



HAL
open science

Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale

Reinis Osis

► **To cite this version:**

Reinis Osis. Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale. Géographie. Le Mans Université, 2019. Français. NNT : . tel-02385128v1

HAL Id: tel-02385128

<https://shs.hal.science/tel-02385128v1>

Submitted on 28 Nov 2019 (v1), last revised 17 Jan 2020 (v2)

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

LE MANS UNIVERSITE
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 604
Sociétés, Temps, Territoires
Spécialité : Géographie

Par

Reinis OSIS

Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale

Thèse présentée et soutenue à Le Mans Université, le 18 novembre 2019
Unité de recherche : Espace et Sociétés (ESO)
Thèse N° : 2019LEMA3014

Rapporteurs avant soutenance :

Martin Paegelow
Christophe Le Page

Professeur, Université Toulouse 2
Chercheur (HDR), CIRAD

Composition du Jury :

Martin Paegelow
Christophe Le Page
Otávio do Canto Lopes
Yamna Djellouli
Moïse Tsayem-Demaze
René Pocard-Chapuis
François Laurent

Professeur, Université Toulouse 2
Chercheur (HDR), CIRAD
Professeur, Universidade Federal do Pará
Professeure, Le Mans Université
Professeur, Le Mans Université
Chercheur, CIRAD
Professeur, Le Mans Université



LE MANS UNIVERSITÉ
UMR CNRS 6590 – ESO

Ecole Doctorale – Sociétés, Temps, Territoires
Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale

Thèse de Doctorat
Discipline : Géographie

Présentée par
Reinis OSIS

Directeurs de thèse : François Laurent et René Pocard-Chapuis
Soutenue le 18 novembre 2019 au Mans

Jury :

Martin PAEGELOW, Professeur, Université Toulouse 2 (*Rapporteur*)

Christophe LE PAGE, Chercheur (HDR), CIRAD (*Rapporteur*)

Otávio DO CANTO LOPES, Professeur, Universidade Federal do Pará (*Examineur*)

Yamna DJELLOULI, Professeure, Le Mans Université (*Examineur*)

Moïse TSAYEM DEMAZE, Professeur, Le Mans Université (*Examineur*)

François LAURENT, Professeur, Le Mans Université (*Directeur de thèse*)

René POCCARD-CHAPUIS, Chercheur, CIRAD (*Co-encadrant de thèse*)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon grand incitateur scientifique et géographique, François Laurent, qui a été dès le début le soutien fondamental pour la réalisation de ce travail, en contribuant de manière critique et constructive aux discussions, tant au bureau que sur le terrain. Toujours avec beaucoup de patience et de compréhension dans les innombrables révisions et relectures.

Je remercie également René Pocard-Chapuis, qui m'a fait connaître l'Amazonie, l'élevage, et le territoire de Paragominas, ce qui a fondé ce travail.

Les suggestions et les encouragements de Marie Gabrielle Piketty et Laurent Polidori, qui pendant quatre ans ont contribué à la construction scientifique de ce travail dans le cadre du comité de suivi, ont également été essentiels à cette recherche. Je les remercie vivement.

Je remercie également Otavio do Canto Lopes, Christophe Le Page, Martin Paegelow, Yamna Djellouli et Moïse Tsayem Demaze d'avoir accepté de faire partie du jury pour l'évaluation de cette thèse.

Je remercie François Messner, Ali Hassan et Felipe Alves Cavani, qui ont beaucoup contribué à ce travail par des discussions et des analyses que certainement je n'aurais pu faire seul.

Ce travail n'aurait évidemment pas été possible sans le soutien et l'affection de Seowon Kwon en tout temps.

Les précieuses discussions, déjeuners, cafés, dîners et barbecues avec les collègues d'ESO Le Mans ont enrichi ma vision, je tiens à remercier Richard, Sosthene, Emmanuel, Dimitri, Amel, Nabil, Rachel, Yanick, Stefan, Wilfried, Mélanie, Heduen, Ahmed, Claire e François Ory.

Et bien sûr, les compatriotes Raphael, Tania, Juliana, Jackson, Leticia, Alexandre, Marcia, Ana et d'autres Brésiliens qui sont venus ici et qui ont grandement contribué à la vie du laboratoire.

Je dois aussi mentionner Thomas, Ravena, Hudson, Sophie et d'autres qui m'ont accueilli à Paragominas comme si j'étais chez moi, et qui m'ont montré "les chemins" dans cette ville.

Et même si je suis physiquement loin d'eux, je tiens à remercier mes collègues brésiliens, en particulier Afonso, Barbara, Fabio, Guilherme, Reinaldo, Rodolfo, Camila, Marlene, Camilo et bien d'autres que j'aurais aimé également citer.

Je tiens à remercier ma famille qui m'a soutenu et encouragé dans ce projet : Leny, Queila et Cristiane, et mon père qui, même s'il n'est plus parmi nous, est toujours ma référence.

Cette thèse a été réalisée avec le financement du *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq - 207592/2014-4), de l'Agence Nationale de la Recherche (ECOTERA, ANR-13-AGRO-0003) et du Cirad UMR-SELMET. Je suis reconnaissant à ces institutions pour ce soutien essentiel.

Sommaire

Introduction générale

PARTIE I - La dynamique d'occupation des sols dans un front pionnier : théories et modèles

Chapitre 1 – La dynamique des fronts pionniers

Chapitre 2 – La modélisation de l'occupation du sol

PARTIE II - Ressources et contraintes biophysiques dans la dynamique d'occupation du sol des différents acteurs agricoles à Paragominas

Chapitre 3 – Paragominas : un territoire aux multiples fronts pionniers

Chapitre 4 – Systèmes de décision d'utilisation des ressources biophysiques à Paragominas

PARTIE III - Modélisation de la dynamique d'occupation du sol à Paragominas : interactions entre facteurs biophysiques et autres dans le temps et dans l'espace

Chapitre 5 - La dynamique temporelle des déterminants spatiaux d'occupation du sol à Paragominas

Chapitre 6 - Déterminants spatiaux et scénarios d'occupation du sol future de la municipalité de Paragominas, une ancienne frontière agricole en Amazonie

Chapitre 7. Modélisation et spatialisation d'unités de systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques à l'aide de techniques d'apprentissage automatique

Chapitre 8. Les facteurs biophysiques et le front pionnier

Conclusion générale

Introduction générale

Une grande partie de la forêt tropicale a subi des transformations majeures au cours des dernières décennies du fait de l'agriculture, des mines, des barrages, de l'urbanisation et des infrastructures de transport. La demande mondiale en produits alimentaires, bio-carburants, pâte à papier et bois d'œuvre est l'un des principaux facteurs de transformation des zones forestières tropicales en terres agricoles. Selon (Gibbs et al. 2010), entre les années 1980 et 1990, plus de 55 % des nouvelles zones agricoles du monde se sont étendues dans des zones forestières intactes et 28 % en forêts perturbées. Les changements d'usage et de couverture du sol génèrent divers impacts environnementaux aux niveaux local, régional et mondial. L'émission de gaz à effet de serre, la perte de biodiversité et la sédimentation dans les lacs et les cours d'eau ne sont que quelques-uns des nombreux impacts qui peuvent se manifester lors de ces changements (Díaz, Settele, et Brondízio 2019). Dans la plus grande forêt tropicale humide du monde, l'Amazonie, cette situation n'est pas différente, surtout au Brésil où la déforestation est particulièrement sensible aux influences internationales telles que les conditions du marché des matières premières et les progrès technologiques (Nepstad et al. 2014).

Toutefois, ce n'est que la continuation d'un processus de migrations plus ancien, qui a commencé à la fin du 19^{ème} siècle le long de l'axe São Luiz – Belém, et surtout à partir des années 1970 avec les projets gouvernementaux d'intégration du territoire par la création d'infrastructures, notamment des routes, et des politiques visant à encourager la colonisation de ces zones (Becker 2001). Cette colonisation, dont l'origine des flux migratoires était diverse, reposait sur une infrastructure précaire et ne prenait pas en compte les contraintes physiques et biotiques de la région et encore moins la protection des populations indigènes ou la conservation du milieu naturel (Fearnside 1987). Lors de cette phase, plus de 16 % de la forêt originelle a été transformée (INPE 2018a) par ce processus d'appropriation des terres, dans les zones dénommées fronts pionniers, qui composent un vaste arc d'occupation et de transformation de la couverture végétale qui couvre toute la partie orientale et méridionale de l'Amazonie. L'intensité de ce processus s'est réduite à partir de 2004 lorsque le gouvernement fédéral et la société organisée ont pris une série de mesures pour contenir la déforestation, telles que l'intensification des contrôles liées au Code forestier, la création d'aires protégées (plus seulement dans les confins de l'Amazonie, mais aussi à proximité des fronts pionniers), des sanctions pour les municipalités ayant les taux

les plus élevés de déforestation et des interventions dans la chaîne de production des principaux produits de la frontière agricole : la viande et le soja. Entre 2005 et 2013, le taux de déforestation a été réduit de plus de 70% (Nepstad et al. 2014).

Dans un contexte de lutte contre la déforestation et de construction de nouveaux espaces de développement en Amazonie, l'un des défis majeurs est d'identifier les causes et les principaux agents des changements de l'occupation du sol (Margulis 2003). Alors que la plupart des études se sont concentrées sur les causes du processus de déforestation, les différents processus qui existent actuellement dans cette région nécessitent des modèles explicatifs qui couvrent non seulement l'avancée du déboisement, mais aussi les trajectoires après la déforestation : que deviennent les espaces ouverts ? comment y évolue la production ? qu'advient-il des patchs de forêt isolés ? Comme le souligne Aguiar et al. (2016), la compréhension de la dynamique des zones déjà déboisées prend de plus en plus d'importance dans le débat sur l'Amazonie. Ceci est d'autant plus pertinent dans un contexte de demande de services écosystémiques, de conservation de l'environnement et d'une agriculture fondée sur de bonnes pratiques (Cerri et al. 2018). Après la déforestation, dans le cas général, l'élevage est l'une des premières activités mises en place, conformément à un processus commun à la plupart des dynamiques historiques de colonisation du Brésil (Poccard, Bendahan, et Carvalho 2015). Cependant, l'arrivée du soja est un élément nouveau dans cette dynamique, occupant à la fois les zones auparavant déboisées et induisant ou non de nouvelles déforestations. Près d'un million d'hectares de champs de soja ont été établis entre 2001 et 2006 (Rudorff et al. 2011), pour répondre principalement à la demande internationale (Torres et al. 2017). Jusqu'au milieu des années 2000, le soja était un facteur important de la déforestation dans le sud de l'Amazonie, et la superficie déboisée était directement corrélée avec le prix moyen annuel du soja (Morton et al. 2006). Mais les interventions directes dans les filières de production du soja puis de la viande sous la pression des politiques et des exigences du marché international (moratoires), se sont avérées efficaces pour agir sur les causes et les agents de la déforestation.

Au-delà de ces aspects généraux sur l'Amazonie, lorsque nous considérons la distribution spatiale de la dynamique de l'occupation du sol, nous pouvons distinguer d'importantes différences dans le développement des processus. Les acteurs agricoles n'ont pas un comportement homogène dans l'espace. Des déterminants spatiaux locaux, ainsi que les facteurs externes tels que les conditions du marché et les contrôles environnementaux, constituent le contexte dans lequel les acteurs fondent

leurs décisions et organisent leurs actions dans l'espace. L'influence de certains facteurs explicitement spatiaux, tels que les infrastructures d'accès, a déjà été démontrée en ce qui concerne le changement d'occupation du sol en Amazonie (Fearnside 2007).

Mais la dynamique spatiale liée aux facteurs naturels est encore peu explorée. Dans les analyses qui considèrent l'ensemble de l'Amazonie, les facteurs biophysiques n'ont pas ou peu de poids dans la dynamique de l'occupation du sol. Cela s'explique en partie par le fait qu'en raison de la taille de l'espace considéré, les facteurs naturels sont souvent représentés de façon simplifiée dans les analyses. C'est le cas, par exemple, des travaux de Kirby et al. (2006) et Laurance et al. (2002), qui utilisent des fenêtres régulières d'ordre kilométrique pour agréger les données et calculer des statistiques. A cette échelle, les informations sur la répartition spatiale des facteurs topographiques et pédologiques du paysage peuvent être complètement perdues, l'échelle de variabilité spatiale de ces éléments étant beaucoup plus fine. Une série de reliefs très irréguliers, par exemple, peut être réduite à une valeur de pente moyenne, et ne pas représenter la complexité locale qui peut être fondamentale dans la dynamique du paysage.

Cependant, certaines études indiquent que dans les zones où le front pionnier est déjà relativement consolidé, des facteurs naturels prennent de l'importance dans l'évaluation des propriétés et parcelles pour certaines occupations. Piketty et al. (2015) montrent qu'il y a eu une augmentation substantielle de la proportion de déforestation sur les sols plus fertiles depuis la période d'expansion du soja dans la municipalité de Paragominas (Etat du Pará). D'autres facteurs biophysiques peuvent également conditionner directement la décision des producteurs, comme l'existence de sols saturés d'eau, de zones à forte déclivité, et indirectement par le biais de la législation environnementale, comme c'est le cas des Aires de Préservation Permanente (*Áreas de Preservação Permanente* - APP) obligatoires sur les rives des cours d'eau. Se pose alors la question de savoir comment ces facteurs interagissent dans la dynamique d'occupation du sol ? Et quelle est l'échelle la plus pertinente à étudier ?

Pour analyser la dynamique spatiale de l'occupation du sol, des modèles de simulation dynamique ont été développés et appliqués en Amazonie, tant pour comprendre la dynamique passée que pour projeter des scénarios futurs possibles qui servent à l'aménagement territorial. La modélisation est utile pour mieux cerner l'importance des facteurs explicatifs dans la dynamique passée et présente de l'occupation du sol. Elle permet également d'anticiper les paysages futurs à partir des tendances observées ou

des politiques alternatives, afin de mieux gérer les systèmes économiques et écologiques complexes (Costanza et Ruth 1998; Verburg et al. 2004). Les modèles de simulation dynamique sont une classe de modèles dont le développement se fait de manière déductive, en prenant comme point de départ ce que l'on sait du système et en l'utilisant pour formuler des hypothèses et évaluer son comportement (Perz et al. 2009).

En Amazonie, la plupart des modèles se sont concentrés sur le processus de déforestation, (Aguilar, Câmara, et Escada 2007; Andersen et Reis 1997; Lapola et al. 2011; Laurance et al. 2002; Soares-Filho et al. 2006). Parmi les facteurs qui influencent le processus de déforestation en Amazonie, nous pouvons souligner : la proximité des routes (Barber et al. 2014; Fearnside 1987), la densité de population, la proximité des centres urbains (Laurance et al. 2002; Reis et Guzman 1992) et la présence d'unités de conservation (Nepstad et al. 2002; Soares-Filho et al. 2006).

Dans la plupart des modèles de déforestation, les dimensions biophysiques telles que la fertilité des sols et les zones humides sont jugées moins pertinentes (e.g. Laurance et al., 2002). Mais le plus souvent, les caractéristiques biophysiques sont considérées de manière homogène, tandis que les comportements des populations locales sont résumés selon une seule logique économique (Arnauld de Sartre et al. 2005). Effectivement, des aspects tels que la qualité du sol sont rarement primordiaux aux premiers stades du front pionnier, lorsque des facteurs tels que la consolidation de la surface de l'exploitation et le revenu initial garanti par l'élevage extensif sont plus importants, il s'agit avant tout d'occuper rapidement l'espace pour en prendre possession, en ouvrant la forêt pour le bétail avec peu d'investissement et de faibles coûts de fonctionnement (Tourrand et al. 2006; Vosti, Witcover, et Carpentier 2002).

Ces espaces ouverts par la déforestation perdent rapidement en productivité du fait d'une absence de gestion adéquate qui entraîne une baisse de fertilité et l'invasion par des plantes ligneuses. Dans le cas de la production agricole et animale à grande échelle, la faible fertilité des sols peut être surmontée grâce à l'application d'amendements calcaires et d'engrais (Angelsen et Kaimowitz 2001), les plantes invasives par une gestion du temps de pâturage, des espèces fourragères, et par la destruction mécanique ou chimique des plantes invasives (Poccard, Bendahan, et Carvalho 2015). Mais, le coût des intrants sur les sols très pauvres et les limites d'accès aux machines dans les zones humides ou accidentées constituent des éléments cruciaux dans les choix des agriculteurs lorsqu'ils cherchent à maintenir, restaurer ou améliorer la productivité des espaces auparavant ouverts comme c'est le

cas dans les fronts pionniers consolidés (Plassin 2018). Par conséquent, les surfaces aplanies aux sols fertiles sont davantage valorisées pour les cultures de grains comme le soja, le maïs ou le sorgho en vue de réduire les coûts de production (M. G. Piketty et al. 2015; Vera-Diaz et al. 2008). Vera-Diaz et al. (2008), par exemple, a constaté que les producteurs de soja de l'Amazonie investissent généralement plus d'engrais dans les sols ayant un meilleur potentiel agricole, ce qui leur permet d'accroître le rendement de ces intrants. Ainsi, les conditions locales et la valorisation hétérogène de l'espace par les agriculteurs peuvent être fondamentales pour le développement des fronts pionniers amazoniens, d'où l'importance d'explorer des scénarios futurs en prenant en compte ces facteurs.

Dans les marges méridionales et orientales du biome amazonien, de nouveaux territoires ont été construits avec des centres urbains entourés de mosaïques de forêts primaires et de zones agricoles accessibles par un réseau de routes asphaltées ou non. Ces régions sont qualifiées d'« Anciennes Frontières Agricoles » (Schielein et Börner 2018) ou de fronts pionniers en intensification (Thalès et Pocard-Chapuis 2014), nous les dénommerons fronts pionniers consolidés.

Dans ce contexte, le changement du paysage a suivi une dynamique spatiale qui reflète les activités successives du front pionnier, principalement pour l'extraction du bois et l'élevage à partir des années 1960 (Barona, Ramankutty, et Hyman 2010; Margulis 2003) et l'expansion des cultures annuelles (soja, maïs, sorgho, coton) et des plantations d'arbres, à partir des années 2000.

La commune de Paragominas (19.342 km²), est emblématique de ces évolutions combinées à une forte réduction de la déforestation (à partir de 2007), qui lui a permis d'être qualifié de « *Município Verde* » (« municipalité verte »). La municipalité connaît depuis les années 2000 une expansion intense des cultures de soja et des plantations d'arbres pour le bois (eucalyptus et paricá) sur de vieux pâturages extensifs, expansion guidée en particulier par le potentiel agricole naturel des terres (Laurent, Arvor, et al. 2017; Piketty et al. 2015).

Dans les zones productives, la concurrence croissante entre pâturages, cultures et plantations d'arbres est un processus récent qui modifie le paysage et l'environnement local. Par ailleurs, la gouvernance innovante, la sensibilisation des acteurs locaux à l'environnement, les processus d'intensification, le découplage entre la déforestation et la production agricole offrent un contexte nouveau où agissent de différents groupes sociaux dans un environnement biophysique hétérogène, ce qui est favorable à l'étude

du rôle des ressources biophysiques dans le développement d'un front pionnier amazonien.

Problématique et hypothèses

Plusieurs études se concentrent sur la compréhension des mécanismes d'extension de l'élevage et de l'agriculture dans les forêts tropicales (Lambin 1997; Mertens et Lambin 1997). Cependant, l'évolution du front pionnier au fil du temps est complexe, bien souvent selon différentes phases et comprend l'interaction entre de nombreux acteurs, variables, échelles temporelles et spatiales. Il nous semble particulièrement important lors de ce processus de connaître le rôle des ressources et contraintes naturelles biophysiques dans l'organisation du paysage : comment sont-elles valorisées ou surmontées et comment cela « construit » des paysages ? En ce sens, le présent travail se concentre sur la question suivante : **quel est le rôle des ressources et des contraintes biophysiques¹ dans la dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol des fronts pionniers d'Amazonie brésilienne ?**

Notre recherche a notamment pour but de contribuer à une discussion sur la façon dont les ressources naturelles sont prises en compte dans le développement d'un front pionnier amazonien. L'accent sera mis sur la question de l'expansion récente des cultures de grains (dénommées *commodities* puisque majoritairement destinées au marché mondial) dans diverses parties de l'Amazonie et sur la façon dont elle résulte non seulement de conditions foncières et d'infrastructures favorables, mais également des aptitudes du sol qui permettent une agriculture mécanisée, avec épandage d'intrants à grande échelle, ce qui a des implications directes pour le développement des politiques publiques de planification et de développement des territoires. Face à la problématique soulevée, trois hypothèses ont été avancées.

La première hypothèse que nous présentons plus bas, se réfère spécifiquement aux facteurs impliqués dans la définition d'un « système de décision d'usage des ressources biophysiques ». Ce concept a été considéré dans cette étude, comme étant la dimension biophysique qui est prise en considération lors des décisions prises par

¹ « Facteurs biophysiques » sont considérés dans cette étude comme la dimension spatiale des facteurs hydrologiques, pédologiques et topographiques.

les agriculteurs dans le cadre de ressources limitées². Considérant d'abord l'échelle spatiale, la taille de l'exploitation conditionne une série d'aspects qui seront pris en compte dans les décisions d'occupation du sol, tels que le capital disponible, l'échelle de production, la surface et la distribution des facteurs biophysiques. La distance de l'exploitation par rapport à toute zone « centrale » (zone urbaine, route asphaltée, région plus densément peuplée) a une implication directe sur le coût de transport³ et, par conséquent, conditionne les autres décisions relatives à la production. Enfin, les caractéristiques et la distribution des différents facteurs biophysiques de l'exploitation constituent la base sur laquelle les systèmes de décision se sont formés.

- Hypothèse 1 : les systèmes de décision d'usage des ressources et contraintes biophysiques varient en fonction de la taille et de l'emplacement de la propriété, ainsi que de la répartition des facteurs biophysiques dans l'exploitation.

Ensuite, la convergence des logiques entre les acteurs du territoire est prise en compte en considérant que des conditions similaires entraînent un comportement similaire. Les actions similaires des agriculteurs dans un même espace conduisent à une organisation du paysage⁴ avec des secteurs qui représentent différents systèmes décisionnels, différentes logiques. En ce sens, l'hypothèse suivante est formulée :

- Hypothèse 2 : différentes combinaisons de ressources et contraintes biophysiques et de systèmes de décision produisent une mosaïque d'occupations du sol qui peut être divisée en unités homogènes qui s'organisent spatialement.

Mais en même temps qu'une dimension spatiale est supposée pour les systèmes de décision, il faut s'attendre à des variations dans le temps. Il est bien connu, par exemple, que les causes de la déforestation et les facteurs de contrôle ont varié au fil du temps (Rudel et al. 2009), en ce sens, une troisième hypothèse est posée :

- Hypothèse 3 : l'importance des facteurs biophysiques varie dans le temps et selon les phases des systèmes de décision d'occupation du sol.

² Par exemple, le rôle de la topographie dans la décision de louer ou non une propriété en particulier, ou d'éviter une parcelle particulière en raison du sol caillouteux.

³ Selon le modèle de von Thünen.

⁴ Voir Chapitre 1 « Approche par la théorie des systèmes complexes ».

Objectifs

Sur la base de ces hypothèses, cinq objectifs spécifiques et sept méthodes principales associées à ces objectifs ont été définis :

- Objectif 1 – Comprendre les principaux moteurs des changements d'occupation du sol sur les fronts pionniers tropicaux et leurs relations avec les ressources naturelles. Une recherche bibliographique a ainsi été menée en considérant les principaux écrits sur les fronts pionniers, en particulier ceux de l'Amazonie.
- Objectif 2 – Identifier les logiques d'usage des ressources et contraintes biophysiques par les agriculteurs sur un front pionnier. À cette fin, en plus de la recherche bibliographique et de l'analyse spatiale, des visites et des entretiens sur le terrain ont été effectués à Paragominas.
- Objectif 3 - Appliquer et valider un modèle de changement d'occupation du sol pour évaluer le rôle des ressources et contraintes biophysiques dans une simulation spatialement explicite. À cette fin, le modèle DINAMICA a été calibré avec des données provenant du territoire de Paragominas.
- Objectif 4 – Évaluer les implications de la distribution spatiale des ressources et contraintes biophysiques pour d'éventuels développements futurs sur le front pionnier. Le modèle spatialement explicite a alors été utilisé pour générer des scénarios de paysage futurs.
- Objectif 5 – – Regrouper les exploitations par type de logique d'occupation du sol en fonction des facteurs identifiés et cartographier cette typologie à l'échelle municipale. Un clustering a été effectué pour atteindre cet objectif.

Le schéma de la Figure 1 représente les hypothèses et des objectifs de la thèse.

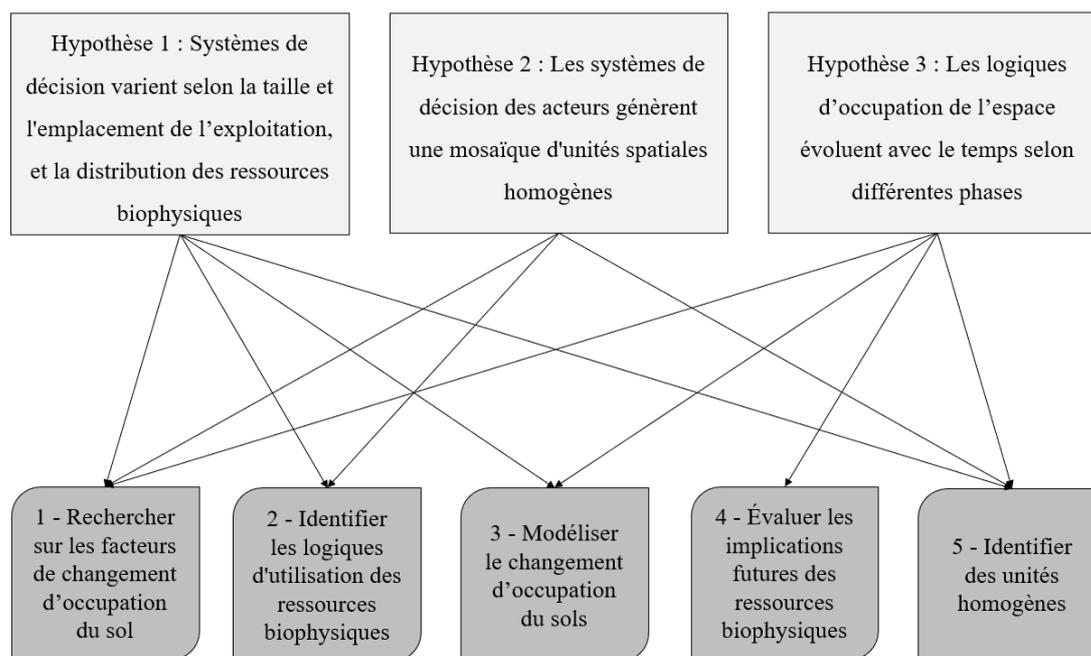


Figure 1. Schéma d'organisation des hypothèses et objectifs proposés.

Cette thèse est développée en trois parties :

- **La première partie** comprend l'état de l'art sur l'étude de la dynamique des fronts pionniers et la modélisation du changement de l'occupation du sol. Le Chapitre 1 traite des principales approches, théories et modèles liés au concept de front pionnier. Dans un premier temps, en considérant le front pionnier comme un concept isolé, et dans un second temps, en considérant en particulier le front pionnier amazonien. Le chapitre présente les activités qui ont joué un rôle clé dans le développement du front pionnier, ainsi que les caractéristiques du développement spatial et temporel du front pionnier amazonien. Le Chapitre 2, présente les principales méthodes de modélisation de l'évolution de l'occupation du sol, ainsi que le calibrage, la validation et la simulation des scénarios futurs. Il se termine par une discussion des principales études de modélisation en Amazonie, soulignant le rôle des ressources biophysiques dans la dynamique d'occupation du sol.
- **La deuxième partie** est une caractérisation de la zone d'étude. Le Chapitre 3 décrit les caractéristiques biophysiques, socio-économiques et les activités productives. Il détaille spécifiquement l'histoire des principales activités économiques rurales depuis la colonisation. Ensuite, le Chapitre 4 vise à identifier et à caractériser les logiques d'occupation du sol, à travers la réalisation d'entretiens avec les producteurs sur le terrain.

- **La troisième partie** est consacrée à l'analyse de données et au développement de modèles. Dans un premier temps, le Chapitre 5 définit la dynamique temporelle des déterminants spatiaux de l'occupation du sol. Ces dynamiques ont servi au Chapitre 6 pour l'application d'un modèle spatialement explicite de changement d'occupation du sol fondé sur des automates cellulaires. Modèle qui a ensuite été utilisé pour générer des scénarios prospectifs d'occupation du sol. Le Chapitre 7 définit et analyse les unités homogènes fondées sur une typologie des logiques des producteurs. Le Chapitre 8 traite du rôle des facteurs biophysiques sur le front pionnier à partir de la littérature et des résultats présentés.

PARTIE I - La dynamique d'occupation des sols
dans un front pionnier : théories et modèles

Introduction de la partie I

La présente partie est consacrée à l'état de l'art. Le chapitre 1 définit le concept de front pionnier utilisé dans l'étude et examine les principales approches qui tentent de comprendre la dynamique des fronts pionniers. Il présente les principales activités agricoles liées au développement d'un front pionnier amazonien, en considérant son histoire, la dynamique de production et les logiques de gestion. Puis, nous nous intéressons aux études du front pionnier qui intègrent, d'une part, la dimension spatiale et, d'autre part, une approche diachronique.

Le chapitre 2, dresse un état de l'art général des principales approches de modélisation de la dynamique spatiale, des échelles de travail, du calibrage, de la validation et de l'élaboration de scénarios prospectifs. Nous examinerons les principales études de modélisation spatialement explicites en Amazonie, les facteurs de changements d'occupation du sol, avec un accent mis sur le rôle des ressources biophysiques dans ces modèles. Enfin, les principaux travaux de simulation de scénarios futurs sont présentés pour l'Amazonie.

Chapitre 1 – La dynamique des fronts pionniers

1. Principaux modèles explicatifs

Dans la mesure où chaque société occupe un espace, qui constitue son territoire, un front pionnier peut être compris comme un processus d'expansion spatiale d'un système par rapport à un autre préexistant. Contrairement aux frontières administratives, définies par des accords politiques, un front pionnier délimite les espaces occupés par la société contemporaine aux dépens de zones peu intégrées (Monbeig, 1952 apud Pocard, Bendahan, et Carvalho, 2015). Pierre Monbeig parle de la recherche de « nouvelles terres » en se référant aux fronts pionniers au Brésil, avec pour exemple l'expansion du café basée sur la conquête de terres bon marché dans le Sud-Est et la migration interne en Amazonie induite par le gouvernement sous le slogan « terre sans hommes pour hommes sans terre ». Ce mouvement est basé sur une vision d'une zone « sauvage » et vide à conquérir et « civiliser ». La notion de « palimpseste » évoquée par Théry (1976) représente bien le processus en considérant que la transformation d'un espace par le front « réécrit » une nouvelle structure spatiale sur l'ancienne. Selon le même auteur, le front pionnier serait la limite extrême des explorateurs, des migrants qui vont établir une colonie sur des terres auparavant vides ou peu peuplées (Théry, 1976).

L'une des premières études sur les fronts pionniers a été celle de F. J. Turner, « The Significance of the Frontier in American History » de 1893, qui a étudié le phénomène de la colonisation aux Etats Unis. Parmi ses constats, il a affirmé que l'environnement de la frontière et son expansion continue étaient plus importants que les compétences héritées de l'Europe pour façonner le caractère et les institutions politiques des États-Unis. Ceci a été ensuite relativisé, mais cet auteur a eu une contribution importante notamment sur la progression par phases, chaque phase étant caractérisée par un groupe différent de colonisateurs, les phases se succédant par vagues à travers le pays (Summers 2008). Ce concept a pris de l'ampleur et est utilisé dans l'explication des fronts pionniers dans le monde.

Dans le présent document, l'expression « front pionnier » sera utilisée à la place de « frontière agricole », car, comme l'explique (Pocard-Chapuis 2004), la première est plus globale et couvre tous les domaines de la société, pas seulement une activité isolée comme l'agriculture. En ce sens, un front pionnier s'établit lorsqu'une société

humaine : a) conquiert le territoire d'une autre société ; b) détruit cette dernière, ou supprime son pouvoir de décision dans la nouvelle organisation du territoire promu ; c) opère de profonds changements dans l'utilisation de l'espace, comme la déforestation, la chasse intensive, le pastoralisme, l'agriculture ou autre forme d'exploitation des ressources naturelles, sans se fonder sur les structures antérieures ; d) intègre cette zone périphérique et se développe progressivement selon les lieux centraux de son propre territoire. Cette définition décrit bien une dynamique qui reflète l'interaction des forces et des relations sociales et des ressources et contraintes naturelles.

1.1. Modèles et théories politico-économiques

Plusieurs modèles et théories ont été proposés pour expliquer la dynamique des fronts pionniers. Beaucoup d'entre eux ont une perspective politico-économique considérant deux pôles distincts d'acteurs : les paysans et les capitalistes. La **théorie de la pénétration capitaliste** souligne le rôle de l'expansion du mode de production capitaliste sur la population locale, dans laquelle il y a un remplacement continu des productions familiales par des modèles capitalistes comme l'élevage commercial ou l'agro-industrie. Ainsi, la dynamique du front pionnier a été perçue comme le résultat de l'interaction et des conflits entre deux classes sociales opposées, communément définies comme des agriculteurs familiaux et des exploitants agricoles (« fazendeiros » au Brésil). Il est expliqué que les agriculteurs familiaux incarnent « l'ouverture du front », dont le développement de la production est directement lié à l'arrivée de nouveaux migrants. Ensuite, se superpose un « front économique » qui évolue en fonction de la rentabilité des produits agricoles, qui dépend du prix de vente, des coûts de production, de la taille des propriétés et des coûts de transport (Arvor 2009; Summers 2008).

La spéculation foncière est l'un des moteurs dans ce contexte, car la valeur ajoutée qu'un terrain acquiert en quelques années permet à ses propriétaires d'acheter et parfois d'ouvrir des parcelles dans une partie plus profonde du front où le terrain est moins cher car il nécessite des investissements en matière de défrichage, de traversée de cours d'eau et de création de voies d'accès. Cela permet d'établir de nouvelles implantations, conduisant ainsi à la progression spatiale du front et à l'établissement de productions plus capitalisées (Pebayle 1981). Dans ce modèle, le cumul de capital appartient aux intermédiaires, aux fonctionnaires d'état, aux élites locales et éventuellement, aux agro-industriels qui s'approprient de la valeur ajoutée du travail des agriculteurs familiaux contenue dans les terres qu'ils ont déboisées au fil

du temps (Foweraker 1981). Dans cette conception, quelques auteurs mettent aussi en valeur que les étapes ne sont pas nécessairement progressives, elles peuvent être cycliques. Parfois, le front peut perdre de sa force et reculer, avec un dépeuplement et une diminution de l'intérêt spéculatif (Summers 2008). La spéculation foncière sur le front pionnier peut aussi fournir des « frontières spéculatives », c'est-à-dire qu'avec le soutien des politiques gouvernementales, les capitalistes s'approprient de grandes portions de terres au-delà du front pionnier profond, provoquant une « fermeture » politique ou juridique de la frontière aux petits agriculteurs. Ces terres appropriées peuvent même ne pas devenir productives, mais une réserve de valeur ou une source de revenus futurs dans le cas de l'expansion des productions capitalistes comme l'élevage extensif ou le soja (Summers 2008).

Ces modèles englobent une dynamique dans laquelle les ressources naturelles sont secondaires. En fait, pour la spéculation foncière, le prix actuel de la terre peut être beaucoup plus important pour s'établir que le potentiel productif (déterminé par les types de sol, la topographie et l'eau disponible). Selon Rego (2016) cette vision, plus axée sur les ressources foncières et moins sur les ressources naturelles, explique que les petits agriculteurs aient délimité leurs exploitations selon des formes rectilignes au mépris de ressources naturelles variées plus ou moins aptes aux productions qu'ils souhaitaient mettre en place.

La **théorie de l'articulation intersectorielle** est similaire à la première, mais souligne que la production familiale n'est pas entièrement remplacée lors du développement du front pionnier. Il y aurait encore une certaine proportion d'agriculteurs familiaux qui auraient pour rôle d'assurer l'accumulation de capital dans les secteurs urbains et industriels dans la mesure où leur présence offre une réserve de main d'œuvre avec le maintien de bas salaires dans les zones rurales et un approvisionnement continu en produits alimentaires à bas prix (Foweraker 1981; Sorj 1980). En ce sens, il n'y pas de réelle incitation à la modernisation de l'agriculture familiale. Ainsi, l'expansion continue de l'agriculture familiale sur le front crée les conditions de la persistance de formes de production traditionnelles (pendant longtemps associées au défriche – brûlis ou « *corte-e-queima* ») et entrave la modernisation de cette agriculture artisanale (Oliveira 1972). Ce processus serait donc responsable du maintien des formes traditionnelles d'agriculture sur le territoire, même dans une phase plus avancée du front pionnier, comme dans le cas actuel de Paragominas, où les champs de soja hautement mécanisés et les pâturages extensifs voisinent les *assentamentos* à l'agriculture traditionnelle peu mécanisée et à faible usage d'intrants.

Ce processus de déplacement des agriculteurs familiaux a été décrit comme une lutte de classe, sous la forme d'une appropriation par les agriculteurs entrepreneuriaux (« fazendeiros ») du capital accumulé par les agriculteurs familiaux dans les superficies déforestées. Cependant, il est alors difficile d'expliquer pourquoi, dans la plupart des cas, les agriculteurs familiaux vendent eux-mêmes leurs terres (Arnauld de Sartre 2003). De plus, l'expansion de l'agriculture n'est pas toujours le fait de grands entrepreneurs agricoles, mais aussi d'agriculteurs familiaux du sud du pays qui, en émigrant vers le nord, peuvent acquérir des terres à bas prix, sur une superficie agricole viable pour une potentielle de production de soja (Empinotti 2015). La frontière entre agriculteurs familiaux et agriculteurs entrepreneuriaux n'est donc pas si nette.

Dans les **théories de système-monde** et de **dépendance**, le front pionnier est vu comme une exploitation de ressources naturelles pour les marchés extérieurs et est façonné par des cycles du type *boom-burst* qui suivent les demandes des marchés (Summers 2008). En ce sens, les frontières agricoles seraient des régions périphériques qui concentrent des ressources bon marché et disponibles pour générer une accumulation dans les centres (Bunker 1985). Par exemple, aux XVI^e et XVII^e siècles, les planteurs de canne à sucre du nord-est du Brésil ont provoqué la conquête du sertão en raison de leurs besoins en animaux et en viande (Pebayle 1981). Dans les pays andins, l'ouverture aux marchés étrangers a poussé les paysans des hauts plateaux à occuper les basses terres chaudes et humides de l'Amazonie. Avec l'expansion de l'économie mondialisée, la croissance explosive de la demande de dérivés de l'huile de palme par la Chine et l'Inde a conduit à une forte expansion de ces cultures en Asie du Sud-Est (Koh et Wilcove 2007), tandis que la même chose s'est produite dans le Centre-Ouest brésilien et en Amazonie en ce qui concerne le soja et la viande, le premier étant influencé par la croissance économique chinoise et par les crises de la « vache folle » en Europe (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006). La croissance urbaine, les changements d'alimentation vers plus de produits animaux pèsent sur le marché international et sont parmi les principales causes exogènes de la perte des forêts tropicales au cours des dernières années, associées à l'expansion des fronts pionniers pour produire de la viande ou du soja servant à l'alimentation animale (Defries et al. 2010).

Dans cette interprétation de la dynamique du front pionnier, il s'agirait d'un élément fondamental de la division internationale du travail, dans laquelle l'accumulation dans les grands centres urbains bénéficierait de matières premières bon marché provenant de zones périphériques telles que les fronts pionniers (Amin 1977). Dans cette optique,

l'une des raisons pour lesquelles des fronts pionniers comme l'Amazonie sont sous-développés serait la nature de l'économie extractive, qui ne favorise pas la stabilisation des communautés et l'accumulation locale de capital. Ainsi, la dégradation continue des ressources environnementales et sociales conduit inévitablement à l'effondrement de l'économie du front pionnier (Summers 2008).

Cette approche met particulièrement en évidence le rôle des réseaux de niveau supérieur qui contrôlent les activités du front pionnier, liés aux marchés des matières premières telles que les grains, la viande et le bois, et qui, en raison de leurs variations et d'une mauvaise gestion des ressources naturelles, conduisent à l'échec du système. Cela donne à penser qu'il existe souvent une ligne étroite de démarcation entre la rentabilité de la production et les conditions du marché. Dans ce contexte, les productions sont souvent extensives et exploitent pleinement le potentiel naturel, c'est-à-dire qu'elles sont produites sur des parcelles où le coût de production est minimal, avec peu d'usage d'intrants, peu d'investissement dans le matériel et dans les bâtiments agricoles. Dans ces conditions, les variations du marché ont une influence majeure sur l'expansion et la rétraction des surfaces productives. En Amazonie jusqu'au début des années 2000, alors que les mesures de lutte contre la déforestation n'étaient pas encore en place, on observe que la déforestation accompagnait les variations du marché (Macedo et al. 2011), montrant un effet de téléconnexion commerciale entre un territoire périphérique producteur de matières premières bon marché et un centre qui concentre les revenus. Dans ce modèle, les fronts pionniers fonctionnent comme des fournisseurs de terres pour produire des matières premières bon marché et permettent la prédominance d'une stratégie d'exploitation minière des ressources naturelles, utilisant des techniques et des intrants pour produire le moins cher possible dans le plus grand espace possible.

1.2. Modèles démographiques et de cycles de vie

Une autre approche fréquemment utilisée pour expliquer le fonctionnement des fronts pionniers est basée sur des concepts démographiques et des cycles de vie, en supposant que les décisions concernant le changement d'occupation du sol se prennent essentiellement au niveau familial dans des conditions de terre abondante et dans des marchés naissants, comme dans le cas des fronts pionniers. Cette approche a été initialement développée sur le modèle de l'économie familiale de Chayanov. Dans ce modèle, basé sur l'étude des campagnes russes du début du XXe siècle, l'occupation du sol est directement liée au travail familial (Summers 2008). Dans une

situation où l'unité familiale est à la fois productrice et consommatrice de produits, Chayanov a souligné que plus le ratio de personnes à charge dans la famille est élevé, plus le travail familial est nécessaire pour répondre aux besoins. Cependant, lorsque la production atteint le niveau de la demande dans l'unité familiale, les agriculteurs n'augmentent pas nécessairement la production, car les difficultés de travail peuvent supplanter un éventuel intérêt à produire des surplus (Martinello et Schneider 2010).

Bien que ce modèle ne représente pas spécifiquement le phénomène du front pionnier amazonien du fait que la plupart des migrants venaient de zones déjà intégrées dans l'économie nationale, les études les plus récentes ont proposé une approche hybride dans laquelle le modèle Chayanov intègre également des aspects de disponibilité de main-d'œuvre, de commercialisation des surplus et les emplois secondaires.

