : nombre de bovins total sur l'exploitation ;

$$MO_{troupeau} = MO_{100unités} \times N/100$$

Avec **MO troupeau** : main d'œuvre totale nécessaire pour le troupeau ; **MO $_{100\ unités}$** : main d'œuvre pour 100 Unités Animales (20 jours/100UA pour une gestion standard, 40jours/100UA pour une gestion intensive) ; **N** : nombre de bovins total sur l'exploitation ; N/100 : est arrondi à l'entier supérieur

$$Coût_{infrastructure} = Coût_{\ clôture} \times P + Coût_{\ corral} \times N$$

Avec **Coût infrastructures** : coût total de manutention des infrastructures ; **Coût clôture** : coût de manutention des clôtures (10 R$/km/an); **P** : périmètre de clôtures (km) ; **Coût corral** : coût de manutention du corral (1 R$/UA) ; **N** : nombre de bovins total sur l'exploitation.

$$MO_{infrastructure} = MO_{\ clôture} \times P + MO_{\ corral} \times N$$

Avec **MO infrastructures** : main d'œuvre requise pour la manutention des infrastructures ; **MO clôture** : main d'œuvre nécessaire pour la manutention des clôtures (1 jour/km); **P** : périmètre de clôtures (km) ; **MO corral** : main d'œuvre pour la manutention du corral (0.01 jour/UA) ; **N** : nombre de bovins total sur l'exploitation.

3) Gestion des pâturages

Décrit dans le Chapitre 4.

4) Vente et bilan comptable

A la fin de la campagne (pas de temps), l'éleveur dresse le bilan économique de la saison :
- Il vend son stock de grains s'il a produit des cultures.
- Il vend la production de son troupeau bovin.
- Si malgré les réformes et les nettoyages, le nombre de bovins est supérieur à la capacité de charge des prairies, l'éleveur vend des bovins jusqu'à ce que la charge animale soit égale à 1,1 fois la capacité de charge des prairies.
- Si après la vente des bovins et des cultures, l'éleveur manque de ressources pour subvenir aux besoins essentiels de l'exploitation pour l'année suivante (consommation et salaire), il décapitalise plus de cheptel pour avoir un minimum de trésorerie pour commencer l'année.
- Enfin, si l'éleveur n'a pas assez d'animaux pour ajuster sa situation, il arrête son activité.

Nous avons appliqué les calculs suivants :

$$Vente_{grains} = R \times S \times P_{grain}$$

Avec **Vente grain** : recettes générées par la vente des grains (R$) ; **R :** rendement moyen (R=4000 kg/ha) ; **S** : surface en cultures (annuelles et intégrées) (ha); $\mathbf{P_{grain}}$: prix des grains (1 R$/kg).

$$Vente_{bovins} = \Delta r \times N \times P_{bovin}$$

Avec **Vente bovins** : recettes générées par la vente de la production bovine (R$) ; **Δr :** taux de renouvellement/abattage (20%) ; **N** : nombre de bovins ; $\mathbf{P_{bovin}}$: prix des bovins (1600 R$/UA).

Annexe 14. Paramètres utilisés pour représenter l'évolution des ressources naturelles

Usage des sols	**Eau (Δrecyclage)**	**Fertilité (Δrecyclage)**	**Structure du sol ($\Delta s_{usage\ du\ sol}$)**
Culture annuelle	0	+5	-15
Culture x pâturage	0	+5	-5
Pâturage Extensif	-10	0	-10
Pâturage Basique	-5	0	-5
Pâturage Bonnes Pratiques	+5	+10 (âge<=3) +5 (âge>3)	-3
Pâturage Ecologiquement intensif	+15	+10 (âge <4) +15 (âge >4)	+5
Pâturage Intensif	+10	+10	-3
Pâturage Irrigué	+10	+10	-3
Forêt	+20	+30	+15

Título : Criar bovinos em paisagens eco-eficientes. Entender e modelizar o processo de intensificação nas propriedades agrícolas da Amazônia oriental brasileira

Palavras-chaves : Paisagem eco-eficiente, Pecuária, Trajetória, Sistema Multi-Agentes, Intensificação, Amazônia brasileira

Resumo :

Após a expansão da pecuária bovina nas frentes pioneiras da Amazônia oriental brasileira durante 50 anos, novas políticas ambientais e dinâmicas socio-econômicas comprometem os sistemas de criação extensivos. Isso resulta na emergência de uma transição agrária. O accesso à terra e à fertilidade das florestas sendo constrangido, os pecuaristas iniciaram um movimento de intensificação dos usos de solo. Esse processo de intensificação ainda é pouco entendido, particularmente no quadro espacial, assim como na sua contribuição para a construção de paisagens eco-efficientes, ou seja paisagens em quais as práticas e o arranjo espacial dessas práticas otimizam o uso dos recursos naturais. Para tratar dessas questões, os objetivos dessa pesquisa são de entender e modelizar as interações entre o sistema de decisão dos pecuaristas, as paisagens e os recursos naturais numa diversidade de estabelecimentos agrícolas.