Des études comme celle menée par le *Centro Ambiental de Tocantins*⁵ (in Walker & Homma, 1996), ont analysé comment les processus du cycle de vie peuvent influencer les stratégies d'occupation du sol. Dans cette étude, ils ont décrit le modèle d'un cycle qui commencerait avec l'arrivée récente d'une famille dans une zone de colonisation forestière. Au départ, l'unité serait composée d'un homme et d'une femme, avec un ratio consommateurs/employés (*c/t*) égal à 1,00. Comme la famille a des enfants, la consommation augmente, ce qui augmente le ratio *c/t*. Les parcelles agricoles de riz, de haricots, de maïs et de manioc sont ensuite agrandies. Au fur et à mesure que les enfants grandissent et commencent à contribuer en tant que travailleurs, le ratio *c/t* diminue, ce qui permet à la famille de commercer avec la communauté locale, d'accumuler certains capitaux et d'investir dans les pâturages et le bétail. Le cycle se terminerait alors avec la prédominance des pâturages sur le bien. Plusieurs autres modèles ont été proposés pour décrire les trajectoires des fronts pionniers (Walker & Homma, 1996). Lorsqu'il y a une contribution technologique dans un système de type Chayanov, certains auteurs ont soutenu qu'il peut y avoir une réduction de la déforestation, puisqu'avec le même intrant il est possible de produire plus, ou de produire la même quantité avec moins d'intrants (Angelsen et Kaimowitz 2001).

Le rôle de l'adaptation aux conditions locales dans les cycles de vie a également été discuté, ce qui se reflète principalement dans la gestion effectuée par la famille. La faible fertilité des sols tropicaux fait que les zones nouvellement déboisées perdent rapidement leur fertilité initiale du fait de la minéralisation de matière organique, et par conséquent, la production diminue. Afin de rétablir la production, l'agriculteur abat de

⁵ Centre Environnemental de Tocantins.

nouvelles parcelles forestières, laissant la précédente en régénération (Walker & Homma, 1996). Ce qui permet une bonne adaptation de la gestion des brûlis aux conditions des milieux forestiers tropicaux.

1.3. Modèles d'interprétation par phases

La plupart des modèles évoqués ci-dessus discutent surtout de ce que serait la « tête » du front pionnier, l'interface entre les zones pratiquement inutilisées et la déforestation, c'est-à-dire les mécanismes qui favorisent la déforestation. Toutefois, cette approche axée sur les colons à faible capacité d'investissement ne couvre pas toutes les situations du front pionnier, ce qui a conduit à l'élaboration d'approches axées sur les différentes étapes d'une frontière, et que chaque étape serait caractérisée par une dynamique spatiale de changement et différents groupes d'acteurs. Cette notion a été démontrée par des études telles que (Defries, Foley, et Asner 2004) qui mettent en évidence une dynamique commune sur les fronts pionniers qui est la séquence de déforestation initiale avec l'établissement de petits agriculteurs orientant la production pour leur subsistance, la réduction continue des espaces naturels et la fermeture de la frontière avec la prédominance de l'agriculture intensive (Figure 2).

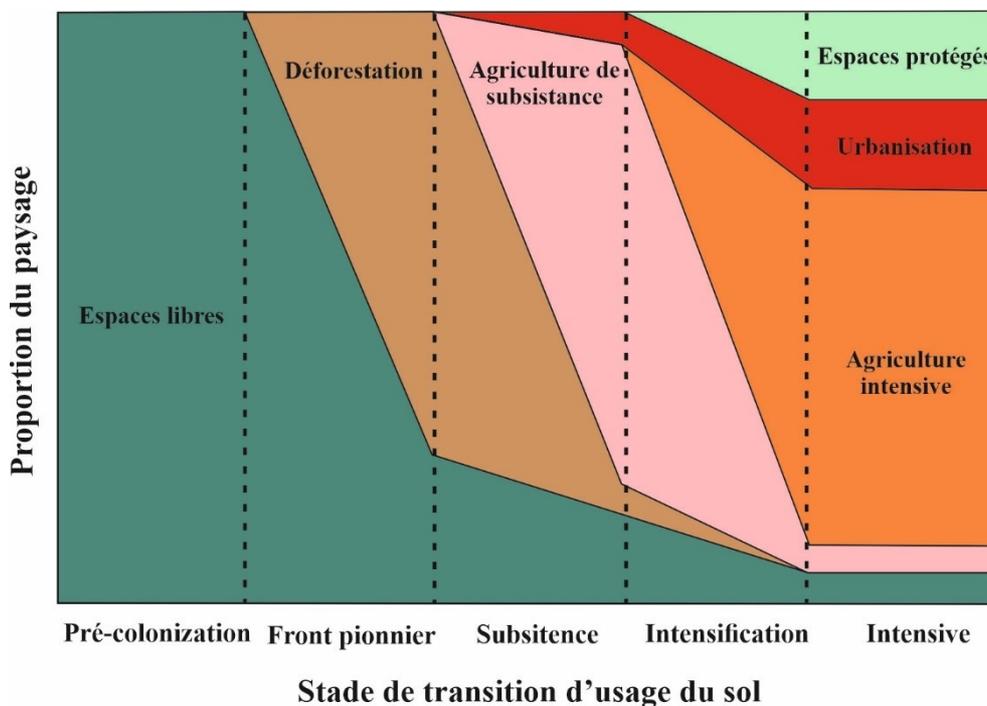


Figure 2. Représentation schématique des transitions dans les usages du sol. Source : (Defries, Foley, et Asner 2004).

L'intensification est ici un processus par lequel de nombreux fronts pionniers convergent (mais pas exclusivement). L'intensification, selon (Angelsen et Kaimowitz 2001), représente une augmentation de l'utilisation des intrants (ou une augmentation des *outputs*) par surface. L'intensification peut également être liée à l'utilisation d'une nouvelle technologie, mais pas nécessairement, puisqu'elle peut être intensifiée sans l'utilisation de nouvelles technologies. Bien sûr, les trajectoires d'occupation du sol peuvent varier considérablement. Comme le soulignent (Mustard et al. 2012), les transitions entre ces phases ne sont pas nécessairement à sens unique, c'est-à-dire qu'une phase peut avancer ou reculer. La même zone peut aussi « sauter » des phases, et la durée de la phase peut varier en fonction de l'emplacement. Dans le modèle du *land sparing*, les progrès en productivité dus à l'intensification dans une partie du territoire, s'accompagne de la protection des aires naturelles, telles que les unités de conservation. Cela suppose que les bénéfices issus des gains de productivité n'incitent pas à l'intégration de nouvelles surfaces dans l'espace productif, ce qui est peu réaliste en l'absence de réglementation et de contrôle.

1.4. Approche par la théorie des systèmes complexes

Les systèmes complexes peuvent être définis comme des systèmes résultant de l'action de plusieurs agents qui obéissent à un ensemble de règles qui, en interaction, génèrent un comportement considéré comme complexe (Bolliger, Sprott, et Mladenoff 2003). Un système complexe comprend l'auto-organisation (ou l'émergence), la rétroaction, l'apprentissage et l'adaptation. L'auto-organisation se produit lorsque des systèmes internes ou des comportements apparaissent spontanément, sous l'impulsion des variations du système lui-même, en raison du grand nombre d'interactions non linéaires et de réactions au sein du système (Manson 2001).

Un aspect important qui implique plusieurs types de systèmes complexes correspond aux systèmes de rétroaction. Sur les fronts pionniers, la rétroaction entre les acteurs et l'environnement limite ou même peut inverser certains des changements initiaux dans l'occupation du sol grâce à la dynamique du système. Les propriétés peuvent émerger de rétroactions locales et non linéaires, contrôlant l'évolution des modes d'occupation du sol (Manson 2001). Les seuils critiques dans la structure spatiale de l'occupation du sol et les rétroactions peuvent produire un système avec un état alternatif, c'est-à-dire que les instabilités peuvent changer le système en un autre régime de comportement en transformant les variables et les processus qui contrôlent le changement d'occupation du sol (Walsh et al. 2008).

Arnauld de Sartre et al. (2005) soulignent que l'organisation de la logique par rapport au potentiel biophysique se développe progressivement sur le front pionnier, avec la découverte des ressources après la déforestation. Cela démontre une autre caractéristique des systèmes complexes qui est l'apprentissage. Le front pionnier considéré comme un système complexe implique également le concept d'adaptation. Les processus qui agissent sur l'espace avec des ressources irrégulières créent des caractéristiques avec des motifs endogènes ou contingents (Messina et Walsh, 2001), c'est-à-dire des combinaisons parfois uniques à une échelle spatiale donnée. Même s'il y a des flux de population ou des investissements uniformes pour une région, les décisions sont adaptées aux conditions locales, créant des fronts avec différents types d'activités et de vitesses. Ceci est particulièrement important pour la modélisation de l'occupation du sol, étant donné qu'un même front pionnier peut présenter des dynamiques de transformation très diverses.

2. La frontière agricole amazonienne : de l'enfer vert au grenier du monde ?

Peu après la Seconde Guerre mondiale, des organisations telles que la FAO⁶, impliquées dans des projets de développement pour la région amazonienne, ont eu l'idée que cet « enfer vert » serait la promesse du nouveau « grenier du monde ». Évidemment, dès le début des recherches, on a observé la pauvreté des sols de cette région, qui offrait peu de perspectives de colonisation traditionnelle, basée sur la production agricole (Andrade 2015). Après plus d'un demi-siècle de colonisation et une multiplicité d'actions gouvernementales et privées, d'agriculture de subsistance, d'élevage et d'exploitation forestière, l'Amazonie a subi ces dernières décennies des transformations qui ont en partie rendu réelle cette notion de « grenier du monde » par la forte expansion des cultures de soja destinées à l'exportation.

En ce sens, cette section vise à résumer l'évolution du front pionnier comme un processus d'adaptation constante des pratiques agricoles sur de nouveaux espaces. La perspective des activités productives et de leurs agents a été adoptée pour analyser le rôle des ressources naturelles dans la dynamique d'occupation du sol en Amazonie dans une perspective historique. A partir de Dubreuil et al. (2008), les principales activités productives directement liées à des catégories spécifiques

⁶ *Food et Agriculture Organization* (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).

d'acteurs du front pionnier amazonien ont été définies : **l'agriculture familiale** des colons et des occupations de la réforme agraire, avec un accent sur l'agriculture de subsistance et l'élevage de bétail à petite échelle; **l'élevage à moyenne et grande échelle**, lié aux grands propriétaires des terres ouvertes par la colonisation de l'Amazonie ; **les activités forestières** (exploitation du bois), ainsi que **les cultures de commodités**, tel que le soja.

2.1. Élevage : le démarreur du front pionnier

Le processus a commencé dans cette « terre sans hommes », en partie comme le reflet du processus de colonisation brésilienne : conquérir de nouveaux espaces et installer du bétail, une stratégie dont l'origine remonte aux débuts de la colonisation portugaise (Deffontaines 1957; Pocard, Bendahan, et Carvalho 2015). L'expansion initiale peut être considérée comme une forme de continuité d'un processus au niveau national. Initié par les « *sertanejos*⁷ » au XVI^e siècle dans le Nord-Est pour soutenir les demandes des plantations de sucre sur la côte, puis poursuivie par « *gauchos*⁸ » dans la pampa du Sud, « *bandeirantes*⁹ » et « *coronéis*¹⁰ » dans les *cerrados* centraux du Brésil (Pocard, Bendahan, et Carvalho 2015). Depuis longtemps, le front pionnier a été poussé par les troupeaux de bovins suivant les contextes les plus favorables à leur production : suivre les cours des rivières et les zones de prairies naturelles, *cerrados* et autres formations herbacées (Vaz, 2013). Dans ce contexte, la forêt n'était pas un environnement favorable à l'expansion de l'élevage. La structuration de l'espace amazonien, longtemps autour de nœuds urbains interconnectés par le réseau hydrographique, « l'Amazonie des fleuves », n'a pas non plus été un contexte favorable pour cette activité (Pocard-Chapuis 2004).

Après les années 1960, cependant, le gouvernement a décidé d'encourager l'occupation de cette zone, considérée comme mal intégrée dans le territoire national. Le slogan « conquérir l'Amazonie par la patte du bœuf » représente bien les intentions d'où et comment cette intégration doit être faite. Ainsi, au cours des années soixante, de larges incitations gouvernementales ont permis l'expansion de l'élevage bovin dans plusieurs régions de l'Amazonie, mais surtout dans sa partie orientale, plus liée au reste du pays et moins pluvieuse, donnant l'impulsion initiale pour l'avancement du

⁷ Les éleveurs qui produisent à l'intérieur du continent : le « *sertão* ».

⁸ Au Brésil, désigne les habitants de l'état du Rio Grande do Sul.

⁹ Les *bandeirantes* sont des aventuriers qui, à partir du XVII^e siècle, pénétrèrent à l'intérieur du Brésil.

¹⁰ Pouvoir local confié à des propriétaires fidèles au gouvernement brésilien.

front pionnier dans ces régions. Exonérations fiscales, réductions de taux d'intérêt de prêts bancaires, mécanisme de don de terres publiques en fonction de la superficie déboisée (pour chaque unité déboisée, le producteur pouvait obtenir le titre de propriété de six fois plus de terres) (Uhl et Almeida 1996), sont quelques-unes des politiques mises en œuvre qui ont permis de réduire de grandes surfaces forestières en pâturages, notamment dans les zones qui se trouvent le long des axes routiers.

Avec la chute des subventions dans les années 1970 (Moran et al. 1994), il y a eu un important processus de dégradation des pâturages¹¹ par invasion d'espèces ligneuses et épuisement des sols (Veríssimo et al. 1992). Cependant, contrairement à ce que beaucoup pensaient, l'élevage n'a pas connu d'effondrement comme en témoigne la conversion constante des forêts en pâturages (Margulis 2003). Cette reprise a été possible principalement grâce aux adaptations technologiques¹² et managériales face aux conditions écologiques de la région, suivant une logique privée, dans laquelle le processus d'occupation est devenu autonome (Margulis 2003). Dans ce système, les grandes propriétés d'élevage extensif prédominaient, en raison de leurs capacités à s'accaparer plus de surfaces forestières. Cependant, l'établissement d'un élevage pourrait se faire non seulement directement après déforestation, mais aussi à la suite de quelques années de cultures de subsistance par des petits producteurs, motivés par la garantie de vente future de la terre à un plus grand producteur (Margulis 2003). Ces relations étaient souvent inégales, avec les actions fréquentes des « grileiros¹³ », cette lutte pour la terre créant d'importants conflits sociaux (Almeida, 1990).

Ces caractéristiques foncières ont favorisé la spéculation. L'élevage dans ce contexte était l'une des alternatives les plus efficaces pour consolider la propriété foncière (Hecht, 1993). De plus, l'élevage était déjà une activité menée auparavant par de nombreux migrants qui avaient investi en Amazonie, il y avait donc une culture de l'élevage bovin avec des connaissances accumulées (Plassin et al. 2017). Parmi les caractéristiques de cette production qui ont favorisé sa mise en œuvre, le fait est qu'elle est considérée comme une activité sûre. Bien qu'elle ne soit pas nécessairement rentable, elle permettait un meilleur contrôle lorsque la production pouvait être commercialisée : lorsqu'il était impossible de vendre, l'éleveur pouvait garder l'animal sans perte jusqu'à ce que les prix s'améliorent et, même s'il devait

¹¹ Les subventions n'ont jamais été utilisées pour combattre la dégradation, plutôt pour étendre les pâturages.

¹² Comme les herbicides sélectifs.

¹³ Accapareur de terres.

vendre, il pouvait toujours trouver des acheteurs (Piketty et al. 2005), ce qui lui permettait une gestion plus flexible (Plassin et al. 2017). Le besoin de peu de main-d'œuvre était également avantageux, puisque même des troupeaux de l'ordre de milliers de têtes peuvent être gérés par quelques personnes (Poccard-Chapuis 2004) (Plassin et al. 2017). Dans ce contexte, il était courant de pratiquer l'élevage extensif, avec peu de bétail et comme alimentation exclusive le pâturage formé de graminées fourragères (Pacheco et Poccard-Chapuis 2012).

Mais les problèmes que le bétail a présentés au fil du temps étaient principalement liés à ces formes de gestion, qui n'étaient pas efficaces pour faire face à la dégradation des pâturages. Par exemple, vingt ans après le début de la colonisation le long de la Transamazonienne, une grande partie des terres avec des pâturages était dégradée. Au cours de cette période, les éleveurs se sont plaints qu'ils avaient été mal informés par le gouvernement et les banques de développement, et que s'ils avaient su à quel point un pâturage pouvait facilement être dégradé, ils n'auraient pas déboisé autant de terres (Moran et al. 1994). Cependant, il y a également eu des changements dans la gestion et les stratégies qui ont permis à l'élevage du bétail de continuer à se développer même sans les incitations. Par exemple, l'établissement de plantes fourragères a toujours été problématique en raison des exigences de fertilité et des attaques de ravageurs, mais dans les années 90, le développement et l'adoption presque généralisée de la graminée *Brachiaria bryzantha* a amélioré les conditions de gestion des pâturages, car elle s'adapte mieux aux sols pauvres et couvre mieux le sol, réduisant l'invasion des sols par des espèces ligneuses. Cette espèce s'est répandue dans toute l'Amazonie en quelques années (Poccard-Chapuis 2004), montrant la dynamique d'adaptation des stratégies des producteurs. Une plus grande spécialisation des activités est également observée au cours de cette période, comme c'est le cas pour les veaux d'engraissement ou, lorsque les conditions le permettent, pour l'élevage de bovins laitiers, ce qui génère un revenu plus élevé pour les éleveurs (Mattos et Uhl 1994).

Dans le contexte d'une zone productive, cependant, l'établissement du bétail avait une logique spatiale qui prenait peu en compte les ressources naturelles disponibles, telles que la fertilité des sols ou le relief. L'expansion des pâturages a été guidée principalement par la nécessité d'établir un statut foncier, qui pouvait être combiné avec une simple expansion d'un bout à l'autre du bien, avec une stratégie primordiale d'appropriation foncière : une expansion fragmentée de l'espace dirigée principalement par un accès aux cours d'eau, voire une expansion radiale centripète à partir du

périmètre du bien, visant la protection des réserves forestières, délimitant le bien et évitant toute invasion (Plassin et al. 2017).

Au cours des dernières décennies, l'Amazonie est devenue l'une des principales régions de production de viande bovine du pays, avec plus d'un tiers du cheptel brésilien (IBGE, 2013), qui, à son tour, est l'un des deux plus grands au monde (Veiga et al. 2010). Selon le SECEX¹⁴ (2017), parmi les principaux marchés de la viande brésilienne figurent la Chine, l'Iran, l'Égypte, Russie et Hong Kong. Le lien international est renforcé par l'absence de fièvre aphteuse d'une grande partie du sud de l'Amazonie dans les années 2000, ainsi que par la dévaluation de la monnaie nationale, l'apparition de l'encéphalopathie spongiforme bovine en Europe et le développement technologique (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006). Les principales zones de production se trouvent actuellement dans « l'arc de déforestation », qui est assimilé à la transition des *cerrados* et des formations forestières du biome de l'Amazonie. L'élevage du bétail s'est également établi dans la forêt, suivant les principaux axes de communication construits par le gouvernement, notamment la BR Belém-Brasília, la Transamazônica, la BR Cuiabá-Santarém et la BR Brasília-Acre. Et dans une moindre mesure, le long de l'Amazonie des fleuves, comme dans la vallée du fleuve Amazonas (Figure 3).

Cette expansion s'est accompagnée d'une structuration importante des marchés. La mise en place d'infrastructures liées à la filière de viande et de lait, telles que les usines de conditionnement de viande et de produits laitiers, sont le reflet de ces liens de la production locale avec le marché extérieur à la municipalité (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012; Piketty et al. 2005). Cependant, les taux élevés de déforestation qui ont accompagné cette expansion de l'élevage ont conduit l'État à prendre une série de mesures pour réduire ce processus, parmi eux, le Plan d'action pour la prévention et la lutte contre la déforestation en Amazonie juridique (PPCDAm I, II, III et IV), initié en 2004. Il visait à régulariser les terres, à les inspecter et à encourager les activités durables (MMA 2016).

¹⁴ <http://portal.siscomex.gov.br/>

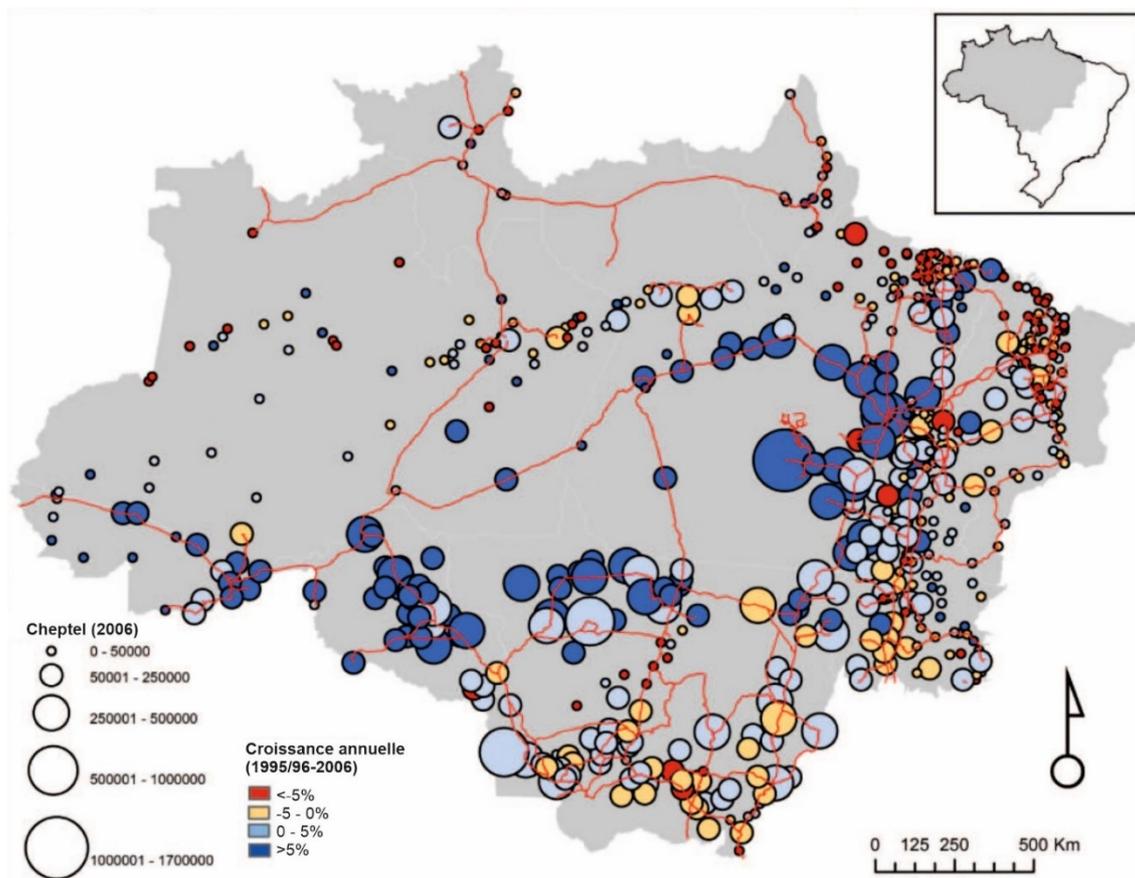


Figure 3. Total du cheptel bovin et croissance entre 1995-2006. Source : Pacheco et al. (2011).

Ensuite, le décret no 6321/2007 a établi la liste noire des municipalités présentant les taux de déforestation les plus élevés, qui font alors l'objet d'actions répressives de l'État. Les opérations d'inspection à grande échelle, avec embargos et amendes, telles que "Arco de Fogo" (« Arc de Feu ») et "Boi Pirata" (« Bœuf Pirate »), menées par la police fédérale, par l'IBAMA et les forces de sécurité nationale, sont destinées aux producteurs responsables de la déforestation (Barreto et Mesquita 2009). En 2008, la Banque centrale limite l'octroi de crédits agricoles aux propriétés sans titre foncier et en situation de non-respect de l'environnement, notamment les crédits de campagne, ce qui a fortement limité l'activité de la majorité de ces producteurs (Laurent, Arvor, et al. 2017).

Au cours de la même période, des campagnes menées par des ONG internationales telles que Greenpeace ont dénoncé la relation entre les banques publiques, les éleveurs et les chaînes de production (Greenpeace 2009). Au Pará, la réponse du secteur de l'élevage bovin a pris la forme d'accords d'ajustement des comportements, comme celui conclu en 2009 entre les plus grands abattoirs brésiliens tels que Bertin, JBS, Mineira, Mafrig ainsi que l'Association des Exportateurs de Bétail (ABEG) et les supermarchés, qui ont accepté de surveiller les fournisseurs pour identifier la

production dans les zones déboisées et le travail esclave. Par la suite, un accord d'ajustement de conduite (TAC) a été signé entre le ministère public fédéral, le gouvernement de l'État, les principaux abattoirs, les entreprises exportatrices, les entreprises rurales, les tanneries et les négociants en bétail, qui prévoyait l'interdiction d'acheter de bétail dans les zones sous embargo imposé par l'IBAMA ou par le ministère du travail (Piketty et al. 2015; da Silva and Barreto 2014). La mise en œuvre du CAR (Registre Rural Environnemental) était également l'une des conditions, mais en raison des difficultés à atteindre les objectifs, le délai de mise en conformité avec le CAR a été reporté plusieurs fois. En 2013, le TAC de la viande a été étendu à d'autres États brésiliens. Ces actions, qui ont directement affecté la chaîne de production animale, ont entraîné une forte réduction de la déforestation, en particulier de la déforestation à grande échelle. Cependant, les mécanismes créés ne couvraient pas tous les maillons de la chaîne de production, en particulier les éleveurs de bovins qui ne vendent pas directement aux abattoirs, ceux qui vendent des veaux à l'engraissement ou qui travaillent avec des bovins laitiers (Piketty et al. 2015). En 2007, certaines mesures ont été prises pour créer une « table ronde », le « Groupe de travail sur l'élevage durable », dirigé par la Société financière internationale (SFI) et avec les producteurs, l'industrie, les ONG et les banques. Toutefois, cette initiative s'est heurtée à des difficultés pour établir des codes de conduite en raison de la résistance des producteurs aux contrôles externes imposés à la chaîne de production (Piketty et al. 2015).

Dans le cadre de ce processus qui croise l'élevage, l'intensification et la structuration des marchés et des politiques de déforestation zéro, on observe également une tendance à la fragmentation des grandes propriétés, surtout après les années 2000. L'intensification tend à accroître la valeur des terres, en particulier dans les zones plus consolidées de la frontière, à proximité des routes, en particulier dans le Centre-Ouest du Mato Grosso et dans la partie sud du Pará. Cette appréciation favorise un nombre élevé de transactions entre propriétaires fonciers, qui n'hésitent pas à diviser leurs terres lorsque cela est approprié (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012).

L'intensification des pratiques, à son tour, vise à accroître la productivité animale par zone (Cialdella et al. 2015), et inclut un apport externe d'intrants et de technologies, accumulés ou adaptés au cours des dernières décennies, tels que l'utilisation de la chaux pour réduire l'acidité des sols, l'utilisation d'engrais phosphatés et l'adoption de graminées fourragères développées par la recherche. Dans ce contexte, des investissements peuvent également être réalisés pour la fragmentation des parcelles à

l'intérieur de la propriété, au moyen de clôtures, visant à établir un système de rotation du pâturage, conduisant à un prélèvement sur les graminées plus homogène et à une réduction du piétinement localisé générant une compaction du sol. Comme les grandes propriétés peuvent couvrir une diversité d'environnements pédomorphologiques, ces investissements sont souvent dirigés vers certaines parties de la propriété (Piketty et al. 2015; Plassin et al. 2017; Pocard, Bendahan, and Carvalho 2015), visant à réduire les coûts de production, en plus, bien sûr, des facteurs liés aux accès entre les terrains et le siège d'exploitation avec l'infrastructure immobilière. Cependant, il peut y avoir beaucoup de variations entre les pratiques adoptées, qui vont de formes plus simples d'intensification telles que la réforme des pâturages avec un nouvel ensemencement, la rotation des pâturages et l'abandon de l'utilisation du feu, à un élevage bovin avec une forte utilisation d'intrants, généralement intégré dans la production de grains (intégration cultures-élevage) permettant de réduire les espèces invasives et d'améliorer la fertilité du sol (Laurent, Arvor, et al. 2017; Plassin et al. 2017).

2.2. L'agriculture familiale

Dans cette section, « l'agriculture familiale » a été considérée par rapport aux caractéristiques de la production et de la propriété : petite taille des parcelles, recours majoritaire à la main d'œuvre familiale avec en premier le chef d'exploitation, alimentation partielle ou totale de l'unité familiale à partir des productions de l'exploitation. Il y a donc une production de subsistance, avec vente éventuelle des excédents et offre de main-d'œuvre à l'extérieur de la propriété. Nous pouvons situer ces producteurs dans un schéma de type Chayanov, dans laquelle une fois que ce qui est nécessaire à la subsistance de la famille est atteint, le producteur a du mal à augmenter sa production. A partir des années 1960, avec les projets de colonisation mis en œuvre par les gouvernements militaires et, surtout, après le Plan national d'intégration (PIN - de 1970), les agriculteurs familiaux se sont établis principalement le long des grands axes routiers, notamment les routes Belém-Brasília, Brasília-Acre, Cuiabá-Santarém et Transamazônica. Ce qui constitue grossièrement un arc qui couvre toute la portion de l'Amazonie orientale et méridionale, plus reliée au reste du pays. Cette migration visait le peuplement et la formation d'un marché du travail local. Avec le PIN, l'Amazonie orientale recevait des migrants venant principalement des États du nord-est du pays, tandis que la partie méridionale avaient une contribution importante de migrants du sud et du sud-est du pays (Caviglia-Harris, Sills, et Mullan 2012) (Figure 4).

À plus petite échelle, les immigrants japonais ont également joué un rôle dans l'établissement de l'agriculture en Amazonie, en particulier dans le cas des cultures de poivre et de jute (Kearns 1969).

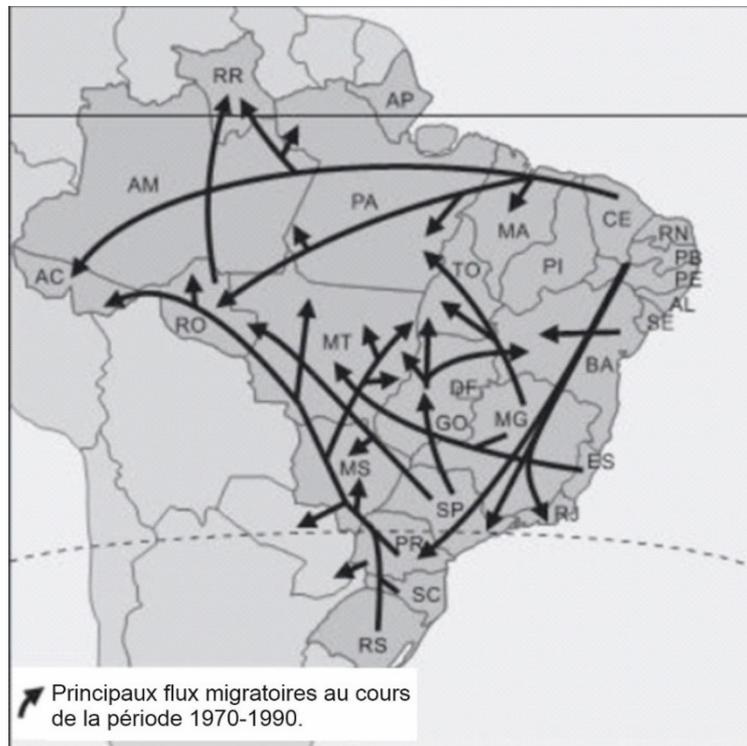


Figure 4. Principaux itinéraires de migration interne au Brésil entre 1970 et 1990. Source : IBGE (2007).

Le PIN, créé sous le gouvernement militaire d'Emílio Garrastazu Médici, visait à installer des agriculteurs familiaux principalement dans des zones situées jusqu'à 10 km des routes nouvellement ouvertes (Becker 2001). Pendant cette période, qui s'étend jusqu'au gouvernement d'Ernesto Geisel au milieu des années 1970, plus de 100.000 km² ont été destinés à des projets de colonisation. L'INCRA a été créée en tant qu'entité pouvant organiser ce projet. Cependant, contrairement aux grands producteurs, il n'y avait pas d'incitations fiscales pour les agriculteurs familiaux, mais seulement des prêts à court terme avec des taux favorables pour les cultures annuelles comme le riz, le maïs et les haricots (Moran et al. 1994). Bien qu'à cette époque le Code forestier (de 1965) était déjà en vigueur, en particulier avec la définition de 80% de l'exploitation en tant que Réserve Légale (pour l'Amazonie), ce Code ne fut pas appliqué¹⁵ et les politiques de colonisation sans inspection environnementale ont entraîné des taux élevés de déforestation.

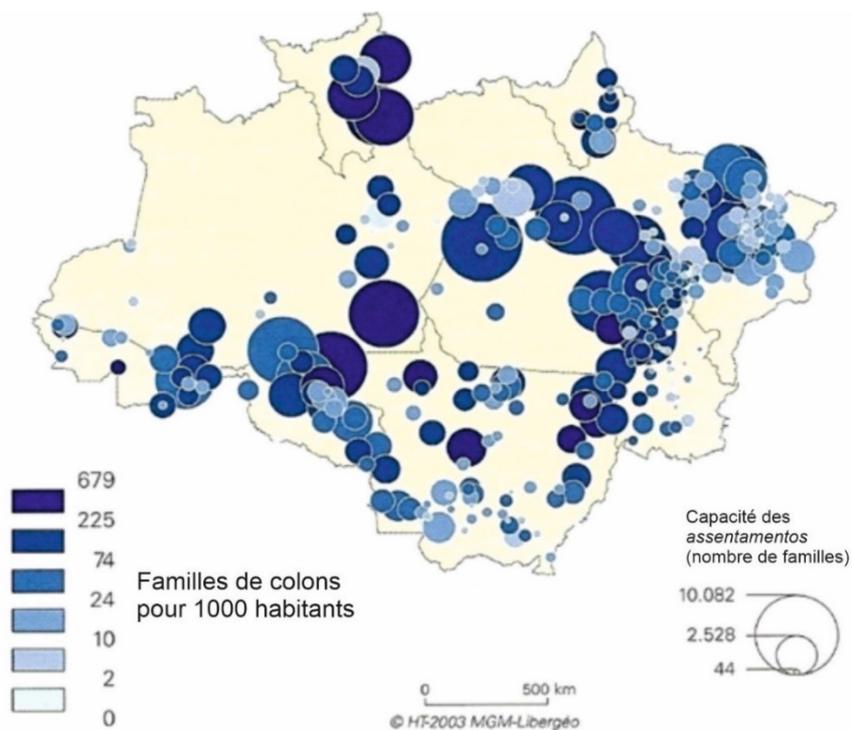
¹⁵ Situation dans laquelle, même si la loi existe, elle n'est pas respectée par la majorité de la population et, en même temps, il n'y a pas de contrôle effectif de l'État.

En ce qui concerne la structure foncière, cette colonisation prévoyait dans un premier temps une distribution régulière des lots (qui variaient autour de quelques dizaines d'hectares), dont la localisation ne tenait généralement pas compte de la variabilité des conditions physiques locales. Dans ce contexte, les migrants, venant de différentes parties du pays, ont développé des stratégies d'occupation du sol qui étaient une adaptation aux terres amazoniennes des pratiques menées dans leur région d'origine. Dans le Rondônia, dans les années 1970, Hervé Théry a décrit le système de culture essentiellement pratiqué par les colons : les *lavouras brancas* (les cultures blanches), qui sont à la base de l'alimentation des agriculteurs. Il s'agit principalement de plantations intercalaires de maïs, de riz et de haricots, qui peuvent être récoltées deux fois par an. Le manioc, en revanche, produit en un peu moins d'un an, mais peut être laissé dans le sol pendant six mois supplémentaires si la récolte n'est pas possible.

Les cultures annuelles se font avec le système de défriche-brûlis, qui consiste à couper la végétation forestière existante, laisser sécher et ensuite mettre le feu au bois sec. Cette parcelle peut ensuite être cultivée pendant quelques années jusqu'à ce que l'appauvrissement progressif du sol et surtout l'invasion des mauvaises herbes laissent en régénération forestière. La période de régénération dure habituellement plusieurs fois la période de culture (Salhins 1972). Néanmoins Arnaud de Sartre et al. (2005) notent que sur le front pionnier amazonien, la période de régénération peut être raccourcie, ne laissant pas assez de temps pour la récupération de la fertilité, de sorte qu'après quelques cycles de brûlage, l'agriculteur décide d'installer un pâturage, intensifiant ainsi davantage la dégradation du sol. Les parcelles cultivées représentent rarement la totalité des superficies des lots et, en cas de « crise » de fertilité, le producteur peut alors décider de couper une autre portion de forêt sur son propre lot (ou dans une autre zone boisée), ce qui est responsable du caractère itinérant des cultures.

Au début du front pionnier, les types de sol et le terrain n'ont pas joué un rôle très pertinent dans la décision d'ouvrir une clairière forestière, qui dépend davantage d'autres facteurs tels que l'accès et les ressources forestières. Cependant, la disposition géométrique des rectangles des projets initiaux de colonisation fait que les aspects physiques sont inégalement répartis entre les lots, avec même avec des lots sans accès direct à l'eau (Rego 2016), ce qui pourrait orienter l'occupation du sol après déforestation. Entre les années 80 et 90, des actions de réforme agraire ont de nouveau été mises en place au Brésil, avec des pics importants dans la création de colonies en 1996 et 2006 (INCRA). En Amazonie, l'augmentation de la population

d'agriculteurs familiaux a élargi et densifié le front pionnier, toujours principalement le long des axes principaux des autoroutes Belém - Brasília, Transamazônica, Cuiabá - Santarém, Brasília - Acre et Manaus-Boa-Vista (Figure 5).



Source : INCRA (1998)

Figure 5. Densité de familles installées et la capacité des assentamentos dans les années 1990. Source : Hervé et Melo (2008).

Pendant cette période, les migrants sont venus de la partie la plus développée du pays. En Rondônia, par exemple, des années 1960 aux années 1990, l'origine de la plupart des migrants était le sud-est (Caviglia-Harris, Sills, et Mullan 2012). Cependant, après les années 1990, un changement important dans la structuration du front pionnier a été due à l'afflux d'agriculteurs dans les villes, ce qui fait que la majeure partie de la population actuelle est urbaine (Machado et Pasquis 2004) (Figure 6).

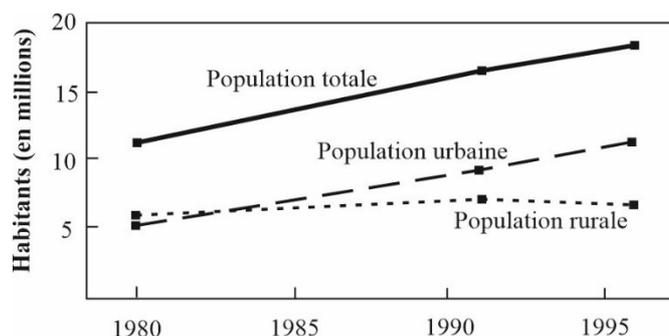


Figure 6. Population totale, rurale et urbaine dans l'Amazonie Légale. Source : Machado et Pasquis (2004).

Sous les gouvernements de Fernando Henrique Cardoso (FHC) et Luiz Inácio Lula da Silva (entre 1995 et 2011), un nombre important de projets d'*assentamentos* est mis en place dans la région amazonienne (Figure 7). Le gouvernement de FHC a créé le *Programa de Fortalecimento da Agricultura Familiar* (PRONAF¹⁶), qui offre des lignes de crédit spécifiques pour les activités agricoles familiales.

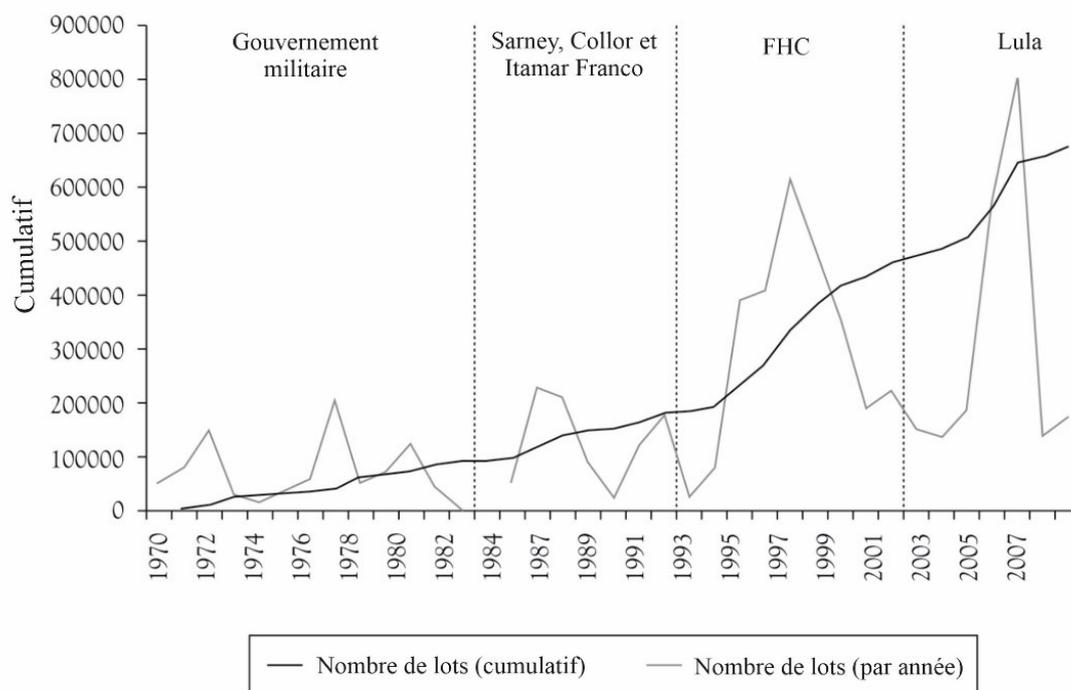


Figure 7. Evolution des parcelles et création annuelle des assentamentos en Amazonie Légale. Source : Tourneau et Bursztyn (2010).

Cependant, tout au long de ce processus, alors que de nouveaux assentamentos s'établissaient, les plus anciens ont vu leur structure foncière se transformer : les lots individuels avaient tendance à se concentrer, en raison de l'appropriation fréquente des terres publiques, notamment par les éleveurs (Pacheco et al. 2011). Ainsi, à partir du milieu des années 1980, l'agriculture familiale est devenue de plus en plus axée sur l'élevage (Piketty et al. 2005; Pacheco et Pocard-Chapuis 2012). Cette activité a commencé à être perçue (et l'est encore aujourd'hui) avec plus d'intérêt et comme pouvant réussir ou compléter l'agriculture sur brûlis, servant de « réserve de capital » pouvant être utilisée si nécessaire (Piketty et al. 2005). Pour ces premiers agriculteurs familiaux, l'élevage était considéré comme un objectif futur de la production familiale, compte tenu du prestige social et des avantages économiques que cela pouvait apporter. Pour ceux qui étaient situés relativement près des centres urbains, la

¹⁶« Programme de renforcement de l'agriculture familiale ».

production laitière est devenue une alternative plus intéressante (Sources & Palmer, 2017).

La gestion effectuée, a été celle qui coûtait le moins cher, dans laquelle la stratégie consistait à maintenir le troupeau au coût le plus bas possible, c'est-à-dire à laisser le bétail au pâturage sans contrôle, à le vendre selon les besoins de la famille et à couper manuellement les plantes invasives. Cependant, le système utilisé a rapidement posé des problèmes : de longues périodes avec puis sans pâturage et l'absence de contrôle de la densité ont entraîné un sous- ou surpâturage, ce qui a provoqué l'invasion par des plantes ligneuses et la dégradation biologique des pâturages (comme décrit Hostiou et al. 2006).

De plus, les brûlages répétés pour le nettoyage de ces pâturages ont fini par réduire davantage la matière organique du sol, réduisant la vigueur des plantes fourragères, qui recouvraient alors moins le sol et laissaient plus de place aux plantes ligneuses envahissantes. Ce cycle de dégradation a entraîné l'effondrement du système et il n'est pas rare que les pâturages se transforment en végétation arbustive, stade initial de la succession forestière (Poccard, Bendahan, et Carvalho 2015). Ces problèmes, associés à d'autres facteurs, ont contribué à initier le processus d'exode rural vers les centres urbains dans les années 1990 (Machado et Pasquis 2004). Après les années 2000 et dans un contexte de déforestation zéro, les exploitations familiales ont présenté des stratégies dans le sens d'une intensification, mais encore à un stade très précaire, car l'utilisation du feu est encore fréquente (Plassin et al. 2017).

2.3. L'exploitation forestière : le pouvoir des « madeireiros »

Ce volet comprend les activités liées à l'exploitation des ressources en bois provenant des forêts primaires, y compris la dynamique de la déforestation et de l'exploitation forestière sélective et la gestion durable des forêts. Dans cette même sous-partie, l'activité sylvicole a également été incluse, bien qu'elle ait une dynamique relativement différente de l'exploitation forestière dans les forêts natives. En Amazonie, l'extraction du bois natif est l'une des premières activités qui font avancer le front pionnier. Autrefois limitée aux plaines inondables des principaux cours d'eau de la région, l'exploitation forestière a pris de l'ampleur avec la construction de routes après les années 1950, ce qui a facilité l'accès à l'exploitation à faible coût, en raison du peu de restrictions environnementales et foncières. Depuis les années 80, la demande

nationale et internationale de bois a augmenté en raison de l'épuisement des stocks dans d'autres régions du pays et en Asie. En 1973, il y avait environ 287 scieries en Amazonie, pour atteindre 2.231 en 1986 (Yared et Brienza Junior 1990), l'Amazonie orientale étant la plus touchée, avec l'installation de centaines de scieries (Veríssimo et al. 1992). Par cette activité, plusieurs centres urbains ont été développés le long des routes, configurant des centres d'exploitation forestière qui concentrent les services et les infrastructures (SFB/Imazon 2010). Cette exploration a été effectuée principalement sur de grandes superficies, de l'ordre de centaines à des milliers d'hectares, dont beaucoup appartenaient à de grands éleveurs de bétail.

Avec la crise de l'élevage bovin et la structuration d'un marché pour le bois amazonien, les ressources forestières des propriétés ont commencé à être davantage valorisées. En d'autres termes, les terres boisées constituaient non seulement un potentiel d'expansion pour les pâturages, mais aussi une ressource qui pouvait être utilisée. Les gains dégagés pouvaient alors être réinvestis dans la récupération et l'ouverture de nouveaux pâturages (Veríssimo et al. 1992).

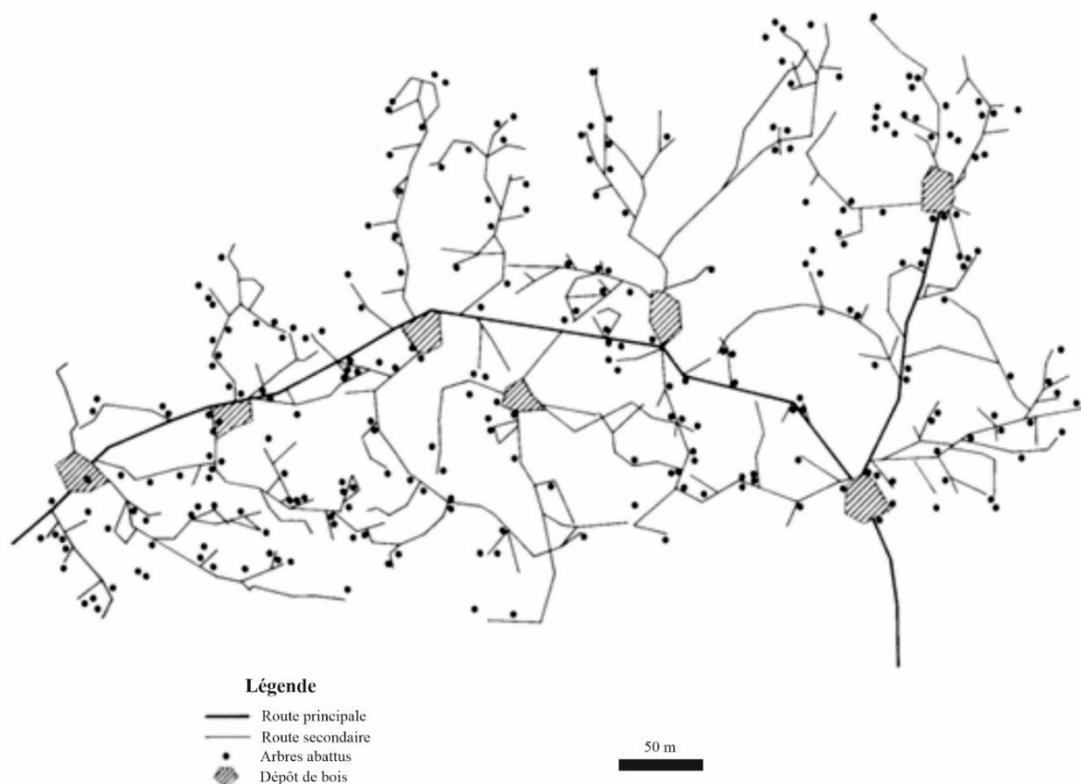


Figure 8. Schéma montrant les zones de coupe, les dépôts temporaires et l'accès aux zones de coupe sélective. Source : Veríssimo et al. (1992).

La coupe sélective à cette époque était la technique la plus utilisée avec le choix des essences de plus grande valeur (*pau rosa*, *acajou*, *virola*, *cerejeira*, *maçaranduba*)

puis, ultérieurement, la coupe sélective à haute intensité s'est développée : toutes les essences à valeur commerciale sont alors coupées (Yared et Brienza Junior 1990). Le système de coupe sélective est organisé approximativement comme un réseau de drainage, dans lequel les points d'abattage sont espacés de dizaines à centaines de mètres les uns des autres, et ceux-ci sont reliés entre eux par des chemins vers les zones de stockage du bois, qui est ensuite redirigé par camion sur les routes principales menant à la scierie (Verissimo et al. 1992) (Figure 8).

Après les années 2000, la production de bois en Amazonie a considérablement diminué (SFB/Imazon 2010), mais la région demeure l'un des principaux producteurs mondiaux de bois tropicaux (OIMT 2016), et plus de la moitié de la production est destinée au marché intérieur (SFB/Imazon 2010). Parmi les zones les plus actives, on remarque l'Est du Pará, le Nord du Mato Grosso et la Rondônia (Lentini et al. 2005) (Figure 9).

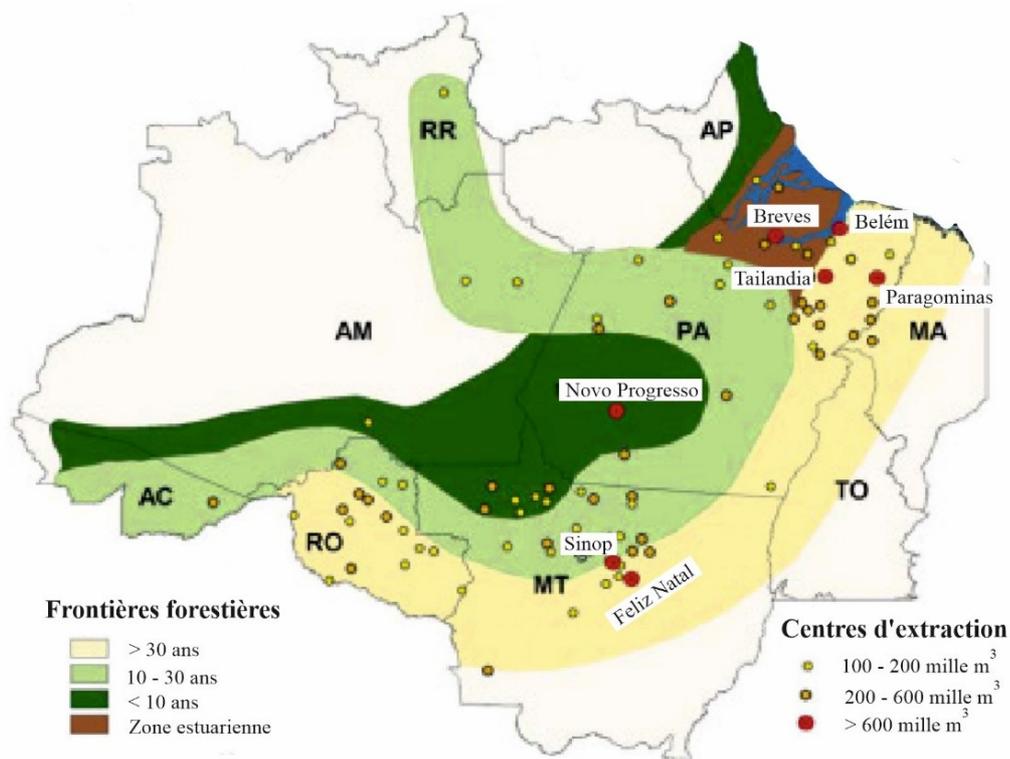


Figure 9. Frontières et pôles d'exploitation forestière en Amazonie Légale en 2004. Source : Lentini et al. (2005).

Parmi les facteurs qui ont permis la réduction de la production de bois en Amazonie après les années 2000, on peut citer l'augmentation de l'inspection de l'abattage illégal, la concurrence pour les produits de bois tropicaux et la crise économique après 2008 (SFB/Imazon 2010). L'exploitation légale du bois natif nécessite l'exécution d'un plan

d'aménagement forestier durable (PMFS¹⁷, pour Plano de Manejo Florestal Sustentável). En outre, d'autres types de certification ont été adoptés par ces opérations, comme la certification FSC (Lentini et al. 2005). Les PMFS font partie des modalités juridiques de l'exploitation forestière qui respectent un certain nombre de procédures afin que les ressources forestières ne soient pas épuisées. Les certifications, d'autre part, sont des processus d'audit externe qui permettent d'améliorer la valeur des produits du bois par la preuve de la réalisation d'une conduite durable. L'un des obstacles à l'adoption généralisée de la gestion durable des forêts est qu'elle est moins économique d'un point de vue privé par rapport à l'exploitation non durable (Margulis 2003). L'aménagement forestier, mais pas exclusivement, est une activité exercée principalement sur de grandes propriétés (41% des propriétés sont de plus de 5.000 ha), dont les deux tiers sont des propriétés sous la forme d'une association entre entrepreneurs et propriétaires (Lentini et al. 2005).

Dans ces formes de gestion durable, des techniques sont adoptées afin d'optimiser la récupération de la zone exploitée. Pour ce faire, la superficie est généralement divisée en parcelles égales selon le cycle de coupe, qui peut varier de 25 à 30 ans, lorsque la forêt est laissée pour régénération. Environ 2 à 5 arbres (20 à 30 m³ de bois) sont extraits par hectare, avec une ouverture d'environ 20% du couvert forestier. A titre de comparaison, dans les coupes prédatrices, entre 50 et 60% de la canopée est affectée (Verissimo e Pereira 2014). De nouvelles technologies sont également largement utilisées, comme l'utilisation de tracteurs forestiers de type débusqueuse ou *skidder* (Lentini et al. 2005). Ces équipements, associés à l'expansion des chemins privés, augmentent considérablement le rendement de l'exploitation du bois.

2.4. L'arrivée des cultures de grains

L'invention et la diffusion de nouvelles technologies agricoles après les années 1950, en particulier l'ensemble des variétés de cultures à haute productivité, les engrais, les pesticides et la mécanisation ont marqué ce que l'on a appelé la Révolution Verte, permettant un bond en avant de la production agricole mondiale. Après le milieu des années 1990, l'Amérique du Sud a connu ce qu'ils appellent la « nouvelle révolution verte », avec comme fleuron les biotechnologies, notamment le soja génétiquement modifié. Si, d'une part, ces technologies visent à accroître la productivité, à conserver les sols, à réduire les besoins en intrants chimiques, d'autre part, elles s'inscrivent

¹⁷ *Plano de Manejo Florestal Sustentável* (Plan d'aménagement forestier durable).

dans un contexte dominée par des grands groupes transnationaux qui exercent une influence sur les politiques agricoles des pays (Richards 2010).

Le Brésil est actuellement l'un des plus grands exportateurs de soja et de maïs au monde. On peut dire que l'expansion du soja au Brésil s'est développée dans un contexte de demande presque élastique, c'est-à-dire que la croissance de la production au niveau local est absorbée par le marché étranger, et il n'y a pas de risque que la surproduction locale fasse baisser le prix. Actuellement, la demande de soja brésilien est largement tirée par la Chine, dont l'économie a connu une forte croissance au cours des 30 dernières années, avec une demande élevée de protéines animales dont la production nécessite une nutrition riche en protéines végétales. Cette relation a été considérée comme une « téléconnexion » entre pays, avec d'importants liens de dépendance entre eux (Torres et al. 2017) (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006).

Déjà bien développé dans d'autres régions du pays, le soja est apparu en Amazonie au début des années 1990, en particulier dans le nord du Mato Grosso (Fearnside 2001), dans la transition entre le cerrados du Brésil central et la forêt amazonienne. Les municipalités de Querência, Canarana, Lucas do Rio Verde, Sorriso et Sinop sont des exemples de pôles de production de grains qui influencent leur expansion vers le Nord. En 1977, le géographe Aziz Ab'Saber soulignait le rôle des cerrados comme « réserve spéciale » compte tenu de son bon potentiel topographique pour l'agriculture, évitant ainsi l'expansion sur la forêt amazonienne (Ab'Saber 2003), toutefois, cette expansion vers l'Amazonie a été possible. Cette expansion sur la forêt est en grande partie le résultat des mouvements migratoires des agriculteurs du sud et du sud-est du Brésil, maîtrisant bien la culture du soja, vers la frontière agricole amazonienne (Silva 2015). La combinaison de la demande des marchés internationaux, de l'ouverture des infrastructures de transport, des incitations économiques des groupes d'entreprises, du crédit privé et de la technologie (Empinotti 2015) a été fondamentale pour le développement de cette activité (Fearnside 2001).

Les migrants du Sud et du Sud-Est ont pu apparaître sur le front pionnier amazonien en tant que « petits paysans en croissance » et « entrepreneurs agricoles ». Ils ont été capables d'établir de fermes de moyenne à grande surface, allant de centaines à des milliers d'hectares. La structure agraire qui s'est développée au cours de cette période reflète en partie la promulgation, en 1964, du « *Estatuto da Terra* » (Loi foncière), qui a défini le concept de module rural, étant la plus petite unité de terre qui peut soutenir une famille et permettre son développement, définie par la loi pour chaque municipalité

selon les conditions biophysiques et sociales. Le contexte de cette loi montre que la notion de petite propriété n'était pas adaptée à l'agriculture moderne, qui exigeait une production à grande échelle (Empinotti 2015).

Dans ce contexte de moyennes à grandes propriétés, la plantation de grains a été au début difficile en Amazonie, principalement en raison du manque de variétés adaptées au climat, de la rareté des infrastructures de stockage et de transformation (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006). Cependant, à partir des années 1990, avec le développement de variétés plus adaptées et des tests réussis, des conditions ont été créées pour l'expansion du soja (Fearnside 2001). Cela a encouragé les agriculteurs qui travaillaient déjà dans d'autres régions du pays ou qui connaissaient des méthodes de production plus mécanisées et intensives à planter des grains dans des régions plus au nord de Mato-Grosso, en profitant de terres bon marché.

La question des subventions externes telles que le crédit privé a joué un rôle clé dans ce processus parce que cette activité, contrairement aux activités menées jusqu'à présent, est exigeante en termes de superficie minimale et de conditions physiques favorables, d'intrants, de machines, d'infrastructures et de personnel formé. Des multinationales comme Cargill, Bunge, subventionnent la production sous forme de semences, d'engrais et de produits agrochimiques, en échange du soja récolté. On estime qu'à la mi-2004, 60 % de la production de soja au Brésil était financée de cette façon (Greenpeace 2006). Mais même s'il s'agit d'une production intensive, selon le contexte du front pionnier, il y a un certain minimum de surface continue qui est rentable pour le producteur (Homma 2005). Parallèlement, certaines études ont montré que la production de soja n'est pas le fait de grandes ou très grandes propriétés, mais qu'elle s'établit à un niveau intermédiaire (Empinotti 2015), en suggérant qu'il existe une certaine limite supérieure à partir de laquelle la production n'est pas rentable car supérieure à la capacité d'investissement¹⁸.

La capacité d'adaptation des producteurs a également été fondamentale dans ce développement qui a d'abord été caractérisé par plusieurs tests en fonction des conditions de production (Arvor, 2009). En plus d'aménager la parcelle si elle était récemment déboisée, ou en pâturages avec encore des troncs d'arbres, la gestion du sol peut impliquer un certain type de labour, scarification et hersage avant les semis.

¹⁸ Cela a été observé sur le terrain, mais c'est difficile à évaluer ces propos, étant donné que de nombreux producteurs ou sociétés produisent sur plusieurs propriétés en même temps, avec leurs propres fermes ou des fermes louées.

La correction à la chaux agricole a également été adoptée comme une pratique fondamentale pour corriger le pH du sol. La plantation en association avec d'autres grains ou graminées a été établie, à la fois à partir de la double plantation et de la succession des récoltes de différentes cultures, parmi lesquelles le maïs, le sorgho, le millet et le coton.

Mais bien que les conditions de propriété foncière, d'accès et d'infrastructure soient cruciales, le soja n'aurait peut-être pas augmenté avec l'intensité observée s'il n'y avait pas de terres plates et mécanisables, et parfois avec de meilleures conditions physiques et de fertilité, comme cela se produit dans les domaines du plateau de Parecis au Mato Grosso et en Rondônia et dans les reliefs tabulaires couverts d'argile de Belterra dans le Pará (région au sud de Santarém et région de Paragominas – Don Eliseu). Ce type de gestion agricole, dans les conditions données, n'est rentable que si la topographie est plane et que si le sol ne présente pas de limites importantes en termes d'hydromorphie ou de texture grossière (Piketty et al. 2015). Ainsi, au fil du temps, le soja s'est développé et rétréci dans diverses parties du biome amazonien, comme une série de tentatives et d'adaptations par les producteurs, reflétant le caractère « empirique » et à court terme des stratégies des producteurs, qui avancent par tâtonnements, comme décrit par Homma (2005). Si l'on considère l'Amazonie Légale, le soja a été consolidé dans la plupart des *cerrados* périphériques à la forêt, et a pénétré dans certaines zones avec des terres déjà ouvertes, de bonnes infrastructures et des conditions agronomiques adéquates. Parmi ces zones, on note l'expansion des pôles de Paragominas et de Santarém, et dans une moindre mesure en Amapá, Roraima et Rondônia (Figure 10). En 2006, la superficie plantée en soja en Amazonie a atteint plus d'un million d'hectares, et cette expansion a fini par être une cause importante de déforestation. Cela a rapidement mené au débat sur le lien entre les grandes filières internationales du bœuf et du soja et la déforestation en Amazonie, qui était en forte hausse à l'époque, et déjà dans le collimateur des actions du premier PPCDAm du gouvernement. Des actions telles que la protestation au port de Cargill en 2005 et la publication de rapports tels que *Eating up the Amazon* par l'ONG Greenpeace ont servi de médias de diffusion, notamment en faisant le lien entre la déforestation et les protéines utilisées par les grandes filières de distribution.

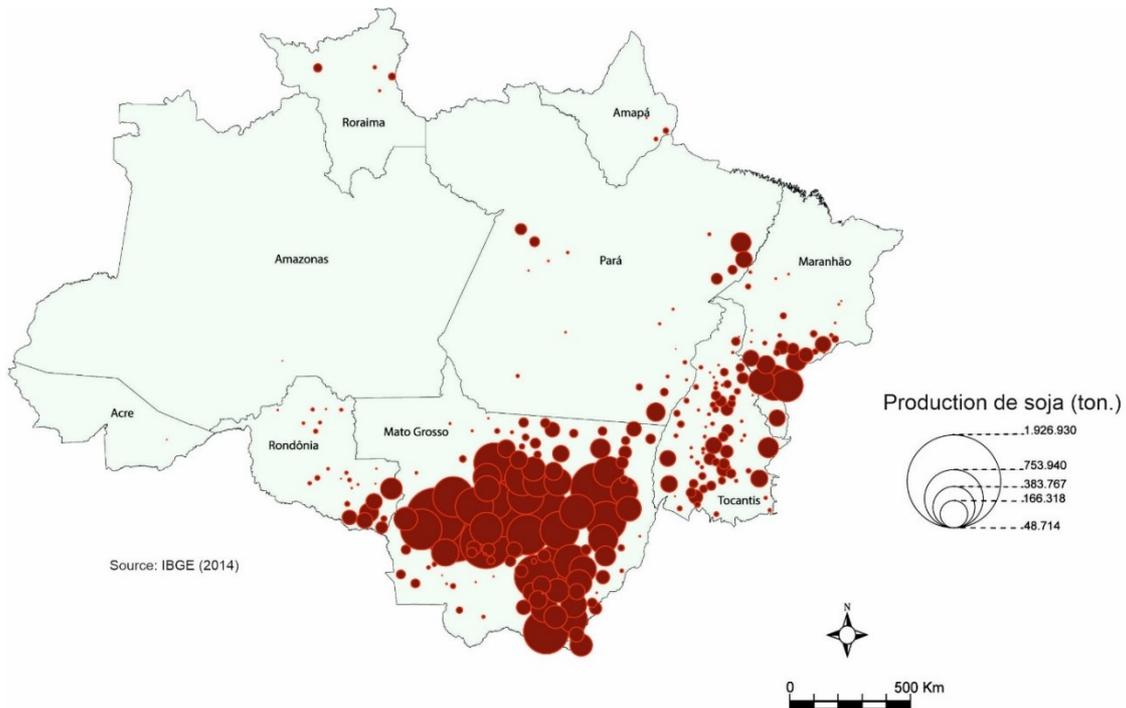


Figure 10. Production de soja dans l'Amazonie Légale en 2014. Source: Silva (2015).

En réponse, le Moratoire du soja a été créé à la mi-2006, le premier accord volontaire sur la déforestation zéro de la chaîne de production du soja, représenté par ABIOVE et ANEC, qui achètent ensemble 90% du soja amazonien. L'accord prévoyait de ne pas accepter le soja provenant de zones déboisées après juillet 2006 dans le biome amazonien. La forte dépendance du producteur de soja vis-à-vis de cette filière, a ainsi entraîné une réduction de la déforestation liée au soja. Ce mécanisme s'est avéré plus efficace pour contrôler le déboisement que les mécanismes gouvernementaux, selon (Gibbs et al. 2015). A partir de cette période, une grande partie de la déforestation est ainsi découplée de l'expansion des grains (Laurent, Arvor, et al. 2017; Macedo et al. 2011) (Figure 11).

En conséquence, l'intérêt pour l'utilisation des espaces boisés pour l'expansion des plantations de soja s'est réduit, ce qui a incité à tirer parti des zones déjà ouvertes avant 2006, en particulier dans les pâturages dégradés. Bien que le moratoire sur le soja soit toujours en vigueur, en décembre 2014, un nouveau mécanisme est entré en jeu au niveau de l'État : le « *Protocolo Verde do Grão* » (Protocole vert sur les grains), dirigé par le Ministère public fédéral, le gouvernement de l'État du Pará, les municipalités, la profession agricole et les entreprises dans la chaîne de production des grains.

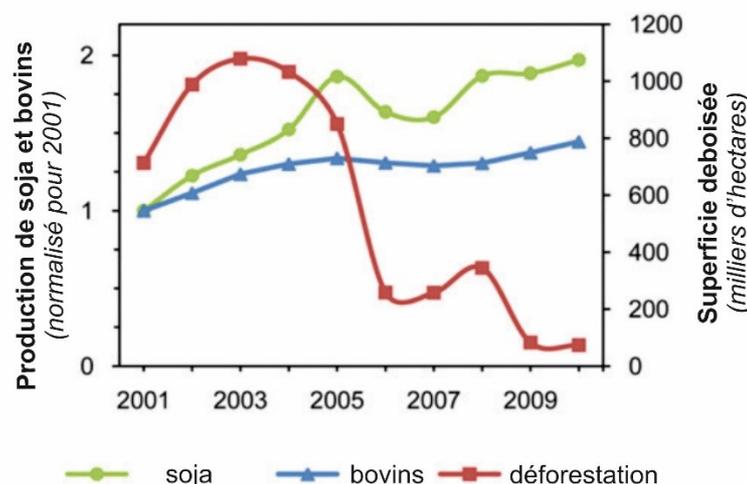


Figure 11. Déconnexion entre la déforestation et de la production de soja et de bétail en Amazonie.
Source: (Macedo et al. 2011).

Contrairement au moratoire, il y a une tolérance à la déforestation jusqu'à des surfaces de 25 hectares, du fait de la marge d'erreur dans les résultats de surveillance du programme PRODES (selon communication personnelle avec René Pocard-Chapuis). L'accord étant plus souple que le moratoire, il est possible qu'une lente progression de la déforestation soit possible en déforestant les lisières des fragments forestiers. Hormis cela, les mécanismes de lutte contre la déforestation limitent les pratiques expansionnistes, alors que l'intensification et la diversification sont favorisées, de même que les doubles cultures (si la saison des pluies est suffisamment longue pour le permettre), le semis direct sous couvert végétal et l'intégration culture-élevage. L'augmentation de la verticalisation de la production s'est également développée, notamment en bénéficiant des matières premières produites sur site, et s'est traduite par l'installation de grands groupes agroalimentaires (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006).

2.5. La plantation d'arbres pour le bois : la monoculture forestière arrive en Amazonie

La plantation commerciale d'arbres, bien qu'il s'agisse encore d'une activité forestière, diffère profondément de l'exploitation des forêts primaires. Contrairement à celles-ci, dont les ressources sont bien définies spatialement, la mise en œuvre des forêts plantées obéit à sa propre dynamique de localisation et de valorisation foncière. En Amazonie brésilienne, à l'exception peut-être d'entreprises de grande envergure mais relativement isolées (comme le projet Jari, Greissing, 2011), c'est une activité récente et en pleine expansion (Piketty et al. 2015). En 2010, dans les états de Pará,

Maranhão et Tocantins, les plantations d'eucalyptus ont totalisé environ 472.000 hectares (Oliveira 2019). Bien que la majorité des plantations soit constituée d'eucalyptus, de plus petites quantités de paricá (*Schizolobium parahybum*), teck (*Tectona grandis*) et mogno africano (*Kahya ivorensis*) ont également été plantées (Verissimo et Pereira 2014).

L'activité a été adoptée par différents types d'acteurs sur le front pionnier, comme dans le cas de la plantation de quelques hectares d'eucalyptus pour alimenter les séchoirs à soja (Arvor 2009). Toutefois, la plus grande partie est liée à la plantation de variétés d'eucalyptus pour l'industrie, alimentant le parc industriel du projet Carajás dans le sud-est de l'Amazonie, impliquant des entreprises telles que Ferro Gusa Carajás, International Paper (Sabogal et al. 2006) et Suzano (Oliveira, Pereira, et Nascimento 2018). Cette migration des industries forestières et des plantations a été appelée « Nouvelles Frontières Forestières » par l'industrie du bois, parce que les régions occupées ont des caractéristiques favorables telles que des terres bon marché et mécanisables, de la main-d'œuvre disponible et une infrastructure logistique (Freitas 2010).

Le Projet Grande Carajás, initié spécifiquement au milieu des années 1980, prévoyait une série d'industries liées à la transformation du fer provenant des grands gisements de la région, exerçant une forte demande de charbon de bois comme thermo-réducteur (Piketty et al. 2011). Par la suite, ce contexte a été favorable à la création, à partir de 2008, d'un grand parc industriel de production de pâte à papier à Imperatriz-MA, alimenté par plusieurs municipalités du front pionnier de l'Amazonie orientale telles que Paragominas, Ulianópolis, Dom Eliseu et Rondon do Pará, toutes à accès facilité par routes asphaltées (Oliveira, Pereira, et Nascimento 2018). Il faut souligner que ces entreprises ont été favorisées par la « réceptivité » des collectivités locales et la disponibilité des crédits des banques de développement (Freitas 2010).

Au cours des dernières années, cette activité a occupé des terres auparavant utilisées principalement par l'élevage bovin, mais il est possible qu'une partie de cette expansion ait eu lieu en remplaçant des forêts natives. Dans la région d'Imperatriz, en Amazonie Légale mais dans le biome du Cerrado, environ 29% des plantations ont été réalisés dans des zones de végétation primaire jusqu'en 2016 (Granado 2016), ce qui suggère qu'au moins jusqu'aux premières actions gouvernementales efficaces contre la déforestation (comme le PPCADM I en 2005), la plantation d'arbres peut avoir contribué à la déforestation, même indirectement. D'autre part, après 2007, face aux problèmes environnementaux posés par l'utilisation du charbon de bois provenant de

forêts primaires, plusieurs entreprises sidérurgiques se sont associées pour créer le *Fundo Florestal de Carajás* (Fond Forestier de Carajás), destiné à financer des plantations, notamment d'eucalyptus, pour la production de charbon végétal (Piketty et al. 2011), ce qui a permis l'expansion de cette activité dans la région.

En ce qui concerne l'aspect foncier, on constate que le système de « partenariat » est très courant, dans lequel une entreprise forestière loue des terres à un tiers pour effectuer la plantation. Cependant, Freitas (2010) considère que, dans la plupart des cas, l'entreprise forestière acquiert directement des terrains pour sa production. Les développements technologiques sont importants dans ce secteur, en particulier avec les variétés développées adaptées aux différentes conditions pédologiques et climatiques. Les contraintes physiques à la production sont un terrain escarpé, qui entrave la mécanisation, et un sol pierreux ou inondable (Penteado 2018), qui limitent le développement racinaire. Les plantations sont généralement réalisées en grandes parcelles rectangulaires de l'ordre de centaines de mètres de côté. Contrairement à l'agriculture et à l'élevage, la sylviculture est une culture à cycle long, qui dépend de l'utilisation finale du bois. Pour la production d'énergie et de pâte à papier, la période minimale de coupe est estimée entre 5 et 8 ans (Penteado, 2018). Après une culture, la transformation vers d'autres activités peut être entravée par les conditions difficiles du terrain, avec la nécessité d'enlever les souches et de corriger le sol.

3. Les études sur la dynamique du front pionnier amazonien

3.1. Approche par la dimension spatiale

Considérant que le front pionnier de l'Amazonie n'est pas un, mais plusieurs processus qui sont spatialisés de différentes manières, certains modèles spatiaux des fronts pionniers peuvent être identifiés et décrits en fonction des processus impliqués. L'une des caractéristiques fondamentales du front pionnier est qu'il ne se présente pas comme une ligne, mais comme une frange, indiquant une profondeur dans l'espace (Théry, 1976; Pocard-Chapuis 2004a). Cette frange, fruit de l'action de l'homme dans le paysage, peut présenter des configurations spatiales liées aux principales contraintes économiques extérieures et aux caractéristiques biophysiques et organisationnelles du territoire. Ainsi, à l'échelle locale, on peut identifier des modèles d'avancement du front pionnier avec une structuration linéaire, sous l'influence des

routes, une structuration polaire (influence urbaine), ainsi que des zones anarchiques avec des espaces vides relatifs (fermes) et absolus (forêts non encore déboisées) (Dubreuil et al. 2008).

Plusieurs études portant plus particulièrement sur le processus de déforestation dans les forêts tropicales ont identifié des modèles de conversion des forêts qui sont liés à la dynamique des fronts pionniers. Mertens et Lambin (1997) décrivent certaines de ces tendances à partir de l'analyse d'images provenant de capteurs à distance. L'un des modèles les plus connus et les plus facilement identifiables est la déforestation « en arête de poisson » associée aux projets de colonisation de l'Amazonie.

Depuis que les études par images satellitaires ont permis d'analyser les schémas spatiaux des fronts pionniers, le rôle de l'infrastructure d'accès dans son expansion a été mis en avant, révélant une série de modèles. En Amazonie, on considère que la fragmentation de la forêt et les accès évoluent ensemble (Arima, Walker, et Perz 2015). Les routes ouvertes par les autorités publiques (telles que les autoroutes BR-010 et BR-163) peuvent présenter une configuration spatiale différente de celles ouvertes et entretenues par des agents privés. Les politiques et les administratifs ne tirent pas explicitement profit de la production agricole et minière, ils agissent avec des objectifs d'intégration économique de nouveaux espaces, de sécurité aux frontières, de promotion du développement et de réduction de la pauvreté. D'autre part, les éleveurs, les agriculteurs, les forestiers, les colons et les mineurs ont une orientation qui tend davantage vers la recherche et l'exploitation des ressources, avec des objectifs plus individuels comme décrit par (Arima, Walker, et Perz 2015).

Des objectifs différents des acteurs peuvent conduire à une structuration différente du front pionnier. La construction de routes fédérales et provinciales (nous utiliserons ce terme pour *estaduais*) vise à relier les pôles, tandis que l'établissement de colonies (comme les projets de colonisation - PICs) organise des parcelles en réseaux réguliers, ce qui permet l'émergence de modèles d'expansion dans les « arêtes de poisson » (Figure 12 (a)). La configuration spatiale du développement du front pionnier est alors fortement influencée par la conception du projet (Batistella, Brondizio, et Moran 2000). Dans certains cas, la demande de terres dans une colonie est supérieure à celle définie par le projet, ce qui a conduit les acteurs à définir de nouveaux lots en plus des lots délimités, reproduisant le même schéma de répartition des lots définis dans le projet, dans l'espoir d'obtenir la reconnaissance de la propriété foncière par l'INCRA (Arima, Walker, et Perz 2015).

Les schémas dendritiques (Figure 12 (b)) par exemple, sont davantage liés aux processus de colonisation indépendants, dans lesquels la distribution spatiale des parcelles et des accès est plus irrégulière. Dans certaines parties de l'Amazonie, les colonisations liées à l'extraction du bois ont servi de « fer de lance » à l'avancée du front pionnier dans des zones non prévues par le gouvernement (Veríssimo et al. 1992; Walker et al. 2013). Dans un premier temps, les routes ont été ouvertes sans restriction de limite de propriété, en recherchant l'interconnexion la plus efficace des sites d'exploitation vers les routes principales (Walker et al. 2013). La fragmentation radiale (Figure 12 (c)) indique une forte interaction entre le centre et le front pionnier. Il s'agit en général d'un format circulaire, avec des routes et des parcelles qui s'étendent comme des « rayons » à partir d'un nœud urbain central, comme celui que l'on peut observer autour des villes d'Altamira, Apuí, Itaituba, Manicoré et Nova Aripuanã. Cette tendance peut refléter dans certains cas la cessation de la colonisation planifiée de l'État, qui se manifeste par une réaction spontanée à la croissance démographique (Arima, Walker, et Perz 2015). Les fronts d'expansion des grandes exploitations d'élevage bovin peuvent en revanche fournir un schéma géométrique rectangulaire (Figure 12 (d)) de grandes zones déboisées, avec des limites plus régulières, entrecoupées de vastes fragments forestiers.

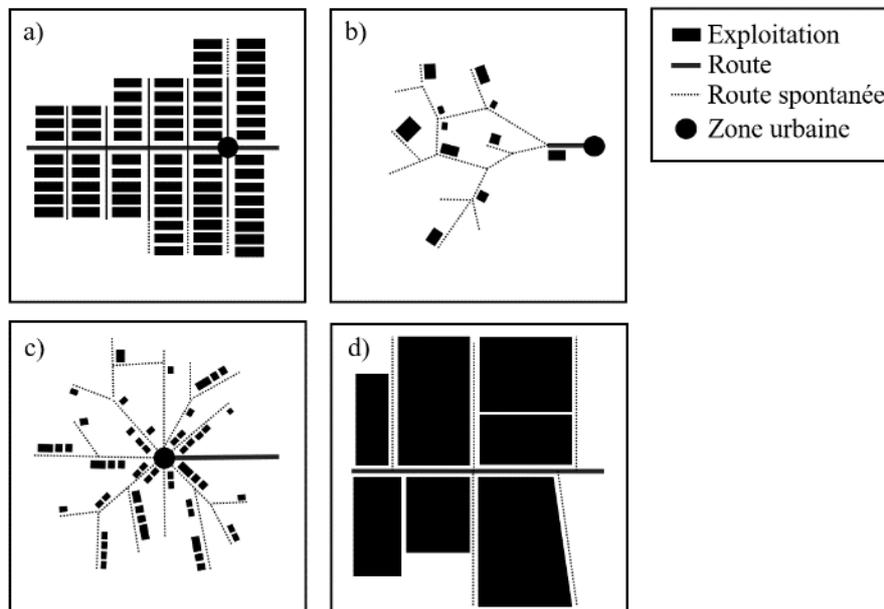


Figure 12. Quelques schémas spatiaux d'occupation du sol en Amazonie. a) arête de poisson ; b) dendritique ; c) radiale et ; d) géométrique.

La forme rectangulaire des propriétés suggère une recherche de réduction des coûts de démarcation et de déplacement au sein des grandes propriétés. Les bords droits et les angles droits, abaisse ainsi le besoin de repères, réduisant ainsi les coûts de

transaction sur le marché foncier. Bien qu'elle soit plus évidente dans les grandes propriétés, la même chose peut aussi se produire dans les lots des petits colons, mais avec une taille plus petite et souvent plus étroite (Arima, Walker, et Perz 2015; Mertens et Lambin 1997). Les activités minières (mines d'or par exemple) peuvent donner lieu à des processus d'occupation spécifiques, comme c'est le cas du schéma « tige de rose », observé dans la zone d'influence de la BR-163. Ce schéma présente en général une route relativement droite sur plusieurs kilomètres, et à un moment donné, il devient un schéma arborescent, lié aux activités minières, qui ont leur propre dynamique. Il peut aussi être associé à l'agriculture familiale.

L'évolution des études de modèles spatiaux a fait apparaître des approches qui intègrent les données spatiales abondantes et les données socio-économiques et agricoles disponibles au niveau de la municipalité (issus des recensement démographiques du IBGE), permettant de déterminer des unités spatiales qui sont le résultat de mécanismes socio-économiques (Almeida 2016). Cet auteur a réalisé une spatialisation des types de systèmes de production de l'état de Rondônia, à partir des données de TerraClass de 2010 et des données socio-économiques et agricoles de l'IBGE. Par ailleurs, Schielein et Börner (2018) effectue une procédure de partitionnement de données (*clustering*) avec des variables spatiales liées aux distances de centres urbains, à la démographie, aux aires protégées, aux aspects de la production agricole et à l'occupation du sol pour définir huit types de frontières pionnières : post-front, front ancien, nouveau front, front à haute pression, front à basse pression, zone de colonisation NE, zone de colonisation N et zone de colonisation S.

Ces travaux montrent le potentiel de l'analyse spatiale pour la cartographie des grands espaces, en considérant non seulement les schémas spatiaux, mais aussi les mécanismes opérant derrière l'histoire des changements de l'occupation du sol qui « produisent » le paysage actuel.

3.2. Approches par la dimension temporelle

Les phases de développement du front pionnier de l'Amazonie peuvent être distinguées en fonction du niveau d'activité et de l'ampleur de la déforestation. Les unités spatiales à faible activité et à faible superficie déboisée peuvent être classées comme « pré-frontières », les unités à forte activité de déboisement et à valeur intermédiaire de superficie déboisée peuvent être classées comme « frontière active » et celles à faible activité de déboisement et à superficie déboisée étendue, comme

« post-frontière » (Tritsch et Arvor 2016). Une approche similaire a été développée par Thalès et Pocard-Chapuis (2014), qui décrit l'évolution des fronts pionniers de l'état du Pará en fonction de la proportion de changements forestiers et temporels.

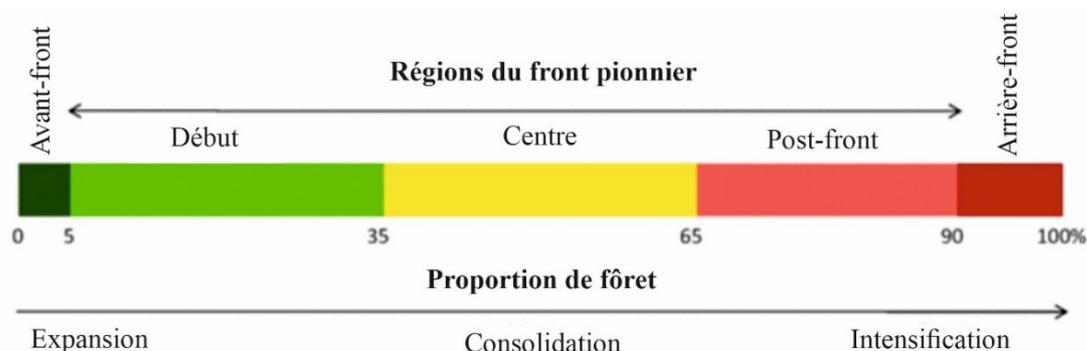


Figure 13. Proportion de forêt dans le paysage et phases de front pionnières définies par Thalès et Pocard-Chapuis (2014) pour l'Etat du Pará.

Les auteurs (Thalès et Pocard-Chapuis 2014) définissent des étapes ou des régions du front pionnier qui sont caractérisées par des dynamiques spécifiques et qui se traduisent dans le paysage par une réduction continue des espaces naturels et par l'intensification et la diversification de la production (Figure 13). La région d'avant-front est caractérisée par la quasi-absence de migrants (Figure 14 (a)), d'infrastructures et une déforestation rare (Figure 14 (b)). Le début du front pionnier, est caractérisé par l'appropriation des terres par les migrants (Figure 14 (m)) et par la déforestation centrée sur les accès existants. Le centre du front pionnier est alors une évolution vers un territoire à plus forte densité de population (Figure 14 (f)) et de zones agricoles, dans lequel tous les espaces sont en quelque sorte appropriés. A ce stade, un réseau urbain et routier commence à être structuré (Figure 14 (i)).

La phase post-front pionnier est représentée par l'évolution vers une région complètement intégrée ; dans ce cas, la plupart des zones naturelles ont déjà été éliminées ou modifiées. Le système peut subir des rétroactions causées par l'épuisement des ressources naturelles. Les acteurs impliqués peuvent progressivement passer d'agriculteurs familiaux à des investisseurs et des entrepreneurs, favorisant l'intensification (Figure 14 (k)) et la concentration de terres (Figure 14 (n)). On peut aussi considérer que c'est surtout à partir de cette phase qu'une série d'infrastructures, de services et d'institutions telles que la fabrication de produits laitiers, les abattoirs, les silos, les magasins d'équipements, les coopératives, etc. s'implantent, caractérisant une plus grande « verticalisation » de la production (Figure 14 (l)).

Enfin, la région post-pionnière se caractérise par la quasi-absence d'espaces naturels, par l'expansion du réseau routier asphaltée (Figure 14 (o)) et par le développement d'un réseau hiérarchique de centres urbains favorisé par l'exode rural (Figure 14 (r)). Ces phases ne sont pas nécessairement linéaires. Les premières organisations qui s'établissent peuvent ou non servir de base à des développements futurs, et une dynamique donnée peut changer radicalement en fonction des divers facteurs contextuels impliqués (Poccard-Chapuis 2004).