Em primeiro lugar, um trabalho de campo foi conduzido em dois territórios no Este e no Sul do Estado do Pará, Paragominas e Redenção. A partir de entrevistas e de uma análise das trajetórias dos estabelecimentos agrícolas e das paisagens, caracterizamos seis tipos de estratégias de intensificação, describimos os efeitos das práticas de manejo de pastagens num conjunto de recursos naturais, e investigamos as percepções dos produtores sobre esses recursos. Em um segundo lugar, desenvolvimos um modelo multi-agentes afim de simular os efeitos das estratégias de intensificação nas paisagens e seus recursos naturais e avaliar a viabilidade de adoção em uma variedade de situações agrárias. O modelo foi usado para explorar dois cenários de intensificação : um semi-intensivo baseado sobre um manejo melhorado das pastagens e um intensivo baseado sobre a integração lavoura-pecuária e a irrigação.

Os resultados mostram que o processo de intensificação leva à uma reconfiguração das paisagens. Os pecuaristas tendem à intensificar as áreas com condições biofísicas mais favoráveis para a produção forrageira, assim como as áreas mais próximas e accessíveis. Enquanto na época da colonização, as estratégias de localização dos usos do solo eram principalmente orientadas pela apropriação de terra, as novas estratégias de intensificação visam uma melhor valorização de múltiplos recursos naturais (topografia, fertilidade do solo, drenagem, accesso à água de superfície ou subterrânea) e a otimização da configuração dos usos do solo nas propriedades. No entanto, essas estratégias divergem entre os produtores (em função das disponibilidades em capital, mão-de-obra, equipamentos) e em função do grau de heterogeneidade das condições biofísicas. Os resultados resultante das simulações destacam que a intensificação do sistema é uma opção para reduzir as áreas de pastagens e de cultivos necessários para a produção animal. Torna-se possível de aumentar o tamanho do rebanho e ao mesmo tempo deixar as florestas regenerar em zonas sensíveis e marginais. No entanto, a baixa disponibilidade de mão de obra constitua um freio importante à intensificação de amplas áreas forrageiras. Observamos também que o re-arranjo espacial dos usos de solo em função do tipo de unidades geomorphologicas é diferente entre as propriedades intensivas e semi-intensivas, o que leva à uma dinâmica diferenciada dos recursos naturais nas paisagens.

Conciliar a produção pecuária com a proteção das florestas é um enorme desafio para a região amazônica. Nesse cuadro, essa tese mostra a importância de raciocinar as áreas dedicadas à intensificação e aquelas dedicadas à conservação, tendo em considereção os projetos dos produtores e os efeitos das práticas e de seu arranjo espacial nos recursos naturais. Identificamos oportunidades e desafios para accompanhar essa transição. Discutimos enfim novas perspectivas de pesquisa ao respeito da compreensão das decisões, modelização e ampliação da escala de análise afim de avaliar a influência de fatores externais sobre as estrátegias e incluir um maior número de processos ecológicos e sociais.

Title: Cattle Ranching in Eco-efficient Landscape. Understanding and modeling livestock intensification dynamics in Eastern Brazilian Amazon farms

Keywords: Eco-efficient Landscape, Livestock Farming System, Farm Trajectory, Agent-Based Modeling, Intensification, Brazilian Amazon

Abstract :

After 50 years of agricultural expansion in Eastern Brazilian Amazon, environmental policy to reduce deforestation and a set of socio-economic drivers are putting constraints on extensive cattle ranching systems. In response, land use intensification has been gaining momentum as a way to improve livestock production in limited land areas and conserve forest. However, the process of land-use intensification is poorly understood in this region, particularly in its spatial dimension and in its contribution towards building eco-efficient landscapes, i.e. landscapes where practices and their spatial distribution optimize the use of natural resources. Therefore, the purpose of this research is to document and model the interactions between cattle ranchers' decisions, landscapes and natural resources in a diversity of cattle farms.

Firstly, we conducted a field research in two livestock-oriented regions of Pará state, Paragominas and Redenção. Drawing on interviews, landscape and farm trajectories analysis, we characterized six patterns of intensification, studied cattle ranchers' perceptions on a range of natural resources and described the effects of land-use management on such resources. Secondly, we developed an Agent-Based Model to simulate over 20 years the effects of intensive farming strategies on landscape and their natural resources, and assess the feasibility of adopting such management in various agrarian situations. We used the model to compare two scenarios of intensification: one semi-intensive solely based on improved pasture management and one intensive based on crop-livestock integration and irrigation.