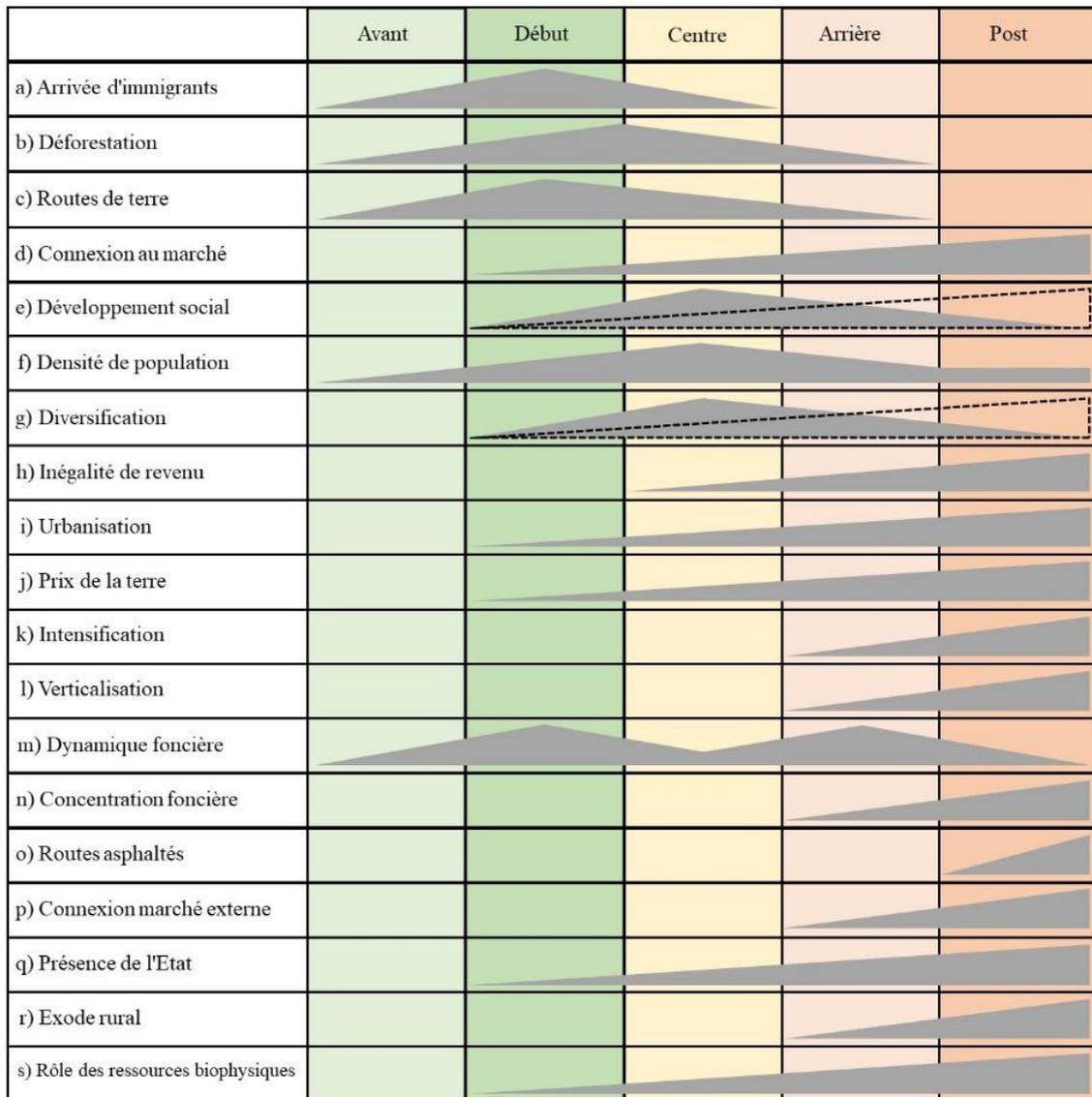


Figure 14. Processus et facteurs en relation avec les phases du front pionnier en Amazonie. Basé sur (Grimaldi et al. 2002; Lapola et al. 2014; Margulis 2003; Piketty et al. 2015; Poccard-Chapuis 2004; Rodrigues et al. 2009; Summers 2008; Thalès et Poccard-Chapuis 2014; Tritsch et Arvor 2016).

Certaines études ont décrit des processus communs qui se développent au fil du temps sur des fronts pionniers, comme une tendance générale à l'augmentation du prix des terres (Figure 14 (j)), alors que les propriétés consolident les zones cultivées

ou les pâturages, les accès et les habitations, renforçant les liens avec le marché (Figure 14 (d)). Ce mécanisme est aussi l'un des moteurs de l'avancée du front, sous forme de spéculation foncière.

Dans ce processus, les agriculteurs familiaux s'inscrivent dans une dynamique qui aboutit à l'appropriation des terres par d'autres acteurs. En ce sens, il peut y avoir deux pics de dynamique foncière dans un front pionnier, l'un au début, lorsqu'il y a appropriation de la terre par les migrants, et l'autre à l'arrière du front pionnier (Thalès et Pocard-Chapuis 2014) (Figure 14 (m)), lorsque les terres sont vendues à des acteurs plus capitalisés.

Dans l'approche de la théorie des cycles de vie de l'Amazonie, (Summers 2008) considère qu'il existe une dynamique de phases non linéaires qui dépendent à la fois de facteurs démographiques familiaux et de facteurs contextuels tels que le marché, les politiques et la situation biophysique. Dans les phases initiales, les changements d'occupation du sol sont intensément liés à la dynamique du cycle de vie de la famille. Cependant, à mesure que le front évolue, les forces contextuelles peuvent augmenter l'impact sur les stratégies d'occupation du sol (Figure 14 (s)). En d'autres termes, à mesure que l'unité familiale devient de plus en plus dépendante des marchés et de moins en moins de la force intérieure, le poids des variables démographiques diminue avec le temps. Dans ce contexte, les familles qui ne s'adaptent pas au contexte post-frontière sont plus susceptibles de vendre la terre et de migrer vers d'autres régions frontalières, passant la terre à un deuxième acteur plus adapté à la nouvelle situation de la frontière.

Les phases de développement peuvent impliquer des changements de stratégies et/ou des changements d'acteurs. (Grimaldi et al. 2002) met en évidence une première phase d'installation, où la stratégie de l'agriculteur est l'utilisation minière des ressources présentes sous forme de déforestation et d'établissement de cultures annuelles ; une deuxième phase de diversification, où la production animale est progressivement intégrée au système productif ; et enfin, une troisième phase de spécialisation, où le bétail devient la principale activité. C'est ce qui se cache derrière les cycles de *boom-and-burst* (d'expansion et d'éclatement) (Rodrigues et al. 2009) prédominant jusqu'au milieu de l'année 2000.

Cette dynamique signifie que pendant les premières étapes du front pionnier, les indicateurs socio-économiques (niveaux de vie relatifs, alphabétisation, espérance de vie) augmentent considérablement. Cependant, lorsque cette étape passe à une phase

plus avancée, avec peu de forêts et une prédominance de l'activité d'élevage, ces indicateurs diminuent. Les niveaux de développement humain avant et après la frontière sont similaires. Cependant, de nouvelles activités et technologies peuvent aussi modifier fondamentalement la dynamique du front, comme c'est le cas de l'arrivée des cultures de grains et des plantations d'arbres pour le bois. Avec un mode d'occupation très différent, la production de grains privilégie certains pôles agricoles émergents en Amazonie où les conditions pédologiques, pluviométriques et logistiques sont favorables (Piketty et al. 2015).

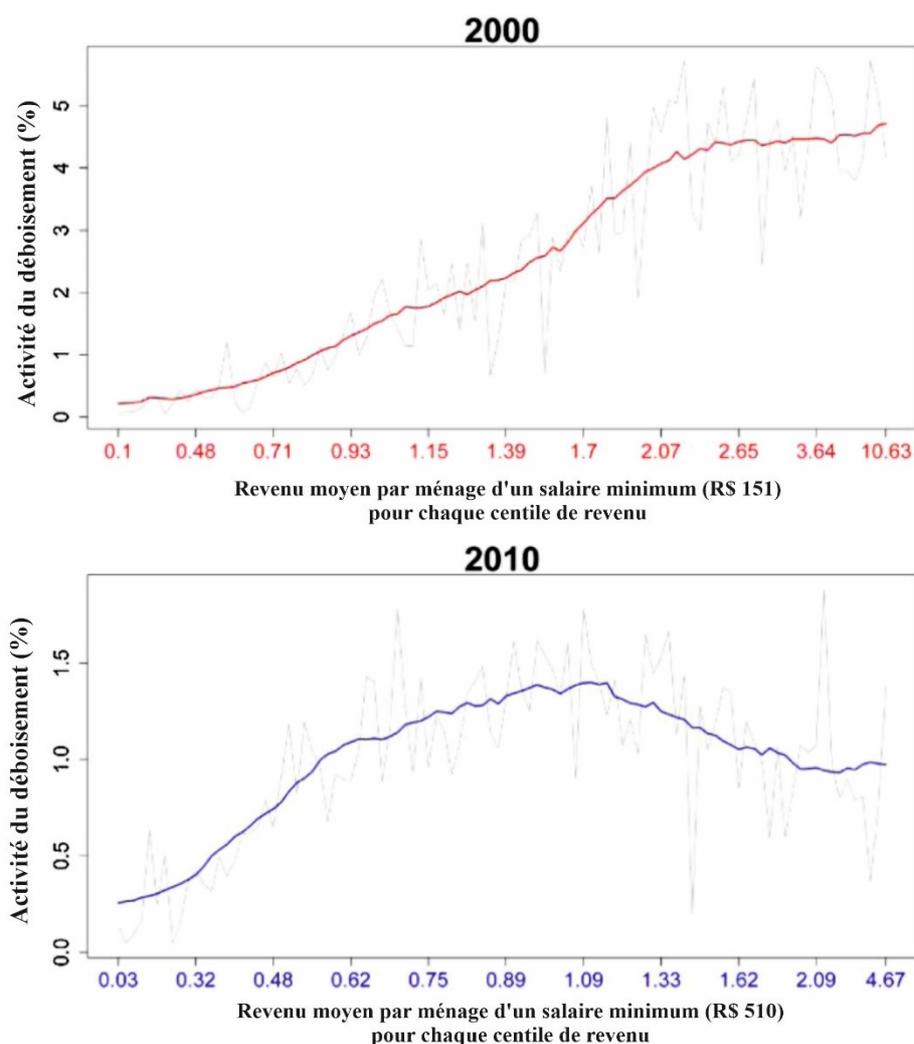


Figure 15. Développement du front pionnier de l'Amazonie en matière de revenus familiaux et de déforestation en 2000 et 2010. Source : Tritsch et Arvor (2016).

C'est ainsi que les cycles de *boom-and-burst* en Amazonie ont présenté des changements entre 2000 et 2010. Dans ces cas, il a été observé que l'évolution du front pionnier ne conduit pas nécessairement à l'effondrement des indicateurs socio-économiques, mais au contraire, à une amélioration (Figure 14 (e)). Ceci est principalement dû au développement de l'agriculture intensive de *commodities* tels que

le soja, qui, contrairement à l'élevage extensif, assure le développement économique (Tritsch et Arvor 2016) mais avec une plus grande inégalité sociale (Lapola et al. 2014) (Figure 14 (h)). Cela a favorisé la formation de ce que l'on a appelé la courbe environnementale de Kuznets. Cette courbe en « U » inversée correspond, dans le contexte de la théorie du développement économique, au début, à un faible revenu associé à une faible dégradation de l'environnement. A la mesure que le revenu augmente, la dégradation augmente, mais diminue ensuite alors que les revenus continuent d'augmenter. Dans le cas de l'Amazonie, on a observé que les revenus évoluent en fonction de la croissance de la déforestation, mais après un certain niveau de revenus, l'activité de déforestation est réduite (Tritsch et Arvor 2016) (Figure 15).

Chapitre 2 – La modélisation de l’occupation du sol

1. Principales approches de la modélisation spatialement explicite

La complexité apparente du paysage rend la prédiction de son comportement particulièrement difficile, car l'action conjointe de différents facteurs qui permettent l'émergence de dynamiques spécifiques ne peut se faire en analysant des attributs isolés (Manson 2001). En ce sens, la modélisation de la dynamique de l'occupation du sol tente de reproduire cette interaction entre plusieurs facteurs qui donnent lieu à des configurations spatiales de l'occupation du sol. Les modèles créés à cette fin sont loin de reproduire fidèlement les processus, mais ils sont capables de synthétiser une série de perceptions et d'inférences individuelles dans une structure commune d'analyse (Soares-Filho et al. 2012). Certains types de modèles fonctionnent spécifiquement avec le caractère spatial des changements d'occupation du sol, ce sont des modèles spatialement explicites, dont la plupart fonctionnent en deux dimensions principales :

- La demande pour la terre : liée à des variables qui contrôlent l'ampleur du changement l'occupation du sol, aussi appelées variables causales (lorsqu'elles sont connues) ou « *drivers* » (lorsque les variables sont incertaines) (Meyfroidt 2016). Il s'agit des interactions des relations sociales et économiques qui contrôlent l'occupation du sol à des niveaux généralement plus élevés de la hiérarchie spatiale en tant que facteurs économiques, commerciaux, institutionnels et technologiques. Dans la plupart des approches de modélisation spatialement explicites, la demande de terres est calculée sur la base des données d'occupation du sol observées entre t0 et t1, ce qui permet de créer une matrice de transition (par exemple, les chaînes de Markov).
- Le potentiel de changement : est lié aux facteurs qui contrôlent l'emplacement de ces changements (Verburg et al., 2006). Nous pouvons aussi l'appeler propension, probabilité, susceptibilité ou adéquation d'une zone à un phénomène (Mas et al. 2014a). Cela représente l'adaptation du territoire aux demandes sociales et économiques, c'est-à-dire les facteurs qui contrôlent la localisation des changements tels que les infrastructures existantes, les aspects fonciers et la distribution et les caractéristiques des ressources naturelles (Geist et Lambin 2002). Dans le contexte de la modélisation de

l'occupation du sol, il s'agit souvent d'un *input* appelé déterminant spatial, c'est-à-dire un facteur ou un groupe de facteurs qui contribuent à l'explication statistique de l'emplacement d'un *output* (Meyfroidt 2016). Les déterminants peuvent générer les probabilités spatiales d'un phénomène et, par conséquent, ce qui peut être considéré comme un produit de la modélisation : la carte de probabilité (Mas et al. 2011).

Différentes techniques peuvent être utilisées pour répartir la demande de terres dans l'espace en fonction du potentiel de changement. Bien que cette approche implique qu'une grande partie des modèles dépende directement des données empiriques (Tayyebi 2013), la modélisation permet de tester une série d'hypothèses concernant la dynamique de l'occupation du sol, notamment en ce qui concerne le rôle de chaque facteur dans les processus observés. Certaines des principales approches de modélisations sont examinées ci-après.

1.1. La régression

Parmi les premiers modèles de changement d'occupation du sol, on trouve des modèles spatiaux univariés qui mettent en relation la fréquence du changement d'occupation du sol (variables dépendantes) avec des variables indépendantes telles que la proximité des routes, des villes, le degré de fragmentation etc. Le modèle est obtenu en faisant une régression aux moindres carrés. La procédure s'applique à l'ensemble d'une région et à des sous-régions qui se caractérisent par des processus de changement distincts. Pour l'utilisation de ces techniques, il est important de définir une échelle adéquate pour la modélisation des processus.

Cependant, selon (Lambin 1994), cette approche a ses limites, car elle ne conduit généralement pas à des structures d'analyse génériques. (Paegelow et al. 2004) utilisent un modèle de régression linéaire généralisée, la régression logistique multiple, dans laquelle la variable réponse est qualitative, dérivée de la prédiction qui prend en compte un ensemble d'informations provenant de variables explicatives. Un autre modèle, le CLUE (Veldkamp et Fresco 1996), acronyme pour *Conversion of Land Use et its Effects*, est un modèle d'état discret et fini qui permet de simuler la conversion de l'occupation du sol en fonction de facteurs humains et biophysiques. Ce modèle part du principe qu'il faut définir un seuil à partir duquel l'occupation du sol ne changera que si les besoins biophysiques et humains ne peuvent être satisfaits par l'occupation actuelle du sol. Alors qu'au niveau régional, les demandes sont évaluées, les décisions finales concernant le changement l'occupation du sol sont prises au niveau du réseau

local.

Le StocModLCC (*Stochastic Modelling of Land Cover Change*), développé par (Rosa et al. 2015), est un modèle de prévision du potentiel de changement et de la configuration spatiale de l'occupation du sol, qui se distingue des autres modèles par son caractère probabiliste plutôt que déterministe, ce qui permet de quantifier les incertitudes des prédictions. Les ratios de transition sont calculés « *bottom-up* » comme étant la somme des probabilités locales déterminées par les processus locaux et les changements sont définis comme un processus de contamination, c'est-à-dire que le changement survient dans un site si les sites voisins connaissent aussi des changements semblables.

1.2. Les automates cellulaires

Les modèles dynamiques basés sur les automates cellulaires, parmi les plus courants pour la simulation des changements d'occupation du sol, ont été initialement développés par John Von Neumann en 1940. Les automates cellulaires consistent en un arrangement de cellules dans lequel l'état de chaque cellule dépend de son état précédent et un ensemble de règles de transition, selon l'arrangement du voisinage.

Un automate cellulaire se compose généralement de cinq éléments : (i) un espace de cellules régulières ou irrégulières, (ii) chaque cellule a un statut qui peut changer par les attributs de cellules voisines, (iii) des règles de transition utilisées pour classifier les données, (iv) un voisinage qui définit l'étendue de l'influence des cellules qui entourent la cellule centrale, (v) pas de temps (Wolfram 1984). Les règles définies pour l'actualisation des cellules permettent d'analyser le comportement spatial de différentes conditions initiales, ainsi que les chemins de changement communs qui tendent à converger vers un nombre limité d'états finaux possibles. Il s'agit de processus dits d'« émergence », caractéristiques des systèmes complexes, qui aboutissent à des structures finales spécifiques et dépendent de la nature des états attracteurs et de l'auto-organisation (Perz et al. 2009).

Dans le contexte de la modélisation du changement d'occupation du sol, certaines méthodes sont utilisées pour définir les règles qui contrôlent les changements dans les cellules à chaque étape discrète d'une simulation. Ces règles peuvent être alimentées par des cartes de probabilité de transition, telle que la méthode bayésienne de poids d'évidence, utilisée par le modèle DINAMICA (Mas et al. 2011; Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin 2002), ou l'évaluation multicritère dans le modèle

CA_MARKOV (Eastman 2001; Mas et al. 2014b).

L'un des plus grands défis étant de trouver la bonne combinaison de paramètres qui définiront le comportement du mécanisme de l'automate cellulaire, plusieurs modèles hybrides d'automates cellulaires couplés à des méthodes statistiques ou basées sur des processus ont été développées. Analyse multicritères, *Support Vector Machines*, des algorithmes d'apprentissage automatique ont été utilisés à cette fin (Tayyebi 2013). Par exemple, (Mas, Soares-Filho, et Rodrigues 2015) ont utilisé un algorithme génétique pour calibrer les paramètres de forme et de taille des patches des mécanismes d'automates cellulaires du modèle DINAMICA. D'autres modèles de simulation de changement d'occupation du sol basés sur des automates cellulaires peuvent être cités comme le SLEUTH (*Slope, Land Use, Exclusion, Urban, Transportation, et Hill Shading*) (Clarke, Hoppen, et Gaydos 1997).

Un modèle établi sur des automates cellulaires, initialement développé pour modéliser la déforestation en Amazonie, est DINAMICA. C'est un modèle de simulation du changement d'occupation du sol spatialement explicite. Le modèle DINAMICA utilise aussi une approche d'automate cellulaire. Les cartes de probabilités de transition sont calculées avec les variables spatiales et cartes d'occupation du sol. Les quantités de transitions sont ensuite exécutées sur la base de la matrice de transition globale en utilisant des chaînes de Markov. Les transitions sont ensuite exécutées sur les mécanismes de l'automate cellulaire *patcher* et *expander*. Le premier responsable de la création de nouveaux patches, et le second, de l'expansion ou de la rétraction des patches¹⁹ existants (Soares-Filho, Coutinho Cerqueira, et Pennachin 2002).

Ce modèle a été appliqué à diverses études sur l'évolution de l'occupation du sol dans des milieux ruraux et fronts pionniers, e.g. (De Faria et al. 2017; Kamusoko et al. 2011; Malek et Boerboom 2015; Mendoza-Ponce et al. 2018; Monteiro Junior et al. 2019; Oliveira et al. 2013; Soares-Filho et al. 2010; Soares-Filho et al. 2006; Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin 2002; Thompson et al. 2017; Vitel et al. 2013) et en milieu urbain, e.g. (Campos, Almeida, et Queiroz 2018; Lahboub et al. 2018; Maithani et al. 2018; Ramos, de Alencastro Graça, et Fearnside 2018). Actuellement c'est une plateforme de modélisation environnementale avec plusieurs outils, appelée Dinamica EGO, développée par le Centre de Télédétection de l'Université Fédérale de Minas Gerais (Rodrigues et al., 2007).

¹⁹ Groupe de cellules contiguës représentant une surface d'une occupation donnée du sol.

1.3. Les modèles basés sur agents et les graphes d'interaction

Les modèles basés sur les agents sont des simulations informatiques d'un certain nombre de décideurs (agents) et d'institutions, qui interagissent les uns avec les autres selon un ensemble de règles prédéfinies (Farmer et Foley 2009). Cette approche trouve son origine dans le paradigme de la programmation orientée objet, qui regroupe les opérations et les données (ou comportements et états) dans des unités modulaires en réseau (An et al. 2005). Ces agents sont immergés dans un environnement dynamique, ayant la capacité d'apprendre et de s'adapter en réponse aux changements des autres agents environnementaux. Les modèles multi-agents, à leur tour, peuvent couvrir une grande variété d'agents et d'états.

Ce réseau dynamique d'interactions entre agent et paysage permet ensuite d'évaluer les relations spatio-temporelles de dépendance à l'égard de la prise de décision et de l'évolution du paysage, ainsi que l'observation des facteurs exogènes et endogènes, des rétroactions et des seuils critiques du système. Ces types de modèles vont au-delà des automates cellulaires en associant les décisions humaines aux caractéristiques du paysage (Perz et al. 2009).

De plus, ils ne fonctionnent pas avec la structure formée par la demande de terres et le potentiel de changement que la plupart des autres modèles utilisent. Cependant, la définition des attributs des agents peut être difficile en raison de la complexité apparente des systèmes homme-environnement (Couclelis 2001). En ce sens, ils ont été appliqués principalement dans l'étude de changement d'occupation du sol à l'échelle locale (Lippe et al. 2019). Il existe plusieurs modèles basés sur les agents, parmi lesquels on peut citer CORMAS (CIRAD), SWARM (*Utah State University*) et le ArcGIS Agent Analyst.

Il est possible d'utiliser cette approche pour simuler des changements dans l'occupation du sol en simulant l'interaction entre les agents sur un support spatial, qui peut également être modifié sous l'effet des processus naturels et sociaux (Bousquet et Gautier 1999). Le modèle CORMAS permet deux approches complémentaires : les acteurs comme agents et l'espace comme agent. Dans le premier cas, il y a des cellules sur lesquelles les agents se déplacent et interagissent. Les cellules sont caractérisées par des attributs tels que la forêt, les pâturages et les cultures, tandis que les agents interagissent avec ces cellules selon des règles prédéfinies. Dans l'approche de l'espace en tant qu'agent, les cellules d'occupation du sol elles-mêmes

sont les agents, interagissant les unes avec les autres.

A Paragominas, Plassin (2018) a utilisé un modèle basé sur de agents pour simuler les effets des différentes stratégies des éleveurs sur le paysage et les ressources et pour évaluer les possibilités d'adopter ces stratégies dans différents contextes agraires.

Une autre approche similaire est celle des graphes d'interaction, est celle utilisée par Ocelet, un programme *Domain Specific Language* (DSL). Dans cette approche, il n'y a moins de restriction aux possibilités d'interaction entre éléments. Il permet de construire des graphes de relations qui décrivent quels éléments du modèle interagissent, et comment. Chaque relation peut exprimer un point de vue spécifique d'un système et plusieurs relations peuvent être combinées pour intégrer différents points de vue dans un même modèle (Degenne et al. 2010).

1.4. Les cartes pondérées et l'évaluation multicritères

Les modèles de cartes pondérées peuvent utiliser différentes méthodes pour intégrer les déterminants spatiaux d'une classe d'occupation du sol donnée ou d'une transition. Des méthodes multicritères peuvent être utilisées à cette fin, telles que la superposition booléenne ou la combinaison linéaire pondérée. L'avantage de cette méthode est la possibilité d'inclure les connaissances des experts dans la modélisation (Mas et al. 2011), contribuant à des aspects que les données d'entrée disponibles ne sont pas toujours en mesure de mettre en évidence. Selon (Olmedo, Paegelow, et Martínez 2007), les modèles dans lesquels la localisation des changements est assistée par une évaluation multicritères présentent de bons résultats dans les contextes à forte dynamique spatio-temporelle.

Le modèle CA_MARKOV, déjà mentionné ci-dessus, est un exemple qui utilise l'évaluation multicritères des variables environnementales comme base pour l'allocation des changements par un automate cellulaire, dont les taux de transition sont calculés par des chaînes de Markov (Eastman 2001; Houet et Hubert-Moy 2006; Paegelow, Camacho Olmedo, et Menor Toribio 2004). Les modèles Multi Criteria Evaluation (MCE) (Wu et Webster 1998) et Geomod appartiennent à cette classe. Geomod utilise une carte de potentiel créée à l'aide d'une méthode multicritères comme entrée pour l'un des mécanismes de localisation des changements (Pontius, Cornell, et Hall 2001).

Un autre modèle est le LandSHIFT, créé pour les simulations à l'échelle globale Dans

ce cas, le modèle est organisé en sous-modules opérationnels indépendants en utilisant une procédure multicritères pour déterminer l'adéquation des zones dans lesquelles chaque sous-module peut affecter les changements (Gollnow et al. 2018; Schaldach et al. 2011).

1.5. L'apprentissage automatique

Les techniques d'apprentissage automatique utilisent des algorithmes capables d'apprendre certaines régularités dans les données qui permettent de résoudre des tâches. Il s'agit d'algorithmes qui ont été largement utilisés pour l'analyse de grands volumes de données et qui ont servi à la fois d'approche pour la modélisation de simulation d'occupation du sol, mais aussi pour l'identification des organisations spatiales.

Parmi les techniques les plus connues figurent les réseaux neuronaux artificiels (RNA). Les RNA sont basés sur le fonctionnement du cerveau biologique, avec une série de « neurones » interconnectés qui sont capables de transmettre des informations et de changer le comportement d'autres neurones. La connexion entre les neurones a un poids qui peut être positif ou négatif, c'est-à-dire qu'elle peut exciter ou réprimer le neurone suivant. En mode d'entraînement, la RNA reçoit des inputs qui sont transmis aux neurones internes, qui peuvent être excités pour transmettre l'information avant s'ils ont reçu un poids des neurones en amont qui dépasse un seuil. Ce processus a lieu jusqu'à ce que les neurones de sortie, qui en mode entraînement sont soumis à des informations de référence qui indiquent au réseau si les chemins pris sont corrects ou non. Après l'entraînement, le réseau peut ensuite être utilisé avec des données non utilisées pendant l'entraînement pour évaluer sa capacité à classer des données inconnues.

Le *Land Change Modeler*, par exemple, est un modèle basé sur des matrices de chaînes de Markov et des cartes de transition obtenues par régression logistique ou par des RNA (Khoi et Murayama 2010). Le *Land Transformation Model* (LTM) utilise un approche similaire (Pijanowskia et al. 2002). Paegelow et al. (2004) a utilisé des réseaux neuronaux pour la projection d'une date d'occupation du sol, en considérant une dimension temporelle (séquence temporelle des pixels), une dimension spatiale (voisinage des pixels) et des variables spatiales explicatives. D'autres approches de l'apprentissage automatique pour les modèles de changement d'occupation du sol comprennent le *Support Vector Machines* (SVM), efficace pour la détection de schémas non linéaires dans les données (Tayyebi 2013), et les algorithmes

génétiques. Ces dernières sont basées sur le processus de sélection naturelle biologique : au début, une population aléatoire de solutions au problème est créée, et ces solutions sont comparées à une référence (telle qu'une carte d'occupation du sol observée). La comparaison permet d'évaluer l'adéquation des solutions et de classer les meilleures. Le processus suivant consiste à croiser et à muter les meilleures solutions, qui sont ensuite à nouveau comparées à la référence. Le processus est ensuite répété jusqu'à la solution finale selon les critères choisis (Shan, Alkheder, et Wang 2008).

L'apprentissage automatique a été utilisé non seulement dans le contexte de la modélisation par simulation, mais aussi fréquemment pour modéliser des motifs spatiaux d'occupation et usage des sols au moyen de données spatiales multivariées. Les travaux qui utilisent des algorithmes de partitionnement de données (*clustering*) tels que celui de (Schielein et Börner 2018), qui l'a utilisé pour cartographier les régions du front pionnier d'Amazonie, et (Bellón et al. 2018), qui a réalisé une cartographie des systèmes productifs de l'Etat de Tocantins, sont des exemples de modélisation d'organisations spatiales. Le partitionnement de données est communément défini comme la tâche de regrouper un ensemble d'objets de telle sorte que les objets d'un même groupe (cluster) sont plus similaires que ceux des autres groupes.

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour cette fonction, qui peuvent être classés comme modèles prototypes (*prototype models*) qui représente chaque cluster par un vecteur moyen unique (e.g. l'algorithme k-means) ; modélisation statistique ou de distribution (*statistical ou distribution modelling*), où les clusters sont modélisés à l'aide de distributions statistiques, telles que les distributions normales multivariées (e.g. l'algorithme Expectation Maximization) et ; regroupement par paires ou modèles hiérarchiques, qui cherchent à construire une hiérarchie des clusters (e.g. l'algorithme Affinity Propagation) (Rokach et Maimon 2005). Les algorithmes de partitionnement de données peuvent également être divisés modèles type *hard clustering*, où chaque objet n'appartient qu'à un seul cluster (e.g. k-means), alors que dans le *soft clustering*, chaque objet peut aussi appartenir à un autre cluster (comme le Gaussian Mixture Model) (Kearns, Mansour, et Ng 1998).

2. L'échelle, la calibration et la validation des modèles de simulation de changement d'occupation du sol

Le choix de l'échelle spatiale d'analyse est fondamental dans les simulations du changement d'occupation du sol en fonction des objectifs. D'une part, un modèle calibré pour une grande zone perd de son réalisme et de sa capacité à prédire les processus, car le niveau élevé d'agrégation des données élimine la variabilité des situations géographiques et dilue les relations causales. D'autre part, la subdivision de la zone en plusieurs modèles calibrés pour chaque secteur peut ne pas convenir à un modèle généraliste.

En plus de se concentrer sur le problème de la définition de ces zones (régionalisation), l'élaboration de modèles pour chaque situation locale peut s'avérer impraticable ou inadéquate s'il n'est pas possible de généraliser à l'ensemble du territoire (Mertens et Lambin 1997).

Un autre aspect important est l'échelle de temporelle. Les modèles dont la calibration est limitée à deux dates t_0 et t_1 peuvent couvrir différentes phases de dynamique, et masquer ainsi un changement de tendance. Par exemple, dans le cas d'une période englobant une phase de hausse puis une phase de stabilisation, le résultat global sera une hausse ce qui masquera le changement de dynamique vers une stabilisation. Ceci a des conséquences directes dans le cas de la simulation de scénarios futurs, lorsqu'il est censé prolonger les tendances récentes.

Par ailleurs, la validation d'un modèle peut comprendre les étapes de vérification, de calibration et de validation. Selon (Coquillard et Hill 1997), la validation du modèle comprend les étapes de : i) vérification (le modèle fonctionne-t-il correctement ?), ii) l'calibration (le modèle simule-t-il correctement une situation connue ?) et iii) validation (le modèle simule-t-il correctement une situation inconnue ?). La calibration consiste généralement à adapter les valeurs de paramètres d'un modèle afin qu'il donne les résultats les plus proches de la réalité observée. La validation consiste à paramètres constants à appliquer le modèle sur une autre période de temps ou un autre espace afin d'évaluer si les résultats sont proches des observations.

Les processus de changement d'occupation du sol sont directement ou indirectement contrôlés par les décisions humaines, et comme les processus cognitifs individuels des

acteurs ne peuvent être connus dans leur intégralité, les occupations du sol qui en résultent sont par nature incertaines. En ce sens, en raison de cette complexité, il est implicite que les modèles ne peuvent générer des résultats parfaitement précis (van Vliet et al. 2016). De plus, des erreurs fréquentes dans les données peuvent être mises en évidence, comme les classifications de l'occupation du sol et les imprécisions dans les variables d'entrée, ainsi que les incertitudes inhérentes aux algorithmes des modèles (Pontius et Neeti 2010; Pontius et Spencer 2005). Selon (Edmonds et al. 2019), parmi les principales raisons pour lesquelles la prédiction de systèmes sociaux complexes échoue est i) le manque des processus qui devraient être inclus dans le modèle, ii) le manque de données de qualité et iii) avoir les bonnes données, mais avec une grande quantité de bruit. C'est la raison pour laquelle il convient de recourir à différents types de validation, tant celles fondées sur la précision lorsque des mesures existent que les évaluations qualitatives réalisées par un expert (validation conceptuelle).

En considérant des validations des modèles d'occupation du sol, basées sur la précision, en principe, deux types de validation peuvent être distingués : (i) la validation de l'emplacement des changements et (ii) la validation de la structure du paysage. Dans le cas de la validation de l'emplacement des changements, plus fréquemment effectuée, on utilise généralement la précision de la simulation par rapport aux données observées dans le même t , ce qui est nommé *hard prediction*. La *soft prediction* quant à elle peut tenir compte du potentiel de changement (carte des probabilités par exemple) par rapport aux données observées (Mas et al. 2011).

Dans les deux cas, un modèle basé sur des cellules (pixels), la validation est influencée par l'échelle spatiale à laquelle la carte simulée et la carte observée sont considérées. Ainsi, une validation qui tient compte d'une comparaison cellule par cellule peut donner lieu à une faible précision, mais si elle est considérée à une échelle plus grossière, la carte simulée peut présenter une similarité (Costanza 1989). Ceci peut être évalué avec la méthode de validation avec plusieurs tailles des fenêtres où sont calculées les similitudes simulées et observées sur la carte. La similitude des cellules peut être considérée sans tenir compte de la position des cellules dans la fenêtre (Costanza 1989), ou en considérant par exemple que les cellules les plus éloignées du centre ont un poids décroissant (similitude floue) (Hagen 2003).

Bien que cela nous permette d'évaluer dans quelles échelles le modèle offre la meilleure prédiction, il est toujours difficile de porter un jugement avec un seul résultat. Pour cette raison, il est recommandé que les cartes simulées et observées soient

également comparées à la similarité d'autres modèles ou à la similarité d'un modèle nul. Un modèle nul peut être une carte avec une distribution aléatoire, mais avec les mêmes fréquences de classes que la carte observée (Costanza 1989). En d'autres termes, il ne présente pas le mécanisme testé et peut montrer si le modèle a un potentiel prédictif plus élevé qu'une distribution aléatoire ou non (Caswell 1988; Tayyebi 2013).

En ce qui concerne la validation sur la structure du paysage, cette méthode peut compléter la procédure de validation car elle ne dépend pas de l'emplacement des résultats. En effet, il est souhaitable d'obtenir non seulement une performance adéquate de la localisation des changements, mais aussi une bonne représentation de la structure du paysage, en particulier lorsque le modèle implique une résolution spatiale fine, dans laquelle les changements peuvent être multimodaux en fonction des différents agents du changement (Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin 2002). Cette validation peut être effectuée en comparant les cartes observées et simulées avec des indices de structure du paysage liés à la surface, à la quantité, à la forme, à la fragmentation, à la connectivité et au voisinage des patches. Toutefois, l'ajout de structures spatiales au modèle peut réduire la précision de l'emplacement des changements, car le processus d'allocation de patches de formes et tailles spécifiques devient plus restreint sur la carte de base (Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin 2002).

Enfin, il est essentiel de procéder à une validation « conceptuelle » du modèle qui, d'après (Rykiel 1996), doit s'assurer que les hypothèses du modèle conceptuel sont correctes ou justifiables et que la représentation du problème ou du système, sa structure, sa logique, ses mathématiques et ses relations causales sont appropriées.

3. Simulation des scénarios futurs

Contrairement au sens commun, la simulation de scénarios futurs n'a pas pour vocation de prédire la réalité, mais d'aider à mieux comprendre les changements spatio-temporels complexes de la relation homme-nature, en produisant des informations utiles à la prise de décision (Paegelow et al. 2004). La simulation de scénarios futurs peut fournir une gamme de conséquences possibles d'un phénomène sur le paysage en fonction d'hypothèses spécifiques (Perz et al. 2009).

La simulation de scénarios est toujours critique en raison de l'hypothèse que les mêmes processus qui se sont produits au cours de la période d'observation passée

continueront de se produire au cours de la période de simulation future, ce qui est peu probable en raison des caractéristiques qui découlent des interactions multiples du système complexe et contingent au fil du temps.

En ce sens, les états possibles du système peuvent être simulés en variant les différentes parties du système pour générer des résultats qui peuvent être discutés dans une approche qui peut commencer par la question « et si ? » (Walsh et al. 2008).

L'un des principaux intérêts de cette procédure est d'analyser quels sont les scénarios souhaitables et non souhaitables, et d'évaluer quels sont les facteurs qui peuvent conduire à l'un et à l'autre et ainsi guider les politiques et actions publiques et sociales (Perz et al. 2009). Selon Alcamo (2001), les principaux types de scénarios peuvent être résumés en scénarios qualitatifs, quantitatifs, exploratoires, anticipatifs et *baseline*.

Les **scénarios qualitatifs** décrivent les futurs possibles sous forme de diagrammes, de phrases ou de textes narratifs, connus sous le nom de « *storylines* ». Les **scénarios quantitatifs** utilisent principalement des informations numériques, des tableaux et des graphiques qui sont généralement issus de modèles computationnels. Une autre façon de classer les scénarios est de choisir entre les **scénarios exploratoires** et les **scénarios d'anticipation**. Les scénarios exploratoires commencent dans le présent et explorent les tendances de l'avenir, c'est-à-dire une séquence d'événements émergents, tandis que les scénarios d'anticipation partent d'une vision prédéfinie du futur, et travaillent à l'inverse dans le temps pour visualiser comment ce futur peut se produire. Enfin, un **scénario baseline** peut être conçu comme le scénario de référence, c'est-à-dire la poursuite des conditions observées lors de la phase actuelle ; par exemple, un scénario dans lequel il n'y a pas de renforcement ou d'affaiblissement de l'intervention politique.

En ce qui concerne la validation des scénarios, une validation par précision n'est évidemment pas possible, car il n'y a pas de références futures. Cependant, il existe des techniques qui permettent d'extrapoler l'exactitude « anticipée » des prédictions, en considérant qu'il y a un déclin prévisible de l'exactitude dans le temps (Pontius et Spencer 2005). D'où l'importance d'utiliser la validation « conceptuelle », déjà discutée ci-dessus, c'est-à-dire qu'un expert peut évaluer les résultats par rapport à la robustesse, la stabilité en cours de fonctionnement et la cohérence entre différents modèles qui utilisent le même ensemble de données et paramètres (Paegelow et al. 2015).

4. La modélisation de la dynamique d'occupation du sol en Amazonie

4.1. Facteurs qui conditionnent les changements d'occupation du sol

Plusieurs travaux ont été réalisés en Amazonie sur la dynamique du front pionnier, ils ont été favorisés par la disponibilité de séries historiques de capteurs embarqués sur des satellites, tels que ceux de la famille Landsat. Dans ce contexte, les relations de la déforestation à plusieurs facteurs potentiels ont été largement discutées.

A l'échelle de l'Amazonie brésilienne, les travaux visant à déterminer les facteurs de déforestation en tant qu'entrés dans des modèles économétriques (Andersen et Reis 1997; Margulis 2003; Pfaff 1999; Reis et Guzman 1992) ont analysé les facteurs démographiques, de prix et production agricole et d'infrastructure tels que l'accessibilité par des routes. L'agrégation des données de ces travaux a été faite en utilisant les municipalités, unités dans lesquelles les données du recensement sont collectées. Dès le début, ces études ont attiré l'attention sur le rôle des politiques de développement, de la démographie et des routes comme moteurs importants de la déforestation.

Nous pouvons citer (Margulis 2003), par exemple, qui montre que les routes jouent un rôle fondamental dans l'intensification de la production. Une deuxième approche prend en compte l'agrégation de facteurs dans des fenêtres de taille régulière, ce qui favorise l'analyse temporelle des données, puisque les surfaces municipales changent avec le temps. Kirby et al. (2006) utilisent des fenêtres carrées avec 50 km de côté, tandis que Aguiar, Câmara, et Escada (2007) utilisent des fenêtres de 25 km. Soares-Filho et al. (2006) procèdent de manière similaire, mais avec des fenêtres de 1 km, avec pour objectif final une simulation dynamique et scénarios futurs. Dans ces travaux, les routes sont également fortement associées à la déforestation, mais Aguiar, Câmara, et Escada (2007) attire l'attention sur le fait que la distance par rapport aux centres urbains est un facteur aussi important.

Pendant que Pfaff (1999) et Aguiar et al. (2007) soulignent que les facteurs biophysiques peuvent jouer un rôle pertinent dans la dynamique de la déforestation, en particulier dans la région de l' « arc de déforestation », les travaux de Laurance et al. (2002), Kirby et al. (2006) et Soares-Filho et al. (2006) ne démontrent pas une

influence importante de facteurs biophysiques tels que le sol et la topographie.

A une échelle plus fine, Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin (2002) présente l'un des premiers essais avec le modèle DINAMICA en simulant le changement d'occupation du sol dans deux zones de colonisation par des petits agriculteurs au nord de Mato-Grosso : Terra Nova (1408 km²) et Guarantã (1274 km²). Ils ont servi de cartes d'occupation du sol d'entrée de deux périodes (1986-1991 ; 1991-1994), avec les classes déforestation, régénération et forêt. La création de la carte des probabilités de transition a été réalisée au moyen d'une régression logistique avec des variables spatiales, et comme résultat, ils mettent en évidence le rôle du réseau routier dans l'organisation spatiale de la déforestation. Bien que les facteurs biophysiques soient pris en compte dans le modèle, ils ne sont pas discutés dans les résultats.

Alors que de nombreuses études considèrent le rôle fondamental des routes comme définissant la localisation de la déforestation, la définition des routes, en revanche, peut être influencée par des facteurs biophysiques, notamment le relief. Arima et al. (2005), dans une modélisation de l'emplacement des routes en Amazonie, ils considèrent que les aspects de forte pente et de zones inondables sont fondamentaux pour son tracé.

L'étude de Barni, Fearnside, et Graça (2014) est l'une des rares études qui considère la qualité du sol pour la localisation de la déforestation. Mais dans l'étude, ce facteur est cité comme l'une des raisons de la difficulté d'extrapoler les taux de déforestation entre des différentes régions. D'un autre côté, dans une étude portant sur la dynamique du front pionnier dans la région de Marabá-PA, Dosso et al. (2005) affirme que la qualité des sols n'a aucune influence sur la déforestation. D'autres travaux soulignent que les aspects tels que la qualité des sols sont rarement une priorité aux premiers stades du front pionnier, lorsque des facteurs tels que la consolidation de la propriété foncière et les revenus initiaux garantis par l'élevage extensif de bétail sont plus importants (Tourrand et al. 2006; Vosti, Witcover, et Carpentier 2002).

En ce sens, dans le processus de déforestation, le rôle des facteurs biophysiques est ambigu, la plupart les considérant comme des facteurs d'importance mineure. On estime que des travaux avec des données spatiales plus fines sur les sols, l'hydrologie et le relief (qui sont rares en Amazonie même dans les travaux au niveau régional), peuvent mieux définir ces relations. La plupart des études se concentrent sur la déforestation et non sur la dynamique du front pionnier dans son ensemble. Si l'on considère les trajectoires d'occupation du sol après la déforestation, les facteurs

biophysiques semblent prendre une grande importance dans les décisions. Par exemple, dans une étude à l'échelle globale de la dynamique des forêts tropicales, (Asner et al. 2009) estiment qu'environ 70 % de la régénération forestière se produit dans des milieux dont la topographie est défavorable à l'agriculture, comme les pentes abruptes et les milieux montagneux. L'un des travaux qui se concentre non seulement sur la déforestation, mais aussi sur la diversité des transitions qui existent sur le front pionnier amazonien est celui de Aguiar (2006), dont l'analyse statistique dans des fenêtres de deux tailles : de 100 km et 25 km, avec 40 facteurs, en relation avec l'occupation du sol comme variable dépendante, a montré que le lien avec les marchés nationaux est le facteur principal pour l'établissement du front pionnier. Et c'est l'interaction de ces facteurs de connexion avec des facteurs socio-économiques et biophysiques qui favorise une dynamique intrarégionale hétérogène.

A une échelle plus fine, Dosso et al. (2005) observent que à Marabá, dans les milieux à sols plus fertiles et d'autres plus pauvres (hétérogénéité biophysique), il y a une tendance à développer l'agriculture (mécanisée ou non) sur les sols les plus fertiles et l'élevage sur les moins fertiles. Dans des milieux homogènes mais avec des sols peu fertiles, ils ont constaté que l'élevage est le résultat le plus fréquent du développement du front pionnier, même en présence d'incitations à la production agricole. Dans un contexte de grandes exploitations et de frontière agricole consolidée, Maeda et al. (2011) aussi décrit que la qualité du sol est pertinente pour les transitions post-déboisement, en particulier dans le cas de la transformation des pâturages en cultures mécanisées comme le soja.

En ce sens, il est clair la progression de l'importance des facteurs liés à l'eau, à la topographie et au sol pour la dynamique d'occupation du sol à mesure que le front pionnier évolue. Cependant, même avec des relations plus évidentes, les discussions sur les implications des facteurs biophysiques dans l'espace, la gestion différenciée des acteurs et les conséquences futures possibles sur l'organisation du paysage dans le contexte des modèles sont rares. Ainsi, la plupart des études portant sur la dynamique de l'occupation du sol en Amazonie s'intéressent davantage au processus de déforestation et moins aux trajectoires d'occupation du sol.

Les ressources biophysiques, bien qu'elles puissent présenter des relations avec la déforestation et d'autres changements dans certaines études, sont souvent considérées d'une manière simplifiée et homogène, sans discussion plus détaillée de son rôle dans les stratégies des acteurs concernant l'occupation du sol. Nous pouvons dire que de nombreux modèles sont très « généreux » par rapport au potentiel

biophysique de la terre, susceptible d'être valorisé. Peu d'entre eux considèrent l'évolution du front pionnier comme un processus intégré de différents acteurs et activités agricoles. Or, cela est fondamental tout au long de l'arc de déforestation en Amazonie, la prise en compte du potentiel agronomique de l'espace considéré permet de mieux orienter les futures décisions vers une résolution des problèmes environnementaux qui présente un impact minimal sur la production agricole.

4.2. La simulation des scénarios d'occupation du sol en Amazonie

La reconnaissance des facteurs qui contrôlent la dynamique de l'occupation du sol permet de modéliser la dynamique et de produire des simulations passées et futures, tel que discuté ci-dessus. Soares-Filho et al. (2006) ont développé un modèle (DINAMICA) pour l'ensemble de l'Amazonie, composé de deux parties : l'une relative à la définition des sous-régions et au calcul des taux de transition pour chaque région, et l'autre qui est alimentée par la première et qui est un simulateur de changement spatial basé sur des cartes de probabilité de transition pour situer les changements. Les cartes de probabilité de transition sont créées en croisant les transitions effectuées et une série de facteurs socioéconomiques et biophysiques distribués dans l'espace.

En même temps, le modèle intègre également un générateur de routes, pour simuler les effets de l'expansion continue du réseau routier, une caractéristique de la dynamique du front pionnier. Sur la base des données de 1997 à 2012, deux scénarios d'occupation du sol future ont été simulés : « *business-as-usual* » et « gouvernance ». Dans la première situation, les taux observés sur la période 1997-2012 sont pris en compte, ainsi qu'un facteur d'accélération, dû à la mise en œuvre des routes planifiées. Dans la seconde situation, une réduction de la déforestation est forcée, simulant l'intervention de l'Etat dans la protection des forêts, notamment sous la forme de créations d'aires protégées. Les résultats montrent que dans le scénario *business-as-usual*, l'Amazonie pourrait perdre environ 50 % de sa couverture forestière actuelle d'ici 2050. Dans le scénario de gouvernance, la déforestation pourrait être réduite jusqu'à 65%. Ce modèle a servi de base à d'autres études, notamment sur l'influence de l'expansion de l'agriculture sur le changement climatique régional (Oliveira et al. 2013).

Aguiar (2006) utilise une adaptation du modèle CLUE pour générer des scénarios futurs pour l'Amazonie. Ce modèle est composé d'un module de demande, qui projette

la quantité de changements de chaque classe d'occupation du sol en fonction des données passées, de la construction de scénarios ou de modèles économiques ; et d'un module d'allocation, chargé d'affecter les changements dans un espace cellulaire fixe sur deux échelles spatiales : large et fine. La répartition dépend de l'aptitude de chaque cellule, préalablement définie par des relations empiriques entre les classes d'occupation du sol et des facteurs spatiaux (Veldkamp et Fresco 1996). Cinq scénarios possibles ont été explorés, en fonction d'hypothèses tenant compte, entre autres, de l'évolution des facteurs d'accessibilité, des marchés, des aires protégées et de l'application de la réglementation environnementale. Parmi ces projections, les auteurs estiment un taux moyen de déboisement de près de 30.000 km² par an jusqu'à 2020. Par la suite, le modèle a été adapté à l'environnement de programmation TerraME (INPE), ce qui a permis d'explorer la modélisation multi-échelles, telle que celle réalisée par Moreira et al. (2009). Une variante de ce modèle, LuccME, a été utilisée pour explorer deux scénarios tenant compte des émissions de gaz à effet de serre en fonction des changements l'occupation du sol: scénario « *baseline* » et scénario « objectif de réduction des émissions » (Assis et al. 2011).

D'autres études utilisant la simulation de scénarios ont également été réalisées à l'échelle amazonienne, comme dans le cas de Lapola et al. (2011), qui a utilisé le modèle LandSHIFT pour évaluer l'impact du changement d'occupation du sol sur les aspects climatiques régionaux. Cependant, Dalla-Nora et al. (2014) soulignent qu'aucun de ces modèles n'a permis de prévoir une réduction drastique de la déforestation après 2004, ce qui révèle la nature non linéaire et difficile à prévoir du front pionnier (Figure 16).

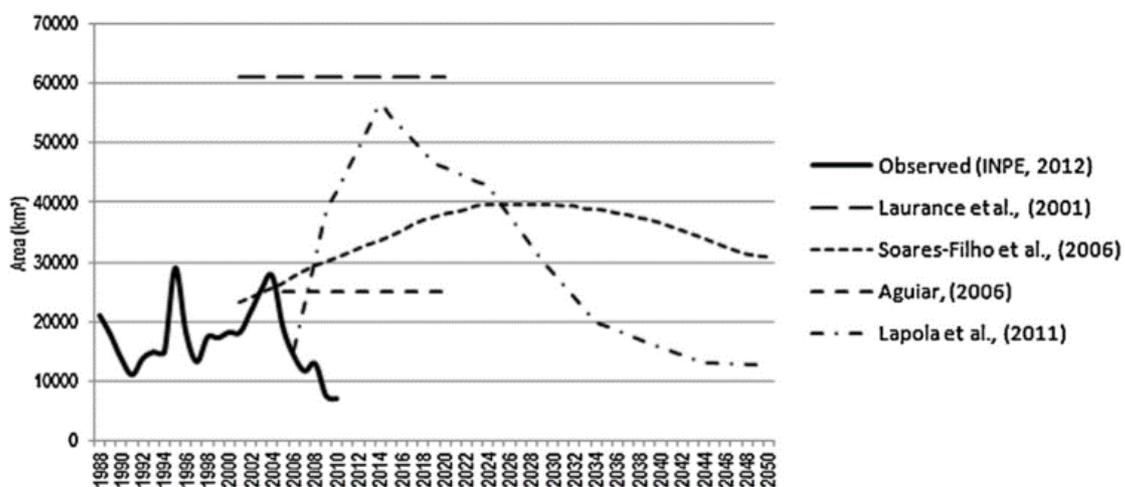


Figure 16. Scénarios simulés de déforestation pour l'Amazonie, basés sur différents modèles. Source : Dalla-Nora et al. (2014).

Des simulations pour des secteurs spécifiques de l'Amazonie ont également été réalisées, permettant de considérer les processus spatiaux à une échelle plus fine par rapport à l'ensemble de la zone constituée par le biome amazonien. Maeda et al. (2011) utilise par exemple le modèle DINAMICA pour simuler des scénarios passés et futurs pour un bassin hydrographique en limitrophe du parc national du Xingu (bassin du fleuve Suiá-Miçu), une importante zone d'expansion de l'agriculture mécanisée, qui comprend environ 20.000 km².

Utilise comme données d'entrée des cartes d'occupation du sol de 2000 et 2005, dérivées d'une classification basée sur le capteur TM-Landsat 5 (30 m), comprenant les classes forêt, pâturage et agriculture. Les probabilités locales de changement ont été calculées au moyen de cinq variables d'organisation territoriale (distance aux centres urbains, distance aux aires protégées routières, distance aux pâturages, distance aux terres cultivées et deux variables biophysiques (distance au réseau de drainage, type de sol).

Ce travail montre que dans une situation de front pionnier dans la consolidation et l'intensification des pratiques, l'importance des distances routières est réduite par rapport à la déforestation, mais au contraire, elle est importante pour l'expansion de l'agriculture. Il montre également que et qu'il y a une relation entre le type de sol et l'expansion de l'agriculture, mais il ne discute pas cette relation. Avec une approche mixte de scénarios *baseline* et d'anticipation, deux scénarios ont été explorés pour 2015, l'un représentant la poursuite des changements observés dans la période observée, et l'autre où les taux de déforestation sont volontairement réduits à zéro. Bien que ce modèle ne tienne pas compte des variables économiques, sa contribution à l'identification de règles spatiales (allocation de probabilités spatiales) dans une zone d'expansion de la culture de grains se démarque. Cependant, elle ne considère pas les différences dans la dynamique entre les grandes et les petites propriétés, ni la forêt secondaire, une occupation du sol fondamentale dans la dynamique du front pionnier.

Barni, Fearnside, et Graça (2014) ont appliqué le modèle AGROECO, mis en œuvre avec la plate-forme Dinamica EGO, à la partie sud de l'État de Roraima (98.995 km²) pour simuler la déforestation et calculer la perte de carbone en réponse à la reconstruction de l'autoroute BR-319. Le modèle AGROECO utilise le modèle DINAMICA, à la différence près que les taux de transition et les routes spatiales variables sont des données provenant de modèles externes. Les taux de transition sont définis dans Vensim, une plateforme de modélisation par simulation continue ou discrète. Dans ce cas, les taux de transition de base (2004-2007) ont été complétés

par un facteur d'évolution routière (superficie forestière disponible pour les routes) et un facteur d'immigration (taux de déforestation dans les colonies), basés sur la dynamique des colonies Roraima entre 1996 et 2001. La variable spatiale des routes est réalisée par un module séparé (construction de routes), qui simule la création de nouvelles routes à chaque étape de la simulation. Dans ce contexte de pré-front, les données Landsat-TM ont été utilisées pour définir les classes forêt et non forêt. Les variables biophysiques utilisées étaient le type de sol, la végétation, l'altitude et la topographie, tandis que les variables non physiques (et dynamiques) étaient la distance par rapport au déboisement précédent, la distance par rapport aux routes, les *assentamentos* et les zones protégées. Dans une approche par scénario *baseline*, quatre scénarios ont été explorés sur la base de la reconstruction ou non de la BR-219, la construction ou non de routes locales, la définition ou non d'unités de conservation et l'inclusion ou non du facteur de migration.

Le travail a le mérite de réaliser une simulation spécifique de l'évolution d'un début de front pionnier, basée sur la mise en œuvre de projets d'implantation gouvernementale ou de colonisation spontanée par de petits agriculteurs. Dans l'étude, ils soulignent que l'extrapolation des taux de déforestation n'est pas simple et implique plusieurs facteurs, dont des facteurs biophysiques comme la fertilité et la pente. Dans l'un des scénarios, ils décrivent que certaines régions peuvent être moins affectées par la déforestation en raison de la faible fertilité des sols. Toutefois, ils ne précisent pas s'il s'agit d'une relation observée dans les données d'entraînement.

Dans la région BR-163, Verburg et al. (2014) ont évalué l'influence de variations des prix des *commodities* en simulant des scénarios dans trois secteurs, chacun ayant un degré de développement différent sur le front pionnier. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un modèle spatialement explicite, il s'agit d'une étude assez complète sur les différentes étapes du développement du front pionnier. Les trois secteurs représentent l'agrégation de certaines municipalités, ce qui a permis d'utiliser les données du recensement pour estimer les superficies cultivées et représentent différents stades de développement de la région BR-163 : zone sud d'agriculture consolidée (36.285 km²) ; zone centrale phase intermédiaire (19.473 km²) et zone nord représentant la phase pionnière (226.657 km²). Le modèle utilisé, LUSMAPA, utilise des équations différentielles et des opérations conditionnelles pour simuler les changements d'occupation du sol. Ils ont élaboré des scénarios de variation des prix et des scénarios politiques. En ce qui concerne les scénarios de prix, une augmentation des prix de la viande et du soja peut accroître la déforestation, mais la différence de

déforestation entre les prix élevés et les prix bas est faible. Cela s'explique par le fait que les zones de front actives se situent dans le secteur nord où la déforestation est davantage influencée par l'immigration. Toutefois, comme il ne s'agit pas d'un modèle spatialement explicite, les variables de localisation des changements d'occupation du sol ne sont pas utilisées et, par conséquent, les contraintes et potentiels biophysiques ne sont pas non plus prises en compte.

Certaines approches ont tenté d'élaborer des modèles couplés, en tenant compte de l'interaction des processus qui se produisent à différentes échelles spatiales, comme c'est le cas des travaux de (Gollnow et al. 2018). Cet auteur a utilisé le modèle LandSHIFT à l'échelle de l'état de Mato-Grosso et du Pará, couplé avec le modèle hallucR, qui utilise une régression logistique pour simuler des scénarios prospectifs pour la région du corridor de la BR-163 (*buffer* de 100 km). Le travail a utilisé deux approches. Dans un premier temps, avec le modèle LandSHIFT, des scénarios prospectifs ont été générés au niveau régional pour les Etats de Mato-Grosso et du Pará, puis les résultats de cette simulation ont servi d'entrées pour le modèle sous-régional le long de la route BR-163. Le modèle LandSHIFT est composé de différents modules qui représentent différents sous-systèmes d'occupation du sol. L'attribution des changements se fait de façon séquentielle : peuplements, agriculture et pâturages, chacun sur les zones les plus probables. Ces probabilités sont définies par une analyse multicritère.

Ce modèle a utilisé des données sur d'occupation du sol provenant d'une intégration des statistiques du recensement et des données phénologiques MODIS de 2010. Les variables spatiales utilisées étaient la pente, la densité de drainage, la distance des routes, l'altitude, la production agricole et la densité de bovins. Le modèle hallucR, à son tour, utilise le meilleur groupe de variables issus d'une analyse de régression logistique pour estimer le potentiel de changement (variables pente, distance du réseau de drainage, distance des routes, précipitations, distance des villes, aptitude à la mécanisation et zones protégées). L'allocation des changements se fait selon une approche concurrentielle entre les classes d'occupation du sol, qui est calibrée en fonction d'une matrice de persistance des classes d'occupation du sol (avec données TerraClass de 2014, avec les classes terres cultivées, pâturage, zones urbaines, forêt, végétation secondaire et l'eau). Deux scénarios, *trend* et *sustainable development*, initialement élaborés sous *story lines*, ont été transformés en quantités de transformation de d'occupation du sol et en changements démographiques.

Ces quantités ont été introduites dans le modèle LandSHIFT pour produire des

scénarios régionaux spatialement explicites, et ces données ont été utilisées comme entrées dans le modèle sous-régional alucR du corridor BR-163. Cette approche couplée a permis de saisir les processus de changement d'occupation du sol indirects, comme la conversion des pâturages en terres agricoles qui a entraîné l'expansion des pâturages ailleurs. Elle a montré que si des modèles sous-régionaux (comme dans le cas, le modèle individuel pour le corridor de la BR-163) peuvent être plus efficaces pour saisir les dynamiques locales, ils peuvent surestimer les changements d'occupation du sol, car tous les changements ont des limites précises.

Cependant, il n'utilise pas des données foncières comme entrée, ce qui pourrait préciser les changements au niveau sous-régional en permettant l'identification des différents acteurs. Ainsi, bien qu'il utilise des données à échelle relativement fine dans le modèle sous-régional, il n'y a aucune discussion sur le rôle des facteurs biophysiques dans l'occupation du sol, ni dans les scénarios discutés. Schaldach et al. (2018) développe une approche similaire en utilisant les états du Pará et du Mato-Grosso comme modèles régionaux et deux bassins fluviaux (Rio Jamanxim et Rio das Mortes) comme modèles sous-régionaux. L'objectif dans ce cas était d'étudier les impacts des changements d'occupation du sol sur les émissions de GES et l'hydrologie dans les bassins. Montrant ainsi qu'il existe un intérêt croissant pour l'impact du changement d'occupation du sol sur les services environnementaux, directement liées aux ressources biophysiques.

Synthèse de la partie I

Cette première partie traite des principaux modèles qui tentent d'expliquer la dynamique du front pionnier, en commençant par les modèles théoriques au début, en passant par les différents modèles empiriques qui permettent d'évaluer l'interaction des facteurs de manière dynamique par moyen des simulations. En se basant sur des modèles théoriques politiques, démographiques et par étapes discutent des relations de pouvoir entre les intérêts privés, les institutions gouvernementales et les différentes classes de agriculteurs. Ces relations se situent à différents niveaux, du local à global. La discussion porte sur le marché de produits agricoles, bien sûr, mais aussi sur le marché foncier. Dans ces approches, les facteurs biophysiques ne sont pas très présents. Le territoire à travers lequel le front est développé est considéré comme homogène par rapport aux aspects biophysiques et, s'il existe des limitations naturelles, telles que la faible fertilité des sols, celles-ci sont homogènes dans l'espace et affectent tous les acteurs de manière égale. L'approche des systèmes complexes donne plus de place au rôle du support biophysique dans la mesure où elle le considère comme le moyen auquel les acteurs s'adaptent et changent.

Mais c'est en entrant dans le détail des productions agricoles que les ressources biophysiques émergent comme le support physique fondamental sur lequel une bonne partie des décisions des agriculteurs sont prises. Après la déforestation, la « découverte » de la terre et de ses caractéristiques entre progressivement dans la logique des producteurs, dans la définition du type de production et dans la gestion, avec plus d'importance pour certaines productions, et moins pour d'autres. Si l'on considère les modèles empiriques et de simulation du front pionnier amazonien, les facteurs biophysiques sont presque toujours présents. L'altitude, la pente, le type de sol et le drainage sont des variables standard utilisées dans les modèles. Cependant, la plupart des études ne trouvent pas de relations significatives entre les variables biophysiques et la déforestation, l'objet de la plupart des études sur le front pionnier. Ceci peut être attribué, d'une part, au fait que ces facteurs sont moins importants pour le processus de déforestation dans la plupart des cas. Mais d'autre part, elle peut également être influencée par la précision réduite des données spatiales utilisées, en particulier pour les travaux à grande échelle.

Par conséquent, il n'y a pas de discussion approfondie sur le rôle des ressources biophysiques sur le front pionnier. Même dans les études qui traitent des processus qui se produisent après la déforestation, c'est-à-dire lorsque le potentiel biophysique a

parfois une influence claire sur les décisions, ces facteurs sont examinés de manière beaucoup plus succincte que les facteurs politiques et économiques. La partie II de ce travail nous permettra donc d'analyser le rôle des ressources biophysiques dans le long développement du front pionnier à Paragominas, en considérant le niveau plus détaillé de cette dynamique, qui est l'agriculteur. Dans la partie III, le rôle des ressources biophysiques sera évalué dans le contexte de deux modèles : un modèle de simulation dynamique et un modèle de groupes logiques d'utilisation des ressources biophysiques dans le front pionnier.

PARTIE II - Ressources et contraintes biophysiques
dans la dynamique d'occupation du sol des
différents acteurs agricoles à Paragominas

Introduction de la partie II

La partie II de la thèse est une analyse centrée sur le territoire de Paragominas, afin d'en présenter son évolution en tant que front pionnier, sa production agricole et les acteurs impliqués. Le chapitre 3, dans sa première section, examine les caractéristiques biophysiques et sociales de Paragominas. La deuxième section de ce chapitre présente une analyse plus détaillée des principales activités agricoles, l'historique de ces activités, des logiques d'utilisation et de gestion des terres, les politiques publiques et le marché. Le chapitre 4 décrit les logiques d'utilisation des ressources biophysiques par les agriculteurs, elles ont été identifiées au moyen d'entretiens menés sur le terrain. Les données spatiales y sont présentées et la méthodologie de l'entretien y est décrite. Les résultats des entretiens et les relations avec les variables spatiales sont présentés en agrégeant les données par type de production.

Chapitre 3 – Paragominas : un territoire aux multiples fronts pionniers

1. Localisation

Selon Thalès et Pocard-Chapuis (2014), Paragominas fait partie du « front pionnier de l'intensification », c'est-à-dire d'un front stable (sans déforestation significative) et avec des espaces qui s'inscrivent de plus en plus dans une logique post-pionnière d'agriculture intensive. Dans l'étude de Schielein et Börner (2018) la région est classée comme « front ancien » : des nouveaux territoires créés en périphérie Sud et Est du biome amazonien, comprenant un centre urbain entouré d'une mosaïque de forêts primaires et de zones agricoles accessibles par un réseau de routes asphaltées ou non.

La municipalité de Paragominas couvre un vaste territoire qui peut être considéré comme ayant des zones à différents stades de développement d'un front pionnier. Depuis la zone centrale, près du centre urbain et des routes asphaltées, on constate une couverture forestière réduite, une densité du réseau routier secondaire (pistes en terre) et une agriculture intensive et diversifiée. En s'éloignant du centre, le paysage change jusqu'à des espaces où les cultures de grain sont plus rares avec de grands fragments de forêt (Figure 17).

Paragominas a également une distribution foncière irrégulière et diverse, avec une dominance des grandes propriétés, mais avec des concentrations de petites exploitations familiales dans des projets de colonisation (*assentamentos*). Ce cadre permet d'analyser le comportement dans ces zones à différents degrés de développement et conditionnées par les relations avec le centre. Bien que chaque front pionnier soit un cas unique, nous cherchons à identifier des mécanismes et des schémas réguliers qui peuvent être généralisés à un contexte plus large.



Figure 17. La municipalité de Paragominas par rapport au Brésil et les principales urbanisations de la région. Source : IBGE (2018) ; TerraClass (2014).

Dans l'objectif d'identifier les principaux facteurs de changement d'occupation du sol dans la municipalité de Paragominas, une étude bibliographique a été réalisée mobilisant des travaux conduits ailleurs en Amazonie ou spécifiquement dans la municipalité. Cette étude s'organise selon les éléments suivants dans leurs liens avec la production agricole et l'évolution des paysages ruraux :

- Aspects biophysiques (ou physiographiques) : caractéristiques géologiques, géomorphologiques, pédologiques, phyto-physionomiques, climatiques et hydrologiques.
- Aspects démographiques et économiques actuels. Dynamique historique des activités agricoles et adaptation de la gestion au contexte biophysique : agriculture familiale, l'exploitation illégale de bois, agriculture entrepreneuriale et plantation d'arbres pour la production de bois. Pour chaque activité, nous avons étudié l'historique de l'activité dans la municipalité, les populations concernées, les politiques foncières, incitatives et environnementales, l'évolution de la gestion et les relations de celles-ci avec les ressources naturelles. Afin d'enrichir cette discussion, les informations tirées des deux travaux de terrain menés en 2016 et 2017 dans la commune ont également été utilisées.

2. Caractérisation biophysique

2.1. Cadre géologique et géomorphologique

Le territoire de Paragominas se situe dans le contexte du bassin sédimentaire de Grajaú, qui comprend des formations sédimentaires de la série Itapecurú (du Albiano-Cénomanién) et la formation d'Ipixuna (Crétacé Supérieur - Tertiaire). La série Itapecurú est composée de grès très friables avec des intercalations d'argilites et de niveaux de conglomérats avec des cailloux de quartz, passant progressivement au nord vers la formation Ipixuna, composé de grès kaoliniques et d'argilites fluviestuariennes (Kotschoubey et al. 2005). Les deux formations sont couvertes par des cuirasses latéritiques paléogènes, développées principalement sur les restes de la surface d'aplanissement sud-américaine. C'est une zone dont les sommets marquent une surface régionale plate. Ces formations superficielles constituent la Province de Bauxite de Paragominas, qui comprend, au sud, des manteaux en latérite ferrugineuse, et au centre et au nord, principalement des alumines et de la bauxite. Au-

dessus, une argile sédimentaire atteignant parfois 20 m d'épaisseur, appelée « argile de Belterra », recouvre les cuirasses. La cartographie réalisée par (Vasquez, Sousa, et Carvalho 2008) n'individualise pas l'argile de Belterra en tant qu'unité lithologique spécifique (Figure 19), mais décrit les surfaces latéritiques. Selon cette cartographie, les cuirasses ferrugineuses et, par conséquent, l'argile de Belterra, se superposeraient à la formation d'Ipixuna. La série Itapecurú apparaît dans les parties sud et à l'est de la municipalité, où les plateaux et les cuirasses ferrugineuses sont plus rares.



Figure 18 : Photo aérienne montrant les principales unités de relief à Paragominas. Photo prise par drone : Pocard-Chapuis et al. (2019).

Le relief actuel est marqué par des plateaux qui s'abaissent en direction nord-ouest. Leur altitude varie entre 360 et 400 m dans la Serra do Gurupi, et 90 à 100 m à Ipixuna do Pará. Les plateaux, appelés localement "*chapadas*", sont séparés par des vallées pouvant atteindre plusieurs kilomètres de large (Figure 18), mais le contraste d'altitude entre les plateaux et le fond des vallées diminue vers le nord (Laurent, Pocard-Chapuis, et al. 2017).

À Paragominas, les sommets se situent entre 160 et 190 m et les fonds des vallées entre 45 et 80 m. Dans la transition entre les plateaux et les vallées, les zones de forte pente et de forte dissection sont courantes, contrôlées principalement par les niveaux latéritiques résistants.

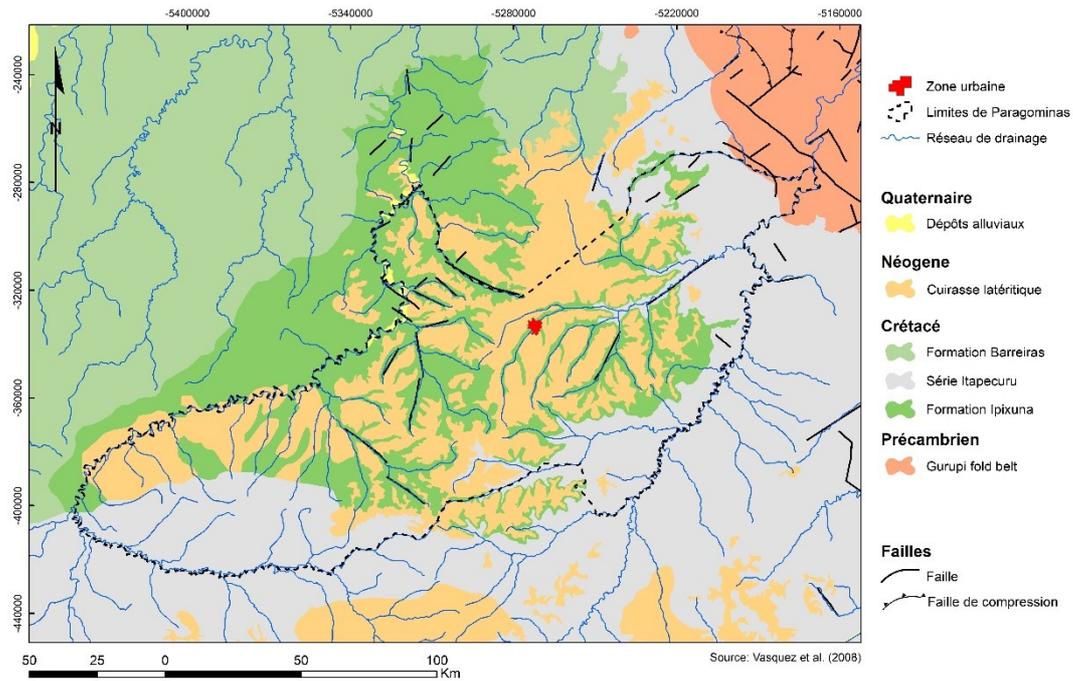


Figure 19. Carte géologique de la municipalité de Paragominas et ses environs. Source : Vasquez, Sousa, et Carvalho (2008).

Une grande partie de la municipalité de Paragominas est caractérisée par ce type de relief qui intercale de grands plateaux argileux et des vallées sableuses avec un motif dendritique de dissection (Figure 20). L'exception est la frontière orientale de la municipalité, où la large vallée de la rivière Gurupi ne présente pas de plateau, ne présentant que les niveaux les plus bas caractéristiques de la surface Velhas. La photographie de la Figure 21 (a) représente es unités pédomorphologiques : le sommet du plateau recouvert d'argile de Belterra ; le bord du plateau, armé par la cuirasse ferrugineuse et dans les pentes, l'argile tachetée.

Cette dissection plus récente a permis l'établissement d'un réseau de vallons (« *grotas* ») qui coupent les surfaces intermédiaires et les bords des plateaux, également avec un tracé spatial dendritique. Ces vallées peuvent avoir un chenal avec un écoulement permanent, nommées vallées humides, ou ils peuvent être des vallées sèches en saison sèche, comme dans le cas de la photographie Figure 21 (b).

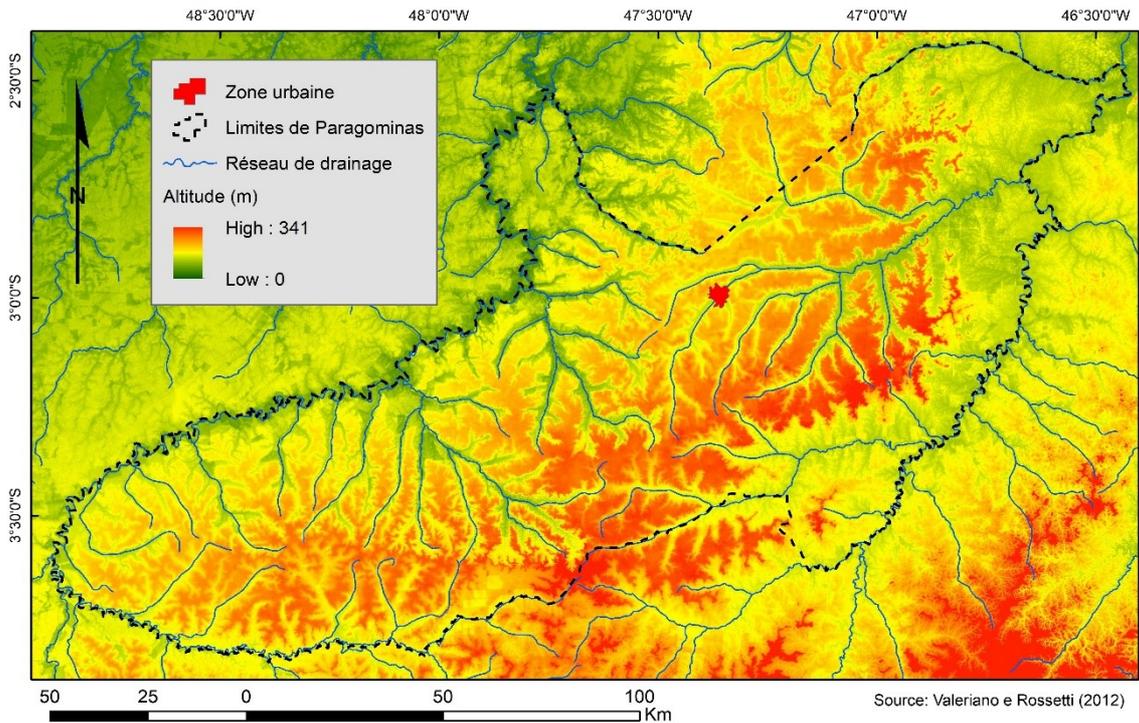


Figure 20. MNT TOPODATA pour la région de Paragominas et ses environs. Source : Valeriano et Rossetti (2012).



a)

b)

Figure 21. a) Photographie de la zone d'étude illustrant les unités pédomorphologiques de la région. b) Vallée peu profonde avec des bords abrupts située sur la surface intermédiaire du Pléistocène - Néogène. Photos : Osis, R. (2016).

Puisque chaque unité géologique a des caractéristiques de texture bien marquées, (Laurent, Pocard-Chapuis, et al. 2017) ont proposé une cartographie de la texture du sol basée sur la topographie, définissant quatre classes : sable argileux, argile tachetée, cuirasse ferrugineuse et argile de Belterra. L'argile de Belterra domine sur le sommet des plateaux, et la cuirasse ferrugineuse affleure généralement sur les bords convexes des plateaux, où elle forme des sols graveleux (Figure 22). Dans les pentes abruptes des bords des plateaux, on trouve des sols argileux tachetés (Figure 22), en

particulier dans les parties supérieures des pentes, avec une tendance aux sols sableux vers le bas concave. Enfin, les pentes douces et les fonds de vallée sont dominés par les sables argileux, issus principalement de l'altération des grès des formations de base.

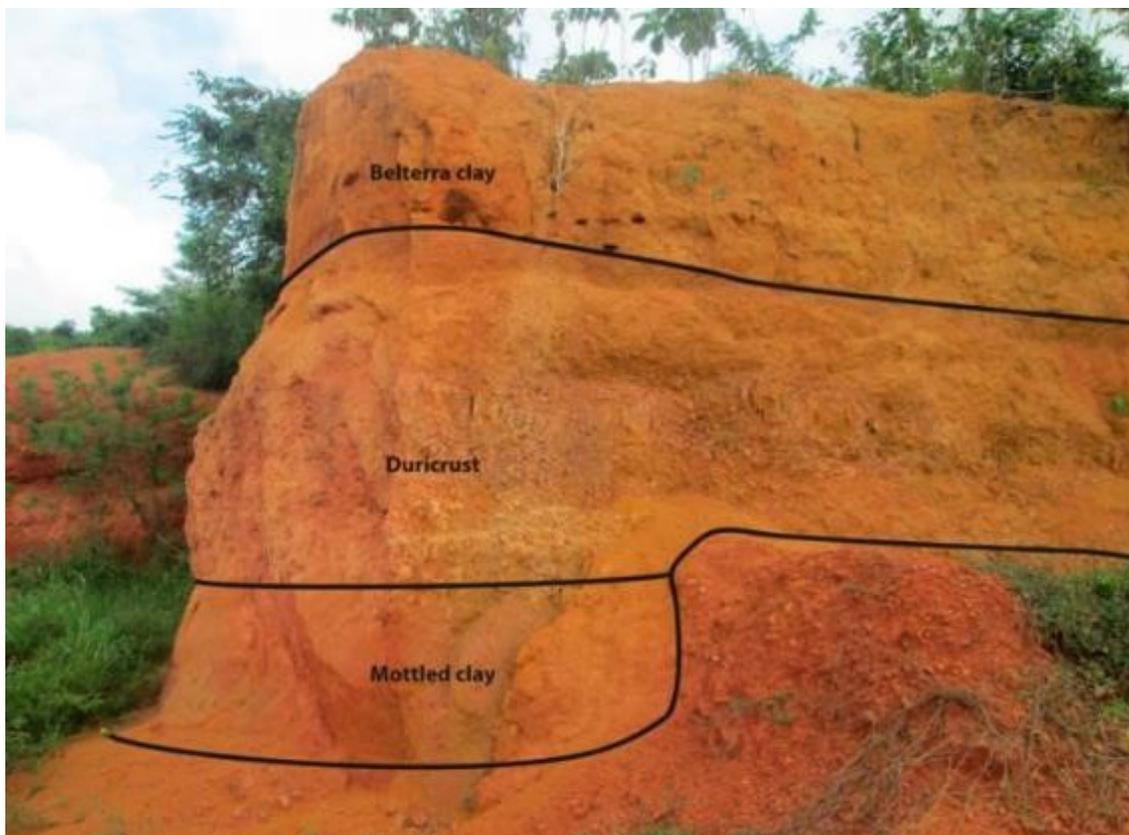


Figure 22. Profil de sol montrant la séquence d'argile tacheté (*mottled clay*) provenant de formations sédimentaires (formation Ipixuna ou série Itapecurú), recouvertes par la cuirasse ferrugineuse (*duricrust*) puis par l'argile de Belterra. Source : Laurent, Poccard-Chapuis, et al. (2017).

Du point de vue pédologique selon la classification brésilienne de sols, les sols de Paragominas sont principalement classés en *LATOSSOLOS AMARELOS*, avec des différenciations quant aux caractéristiques physiques telles que les *LATOSSOLO AMARELO coeso* pour la couverture argileuse de Belterra et les *LATOSSOLO AMARELO concrecionário* pour les bords des plateaux où il y a eu démantèlement de la cuirasse ferrugineuse (Rodrigues et al. 2003). Ces sols sont très acides, avec un pH compris entre 3,5 e 5,3 (Kotschoubey et al. 2005) et une saturation en aluminium proche de la limite de toxicité, généralement supérieure à 60 %. Le carbone organique est faible, allant de 0,1 à 3,8 % et la concentration des bases échangeables est également faible, entre 0,2 et 1,5 cmole kg⁻¹. Cependant, il existe une différence de concentration de base entre les sols des plateaux formés sur l'argile de Belterra et les sols sableux du fond des vallées. L'argile de Belterra peut présenter 4,2 et 7,9 cmole

kg⁻¹, alors que les sols au fond des vallées sont généralement inférieurs à 4 cmole kg⁻¹ (Rodrigues et al. 2003). La fertilité de l'argile de Belterra est donc plus élevée que celle des sables argileux.

2.2. Climat

La région où se situe la municipalité de Paragominas, quelque peu excentrée à l'est du bassin et du biome amazonien, se caractérise par une transition entre les climats humides et les climats à saisons plus contrastées en matière de précipitations. Selon la classification Köppen-Geiger, la municipalité se situe entre le type Am mais borde le type Aw. Les deux types se caractérisent par une température moyenne du mois le plus froid supérieure à 18°, mais le type Aw (climat tropical avec saison hivernale sèche), typique des régions de savane, a au moins un mois par an avec des précipitations totales moyennes inférieures à 60 mm. Le type Am (climat de mousson) peut aussi avoir un mois sec avec moins de 60 mm, mais les précipitations annuelles sont plus élevées que l'Aw (Figure 23).

A Paragominas, la moyenne des températures annuelles est de 26,3°C. La moyenne des maximas est de 33°C et des minima de 22°C. L'humidité relative annuelle moyenne de l'air est de 81%, avec des variations mensuelles entre 76 et 85%. Les précipitations annuelles moyennes enregistrées avec les données de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (pmm.nasa.gov) entre 2004 et 2014 sont de 1 993 mm, dont 85% concentrées pendant la saison des pluies, de décembre à mai (Figure 24). Paragominas est située dans une région où un « appendice » climatique à plus fort contraste saisonnier pénètre dans la forêt amazonienne à partir du Maranhão, ce qui peut être observé avec la carte de l'index de Walsh dans le travail effectué par le Groupe biodiversité OBT-INPE (<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata>). Ces conditions uniques rendent Paragominas particulièrement sensible aux risques climatiques pour les écosystèmes, l'agriculture et les incendies de forêt.

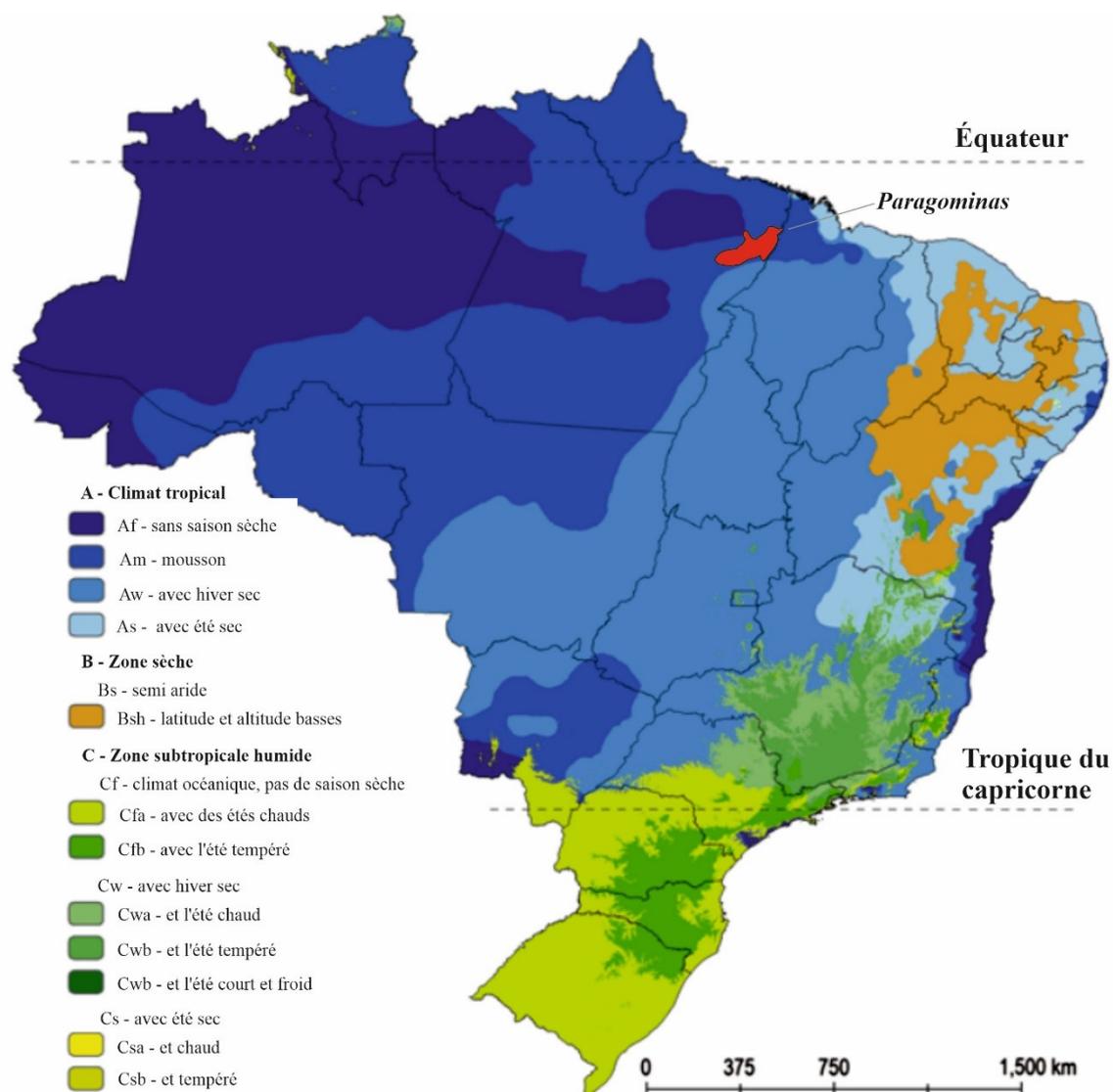


Figure 23. Classification climatique Köppen-Geiger appliquée au Brésil. Région de Paragominas indiquée par un cercle rouge. Source : Stape et al. (2014).