The results show that the process of intensification has led to a spatial rearrangement of land uses. Cattle ranchers prefer to intensify fields with the best biophysical conditions for forage production, as well as those closest to and most accessible from the farmstead. The intensification strategies aim at enhancing the use of multiple natural resources (topography, soil fertility, soil drainage, access to surface and groundwater) and optimizing land-use configuration at farm scale. This contrasts with the colonization period, when pasture location decisions were mostly guided by land appropriation. Nevertheless, intensification strategies differ among farms (availability of capital, labor, equipments) and according to the degree of heterogeneity of biophysical conditions. Results from the simulation model highlight that the process of intensification can reduce the area necessary for animal production. Thus, cattle ranchers can increase herd size while sparing land for forest regeneration. However, low labor availability limits the spatial extent of pasture intensification in modeled farms. In terms of landscape dynamics, intensive and semi-intensive cattle ranchers locate land-uses according to geomorphological units differently, which leads to heterogeneous spatial dynamics of natural resources.

Reconciling cattle ranching production and forest conservation in eco-efficient landscape remains an important challenge for Brazilian Amazon. The findings illustrate the importance of assessing the landscape areas most suitable for agricultural intensification and for conservation, based on cattle ranchers' projects and the effects of their practices and spatial location on natural resources. Several opportunities and challenges are identified to tackle such challenge. New research perspectives related to decisions understanding, modeling and upscaling are also proposed in order to take into account the influence of external factors on cattle ranchers' decisions and include more ecological and social interactions.

Titre : Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne

Mots-clés : paysage éco-efficient, système d'élevage bovin, trajectoire, système multi-agents, intensification, Amazonie brésilienne

Résumé :

Après 50 ans d'avancée des fronts pionniers, l'Amazonie orientale brésilienne aborde une phase de transition agraire. Face à la fermeture de la frontière limitant l'accès au foncier et à la fertilité forestière, les éleveurs bovins ont initié un mouvement d'intensification de l'usage des sols. Malgré les enjeux environnementaux que soulèvent de tels changements, cette dynamique d'intensification est encore mal comprise, notamment dans sa dimension spatiale et dans sa capacité à favoriser des paysages éco-efficients, c'est-à-dire des paysages au sein desquels les pratiques et leur localisation optimiseraient l'utilisation des ressources naturelles. Pour adresser ces questions, cette thèse propose de décrire et modéliser les interactions entre le système de décision des exploitants, les paysages et leurs ressources dans une diversité de fermes d'élevage.

Dans un premier temps, un travail de terrain a été conduit dans deux territoires à l'Est et au Sud de l'Etat du Pará, Paragominas et Redenção. A partir d'enquêtes et d'une analyse des trajectoires d'exploitation et des paysages, nous avons caractérisé six types de stratégies d'intensification, qualifié leurs effets sur un certain nombre de ressources naturelles et étudié les perceptions des éleveurs sur ces ressources. Dans un deuxième temps, nous avons développé un modèle multi-agents afin de simuler les effets des stratégies d'intensification sur les paysages et leurs ressources et évaluer leur faisabilité d'adoption dans différentes situations agraires. Le modèle a été utilisé pour explorer deux scénarios d'intensification : l'un semi-intensif basé uniquement sur une conduite améliorée des pâturages, et l'autre intensif basé sur l'intégration agriculture-élevage et l'irrigation.

Les résultats montrent que le processus d'intensification conduit à une reconfiguration des usages des sols dans les paysages. Après une phase de colonisation où l'occupation des sols était essentiellement guidée par l'appropriation du foncier, les éleveurs ont tendance à intensifier les parcelles aux conditions biophysiques les plus favorables à la production fourragère et les plus proches et accessibles. Ces stratégies visent à mieux valoriser diverses ressources naturelles (topographie, fertilité et drainage des sols, eau de surface et souterraine) et à optimiser les déplacements. Cependant, ces stratégies divergent selon la situation agraire de l'exploitation (disponibilité en capital, main d'œuvre, équipements) et le degré d'hétérogénéité de l'environnement biophysique. Par ailleurs, les sorties des simulations soulignent que l'intensification du système permet de réduire les besoins en surface fourragère pour un même niveau de production animale. Les éleveurs sont ainsi capables d'augmenter la taille de leur troupeau tout en régénérant des forêts sur les zones sensibles et marginales. Cependant, la faible disponibilité en main d'œuvre constitue un frein majeur à l'intensification de vastes surfaces fourragères. En termes d'évolution des paysages, les éleveurs intensifs et semi-intensifs positionnent différemment les usages des sols en fonction du type d'unités géomorphologiques, ce qui se traduit par une dynamique spatiale contrastée des ressources naturelles.

Concilier élevage et forêt dans des paysages éco-efficients constitue un défi important pour la région amazonienne. Dans ce cadre, cette thèse montre l'importance de raisonner les espaces voués à l'intensification et à la conservation en tenant compte des projets des exploitations et des effets de leurs pratiques et de leur agencement sur les ressources naturelles. Elle identifie des priorités pour accompagner cette transition. Enfin, elle suggère de nouvelles perspectives de recherche concernant la compréhension des décisions, la modélisation et l'élargissement de l'échelle d'analyse afin de mieux apprécier l'influence de facteurs externes sur les stratégies des éleveurs et intégrer un plus grand nombre de processus écologiques et sociaux.