Plusieurs études montrent que l'Amazonie peut présenter une intensification de la saison sèche, en particulier dans sa partie sud-est, en raison des changements climatiques mondiaux causés par l'augmentation du CO₂ atmosphérique (Malhi et al. 2009). Avec un modèle atmosphérique couplé à un modèle de potentiel végétal (RCM-PVM), (Cook et Vizy 2008) estiment que 70% de la forêt amazonienne peut être réduite d'ici la fin du 21^{ème} siècle du fait de la réduction des précipitations et de la modification du cycle saisonnier associée à une augmentation du CO₂ atmosphérique à 757 ppmv (Figure 25).

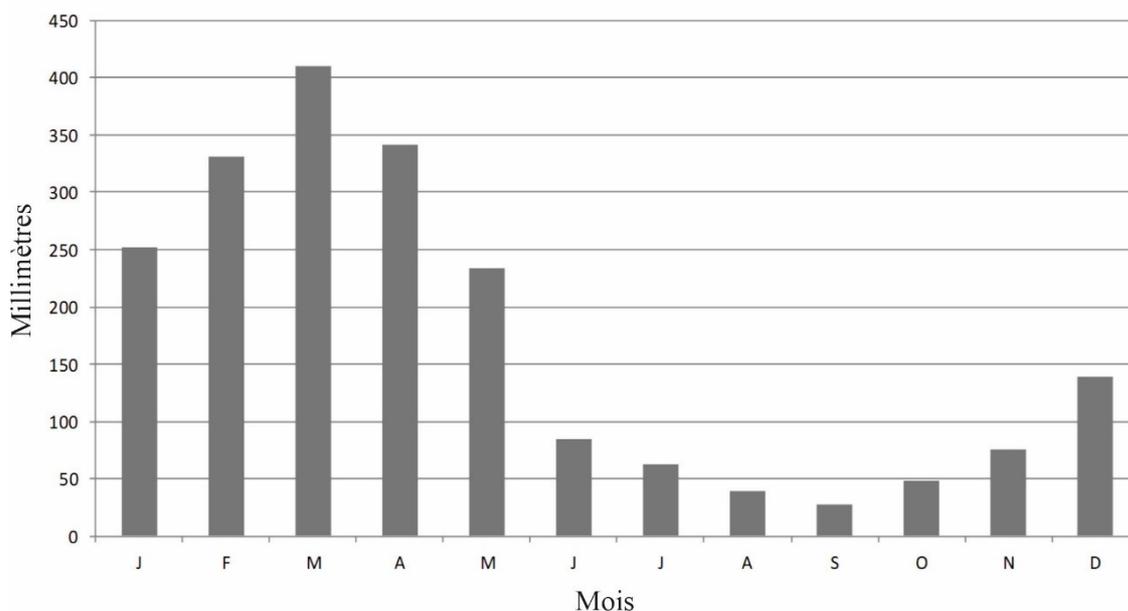


Figure 24. Précipitations mensuelles moyennes (mm) pour la ville de Paragominas, sur la base des données TRMM entre 2004 et 2014. Source : Laurent et al. (2016, non publié).

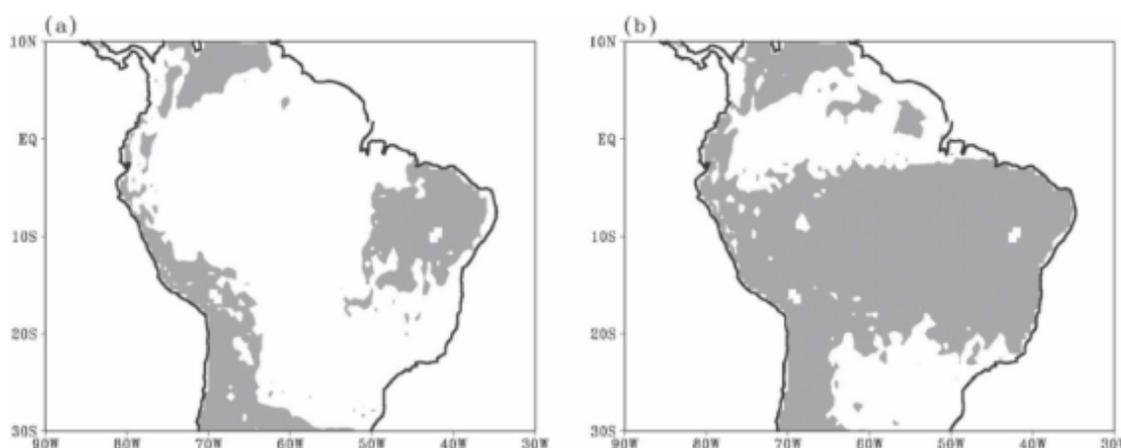


Figure 25. Les zones grisées indiquent des précipitations annuelles insuffisantes pour soutenir la végétation forestière, soit (a) l'état actuel et (b) le résultat de la simulation couplée pour la période 2080-2100. Source : Cook et Vizy (2008).

Avec le modèle régional Eta CPTEC/HadCM3, (Marengo et al. 2012) ont évalué des scénarios climatiques futurs pour le bassin de l'Amazonie et ont observé que pour la période 2071-2100 avec une concentration atmosphérique de CO₂ de 638 ppm, il pourrait y avoir une réduction pouvant atteindre 19% des précipitations dans le bassin de l'Amazonie.

Paragominas étant dans une zone de transition vers un climat plus sec, ces changements climatiques peuvent avoir des conséquences importantes sur les paysages et une réduction drastique de la productivité des pâturages non irrigués pendant les périodes sèches, ce qui affecterait directement la plupart des éleveurs, qui

dépendent actuellement du régime pluvial (Laurent, Arvor, et al. 2017). Cette situation suggère également que les épisodes de « *veranico* », c'est-à-dire, des jours sans pluie pendant la période de croissance des cultures annuelles (février à mai) (Gaia et al. 2017), peut également être intensifiée, avec des impacts sur la production agricole.

2.3. *Phyto-physionomies*

La municipalité de Paragominas fait partie du biome ou province biogéographique de l'Amazonie, une région couverte d'une végétation avec la phyto-physionomie d'une forêt tropicale humide à grande biomasse et hétérogénéité, dont la variation floristique d'un endroit à l'autre est grande, et la différence entre des endroits éloignés est encore plus grande (Braga 1979). La région d'étude se caractérise par deux grandes phyto-physionomies : forêt dense ombrophile et forêt ombrophile ouverte, décrites par (Velooso, Rangel Filho, et Lima 1991) (Figure 26).



Figure 26. Principales phyto-physionomies dans la région de Paragominas. Source : Velooso, Rangel Filho, et Lima (1991).

La forêt dense ombrophile, également appelée forêt tropicale humide, est le type de végétation caractérisé principalement par des formes de vie macro et mésophanérophytes, ainsi que par l'abondance de lianes ligneuses et d'épiphytes, et la principale caractéristique est la dépendance à une forte précipitation et une température élevée, bien répartie sur toute l'année, avec deux mois secs maximum. Les variations de cette physionomie sont principalement dues aux différences d'altitude et de position topographique. Dans la zone d'étude, cette phyto-physionomie est séparée en trois formations : *aluvial*, *terras baixas* et *submontana*. La formation *aluvial*

est également connue sous le nom de « mata ciliar » (ripisylve), se développant le long des cours d'eau, sur les berges, les plaines et terrasses alluviales et les milieux physiographiques soumis à des écoulements permanents ou temporaires d'eau. Les espèces à écorce lisse et à croissance rapide, à canopée émergente uniforme sont communes, et de nombreux palmiers, des lianes ligneuses, des épiphytes et quelques plantes parasites peuvent apparaître. Les espèces communes dans cette formation (ochlospèces) comprennent *Ceiba pentandra* (*sumaúma*), *Virola surinamensis* (*ucuuba*), *Tapira guianensis*, *Mauritia flexuosa* (*buriti*), entre autres. La formation de *terras baixas* est fréquente dans des domaines physiographiques similaires à ceux du groupe Barreiras, c'est-à-dire des couvertures sédimentaires Pliopleistocènes, qui présentent une flore typique représentée principalement par des genres tels que *Ficus*, *Alchornea* (*pau-óleo*) et *Tabebuia* (*ipê*) (Figure 27 (a)).

Dans la région amazonienne, cette formation se situe généralement entre 5 et 100 m d'altitude. La formation *submontana* représente à son tour les formations situées sur les pentes des hautes terres, généralement entre 100 et 600 m d'altitude. Elle présente une formation forestière avec des phanérophytes de hauteur plus ou moins uniforme, pouvant présenter des phanérophytes de grande taille, jusqu'à 50 m (Veloso, Rangel Filho, et Lima 1991).



Figure 27. a) Aspect de la forêt primaire à Paragominas. b) Formations secondaires ou forêts dégradées avec de grandes quantités de *babaçu* (*Attalea speciosa*). Photos : Osis, R. (2017).

La forêt ombrophile ouverte est une variante de la forêt ombrophile dense, considérée comme une transition entre la forêt amazonienne et les zones extra-amazoniennes. Elle se caractérise par une densité plus faible et est liée aux gradients climatiques avec plus de deux mois secs par an. Ces zones de transition, lorsqu'elles possèdent des sols sablonneux, comme dans certaines parties de la zone d'étude, présentent principalement des formations avec palmiers, comme le *babaçu* (*Attalea speciosa*), qui sont même appelés "forêts de *babaçu*" au Piauí et au Maranhão, surtout lorsque les

formations sont dégradées par les activités humaines (Figure 27 (b)).

La région de Paragominas représente bien cette zone de transition entre formations denses et formations ouvertes, notamment en raison de la plus grande saisonnalité climatique, avec une période sèche relativement importante dans cette région. Ces différences de gradients climatiques finissent par conditionner des habitats différents de ceux des zones les plus humides, et gagnent actuellement en importance principalement parce que ce sont les zones les plus touchées par le front pionnier, avec des pertes importantes de ces niches écologiques climatiques (Nelson, Soares-Filho, et Albernaz 2009).

2.4. Dynamique hydro-géomorphologique actuelle

Le territoire de Paragominas comprend un système physiographique dans lequel la végétation abondante joue un rôle prépondérant dans la dynamique de l'eau dans le paysage. La végétation forestière dense sert de filtre et de stabilisateur de sédiments, et la charge sédimentaire dans les rivières est principalement composée de particules fines, transportées en suspension et de solutés.

Le couvert forestier favorise également l'infiltration des précipitations, ce qui fait que la majeure partie de celles-ci atteint l'aquifère poreux et soutient ensuite le débit des cours d'eau. Ce processus se reflète dans la configuration commune des chenaux de la région, avec des sections profondes et peu de formes fluviales sédimentaires, comme les dépôts de sable (Figure 28 (a)). Lorsque le contexte géomorphologique favorise l'apparition de plaines alluviales, celles-ci peuvent présenter des chenaux à configuration complexe, avec un ou plusieurs chenaux principaux sinueux, rectilignes ou irréguliers, et des chenaux secondaires plus petits, latéraux et discontinus, avec différents degrés de connexion aux autres chenaux, une configuration qui peut être observée dans différentes hiérarchies de drainage.



a)



b)

Figure 28. a) Drainage fluvial typique dans la région de Paragominas. Photo : Osis, R. (2017). b) Tracé de drainage sinueux/anastomosé sur une plaine alluviale d'un affluent de la rivière Gurupi. Source : composition *truecolor* Digital Globe/Google de 11/7/2008.

Les écoulements peuvent traverser des zones inondables, en particulier pendant la période pluvieuse (Figure 28 (b)). Ce système hydrologique peut cependant être affecté par la couverture et l'occupation du sol par les producteurs, dont les impacts résultant de ces pratiques sont analysés dans la section suivante. Ces impacts sont principalement relatifs aux influences sur l'hydrologie de surface des versants, où la couverture affecte la quantité d'eau entrant dans l'aquifère, celle qui s'écoule superficiellement et celle qui est évapotranspirée. Les deux premiers flux ont des impacts en aval sur le versant et le canal de drainage, tandis que le troisième a des impacts sur le système climatique.

3. Le développement du territoire de Paragominas

3.1. Aspects socio-économiques

Paragominas est une municipalité de 19.342 km² de l'État fédéré du Pará. Elle a été fondée en 1965, à la suite de la migration induite par la construction de la route asphaltée BR-010 « Belém – Brasília » (Veríssimo et al. 1992).

Selon Leal (2000), en 1958, l'homme d'affaires Célio Miranda a planifié la colonisation de la région, qui allait être bientôt traversée par la route asphaltée BR-010 et, pour ce faire, il a jugé nécessaire de « constituer une population locale », ce qui a entraîné le processus de création du noyau urbain de Paragominas. Par la suite, des vagues de migrants venus de différentes parties du pays ont permis l'expansion de la colonisation des terres disponibles. Le contexte d'une zone « inoccupée », mais avec la nouvelle possibilité d'accès par route asphaltée, a favorisé la spéculation foncière, qui s'est ensuite accélérée avec des subventions pour l'occupation du territoire. La déforestation dans cette phase n'a pas seulement été autorisée, mais aussi encouragée. La structure agraire n'avait pas encore été établie et des *glebas*²⁰ ont été obtenues par des acteurs spécifiques du processus de colonisation, qui les ont ensuite fragmentées.

Située dans la mésorégion du sud-est du Pará et centre de la microrégion de

²⁰ Zones négociées par le gouvernement dans le cadre de projets de colonisation destinés aux investisseurs. La superficie des *glebas* se situait entre 3.000 et 4.000 ha.

Paragominas, la municipalité comptait en 2017 environ 110.026 habitants, soit la 13^{ème} plus importante population de l'État. En 2010, date du dernier recensement, 21,7% de la population vivait dans les zones rurales, une valeur relativement élevée de la population rurale par rapport aux autres municipalités du Pará. Avec une densité de population de 5,06 habitants/km², elle est située dans la partie de l'État où la densité de population est assez élevée. Elle a le 12^{ème} rang dans le PIB par habitant de l'État (R\$ 22.462), qui compte 144 municipalités, l'un des salaires moyens les plus élevés des travailleurs du secteur formel (3,3 salaires minimums) et un revenu réalisé de R\$ 242.966.000, le huitième de l'État.

La municipalité a une pyramide des âges très large, avec une concentration des âges entre 10 et 29 ans. 17% de la population est occupée, un taux élevé au Pará (IBGE, 2010). Ses principales activités économiques, par ordre décroissant, sont celles des secteurs tertiaire, industriel et agricole (IBGE, 2013). L'IDH (Indice de Développement Humain) en 2010 était de 0,645, 20^{ème} place parmi les municipalités du Pará, soit un indice considéré comme moyen. Cependant, Paragominas est contigüe à une municipalité avec un très faible IDH, Ipixuna do Pará, dont l'indice est de 0,489. En comparaison, en 2015, environ 92% des recettes publiques d'Ipixuna do Pará provenaient de ressources externes, contre 77% pour Paragominas.

Toutefois, cette importante activité économique s'accompagne d'une forte inégalité dans la répartition des revenus. En 2010, 41 % de la population occupée percevait moins de la moitié du salaire minimum, soit un indice de Gini de 0,41, l'un des plus élevés du Pará. Cette inégalité s'exprime également dans la répartition foncière qui, comme dans la majeure partie de l'Amazonie, est fortement dominée dans l'espace par les grandes propriétés. Sur la base des données CAR de 2016 (SEMAS 2016), les propriétés de plus de 1.000 ha couvrent plus de 80% de la superficie de la municipalité. Dans le même temps, les propriétés de moins de 250 ha représentent 66 % du nombre total de propriétés. Bien que Paragominas ne possède pas d'unité de conservation, une partie d'une terre indigène couvre la partie extrême-orientale de la municipalité, la réserve de Alto Rio Guamá (FUNAI 2017). Selon Funasa (2006), la population autochtone de cette réserve comprenait 1.425 personnes des peuples Tembé et Timbira. Plusieurs mouvements migratoires ont eu lieu depuis la fondation de la municipalité, et même en 2010 une bonne partie de la population est née dans des États en dehors de la région Nord : Nord-Est 24,7%, Sud-Est 2,8% et Sud et Centre-Ouest avec 0,7% chacun (IBGE, 2010).

3.2. Agriculture familiale

Les agriculteurs familiaux constituent un groupe social important dans l'espace amazonien et ont une dynamique spatiale particulière. A Paragominas, les agriculteurs familiaux participèrent depuis le début à la colonisation, avant la construction de la route asphaltée BR-010. Pendant cette période, les petits agriculteurs étaient établis près des principales rivières de la région : Capim et Gurupi. Les populations étaient liées à la migration à petite échelle, dont le principal moyen de transport était assuré par les rivières. Après la construction de la route asphaltée et l'arrivée des migrants en provenance du Sud, du Sud-Est et du Centre-Ouest du pays, les terres des régions les plus éloignées des principaux fleuves ont été progressivement occupées, y compris la zone du siège actuel de la municipalité. Au milieu des années 80, l'agriculture familiale se distribue dans des espaces bien définis, comme dans la zone connue sous le nom de Capim, une zone proche de l'actuelle Piriá et dans l'actuel *assentamento* Camapuã (Água Suja) (Figure 29).

Après le ralentissement de l'exploitation forestière à la fin des années 90 (Pinto et al. 2009), les plus grandes zones de colonisation de la municipalité sont apparues : les *assentamentos* Paragonorte et Luiz Inácio. Sous le gouvernement de Fernando Henrique Cardoso (1995-2003), cette période a été marquée par la définition de projets d'implantation non seulement dans les zones publiques non réclamées, mais aussi dans les fermes expropriées (Tourneau et Bursztyn 2010). Selon Pinho (2014), les *assentamentos* de Paragonorte et Luiz Inácio sont apparues en réponse à des conflits fonciers résultant de l'occupation de terres des populations autochtones par des agriculteurs familiaux, ce qui a entraîné la demande d'une nouvelle zone de colonisation dans la municipalité.

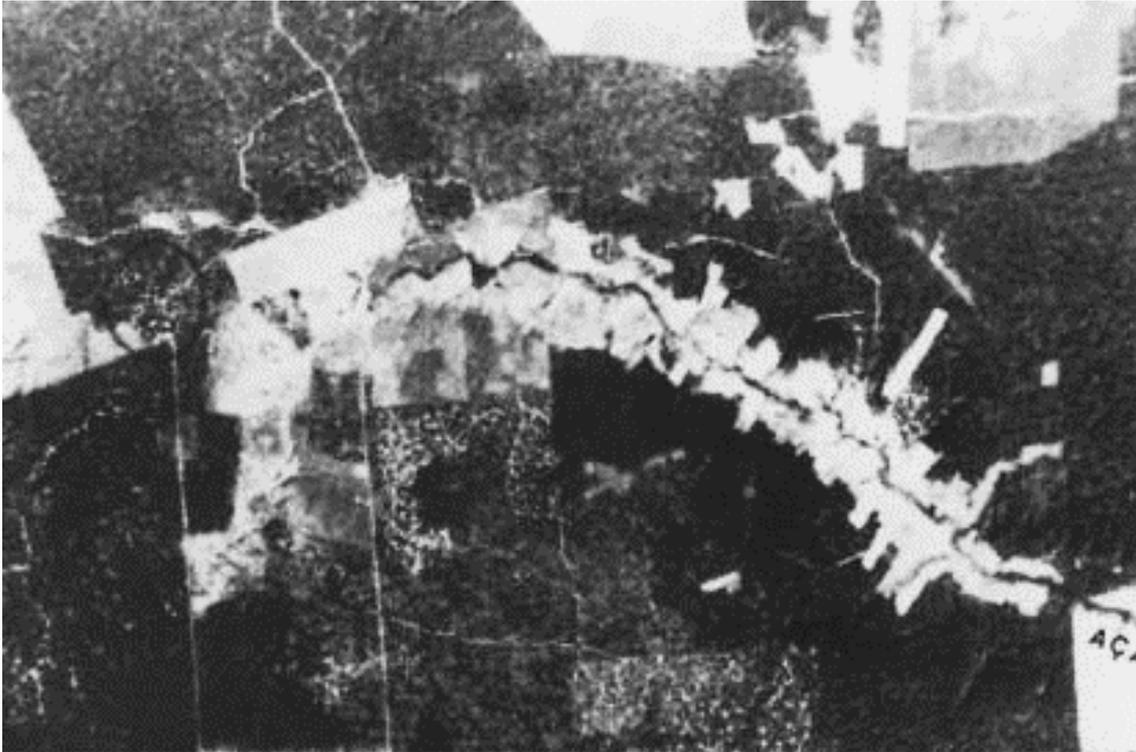


Figure 29. Image Landsat TM (1992) de la zone Água Suja à l'est de la municipalité : zones déboisées et forêts à forte activité d'exploitation de bois (exploitation sélective) aux alentours de la zone de colonisation qui se développe au fond de la vallée avec des lots rectangulaires. Source : Veríssimo et al. (1992).

La première option a été la zone où opérait une société d'exploration forestière (CASEMA, appelée *Companhia Industrial do Pará - CAIP*). Cette zone appartenait auparavant à une société composée par les sociétés Swift, Armour et Rockefeller, créée dans les années 1970, et axée principalement sur l'élevage extensif (Tucker, 1955). Après la fin des activités de la CAIP, la zone a été occupée sans autorisation officielle par les colons à la mi-1997, et n'a été régularisée qu'en 2011, recevant également des colons d'autres régions du Pará et du Maranhão.

Cette première zone avait une capacité d'environ 1.200 lots de 25 ha. Selon un entretien avec un fonctionnaire de l'INCRA de Paragominas, un deuxième campement, Luiz Inácio, a été créé plus tard sur une échelle similaire, mais quelques dizaines de kilomètres plus au nord. Ce nouveau peuplement se caractérisait à l'époque par un important couvert forestier. Dans ces colonies, des parcelles de taille similaire ont été définies, autour de cinq « *alqueires*²¹ », mais avec une délimitation assez imprécise. En général, un « front » a été défini par rapport à la route d'accès au site, et la longueur d'un "fond" en détermine la dimension, avec des limites latérales arbitraires,

²¹ Unité de mesure de superficie qui varie selon la région du Brésil. A Paragominas, on utilise le « *alqueire mineiro* », ce qui équivaut à 4,84 ha. Ainsi, la plupart des parcelles de colonisation étaient de 5 *alqueires* ou 24,2 ha.

généralement définies d'un commun accord par les propriétaires voisins. Cependant, en raison du processus de formation de ces colonisations, il n'est pas rare que l'occupation ait été faite avant une démarcation officielle. Malgré cela, la structure agraire de ces zones de colonisation est très dynamique et est transformée par les stratégies des producteurs.

Au fil du temps, certains producteurs liés à l'élevage regroupent plusieurs lots pour avoir une plus grande superficie productive (les « *fazendinhas* » à Paragominas), selon un processus de concentration foncière (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012). Ce phénomène se produit dans l'*assentamento* Camapuã (Água Suja), comme cela fut observé sur le terrain.



Figure 30. Images par télédétection de l'*assentamento* de Paragonorte. a) ferme d'origine en 1985 avec l'élevage extensif et ; b) en 2015, des fermes familiales, avec des pâturages et une végétation secondaire. Le côté de la ferme d'origine est d'environ 20 km de long. Source : images Landsat TM/Google Earth (2018).

Les zones occupées et établies avec des résidences et des cultures suivent certaines préférences, comme l'existence de terres publiques ou improductives (abandonnées), ainsi que la présence de ressources forestières et hydriques. Ce dernier aspect a une importance particulière à Paragominas en raison de son relief avec des plateaux à faible drainage du fait d'un sol perméable, ce qui conduit une grande partie des agriculteurs familiaux à s'installer dans les vallées, développant les productions en remontant les versant en direction des plateaux et non le contraire. L'accès à l'eau est fondamental non seulement pour la consommation humaine, mais aussi pour la consommation animale, voire l'irrigation des cultures. Les ressources forestières, d'autre part, dans le cas des systèmes de production locaux, peuvent être importantes pour l'approvisionnement en bois pour les tuteurs de poivre noir, pour les poteaux de

clôtures et autres équipements. Mais c'est surtout la réserve de fertilité de la matière organique de la forêt primaire qui a incité à l'occupation de la région de l'*assentamento* Luiz Inácio.

Les pratiques agricoles des agriculteurs familiaux de Paragominas sont diverses et ont traversé différentes phases au fil du temps, mais certaines productions sont communes à différentes unités familiales, comme le manioc, le maïs et les haricots, ainsi que l'élevage à petite échelle, les petits animaux et les arbres fruitiers. La pratique la plus courante est le système d'agriculture sur le brûlis. D'autres activités permettent une commercialisation, comme l'exploitation forestière, surtout pour la production de charbon de bois, et le poivre noir, dont la valeur marchande élevée a encouragé plusieurs agriculteurs familiaux dans cette culture. Les incitations publiques ont également joué leur rôle, déclenchant certaines activités, comme ce fut le cas du *Fundo Constitucional de Financiamento do Norte* (FNO), chargé en 2000 de promouvoir le consortium ananas et noix de cajou, et en 2009 du *Pronaf A*, qui s'est accompagné de subventions pour la construction de réservoirs piscicoles et pour la promotion de l'élevage bovin (Pinho 2014).

Actuellement, la municipalité compte 16 zones d'*assentamento* liées à l'INCRA, totalisant 2.200 km², soit 11,3% de la superficie totale de la municipalité. En outre, il existe des zones de colonisation de terres publiques, situées dans les zones de Capim et de Mandacaru, au nord-ouest, la plupart avec un certain degré de régularisation par le programme fédéral Terra Legal, de 2009, qui vise à régulariser les agriculteurs familiaux qui sont en possession de terres publiques fédérales non destinées (SEMAS 2016).

Toutefois, des changements se sont produits avec le renforcement de l'application de la législation environnementale et une série d'actions gouvernementales, en particulier depuis 2007, au cours desquelles les agriculteurs familiaux et les grands producteurs ont subi des pressions pour réduire la déforestation et s'adapter au « Nouveau Code Forestier²² ». Parmi les points clés de cette nouvelle politique figurait l'interdiction de l'utilisation du feu (Pinho 2014). Après ces mesures, la déforestation a été considérablement réduite, en particulier dans les grandes exploitations. Dans le contexte de l'agriculture familiale, par contre, les changements dans les pratiques d'utilisation des forêts ont été limités, car les méthodes traditionnelles d'intensification,

²² Lei n° 12.651 de 25 de Maio de 2012 (http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm).

avec l'utilisation d'intrants et de machines, ne se sont pas révélées être une option viable (Cialdella et al. 2015), de sorte que celles-ci se poursuivent largement avec le système qui utilise le feu pour nettoyer les parcelles. Cependant, il existe une stratégie d'adaptation des activités agricoles des agriculteurs familiaux, en tenant compte du contexte physiographique dans lequel ils se trouvent et des productions qu'ils réalisent ou qu'ils souhaitent réaliser. Par exemple, les cultures sont préférables dans les zones plus plates et proches des ressources en eau et de la maison, ce qui facilite l'irrigation (Plassin, Pocard-chapuis, et Tourrand 2015).

L'élevage bovin est également une activité importante dans le cadre de l'agriculture familiale à Paragominas, et certaines zones ont une plus grande présence de cette production, comme autour des villages d'Água Suja et Oriente. L'élevage bovin laitier est fréquent et il existe des chaînes de production orientées vers les produits laitiers locaux, comme c'est le cas pour la production de fromage. Pour les fermes situées à proximité du centre urbain, ce marché accessible favorise également la vente quotidienne de lait sur le marché urbain (Polge, Pocard-Chapuis, et Piraux 2016; Tourrand et al. 2006).

En ce qui concerne les impacts environnementaux de ces activités, il est évident qu'il y a des changements dans les habitats et l'émission de gaz à effet de serre en coupant et brûlant la forêt. Le système d'agriculture sur brûlis augmente également le transfert des nutriments du sol vers le réseau de drainage, comme l'indique (Figueiredo 2007), comparativement aux pratiques sans recours au feu. Cependant, l'emprise spatiale de ces activités est plus restreinte que celle des grandes propriétés. Un phénomène qui peut toutefois dépasser l'échelle des petites propriétés est l'incendie forestier, car de graves périodes de sécheresse ont permis aux incendies de se propager sur de vastes étendues de forêt, comme ce fut le cas lors des incendies de 2015, qui ont touché près de 10% des forêts primaires du territoire (Hasan, 2019).

3.3. Élevage bovin de moyenne et grande échelle

A Paragominas, l'élevage a eu une grande importance dans l'histoire de l'occupation du sol. Les années 1960 ont été fondamentales avec la mise en place par l'Etat de la route asphaltée BR-010 et la distribution de *glebas* aux producteurs notamment issus du Goiás (Leal 2000), permettant la mise en place d'activités d'élevage après la déforestation des lots. Dans les années 90, l'activité montre une accélération, atteignant lors de son apogée un troupeau proche de 600.000 têtes, ce qui en faisait le plus grand producteur de Pará à l'époque. Par la suite, ce taux a été réduit, puis est remonté avec un nouveau pic en 2004 (Pinto et al. 2009), période au cours de laquelle le taux de déforestation était également l'un des plus élevés. Ces caractéristiques de l'occupation initiale représentent bien la mise en œuvre d'un front pionnier avec l'activité des migrants en provenance d'autres parties du pays, et surtout basée sur l'élevage du bétail.

Au cours des années 1990, l'élevage bovin s'est développé, en partie grâce à l'intense activité d'exploitation forestière pour le bois au cours de cette période, où une partie des revenus a été reversée pour la récupération et l'ouverture de pâturages supplémentaires, puisque la plupart des terres où le bois était exploité appartenaient aux éleveurs (Veríssimo et al. 1992). Ces revenus de l'exploitation forestière ont également permis une intensification et une spécialisation de la production dans la municipalité. Les éleveurs réforment les pâturages avec de nouvelles variétés de fourrage, amendent leurs pâturages avec de la chaux et diversifient la production avec l'élevage des veaux, l'engraissement ou la production laitière (Mattos et Uhl 1994). Après 2004, cependant, le troupeau de Paragominas connaît une réduction d'environ 100.000 têtes de bovins, malgré une brève reprise au début de la décennie 2010 (IBGE, 2017).

Les actions contre la déforestation à partir de 2004 ont rapidement affecté les activités rurales, puisqu'à l'époque elle présentait des taux de déforestation suffisamment élevés pour les inscrire sur la liste noire des municipalités qui déboisent le plus. Des embargos et des restrictions de crédit furent imposés, et l'une des réponses a été la mise en œuvre du programme « *Município Verde* » en 2007 et, par la suite, la signature du TAC²³ pour la viande, réduisant considérablement la déforestation liée à

²³ « *Termo de Ajuste de Conduta* ».

la production animale après cette période. Dans le même temps, des actions au niveau local ont été mises en place pour promouvoir la modernisation de l'élevage dans la municipalité, telles que le « Programme Elevage Vert » lancé en 2011, proposé par le *Sindicato de Produtores Rurais* de Paragominas avec financement privé. Ce programme visait à accroître la productivité, à mettre en œuvre de bonnes pratiques de gestion, à restaurer les zones dégradées et à améliorer l'aptitude des sols à l'agriculture. Cependant, ce système intensif et à haute technologie se limite à quelques unités de production dans la municipalité (Piketty et al. 2015).

L'expansion de l'élevage bovin est donc le résultat de l'interaction d'une série de facteurs qui ont permis sa viabilité dans le territoire en question. Compte tenu du cadre naturel dans lequel il s'est développé, le relief de la région et la distribution des ressources en eau ont été des facteurs qui ont conditionné la distribution spatiale du système d'élevage extensif, qui dépend de la disponibilité de l'eau pour l'abreuvement du bétail. Ainsi, les plateaux couvrant de grandes surfaces sans eau sur plusieurs kilomètres ont concentré l'expansion des pâturages selon les axes des vallées principales (Piketty et al. 2015).

A partir des années 2000, une partie des propriétés d'élevage présente déjà un certain niveau d'intensification, surtout celles situées plus près des routes et de la zone urbaine. Quelques exemples d'intensification ont été promus par le programme « *Pecuária Verde* » (« Élevage Vert »), avec l'adoption de techniques et d'intrants tels que l'établissement de pâturages en rotation, l'irrigation et la fertilisation des pâturages et l'abreuvement du bétail par réservoirs. Avec la forte expansion des cultures de grains, l'élevage s'y associé et a bénéficié de l'amélioration des terres générée par les cultures annuelles, comme c'est le cas des systèmes d'intégration agriculture-élevage. Les impacts environnementaux de l'élevage à grande échelle en Amazonie sont bien connus, il est considéré comme l'une des principales activités liées à la déforestation. En plus des importantes émissions de carbone stockées dans la forêt, la transformation en pâturages a des impacts importants sur l'hydrologie. L'absence d'arbres réduit une partie des flux d'évapotranspiration, entraînant ainsi plus d'écoulement d'eau et augmentant le débit dans les cours d'eau (Panday et al. 2015).

De plus, l'infiltration peut être réduite par compaction du sol, ce qui favorise le ruissellement de surface et l'apparition de pics d'écoulement dans les cours d'eau. La réduction du couvert végétal, les fortes pentes et le piétinement intensif du bétail peuvent également favoriser l'apparition de l'érosion superficielle. Un autre impact important sur le paysage, qui n'est pas exclusif à l'élevage extensif, mais qui y est

fréquent, est la construction de barrages comme réserve d'eau pour l'abreuvement du bétail. Les petits réservoirs prolifèrent sur le front pionnier amazonien (Arvor et al. 2018). Comme tout barrage, cela modifie complètement l'état physique des habitats fluviaux, coupant la connectivité du réseau de drainage, transformant une partie de la rivière en un système lentique avec rétention des sédiments (Figure 31).



Figure 31. Barrages et passages sur des ruisseaux dans les fermes d'élevage extensif de Paragominas. a) ($3^{\circ}17'16,25''/47^{\circ}18'07,01''$). Source : Digital Globe de 14/7/2008. b) ($3^{\circ}01'12,94''/47^{\circ}10'31,82''$). Source : CNES/Airbus (2018).

En aval des barrages, il peut y avoir un accroissement de l'érosion fluviale et une réduction de la charge sédimentaire. Certaines études à Paragominas ont également montré que les barrages dont la zone de contribution est dominée par la production agricole, la teneur en oxygène de ces masses d'eau peut être réduite, ce qui est lié à une eutrophisation (Figueiredo 2007).

3.4. Exploitation du bois de forêts primaires

La déforestation elle-même peut être considérée comme une activité forestière, et la destination du bois peut être diverse et avec des quantités différentes dans le temps. Par exemple, à Paragominas, lors des premières ouvertures de la forêt, l'objectif principal était d'ouvrir des zones de pâturage, sans trop utiliser de bois (Veríssimo et al. 1992). Ensuite, du bois de plus grande valeur a été commercialisé ou utilisé à la ferme. L'activité extractive à des fins commerciales a connu un boom dans les années 80 et 90, lorsqu'elle est devenue même le plus grand producteur de bois d'œuvre du pays et la principale activité de la municipalité (Veríssimo et al. 1992). Ce pic s'est accompagné du développement d'une chaîne de transport et de transformation, les scieries étant des points stratégiques du réseau du bois. En 1989, la région de Paragominas comptait 238 scieries. C'est lors de cette phase que la population urbaine a dépassé la population rurale, environ la moitié de la population urbaine active de l'époque était liée à la filière bois. La plus grande partie de cette population a migré

d'autres parties de l'État et du pays, en particulier du Maranhão (Veríssimo et al. 1992). Après les années 1990, l'exploitation forestière dans l'est de l'Amazonie avait également un lien important avec la production de charbon de bois (Figure 32) pour la sidérurgie installée dans la région du « *Projeto Grande Carajás*²⁴ » (Piketty et al. 2011). Au début des années 2000, la municipalité produisait environ 500.000 tonnes de charbon de bois par an.



Figure 32. Four artisanal pour la production de charbon de bois (désactivé). Photos : R. Osis (2017).

Cette activité s'est principalement concentrée dans les zones boisées de grandes propriétés appartenant à des éleveurs, ce qui offrait une ressource supplémentaire à ces exploitations, notamment pour la récupération et l'établissement de nouveaux pâturages (Veríssimo et al. 1992)(Pinto et al. 2009). Comme dans une grande partie de l'Amazonie, l'exploitation forestière s'est concentrée sur la coupe sélective de plus d'une douzaine d'espèces commerciales, parmi lesquelles le *maçaranduba*, le *jatobá*, le *piquiá* et le *copaíba* (Veríssimo et al. 1992) (Figure 33).

Après les années 2000, la région de Paragominas continue d'être une plaque tournante du bois en Amazonie (SFB/Imazon 2010), mais avec une production bien inférieure à celle des années 1990 (Pinto et al. 2009). L'exploitation illégale à grande échelle se réduit, en particulier après les mesures contre la déforestation prises au cours de cette période.

²⁴ L'un des plus grands projets d'exploration, de transport et de transformation minérale au monde. Créé dans les années 1970, couvre une partie des États du Pará, du Tocantins et du Maranhão.



Figure 33. a) Image Landsat (1996) de la zone où se trouve actuellement l'invasion Oriente, montrant les zones d'accès et de dépôt dans des exploitations forestières. Source : Google Earth (2017) b) Image Landsat (1999) de la ferme Cikel. Source : Google Earth (2019).

Avec l'application du Plan d'Action Pour la Prévention et le Contrôle de la Déforestation en Amazonie Légale (PPCDAm²⁵) et des opérations telles que « *Arco de Fogo* » et « *Rastro Negro* » qui ont abouti à la saisie des bois illégaux, l'embargo sur les exploitations et la fermeture des scieries. Cette réduction de l'importance de l'industrie du bois a eu des répercussions sociales et économiques importantes (Piketty et al. 2015), dont un taux de chômage élevé, et cela a contribué à la formation des principaux *assentamentos*. Au cours des dernières années, l'exploitation forestière s'est concentrée dans l'ouest de la municipalité (Pinto et al. 2009), comme c'est le cas de la ferme de la Cikel, entreprise certifiée avec un plan de gestion durable, dont la superficie totalise plus de 140.000 ha (Pinto et al. 2009).

Actuellement, la plupart des activités forestières légales et à plus grande échelle ont un Plan de Gestion²⁶. Parmi les types de Plan de Gestion adoptés par certaines de ces entreprises figure l'enrichissement des clairières générées par les coupes avec des essences commerciales telles que le *paricá*, le *cèdre* et le *ipê-roxo* (Gomes 2013). En ce qui concerne la localisation de ces opérations de gestion forestière, elles dépendent principalement de l'existence de réserves forestières commercialement viables. En ce sens, l'accès peut avoir une importance relative, car il n'est pas nécessaire d'effectuer plusieurs déplacements, comme dans le cas de l'agriculture. La présence de stocks de bois valorisés peut justifier l'exploitation forestière même si les zones sont difficiles

²⁵ Le PPCDAm a été créé en 2004 et ses objectifs sont de réduire de manière continue la déforestation et de créer les conditions pour établir un modèle de développement durable dans l'Amazonie Légale. Les quatre phases du programme s'articulent autour de quatre axes d'action : la régularisation foncière, le suivi, la subvention et les instruments économiques et réglementaires (<http://www.mma.gov.br>).

²⁶ « *Plano de Manejo Florestal Sustentável* » (PMFS) (<http://www.florestal.gov.br/pngf/manejo-florestal/apresentacao>).

d'accès. Par ailleurs, les conditions biophysiques peuvent conditionner la présence d'essences spécifiques, tandis que des reliefs très abrupts peuvent guider les accès et l'exploitation forestière (Arima et al. 2015).

3.5. Le soja et autres cultures de grains

La culture commerciale des grains est une activité d'une grande importance dans la municipalité, mais elle est relativement récente. Au milieu des années 1990, la restauration des pâturages dégradés devenait critique en termes de coûts. C'est dans ce contexte que l'EMBRAPA a développé les premiers tests de restauration des pâturages par des cultures annuelles. L'idée était de réaliser une production agricole dans les parcelles de pâturages dégradés, avec travail du sol, correction du pH et fertilisation, et dont la vente de la production permettrait de financer cette restauration et de constituer de nouveaux pâturages.

A l'époque, le maïs était une option intéressante car il pouvait répondre à la demande de la production avicole dans la région Bragantina²⁷, au nord-est du Pará. Le soja a été introduit dans ce contexte, comme plantation à la fin du cycle de récupération ou entre le maïs et le pâturage (Burlamaqui et al. 2013). L'activité s'est avérée rentable, mais un problème majeur subsistait : la mécanisation nécessaire à la procédure était étrangère au modèle de l'élevage extensif²⁸. Ainsi, les éleveurs ont recherché ces moyens auprès de ceux qui avaient déjà de l'expérience dans cette activité, c'est-à-dire des producteurs venant du Sud du pays. Au fil du temps, le cycle s'est inversé : les agriculteurs ont commencé à louer des pâturages (Burlamaqui et al. 2013) non seulement pour les récupérer, mais avec l'intention de planter surtout du soja, grain à haute valeur au marché. Un ensemble de facteurs peut expliquer le développement de cette culture dans la municipalité, parmi lesquels on peut citer le climat moins humide que d'autres portions de l'Amazonie, les terres bon marché et déjà en partie déboisées et l'accès à une importante route asphaltée, en liaison avec les ports de la région Nord, la BR-010 (Bispo 2007). La première récolte commerciale de Paragominas a eu lieu en 1997, avec 330 hectares de soja plantés (Homma 2005). Depuis, la superficie plantée a augmenté, surtout depuis les années 2000²⁹ (Laurent, Arvor, et al. 2017). Le

²⁷ Nord-est du Pará.

²⁸ En général, un planteur, d'une moissonneuse-batteuse et de deux tracteurs, un gros de 120-140 CV et un plus petit de 50- 60 CV, pour une superficie 500 - 800 ha (Burlamaqui et al. 2013).

²⁹ Le maïs de Paragominas est vendu en grande partie aux éleveurs de poulet de Castanhal et Santa Isabel (communication personnelle avec René Pocard-Chapuis (2019).

déclin de l'exploitation forestière a également poussé les anciens exploitants de bois à opter pour le soja, car ils maîtrisaient déjà la mécanisation (Burlamaqui et al. 2013). En ce qui concerne la structure agraire, même si de nombreux acteurs n'ont pas de titre foncier (Piketty et al. 2015), la production peut se faire par le biais de la location, puisque le retour sur investissement est relativement rapide comparé à d'autres productions comme l'élevage. La plantation du soja n'est pas exigeante en ce qui concerne les infrastructures telles que le corral et les clôtures.

En 2015, la taille moyenne des exploitations de soja était de 1.000 ha, il s'agit donc généralement de grandes exploitations. Évidemment, rares sont les propriétés qui sont complètement couvertes par les plantations de soja, ce sont en moyenne 30% de la superficie qui sont cultivés (données CAR et MODIS³⁰). Mais un aspect important de ce processus est que le soja commence son expansion exactement à une période où non seulement Paragominas, mais une grande partie de l'Amazonie, présente des taux élevés de déforestation. Dans ce contexte, la municipalité a été l'une des cibles des politiques de lutte contre la déforestation qui ont débuté au milieu des années 2000. Elle a été rapidement soumise à la surveillance du Moratoire du Soja (M. G. Piketty et al. 2015), avec détection de la déforestation par télédétection, réalisée par l'INPE (Gibbs et al. 2015).

En 2007, Paragominas figurait sur la liste noire des municipalités les plus touchées par la déforestation en Amazonie. Cette liste impliquait des réductions de crédit, la perte de nombreuses subventions, la suspension de la déforestation légale et des amendes pour déforestation illégale et incendies (Nepstad et al. 2014). Cette situation de crise du territoire a conduit à un « retournement environnemental » dans la municipalité. Les producteurs avaient besoin que la municipalité sorte de la liste noire pour retrouver l'accès au crédit et aux subventions, importants surtout pour la production de soja, et ils avaient aussi besoin de s'assurer une nouvelle image aux yeux des investisseurs et des acheteurs des produits après les campagnes des groupes environnementaux.

C'est dans ce contexte qu'a émergé l'initiative *Município Verde*, une coopération entre l'administration municipale (la mairie), les grands producteurs (syndicat de producteurs ruraux), l'association des producteurs de soja et de grains (APROSOJA), les ONG Imazon et The Nature Conservancy (TNC) avec un financement par la société minière Vale. Cette initiative visait à permettre à la municipalité de sortir de la liste noire et créer les conditions d'une régularisation environnementale des propriétés : avec

³⁰ *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.*

l'inscription d'au moins 80 % des propriétés dans le Cadastre Environnemental Rural (CAR, acronyme en portugais) et la réduction de la déforestation à moins de 40 km²/an. Le programme a entraîné une importante et rapide réduction de la déforestation et, en 2010, la municipalité est sortie de la liste noire (Laurent, Arvor, et al. 2017; Piketty et al. 2015). Pendant cette brève période de crise, l'expansion du soja s'est légèrement ralentie, mais peu après le retrait de la liste noire, le soja a repris son avance sur les pâturages et les forêts secondaires. La proximité des ports et le développement d'un réseau de services et d'infrastructures liés à l'activité, tels que séchoirs, silos, entreprise de service pour la vente et la maintenance des machines, la distribution d'intrants, entre autres, ont permis à ce front pionnier de connaître une intensification et une diversification plus intense que dans le reste du bassin amazonien (Laurent, Arvor, et al. 2017).

Avec la pression de l'expansion du soja dirigée vers les pâturages dégradés et les forêts secondaires, la « loi de la *juquira*³¹ » a été créée, pour l'utilisation de ces zones de régénération forestière. Les parcelles en cours de régénération depuis cinq ans au maximum nécessitent dans cette loi, une procédure de déclaration du « débroussaillage de végétation secondaire » et les parcelles âgées de cinq à vingt ans nécessitent un « permis de suppression de la végétation secondaire », sous la réserve d'une autorisation délivrée par un expert tenant compte des aspects morphologiques de la végétation (Pará 2015).

Dans les zones déjà établies avec des pâturages, les coûts de leur récupération peuvent être compensés par la location des terres à des producteurs de soja, tel que discuté précédemment. La préparation des terres (nettoyage, labour) s'est généralement accompagnée d'une correction du sol avec de la chaux agricole. Les premières plantations sont généralement faites avec du riz, puis sont suivies de variétés de soja du *cerrado*³², et celles développées pour la région par les chercheurs El-Husny, J. C., Andrade, E. B., Meyer, M. C. e Almeida, L. A. (Homma 2005). La plantation du soja, faite au début de la saison des pluies, est généralement suivie par le maïs « *safrinha*³³ », et pendant le reste de la saison sèche, la terre est laissée à découvert jusqu'à la plantation suivante.

³¹ Nom régional donné à la végétation forestière secondaire.

³² Biome caractérisé pour des graminées et arbres peu développés, c'est la savane de l'Amérique du Sud.

³³ Culture suivante à la culture principale d'été (soja) dans une même année agricole. Normalement on trouve des *safrinhas* de maïs, le millet ou sorgho.

La production de soja nécessite un investissement et des coûts de fonctionnement élevés, la préférence est donc faite pour des terres faciles à mécaniser et de bonnes conditions de sol, comme c'est le cas pour les plateaux argileux à Paragominas (Piketty et al. 2015). Même si ces sols de plateau sont généralement acides (Kotschoubey et al. 2005), avec des taux élevés d'aluminium libre, une faible saturation en bases et une faible teneur en carbone organique, ceux-ci sont meilleurs pour les cultures de grains que ceux des fonds de vallée car leur capacité d'échange cationique y est supérieure et la macro-porosité de ces latosols kaolinitiques est favorable au drainage interne.

Dans un contexte de zéro déforestation, les caractéristiques des espaces ouverts, notamment en ce qui concerne la qualité des sols, ont des implications plus importantes pour l'occupation du sol (Piketty et al. 2015). Les zones de sols favorables avec des pâturages dégradés sont non seulement plus recherchées pour la culture du soja, mais elles font aussi l'objet d'améliorations continues, visant à réduire les coûts de production et à augmenter la valeur des terres. La correction du pH par chaulage est un investissement qui donne des résultats sur plusieurs années. Les intégrations agriculture-élevage sont plus fréquentes et, dans certains cas, l'intégration avec la foresterie aussi est présente. Les techniques de semis-direct sont également très répandues (Burlamaqui et al. 2013).

Un autre facteur qui a également contribué à l'expansion rapide du soja dans les pâturages est la saison sèche de plus en plus longue et sévère dans cette région, qui affecte considérablement la production animale qui dépend d'une production continue de fourrage en l'absence de l'ensilage. En revanche, les cultures annuelles comme le soja, faites en saison des pluies, sont moins affectées et sont donc ainsi moins sensibles à ce changement climatique (Laurent, Arvor, et al. 2017).

En ce qui concerne les impacts environnementaux des activités agricoles à grande échelle, plusieurs études ont mis en évidence la modification du bilan de l'eau avec, comme dans les pâturages, une baisse de l'évapotranspiration. La réduction de l'infiltration peut également influencer sur les écoulements de surface, mais certains travaux en Amazonie ont montré que les changements de la forêt en pâturages ou en cultures n'entraînent pas de transformations importantes des écoulements verticaux d'eau dans le sol (Scheffler et al. 2011). Cependant, à Paragominas, des processus érosifs superficiels et des dépôts sédimentaires en aval peuvent être observés dans les zones cultivées, en particulier après des épisodes de précipitations intenses (Figure 34).

Les cultures agricoles avec l'usage d'intrants peuvent également accroître le transfert de nutriments et de produits phytosanitaires (Figueiredo 2007), mais les mesures de qualité de l'eau dans les cours d'eau³⁴ font défaut pour le démontrer à Paragominas.



Figure 34. a) Aspect de la formation de rigoles d'érosion dans les cultures annuelles. b) Aspect d'un chenal fluvial avec dépôt de sédiments, en aval de la même zone de la figure (a) (3°01'08.62" S 47°23'58.46" O). Source : Image Digital Globe, *truecolor*, de 06/05/2019.

3.6. Plantations d'arbre à bois

A Paragominas, la plantation d'arbres à bois est une activité relativement récente, développée à partir des années 2000, depuis lors, elle n'a pas cessé de s'étendre (Pinto et al. 2009). En 2015, la plupart des grandes plantations étaient situées à moins de 30 km des routes asphaltés (observation avec les données Landsat). Parmi les acteurs qui exercent cette activité, les éleveurs peuvent souvent être impliqués, soit en plantant eux-mêmes, soit en louant des terres à des tiers. On peut distinguer quelques logiques de plantation d'arbres dans la municipalité. Toute une série de politiques ont permis l'expansion de cette activité à Paragominas, parmi lesquelles on peut souligner l'aide de l'Etat à travers les crédits des banques de développement pour la chaîne de production de cellulose et du papier. Cette industrie est centrée à Imperatriz-MA, dont la position géographique favorise l'approvisionnement par différentes municipalités de l'Amazonie orientale et de la région du « MAPITO³⁵ » et, surtout, l'acheminement par le chemin de fer au port d'Itaqui-MA.

Au départ, l'exploitation forestière à Paragominas a été encouragée par l'explosion de la demande de charbon de bois pour le complexe sidérurgique de Carajás. La société Vale S.A. avait acquis de vastes étendues à Paragominas pour y planter des

³⁴ Cours d'eau connus dans la région sous le nom de « *igarapés* ».

³⁵ MAPITO ou MATOPIBA, région de front agricole au *cerrado* à l'intersection des États du Maranhão, du Piauí, des Tocantins et de Bahia.

eucalyptus. Ces zones disponibles étaient principalement de grands pâturages dans les vallées, car les plateaux argileux sont essentiellement constitués de forêts. Toutefois, en même temps, la production de charbon de bois illégal à partir de bois de forêts primaires a également connu une forte augmentation dans cette période. L'image de l'entreprise s'en est trouvée ternie, accusée de promouvoir la déforestation dans la région. A l'époque, l'entreprise a tenté d'appliquer des mesures pour l'achat de charbon de bois provenant de zones non liées à la déforestation, mais sans grand succès.

Le Code Municipal de l'Environnement (Paragominas 2011) a interdit ensuite l'utilisation d'arbres de forêts primaires pour la production de charbon de bois et la Vale S.A. a transféré ses plantations à une autre société : Suzano Papel e Celulose, à Açailândia-MA. Cela a réduit l'apparition des nouvelles grandes plantations d'eucalyptus, mais a augmenté l'apparition des petites plantations privées qui vendent la production à Suzano Papel e Celulose. A la suite de ces plantations liées à l'industrie de papier, d'autres projets de plantations d'arbres se sont développés tels que ceux du groupe Concrem (Floraplac) et de l'association Paragoflor (Pinto et al. 2009), dont la production est destinée à l'usine de fabrication de MDF³⁶ de Paragominas (Oliveira, Pereira, et Nascimento 2018).

D'autres plantations d'arbres, généralement à plus petite échelle, peuvent être effectuées en réponse à une logique de diversification de la production, comme forme alternative de reconstitution forestière de la Réserve Légale (Pinto et al. 2009), ou pour la fourniture de bois combustible pour les séchoirs à grains. Une partie de la production est également consacrée à la plantation d'essences autres que l'eucalyptus, en particulier le paricá (*Schizolobium amazonicum*) (Verissimo et Pereira 2014).

Les plantations d'arbres à bois à grande échelle nécessitent une technologie et des investissements importants et, comme le soja, elles conduisent à valoriser des zones à plus fort potentiel agronomique (Piketty et al. 2015).

³⁶ *Medium Density Fiberboard*, matériau à base de bois avec une densité et un comportement uniforme, largement utilisé dans la fabrication de meubles.

4. Principaux événements de la période étudiée

Ce qui suit est un résumé des principaux événements sociaux, politiques, environnementaux et économiques qui se sont produits au cours de la période étudiée aux niveaux international, national et municipal et qui peuvent avoir un lien avec des changements dans la dynamique de l'occupation du sol à Paragominas.

- 2000-2004 : période au cours de laquelle il y a eu la création du Système National d'Unités de Conservation (SNUC). L'élection de Luiz Inácio Lula da Silva à la présidence a été suivie de la promulgation du premier PPCDAm³⁷. Ce plan a été à l'origine de la création d'environ 500.000 km² d'hectares d'unités de conservation et de l'homologation de 100.000 km² de réserves indigènes en Amazonie (MMA 2016). Ces actions ont commencé à avoir un impact important sur la réduction de la déforestation en Amazonie.
- 2005 : Définition du macrozonage écologique et économique du Pará (loi provinciale n° 6.745/2005 ; Governo do Estado do Pará, 2012).
- 2006 : Le CAR est imposé au niveau de l'État au Pará, en même temps que la mise en œuvre du Moratoire du soja, renforçant ainsi les actions contre la déforestation en Amazonie.
- 2007 : Année clé pour Paragominas, la « Liste des Municipalités Prioritaires de l'Amazonie » (liste noire) est créée, elle regroupe les municipalités qui déboisent le plus. (Décret n° 6.321 de 21 de décembre de 2007) (MMA, 2007). Paragominas et 16 autres municipalités figurent sur la liste, et les sanctions et embargos sur la vente de produits agricoles provoquent une crise sociale et économique.
- 2008 : Parallèlement à la hausse des prix du soja et du maïs au niveau international (FMI Primary Commodity Prices, 2014), d'importantes mesures de lutte contre la déforestation et la criminalité organisée sont prises (par exemple, les actions *Arco de Fogo* et *Boi Pirata*). Le programme *Fundo Amazonia* est également créé. Mais surtout, l'initiative *Município Verde* est lancée à Paragominas. Ce programme, à travers différents acteurs, vise à réduire les taux de déforestation et à cadastrer les propriétés dans le CAR afin de rayer la

³⁷ « *Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazonia* » (Plan d'action pour la prévention et le contrôle de la déforestation en Amazonie).

municipalité de la liste noire, retrouver l'accès au crédit et « nettoyer » l'image de la municipalité face au marché et la société.

- 2009 : Année de la COP 15 à Copenhague, où le Brésil s'engage à réduire la déforestation de 80% d'ici 2020 et où le Plan National pour le Changement Climatique (PNMC) est institué. La mise en œuvre du PPCDAm II est lancée et d'importantes opérations telles que le *Boi Pirata II* sont menées au niveau des États. L'ONG Greenpeace lance une campagne qui associe l'élevage bovin en Amazonie aux grandes marques de distribution mondiale. Dans ce contexte, un accord d'ajustement de conduite (TAC, en portugais) est établi dans les abattoirs, qui s'engagent à ne pas acheter de bétail dans les zones déboisées et les unités de conservation en Amazonie.
- 2010 : Une autre année clé pour Paragominas, parce qu'elle atteint les objectifs de réduction de la déforestation ce qui lui permet d'être la première municipalité à quitter la liste noire. Zonage écologique et économique de la zone Est du Pará, et la route PA-256 entre Paragominas et la route PA-451 est asphaltée.
- 2011 : Dilma Rousseff, est élue présidente et le programme *Município Verde* est étendu à l'échelle de l'État du Pará. A Paragominas, le projet « *Pecuária Verde* » commence.
- 2012 : Au niveau national, le Nouveau Code Forestier (Loi fédérale n° 12.561) est institué, avec des modifications notamment dans la définition de la Réserve Légale et l'établissement du CAR au niveau national. Le prix du soja est élevé durant cette période.
- 2015 : La COP 21 se tient à Paris, le Brésil s'engage à mettre fin à la déforestation illégale avant 2030.
- 2016 – 2017 : Création de la politique nationale de rétablissement de la végétation native (PROVEG).

Table 1. Principaux événements socio-politiques qui peuvent être liés à la dynamique de l'occupation du sol à Paragominas entre 2000 et 2017.

Année	Local	Municipale	État	Amazonie	National	International	
2000					SNUC		
2001							
2002							
2003					Lula		
2004				PPCDAm I		Baisse du prix du maïs	
2005			MACROZEE				
2006			CAR	Moratoire du soja		Baisse du prix du soja	
2007		Entrée dans la liste noire		Liste noire			
2008		Programme « Município Verde »	« Arco de Fogo »	PPCDAm II		Hausse du prix du maïs	
			« Boi Pirata I »				
				« Fundo Amazonia »		Hausse du prix de la viande	Hausse du prix du soja
2009				Action ONG Greenpeace		Baisse du prix du maïs	
			« Boi Pirata II »	PPCDAM III			
			« TAC de la viande »			Baisse du prix de la viande	Baisse du prix du soja
							Cop 15
2010	Asphalte PA-256	Sortie de la liste noire			Hausse du prix de la viande		
			ZEE Zone Est				
2011	Programme « Pecuária Verde »		Programme « Municípios Verdes »		Dilma Roussef	Hausse du prix du maïs	
2012					Nouveau Code Forestier	Hausse du prix du soja	
2013							
2014							
2015						COP 21	
2016					Michel Temer		
2017					PROVEG		

Chapitre 4 – Systèmes de décision d'utilisation des ressources biophysiques à Paragominas

1. Données et méthodes pour la cartographie de Paragominas

1.1. Série temporelle d'occupation du sol

Pour la cartographie de la dynamique de l'occupation du sol, une série temporelle d'images est fondamentale. A cette fin, quelques considérations ont d'abord été faites sur le choix du capteur : i) Période couverte : il est nécessaire de disposer de données datant au moins du début de l'expansion de la culture de grains à Paragominas, qui s'est amplifiée à la moitié de la décennie 2000. ii) Echelle temporelle : la période de retour du capteur ne peut être trop longue, surtout pour réduire l'occurrence des zones non observées parce que couvertes de nuages sur le territoire étudié³⁸. iii) Echelle spatiale : les données doivent être suffisamment précises pour identifier les parcelles des principales occupations du sol (cultures de grains, pâturages, agriculture familiale), tout en ayant une échelle spatiale qui ne soit pas exagérément réduite et qui compromette le traitement à l'échelle du territoire choisi. iv) Domaine spectral : une couverture spectrale adéquate pour distinguer les variations végétales dans un milieu tropical humide.

Les capteurs MODIS et ceux de la série Landsat couvrent plus ou moins toutes ces caractéristiques, mais MODIS a une résolution trop grossière pour capturer les cultures dans l'agriculture familiale, alors que Landsat a des problèmes avec excès des nuages. Le choix final a été défini en fonction de l'évaluation du Table 2.

³⁸ Surface total de la municipalité : 19.342 km².

Table 2. Comparaison des capteurs MODIS et Landsat selon les exigences de l'étude. Une étoile : moins favorable. Trois étoiles : plus favorable.

	MODIS	Landsat
Période couverte	***	***
Échelle temporelle	***	*
Échelle spatiale	*	**
Domaine spectral	***	***

Les données des capteurs MODIS ont été choisies, principalement en raison de la fréquence de passage des satellites Terra et Aqua, ce qui permet de générer des images annuelles pratiquement sans l'interférence des nuages, un aspect important pour cette région. Cependant, l'inconvénient de ce choix est que la résolution spatiale moyenne (250 m) ne permet pas d'identifier de petites parcelles d'agriculture familiale, souvent de taille inférieure à un pixel. Le capteur MODIS est un instrument embarqué sur les satellites Terra et Aqua. Le satellite Terra a une orbite du nord au sud passant par l'équateur le matin, tandis qu'Aqua est du sud au nord passant par l'équateur l'après-midi, ce qui fait que les deux satellites couvrent la totalité de la surface terrestre tous les 1-2 jours (*swath* de 2.330 x 10 km). Ils enregistrent passivement un total de 36 bandes spectrales, avec une résolution spatiale de 250 m (bandes 1-2), 500 m (bandes 3-7) et 1 000 m (bandes 8-36) (<https://modis.gsfc.nasa.gov>). Les produits MOD13Q1 (satellite Terra) et MYD13Q1 (satellite Aqua), générés par l'USGS, ont été choisis pour la classification de l'occupation du sol, notamment pour les indices de végétation NDVI et EVI et la procédure de filtrage et de substitution de pixels. L'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), est calculé comme suit

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

où *NIR* est la bande *Near Infra Red*, et *red* est la bande rouge. Il s'agit d'un indice normalisé (entre -1 et +1) qui intègre deux bandes efficaces pour évaluer l'activité photosynthétique des plantes et donc les caractéristiques et la saisonnalité de la végétation. Cependant, dans le cas de régions à forte biomasse (comme l'Amazonie), la réponse peut être excessivement saturée. Dans ce cas, l'indice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) présente des avantages. L'EVI est calculé comme suit :

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L}$$

où *G* est un facteur de gain, égal à 2,5 ; *C*₁ et *C*₂ sont des coefficients de correction de la diffusion atmosphérique (respectivement 6 et 7,5) et *L* est le facteur de correction du sol (égal à 1). Après le calcul de ces indices de végétation, un algorithme sélectionne

les meilleurs pixels au bout de 16 jours pour les données de chaque satellite, en utilisant les critères de faible nébulosité, de faible angle de vision et les valeurs les plus élevées de NDVI et EVI (<https://lpdaac.usgs.gov>). Une image est reconstituée tous 8 jours, il est ainsi possible d'obtenir quatre images par mois. L'avantage de ce produit est la possibilité d'obtenir des images même pendant la saison des pluies en Amazonie, ce qui est plus difficile dans le cas de la série Landsat.

Classification : la méthode de classification choisie devait permettre de distinguer les trois principales occupations des sols de Paragominas, à savoir forêt, pâturages et agriculture. Les cultures et les pâturages peuvent présenter des réponses similaires pendant les périodes humides. En outre, une zone agricole qui effectue l'intégration des cultures et des pâturages peut être classée à un moment donné comme une zone agricole et à un autre comme un pâturage. Les pâturages très envahis de ligneux peuvent être classés comme forêts pendant la saison des pluies. En ce sens, une méthode qui tient compte des variations saisonnières de la végétation est mieux adaptée.

Selon (Vuolo, Richter, et Atzberger 2011), l'utilisation de mesures phénologiques peut être utile comme entrée dans une classification de l'occupation du sol. Perrier (2014) a appliqué une méthode de classification au moyen de mesures phénologiques (indice EVI-MODIS) comme entrée pour une classification supervisée du type d'arbre décisionnel à Paragominas. La série temporelle de Perrier (2014), allant de 2004 à 2013 a été complétée jusqu'à 2015. De plus, les classes d'occupation du sol que la méthode n'a pas été en mesure d'identifier (forêt secondaire et plantation d'arbres) ont été également incluses avec des méthodes accessoires (cf. infra).

Définition des paramètres phénologiques : les paramètres phénologiques sont définis en fonction de la variation temporelle des indices de végétation NDVI ou EVI. Les paramètres phénologiques sont des valeurs relatives à la variation temporelle de la végétation, comme les réponses aux saisons climatiques et aux cycles végétatifs. Le logiciel TIMESAT (Eklundh et Jonsson 2017) a été développé dans le but de calculer ces paramètres (Figure 35).

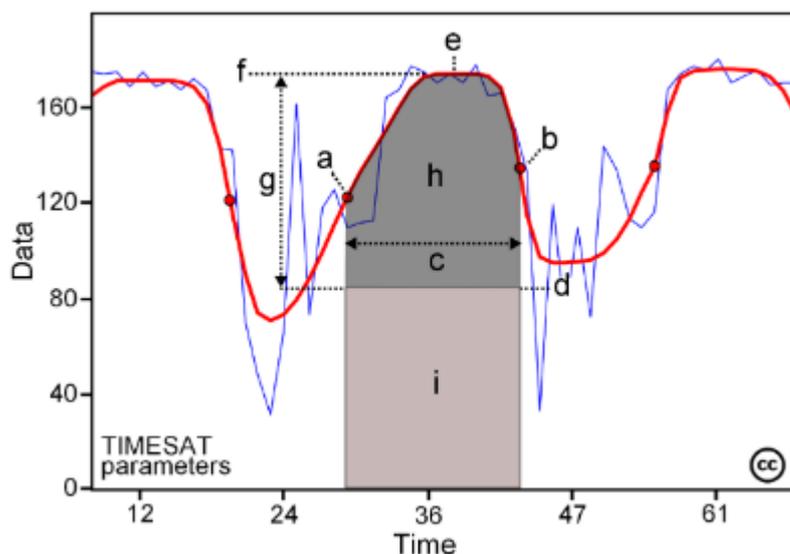


Figure 35. Certaines des paramètres phénologiques générées par TIMESAT : a) début de saison, b) fin de saison, c) durée de la saison, d) valeur de base, e) milieu de saison, f) valeur maximale, g) amplitude, h) petite intégrale, h + i) grande intégrale. Source : Eklundh et Jonsson (2017).

Pour ce faire, il est nécessaire de créer une pile (*stack*) avec toutes les images pendant la période d'intérêt. Pour générer une courbe phénologique, le programme TIMESAT a besoin d'au moins trois années de données. Ainsi, pour générer les métriques pour l'année 2015, des données ont été requises entre fév./2014 e déc./2016 de la base de données de l'*University of Natural Resources et Life Sciences* à Vienne (<http://ivfl-info.boku.ac.at/>), totalisant 153 images. Avant de calculer les paramètres, il est nécessaire de filtrer la série temporelle EVI avec un algorithme qui lisse la courbe et permet l'identification de la saison.

Comme les images de cette base de données sont déjà filtrées avec l'algorithme Whittaker, cette procédure n'était pas nécessaire dans TIMESAT. Pour la définition des paramètres phénologiques, il est nécessaire de définir les paramètres de début et de fin de saison. Celles-ci ont été définies à 0,1 de l'amplitude et au paramètre saisonnier 1, c'est-à-dire un cycle complet de la centrale par année. Ensuite, les paramètres sont calculés pour chaque vecteur temporel de pixels et doivent être exportées au format image (Figure 36).

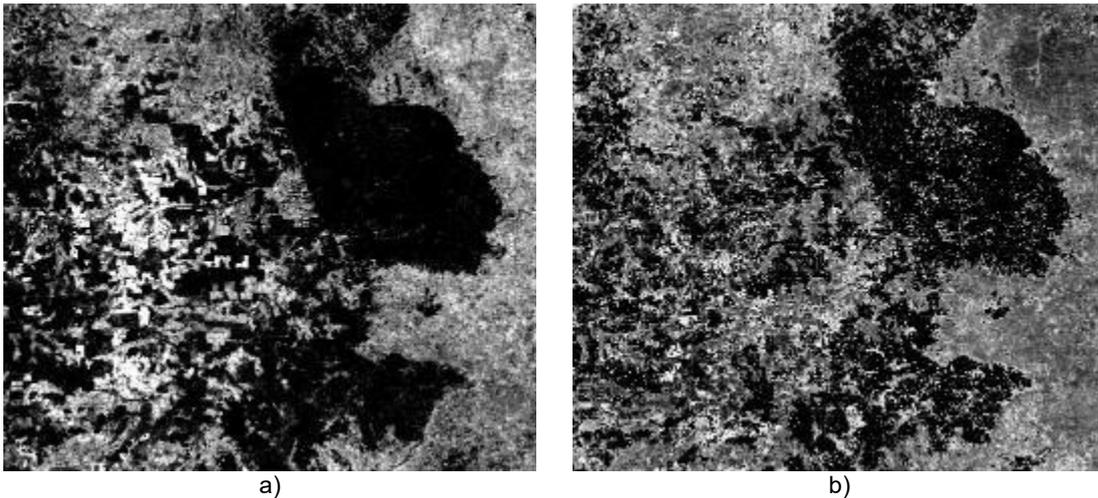


Figure 36. Paramètres phénologiques a) amplitude et b) base. Secteur à l'est de Paragominas, la partie la plus sombre est la réserve indigène.

Pour la classification, l'algorithme Random Forests avec « R » a été utilisé (Liaw et Wiener 2018). Random Forests est une méthode de classification basée sur des arbres de décision. Un algorithme d'arbre de décision applique une opération de séparation de données selon un critère donné, cette opération étant répétée récursivement aux ensembles formés jusqu'à ce qu'un seuil prédéterminé soit atteint. Random Forests rassemble plusieurs arbres (forêt). Pour la classification d'un nouvel objet à partir d'un vecteur d'entrée, ce vecteur est placé pour différents arbres. Chaque arbre donne ensuite une classification et « vote » pour une classe particulière. A la fin, l'arbre choisit le classement avec le plus grand nombre de votes. Les avantages de cette méthode sont la réduction du *overfitting*³⁹ et il est possible d'obtenir les probabilités de chaque classe pour un pixel (produit *maxincertitude*).

Les vecteurs d'entrée dans ce cas sont les valeurs EVI des 3 années, les 11 paramètres phénologiques calculés et les ROI (*Region of Interest*) d'apprentissage. Les ROI sont composés de points de terrain et de points interprétés avec une composition colorée de image satellitaire. Les points de terrain ont été obtenus lors de travaux de terrain⁴⁰ en 2014, soit 15 points de canne à sucre, 211 points de forêt, 78 points de pâturages propres, 49 points de pâturages dégradés et 18 points de forêts secondaires. Ces points ont servi de référence pour la collecte des points dans une composition colorée (RVB) temporelle de l'EVI. Cette composition est la représentation de l'EVI pour trois dates distinctes sur un cycle phénologique complet.

³⁹ Une adaptation excessive du modèle aux données et loin d'une généralisation.

⁴⁰ Collectées par F. Laurent (2014).

Dans le cas présent, nous avons utilisé les dates : *Rouge* (28/03/2015) ; *Vert* (25/04/2015) et *Bleu* (25/09/2014) (Figure 37). Cinq classes ont ensuite été définies (Figure 38).



Figure 37. Composition colorée de Paragominas avec des valeurs EVI pour les dates Rouge (28/03/2015), Vert (25/04/2015) et Bleu (25/09/2014).

La classe 1 (sol nu/urbain) a de faibles valeurs EVI tout au long de l'année, donc elle est noire. La classe 2 (forêt) a une courbe haute tout au long de l'année, autour de 6.000 EVI, ce qui donne une coloration violette. La classe 3 (cultures), en revanche, présente une forte amplitude EVI, avec un pic proche du mois de mars, donc la couleur tend vers le rouge (Figure 38). La classe 4 (pâturages) a également une certaine ampleur, mais elle est moins intense que les cultures, et les valeurs d'EVI en début de saison sont plus élevées. Enfin, la classe 5 (déforestation), est caractérisée par une couleur bleu intense, représentant dans ce cas, une coupe de la forêt à la mi-septembre, ce qui rend l'EVI dans les mois suivants beaucoup plus faible.

Avec ces classes : 419 points de sol nu/zone urbaine ; 615 points de forêt ; 624 points de cultures ; 639 points de pâturages et 140 points de déforestation ont été collectés. Pour chaque point, les métriques phénologiques respectives et les valeurs de trois ans de l'EVI (153 images) sont ensuite extraites, formant les vecteurs d'entrée pour l'algorithme Random Forests (base de données).

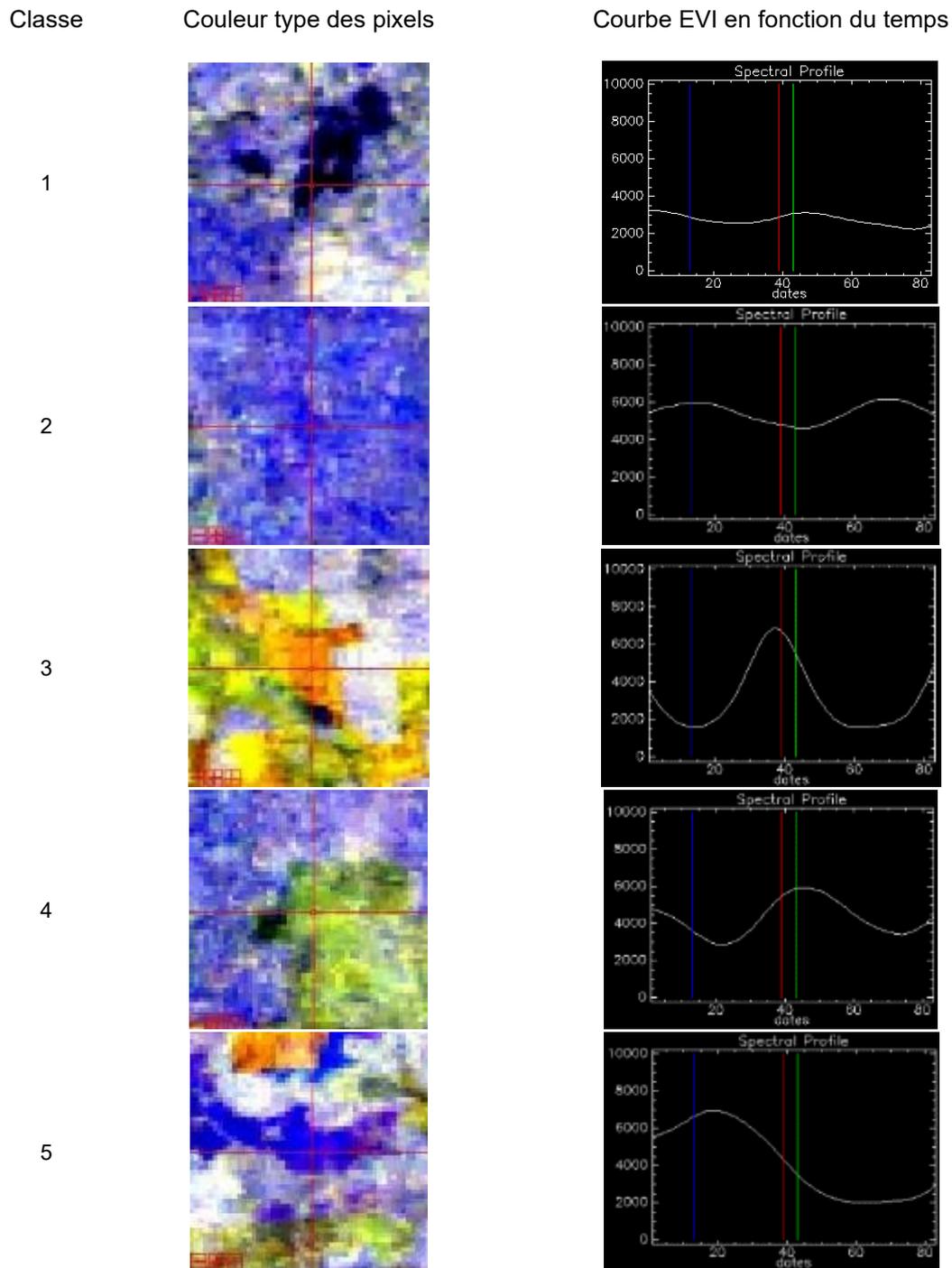


Figure 38. Caractéristiques des ROI de classes d'occupation du sol collectées. Dans les graphiques, l'axe des ordonnées représente les valeurs d'EVI, et celui des abscisses représente les dates, quatre dates par mois, du 05/07/2014 au 30/01/2016.

Ensuite, la base de données a été répartie au hasard entre données d'entraînement (70 %) et données de validation (30 %). Le résultat de la classification est ensuite soumis à deux traitements pour éliminer les erreurs : le filtrage par tamisage et le filtrage des bordures, les deux utilisant des scripts IDL⁴¹. Le filtrage par tamisage vise à

⁴¹ Langage de programmation interactif utilisé pour des traitements dans le logiciel Envi.

éliminer les pixels isolés d'agriculture, issus des erreurs de classification. Le filtrage des bordures, cependant, vise à éliminer une erreur commune dans l'utilisation des images MODIS, qui sont des pixels mixtes.

En raison de ses dimensions considérables (250 m x 250 m), il n'est pas rare qu'un pixel recouvre en partie la forêt, les pâturages ou l'agriculture. Ainsi, ce mélange spectral fait en sorte que les pixels qui se trouvent à la lisière entre culture et forêt présentent une réponse semblable à celle des pâturages et sont donc classés comme tels. Pour corriger ce problème, il faut d'abord sélectionner ces pixels de pâturage entre la culture et la forêt. Pour ce faire, on dilate à la fois les *patches*⁴² de forêt et les *patches* de cultures, ce qui permet de sélectionner tous les pixels de pâturage qui sont couverts à la fois par la forêt et par cultures. Ces pixels sont ensuite remplacés par la deuxième probabilité la plus élevée d'affectation de classe, entre forêt et culture, grâce au produit *maxincertitude* obtenue lors de la classification.

Identification des forêts secondaires : la méthode de classification à l'aide de paramètres phénologiques sur une seule année ne permet pas d'identifier les forêts secondaires, principalement en raison de la similitude de la réponse temporelle de l'EVI avec la forêt primaire. Un chevauchement de masques de forêt et non forêt a été effectué, étant considéré comme une forêt secondaire les zones dans lesquelles il y avait auparavant une autre occupation du sol. Une classification forêt/non-forêt a été faite avec des images Landsat 5 TM de 1989 pour obtenir des forêts de plus anciennes que 2000. Cependant, en raison d'erreurs de classification fréquentes dans les zones de bordure (principalement dues à des pixels mixtes) entre les *patches* entre différentes classifications, l'application de masques génère des erreurs cumulatives à mesure que les masques sont appliqués. Pour réduire l'effet de ces erreurs, nous avons procédé à l'élimination de tous les pixels de forêt secondaire alignés avec plus de quatre pixels, en supposant que ce pattern est davantage lié aux erreurs de classification qu'à la forêt secondaire (Table 3). Ces pixels ont donc été reclassés en pâturage, considérant que les pixels mixtes peuvent être constitués plus fréquemment de pâturages dégradés et de pâturages que de forêt primaire pure. Sur la dernière image, en 2015, 8 215 pixels soit 18,75 % de la superficie de la forêt secondaire ont été éliminés.

⁴² Ensemble de pixels reliés entre eux et appartenant à la même classe d'occupation du sol.

Table 3. Pixels de forêt secondaire supprimés (suites de 4 pixels alignés ou plus).

Anée	Pixels originales	Pixels exclus	Aire pixels exclus (km ²)	Pourcentage de la superficie exclue
2004	17.508	741	46,31	4,23
2007	19.072	2.227	139,19	11,68
2010	26.687	4.475	279,69	16,77
2013	35.865	5.716	357,25	15,94
2015	43.908	8.215	513,44	18,71

Définition des plantations d'arbres : Dans la procédure décrite ci-dessus pour délimiter les forêts secondaires, les masques finissent par inclure également les plantations d'arbres. Pour les séparer, une identification par photo-interprétation a été réalisée à partir des images Landsat TM et ETM+ pour les années 2004, 2007, 2010, 2013 et 2015, disponibles sur la plate-forme Google Earth. La procédure consistait en une inspection visuelle utilisant comme référence une grille de 5 km de côté.

Les plantations d'arbres sont identifiables par la texture régulière, la constance temporelle de la couverture végétale et la forme géométrique des parcelles. La limitation de cette procédure est que les parcelles de moins de 500 x 500 m ne peuvent être identifiées, de sorte que seules les grandes plantations ont été distingués dans ce travail. A l'avenir, d'autres techniques pourraient être testées pour l'identification automatique des plantations d'arbres, telles que celle réalisée par Paegelow et al. (2012) et Maestriperi et al. (2017).

Validation : la validation de chacune des scènes de la série temporelle a été effectuée par comparaison directe entre les points de contrôle et les pixels classés. Les points de contrôle utilisés sont ceux du travail de terrain (479 points) effectué en 2014 et 2015 (Perrier 2014), et 2.631 points acquis en partie par photo-interprétation (forêt primaire, pâturage, agriculture) d'images Landsat TM et ETM+ traitées avec le logiciel CLASLITE par Hasan (2019), et les scènes Landsat *truecolor* disponibles sur la plateforme Google Earth. Les points de forêt secondaire ont été vérifiés à l'aide d'une séquence temporelle d'images. Le nombre de points recueillis par classe d'occupation du sol est présenté dans la Table 4. La validation directe des points sur des pixels individuels classés a permis d'obtenir une précision moyenne annuelle supérieure à 0,7, et une moyenne par classe supérieure à 0,6. Les meilleures valeurs de classification ont été obtenues pour la forêt primaire (0,94), tandis que les pires valeurs ont été obtenues pour la forêt secondaire (0,67) (Table 5).

Table 4. Nombre de points identifiés par classe d'occupation du sol et par année.

Classes	2004	2007	2010	2013	2015
Forêt primaire	70	101	112	116	180
Agriculture	106	93	111	119	213
Pâturage	641	101	109	123	262
Forêt secondaire	281	181	212	213	246
Total	1096	470	539	560	897

L'indice Kappa, qui évalue le degré d'accord entre deux jugements, a également été utilisé pour évaluer l'accord général des classifications. Cet indice varie entre 0 et 1, et l'interprétation a été faite à partir des classes définies par (Landis et Koch 1977). Chaque année, Kappa dépasse 0,6, ce qui indique un accord substantiel des classifications avec les points observés. Les cartes qui en résultent pour chaque année sont présentées au Chapitre 6 et Annexe 2.

Table 5. Précision et valeurs Kappa des classes d'occupation du sol pour chaque année de la série temporelle.

Classes	2004	2007	2010	2013	2015	Moyenne
Forêt primaire	0,9857	0,9406	0,9821	0,9828	0,8500	0,9482
Agriculture	0,6286	0,9247	0,9182	0,9099	0,8095	0,8382
Pâturage	0,9156	0,8542	0,8019	0,9268	0,8702	0,8737
Forêt secondaire	0,6192	0,6444	0,6825	0,7571	0,6776	0,6762
Moyenne	0,7873	0,8410	0,8462	0,8942	0,8018	
Kappa	0,68	0,74	0,75	0,82	0,73	

1.2. Variables spatiales biophysiques

Pente : la pente a été obtenue à l'aide de l'outil *slope* sur ArcGIS 10.1, à partir des données du MNT Topodata (Valeriano et Rossetti 2012), avec une résolution spatiale de 30 m, et basé sur le modèle d'élévation SRTM. Ensuite, le résultat a été rééchantillonné à une échelle spatiale de 250 m, pour correspondre à la même échelle spatiale de la série temporelle de l'occupation du sol (Figure 39).

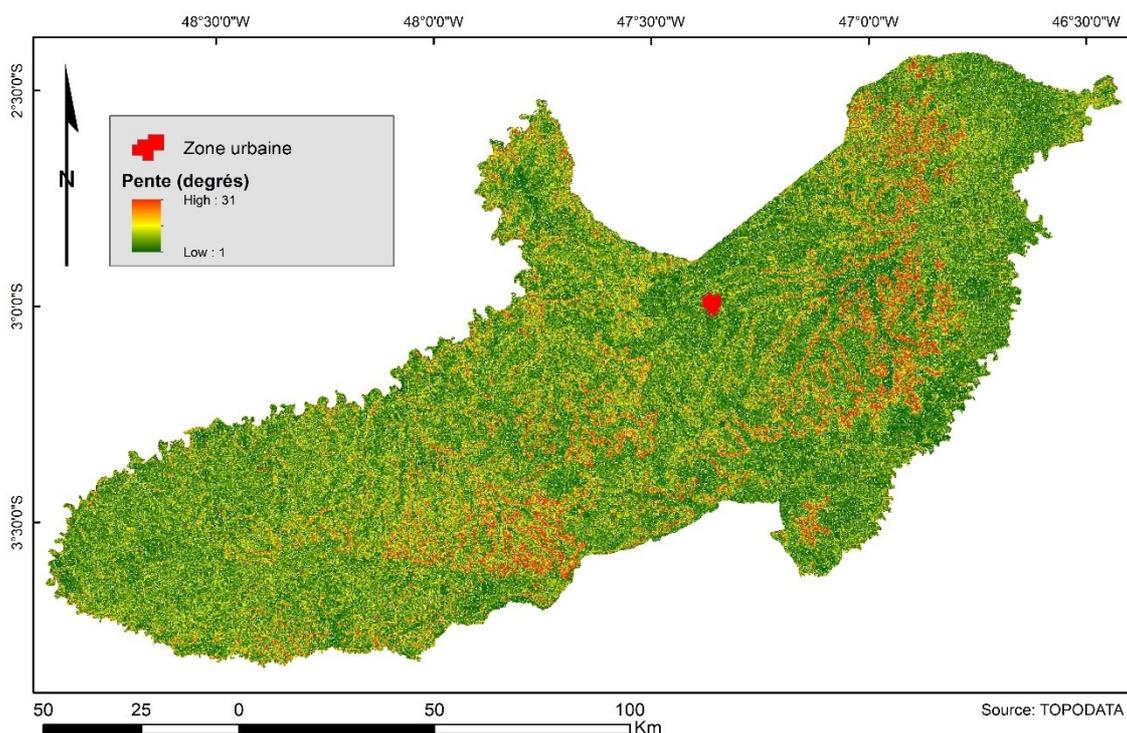


Figure 39. Pente dans la municipalité de Paragominas.

Distance euclidienne du réseau de drainage : cette variable est basée sur le réseau de drainage généré à partir du MNT Topodata, à l'aide des outils *hydrology* sur ArcGIS 10.1. Le drainage a été classé selon Strahler, seuls les cours d'eau d'ordre supérieur à 3 étant sélectionnés, car les canaux modélisés d'ordre inférieur représentent généralement un drainage intermittent, notamment dans les zones de plateau. Ensuite, des zones tampon ont été définies tous les 200 m à partir des rivières, jusqu'à 1.000 m. Ils ont ensuite été transformés en format matriciel et échantillonnés à 250 m pour s'adapter au format MODIS (Figure 40).

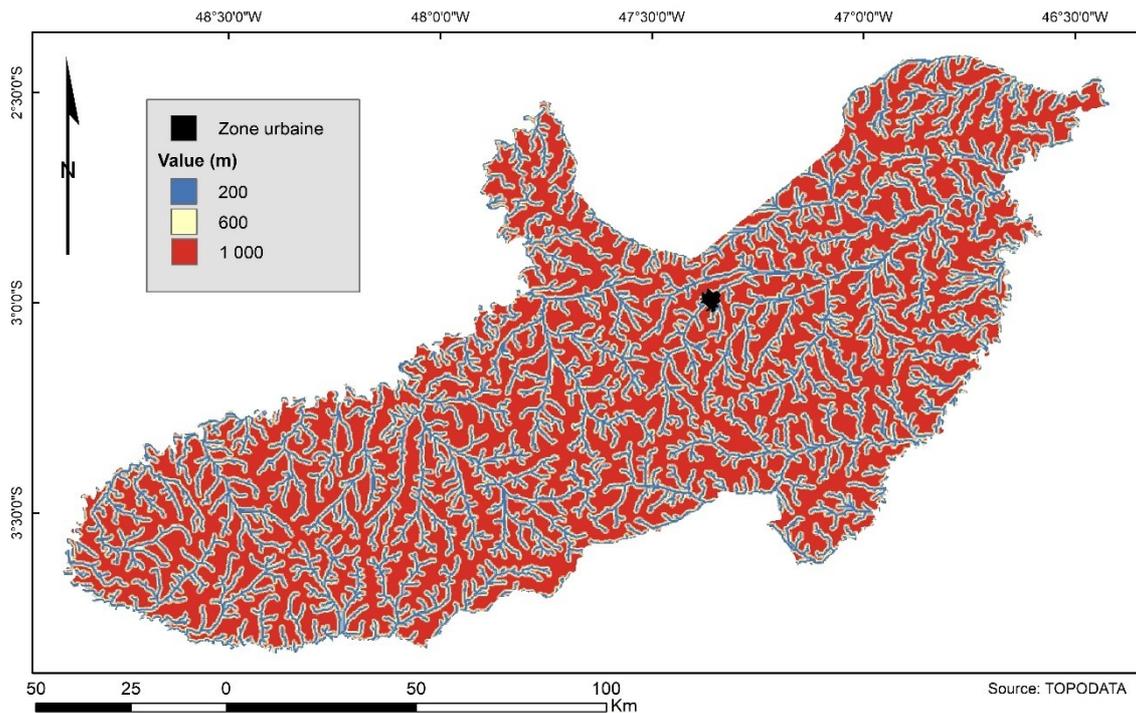


Figure 40. Distance euclidienne du réseau de drainage.

Texture du sol : la texture du sol a été obtenue par cartographie réalisée par Laurent et al. (2017) à l'échelle 1:100 000. Les auteurs se sont appuyés sur la relation étroite entre la topographie, contrôlée principalement par la résistance de la cuirasse latéritique, et les caractéristiques des sols de la région, pour réaliser une cartographie prédictive basée sur un MNT. La cartographie a permis de cartographier efficacement 78 % des points de contrôle d'argile de Belterra, 90 % de ceux de la cuirasse ferrugineuse, 41 % d'argile tachetée et 60 % de sable argileux. Ces données, obtenues en format vectoriel, ont été transformées en raster et rééchantillonnées à 250 m (Figure 41).

Unités pédomorphologiques : en considérant les aspects topographiques et pédologiques, Thales et Pocard-Chapuis (2015) ont identifié six unités pédomorphologiques pour la municipalité : i) zone inondable ; ii) pente abrupte ; iii) vallon sec ; iv) vallon humide ; v) plateau argileux et ; vi) versant sableux. Cette cartographie s'est fait principalement avec la fonction HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) développé par Rennó et al. (2008) (Figure 42 et Figure 43).

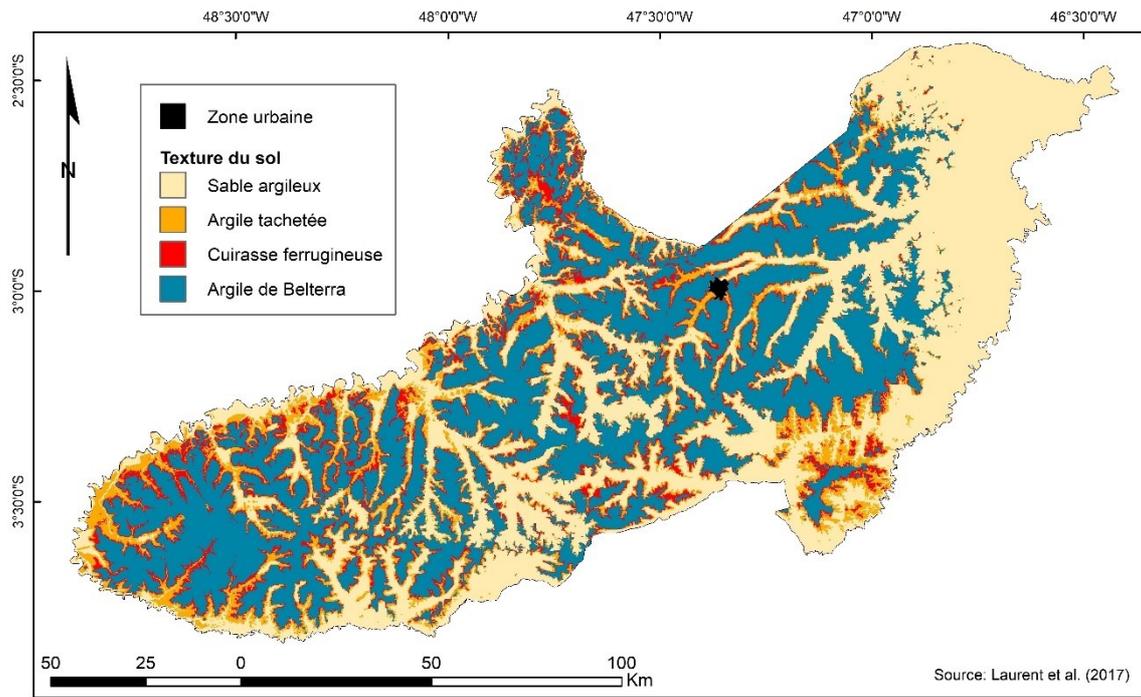


Figure 41. Texture du sol dans la municipalité de Paragominas.

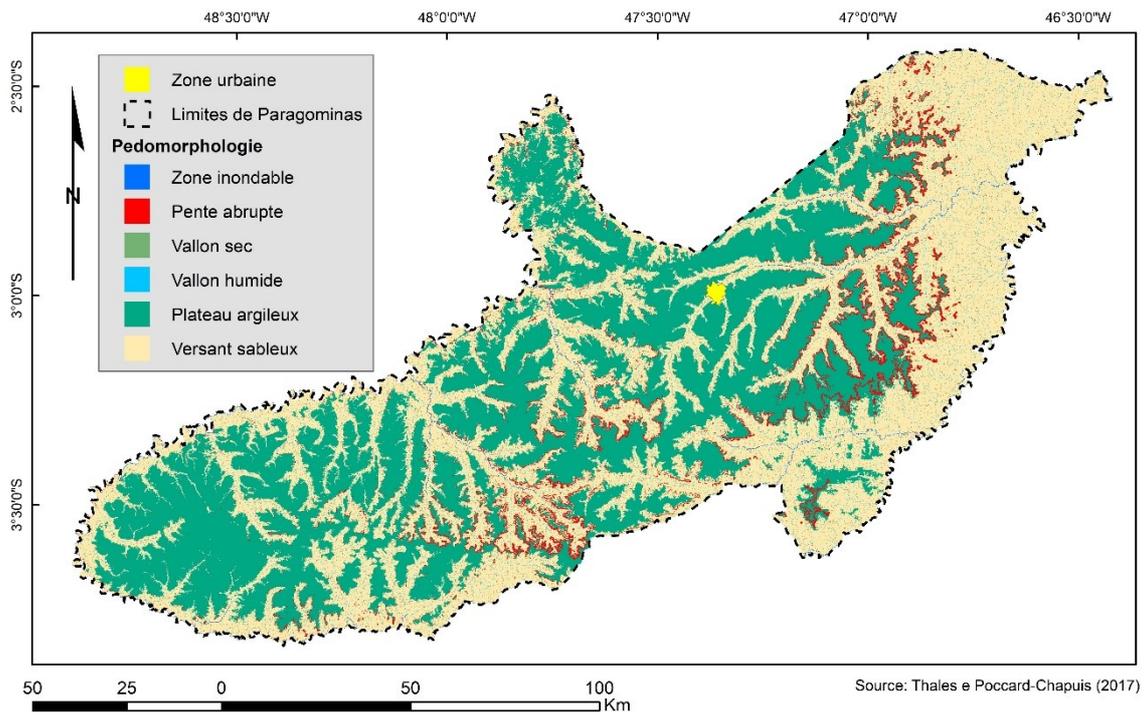


Figure 42. Unités pédomorphologiques de Paragominas.

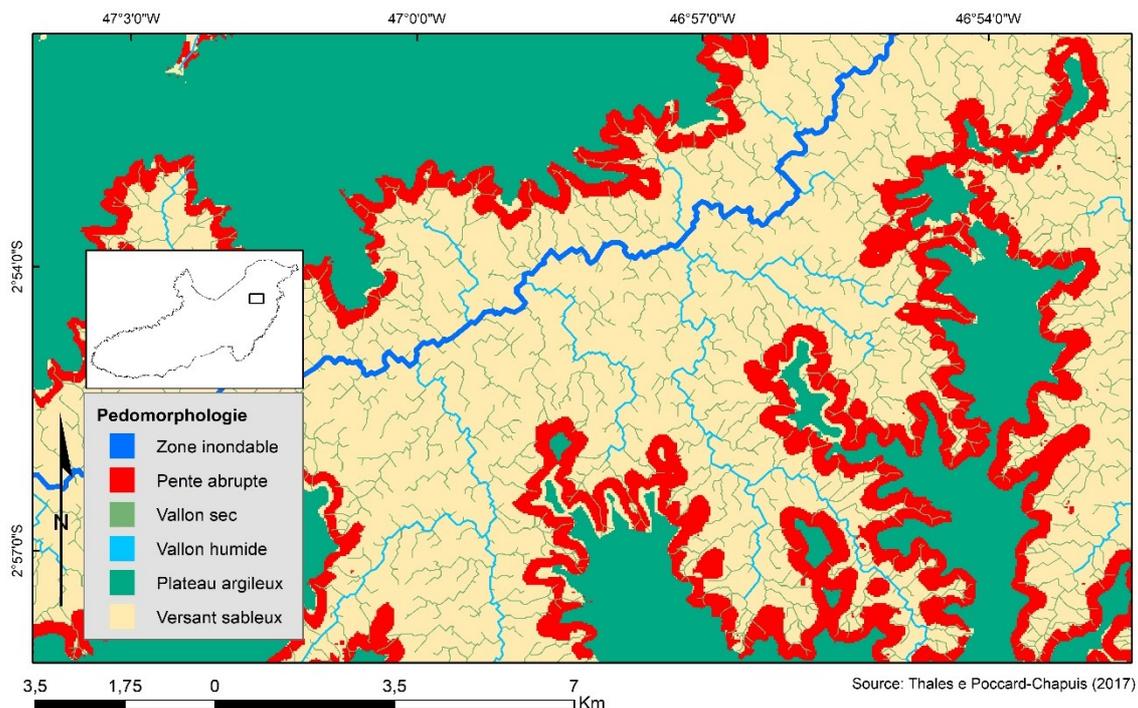


Figure 43. Détail des unités pédomorphologiques de Paragominas.

1.3. Variables de l'organisation du territoire

Distance euclidienne des routes principales : nous avons considéré comme « routes principales » les routes asphaltées qui traversent la municipalité (BR-010 et PA-256) et une route non asphaltée, mais qui a un flux important de véhicules dû à un entretien régulier, la PA-125. Ces routes, obtenues sous forme de fichier de forme à partir de la base de données DNIT (<http://www.dnit.gov.br>), ont été utilisées pour générer plusieurs zones tampons tous les 5.000 mètres. Ces zones tampon ont également été transformées en raster et rééchantillonnées à 250 m selon la maille MODIS (Figure 44).

Distance euclidienne de toutes les routes : l'ensemble des routes principales et secondaires (ces dernières sont toutes non asphaltées) ont été obtenues à partir de la base de données du DNIT, ainsi que par la photo-interprétation d'images Landsat TM et ETM+ par la plate-forme Google Earth, en utilisant des images entre 2004 et 2015. On a supposé qu'il n'y a pas eu de développement significatif du réseau de routes secondaires cours de cette période. Des zones tampon ont été créées pour chaque 100 m de distance du réseau routier (en considérant que l'effet distance est plus court à partir de pistes en terre que de routes asphaltées), puis transformés en fichier raster selon le maillage MODIS (Figure 45).

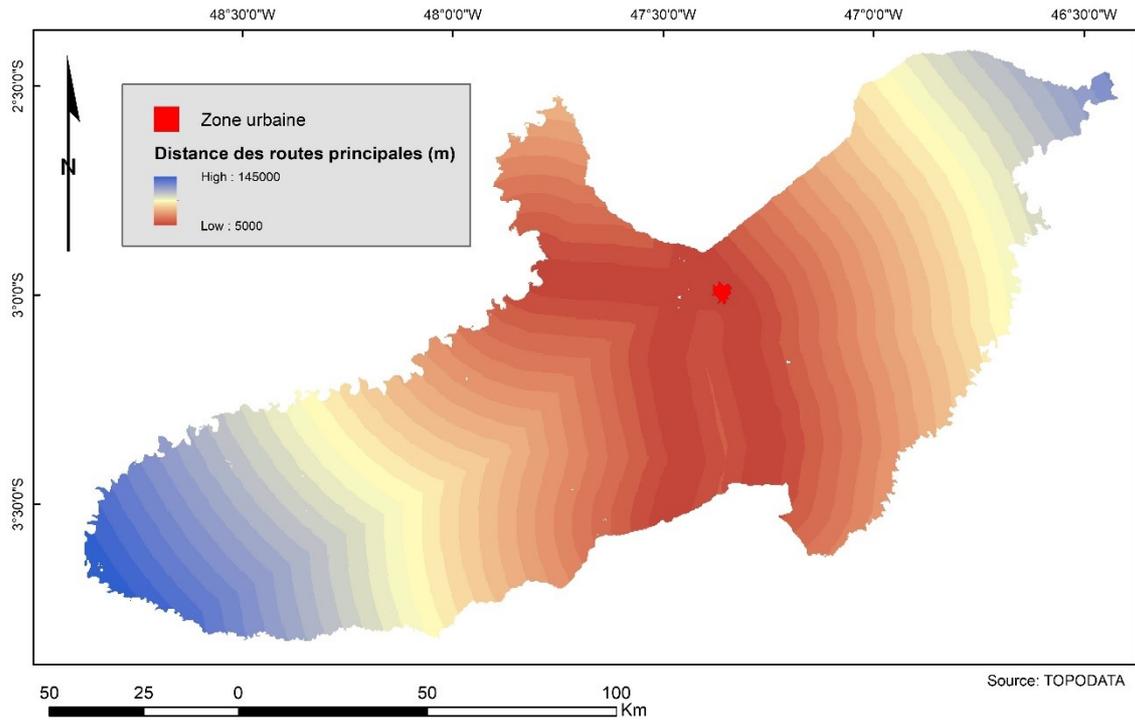


Figure 44. Distance euclidienne des routes principales.

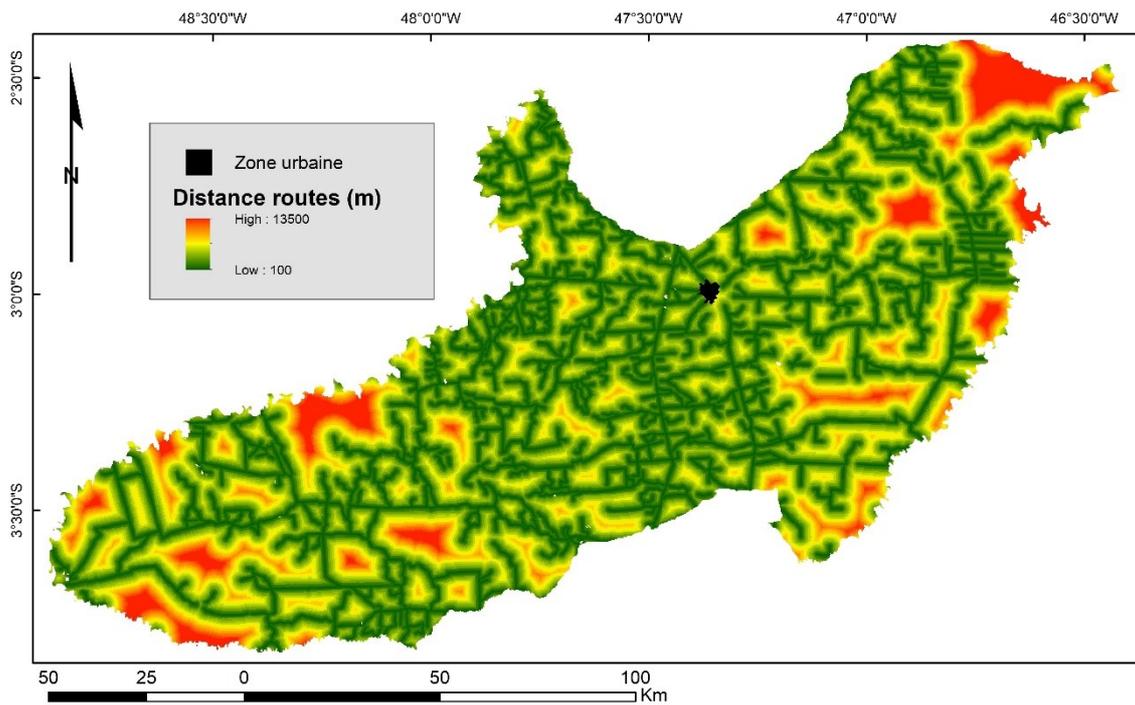


Figure 45. Distance euclidienne de toutes les routes (Source : Photo-interprétation des images Landsat).

Distance des villages ruraux : les villages ruraux ont été définis à partir de toute agglomération de quatre maisons ou plus dans un rayon ne dépassant pas 200 m, identifiée sur le terrain et au moyen d'images à haute résolution disponibles sur Google Earth (principalement des images satellite de Digital Globe et de la série Landsat). Les points scannés ont ensuite été utilisés pour créer des tampons tous les 1.000 m (Figure 46).

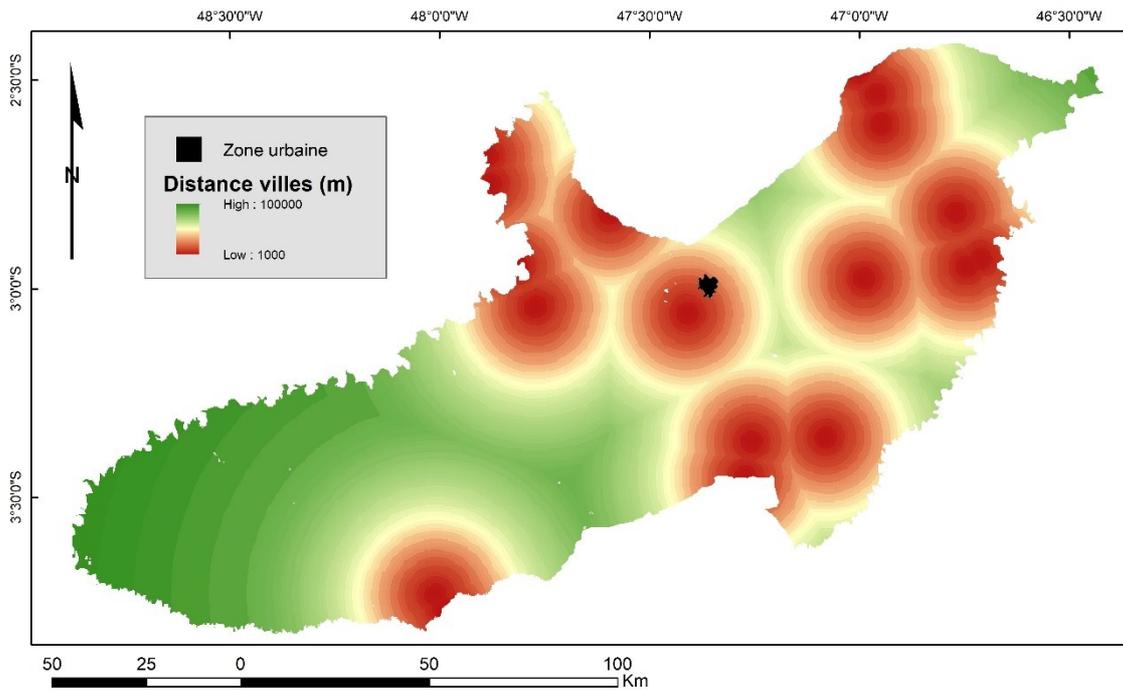


Figure 46. Distance des villages ruraux (Source : Photo-interprétation des images Landsat).

Données foncières : les données foncières proviennent des bases de données du CAR, de Terra Legal et de l'INCRA. Les données du CAR 2016, obtenues sur le site Web de la SEMAS (*Secretaria Estadual de Meio Ambiente*), ont été utilisées. Le Nouveau Code Forestier brésilien prévoit l'exécution du Registre Environnemental Rural (CAR) (<http://www.car.gov.br>), qui comprend les limites de l'exploitation, les Aires de Préservation Permanente, la Réserve Légale, végétation primaire, et les zones dites « consolidées », des aspects liés à la régularisation environnementale des propriétés rurales. La création de ce dispositif a permis la formation d'une importante base de données foncières en Amazonie. Plusieurs municipalités ont déjà une grande partie de leur territoire enregistrée dans ce système, ce qui permet une série d'analyses spatiales qui étaient impossibles à faire avant. Cependant, le CAR ne dispose pas d'informations sur les principales occupations du sol. Ce registre ne contient pas non plus de données sur les types de production, les ressources naturelles, les stratégies de production et les acteurs impliqués, informations

importantes pour la caractérisation des systèmes de production et leur relation avec le potentiel naturel (ressources et contraintes). Du fait que l'alimentation de cette base de données est faite par chaque propriétaire, les erreurs ne sont pas rares. Par exemple, à Paragominas, plusieurs zones indiquées comme zones consolidées ne montrent pas de signe de déboisement.

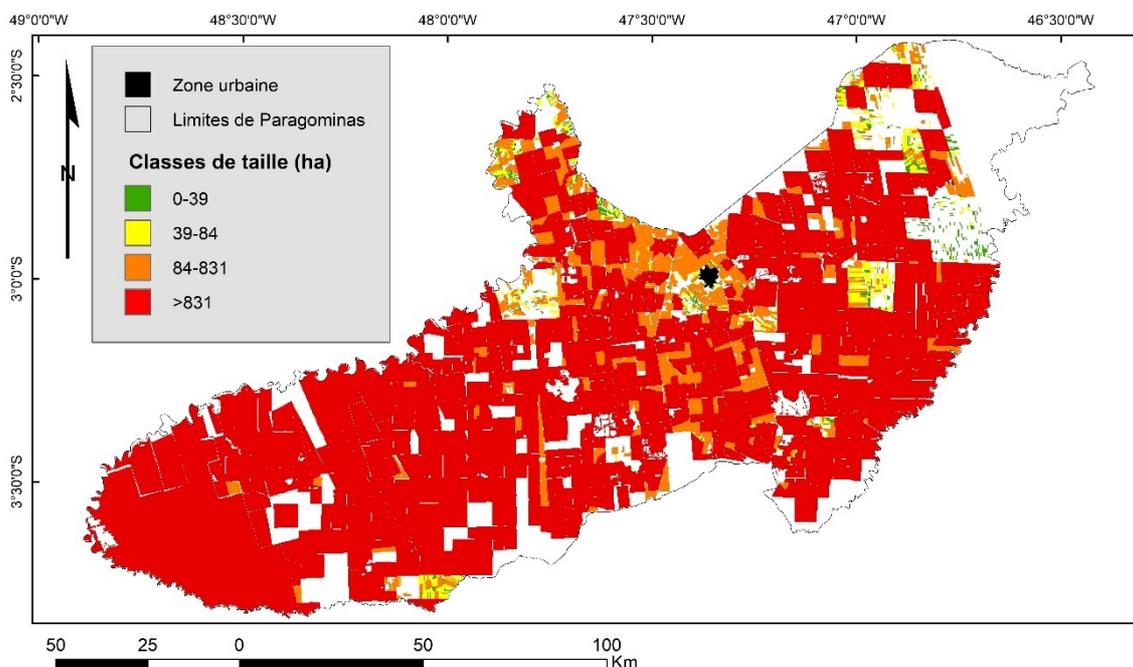


Figure 47. Limites foncières et classes de taille des exploitations à Paragominas.

Les données sur les limites d'exploitation des zones de colonisation de la réforme agraire (assentamentos) ont été obtenues par la base de données du Terra Legal (<http://terralegal.mda.gov.br/>) et de l'INCRA (<http://www.incra.gov.br/>). Ces données sont généralement relatives aux projets initiaux de colonisation. Selon un représentant de l'INCRA, ces limites ne correspondent souvent pas aux superficies réellement utilisées par les colons. Mais ils peuvent donner une idée générale de la taille des exploitations et de l'organisation foncière. Dans la Figure 47 les propriétés sont représentées, chaque classe étant un quartile de taille de propriété.

Terres Indigènes : les terres indigènes ont été obtenues à partir de la base de données de la FUNAI (<http://www.funai.gov.br/index.php/shape>), en utilisant les polygones indiqués comme terres « régularisées ». Cette base de données a été utilisée pour créer une archive de Paragominas avec deux classes : « avec terres indigènes » et « sans terres indigènes » (Figure 48).

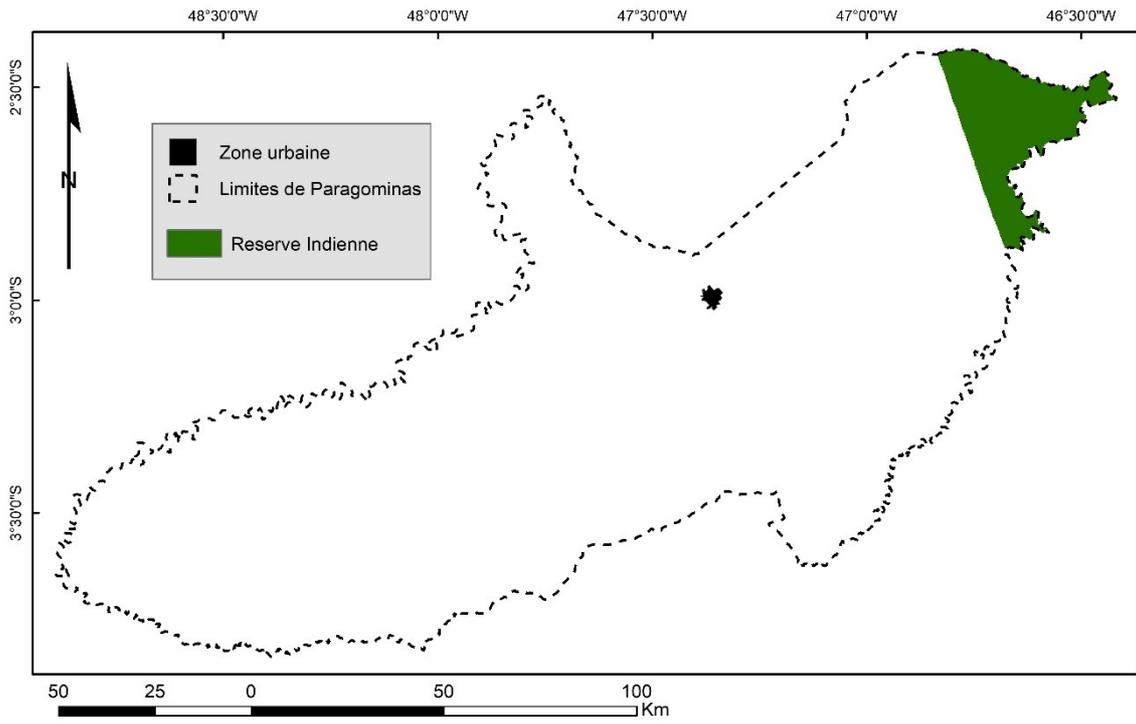


Figure 48. Reserve Indienne (Alto Rio Guamá). Source : FUNAI (2018).

2. Entretiens - méthodes

2.1. Délimitation des acteurs

Les champs abordés dans les questionnaires portent principalement sur des aspects liés aux caractéristiques et aux stratégies de production et d'utilisation des ressources biophysiques disponibles. Le nombre d'entretiens n'a pas été défini a priori et nous avons procédé par saturation de l'information, c'est-à-dire que lorsqu'aucune nouvelle information n'a été recueillie, nous avons arrêté les entretiens. Leur localisation a été prédéfinie avec des informations provenant de chercheurs locaux afin de couvrir différents types de production et d'acteurs.

2.2. Questionnaire

Voici les questions des questionnaires semi-structurés.

- Questionnaire No.
- Date.
- Nom de référence.
- Point GPS, Coordonnées.
- Taille de l'exploitation.
- Mécanisation.
- Année d'arrivée.
- Présence de drainage.
- Main-d'œuvre.
- Orientation de la production.
- Sol : classes et proportions/gestion : pour chaque classe, pourquoi et depuis quand/utilisez-vous toute la classe ?
- Pente : classes et proportions/gestion : pour chaque classe, pourquoi et depuis quand/utilisez-vous toute la classe ?
- Saturation en eau : où dans l'exploitation ? Cela affecte-t-il l'utilisation ou la gestion des terres ?
- Bord de rivière : laissez-vous la végétation naturelle ? Depuis quand et pourquoi ?
- La proximité de la route asphaltée a-t-elle une incidence sur l'orientation de la production ?
- Où y a-t-il le plus de forêt/forêt secondaire (zone non productive) et pourquoi ?
- Dans le passé, avez-vous réduit ou augmenté la superficie cultivée, ou la superficie en pâturage, ou la superficie de forêt secondaire par rapport au marché ou à la législation ?
- Quels sont vos projets futurs pour l'exploitation ?
- Quel serait le facteur important pour changer de production ?

2.3. **Elaboration de la base de données**

Après l'application des questionnaires, l'information a été compilée afin de réaliser les statistiques. Voici comment les réponses ont été quantifiées, ainsi que l'indication des abréviations utilisées (entre parenthèses) dans la base de données pour des analyses ultérieures, comme la définition d'unités systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques dans le Chapitre 7.

Production agricole : relevé de la production de la propriété. En raison de la grande diversité des activités, des échelles de gestion et de production, celles-ci ont été résumées en huit grandes classes, présentées ci-dessous : les cultures de grains à grande échelle, incluant le soja, le maïs, le sorgho, le millet et le riz (GRAO) ; le maraîchage (HORT) ; l'élevage, quels qu'en soient l'échelle et le type (de viande ou laitière) (PECU) ; la culture de poivre noir (PIME) ; les vergers ou les systèmes agroforestiers de subsistance et/ou pour la commercialisation (FRUT) ; le manioc, *macaxeira*⁴³, maïs et haricots, dans le système de culture sur brûlis, pour la subsistance et/ou la vente (MAND) ; les plantations d'arbres à bois (à l'exclusion des petites plantations) (SILV) et la plantation ou la cueillette d'açaí natif, à des fins de subsistance et/ou de vente (ACAI). Chaque production était indiquée par OUI ou NON dans la base de données pour chaque propriété. En lien avec cette question, une deuxième variable a été calculée par la suite : le nombre de productions par propriété, dont le code dans la base de données est NPRO.

Intensification : associé aux types de production, l'acteur a également été questionné sur l'existence de l'intensification de la production (variable INTE, décrite par SIM ou NAO). L'intensification a été définie comme une « augmentation des *inputs* dans une production » (Angelsen et Kaimowitz 2001). Cela comprend l'irrigation et la fertilisation des cultures et des pâturages. L'intégration culture-élevage, ou l'alimentation du bétail avec des rations ou la rotation des pâturages avec des clôtures constituent des changements technologiques, elles ont également été considérées comme une sorte d'intensification, car elles impliquent une augmentation des *inputs* par unité de surface. Le passage de l'élevage extensif à la production du soja implique également l'augmentation des *inputs* par unité de surface, et est considéré comme une

⁴³ Les variétés de *Manihot esculenta*, la manioc (*mandioca*) et la *macaxeira*, se différencient par la quantité de composés cyanogéniques. Le manioc étant celui dont la quantité est la plus importante et qui nécessite un traitement (broyage, retrait de la *manipuera* et grillage) pour sa consommation (Mattos, Farias, et Ferreira Filho 2006).

intensification⁴⁴ par des auteurs tels que (Macedo et al. 2011). Toutefois, dans la présente étude, seuls les changements qui impliquent un changement des *inputs* dans l'activité actuelle dans l'exploitation ont été pris en compte. En ce sens, le passage de l'élevage extensif à la production de grains a été considéré comme un processus de changement d'activité, et il n'est pas pris en compte comme une intensification. D'autre part, ont été considérées comme intensification, les activités qui impliquent une augmentation des *inputs* dans le contexte des cultures de grains. Les types d'intensification (INTI) étaient les suivants : intégration agriculture-élevage (ILP) ; intégration agriculture-élevage-foresterie (ILPF) ; irrigation des pâturages (IRP) ; fertilisation des pâturages (ADP) ; l'irrigation des cultures permanentes ou annuelles (légumes, banane, noix de coco, fruits de la passion, poivre noir etc.) (IRF) ; irrigation des grains (IRG) et rotation des pâturages (ROT).

Aspect foncier : caractérisation de la situation foncière (FUND) telle que définie par le répondant, les données du CAR ou de l'INCRA. Une classification a été définie avec les classes : propriétés « privées », régulières ou non (PART) ; les parcelles de projets de colonisation (lot d'assentamento) (ASSE) ; les parcelles d'invasions récentes non réglementées (INVA) ; les zones d'occupation ancienne sur les rives des cours d'eau (*ribeirinhos*⁴⁵) (ANTI) ; les parcelles plus petites que le « module rural⁴⁶ » telles que le « condominium rural » de la colonie d'Uraim (SUBL) et ; les propriétés issues de l'union de deux ou plusieurs parcelles (lots) de projets de colonisation du INCRA (AGRE).

Début des activités : dans ce point, nous considérons l'année du début du déboisement (INIC) et l'année du début de la culture du soja sur la propriété (INAG), lorsqu'il y en a.

La location⁴⁷ : un aspect important dans les zones de front pionnier avec expansion du soja est que souvent les nouvelles cultures agricoles sont faites par le biais de la location de terres (ARRE), surtout d'éleveurs. On s'est donc demandé si le bien en question faisait l'objet d'une location ou non (SIM, NAO).

⁴⁴ La plantation de soja dans le contexte du front agricole peut avoir à la fois des caractéristiques d'intensification, parce qu'elle augmente les *inputs* par superficie, et d'extensification, parce qu'elle cherche à réduire les coûts en augmentant l'échelle de la production.

⁴⁵ Populations traditionnelles de l'Amazonie qui vivent le long des cours d'eau et les utilisent comme principal moyen de vie et transport.

⁴⁶ Surface définie par Loi municipale en fonction des caractéristiques du territoire et servant de base à la parcellisation. À Paragominas, le module rural couvre 55 ha.

⁴⁷ *Arrendamento* en portugais.

Mécanisation : la mécanisation (MECA) indique le degré technologique, de capital et l'accès à crédit financiers par l'acteur. Des exemples de mécanisation sont la présence de débroussailleuses de pâturages dans l'élevage, de tracteurs pour abattre la forêt secondaire dans le système de cultures sur le brûlis et, bien sûr, toutes les machines spécifiques pour la production de grains.

Main-d'œuvre : cette variable évalue le nombre de personnes permanentes impliquées dans la production d'une exploitation (MAOD). La main-d'œuvre est une ressource limitée qui peut restreindre la surface utilisable, et pèse surtout lorsque l'unité productive est limitée en capital et en mécanisation. Pour évaluer cette variable, un rapport a été établi entre le nombre de travailleurs actifs et la surface de l'exploitation. Les valeurs ont ensuite été discrétisées en considérant les seuils de 55 ha (module rural de Paragominas) et 220 ha, soit quatre fois le module rural, qui est considéré comme la limite pour les exploitations considérées comme familiales (Table 6).

Table 6. Discrétisation des valeurs de densité main-d'œuvre.

Type	Surface (ha)	Personnes	Rapport
Module rural	55	1	0,018
Module agri. fam.	220	1	0,004

Intervalles	Classes
<0,004	BAIX
0,004-0,018	MEDI
>0,018	ALTA

Surfaces non productives : contrairement aux raisons pour lesquelles certaines parcelles sont utilisées, cette question vise à définir les raisons du maintien de surfaces qui ne sont pas intégrées dans la production, généralement représentées par des forêts primaires, forêts secondaires ou pâturages dégradés. Les réponses ont été résumées en trois groupes principaux : les restrictions imposées par le Code Forestier (NPCF) ; les restrictions sur le potentiel agricole des terres ou la mécanisation (NPME) ; et les restrictions de capital (NPSR).

Ressources en eau : la présence ou l'absence de drainage de surface pérenne sur le terrain (RIO ; SIM, NÃO), de forage d'eau (ARTE), de forage d'eau communautaire (COMU) et de puits (MANU).

Relation entre les secteurs pédomorphologiques et l'occupation du sol : les réponses aux questions n° 11 et 12 du questionnaire ont été résumées, et traitent de la gestion de chaque secteur pédomorphologique de l'exploitation. Dans un premier temps, le secteur pédomorphologique (TPM) de la parcelle en question a été identifié :

Dans un premier temps, le secteur pédomorphologique (TPM) de la parcelle en question a été identifié :

PL - Plateau argileux
EN - Pente abrupte
GR - Vallon sèche/humide
VR - Versants sableux
AI - Zone inondable

Ensuite, l'occupation du sol a été identifiée (USO) :

FS - Forêt secondaire
FL - Forêt primaire
PA - Pâturage
AG - Agriculture
AF - Agriculture familiale (agriculture sur le brûlis)
HO - Maraîchage
SI - Plantation d'arbres à bois
IN - Intégration : LP, LPF, PF etc.

Et enfin, la raison d'une occupation du sol donnée dans un contexte pédomorphologique (M) :

DC - Gestion difficile à cause de la pente
SV - Gestion favorisée par la topographie
FR - Fertilité du sol plus importante
RH - Proximité des ressources en eau
LH - Loin des ressources en eau
PR - Proximité avec accès ou habitation
CF - Restriction par le Code Forestier
DV - Diversification des activités
DA - Distance des voies d'accès ou de l'habitation
SE - Surface limitée de l'exploitation
RT - Restriction de capital

Pour chaque exploitation, des informations peuvent avoir été recueillies sur jusqu'à trois parcelles différentes.

Projets futurs : dans le cadre des stratégies des producteurs, se trouvent les projets futurs (PRF), qui peuvent guider la production et l'occupation du sol actuels et futurs. Les réponses ont été résumées dans les classes suivantes : augmenter la production actuelle en superficie (expansion) (EX) ; intensifier la production (IN) ; modifier la production ou louer la ferme (MD) ; diversifier (DV) ; maintenir le *statu quo* (SQ) et ; mécaniser (MC).

Facteurs critiques de changement : comme pour l'élément précédent, les facteurs critiques qui peuvent entraîner un changement des activités productives (FMU) ont été soulevés (changement de surface, d'intensification ou de technologie) : coûts de production et de vente (MC) ; rôle des politiques publiques (GV) comme le crédit, la

réalisation d'infrastructures, l'assistance technique, etc. ; le changement climatique (persistance des sécheresses) (SE) ; les politiques environnementales (CF) ; la légalisation foncière (LG) et la disponibilité de la main-d'œuvre (MO).

Importance de l'emplacement de l'exploitation : sur la base de l'hypothèse de von Thünen, l'importance de l'emplacement ou de l'accès par rapport au marché (DIST) a été évaluée dans cette question. Ceci permet d'évaluer le poids de la distance pour les pratiques. La question était « la distance par rapport à la route asphalté ou à la zone urbaine est-elle déterminante pour la réalisation de la production en termes de coût de transport ? » (SIM/NAO).

3. Analyse des systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques par type de production

Les travaux de terrain effectués en 2016 (août et septembre) et 2017 (juillet et août) ont abouti à un total de 113 questionnaires remplis avec des réponses des acteurs représentant chaque exploitation. Dans cet ensemble de questionnaires, l'activité la plus fréquente était l'élevage (62 occurrences), suivi du manioc (53), des grains (29), de la fruiticulture (21), du poivre noir (18), du maraichage (6), des plantations d'arbres pour le bois (3) et de l'açaí (2).

Environ 70% sont des propriétés avec moins de 220 ha, c'est-à-dire qu'elles ont une superficie inférieure à la superficie qui définit les propriétés agricoles familiales à Paragominas. Cependant, la superficie couverte par ces petites propriétés interrogées est de 3.737 ha, tandis que celle des grandes propriétés est de 58.933 ha. La Figure 49 montre l'emplacement des exploitations interviewées.

L'objectif de cette section est d'analyser les systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques en fonction des types de production réalisés. A cette fin, une analyse intégrée des résultats des entretiens a été réalisée en tenant compte de cinq activités rurales pertinentes dans l'espace d'étude : l'élevage à grande échelle, l'élevage à petite échelle, les cultures de grains, l'agriculture familiale et la plantation d'arbres pour le bois.

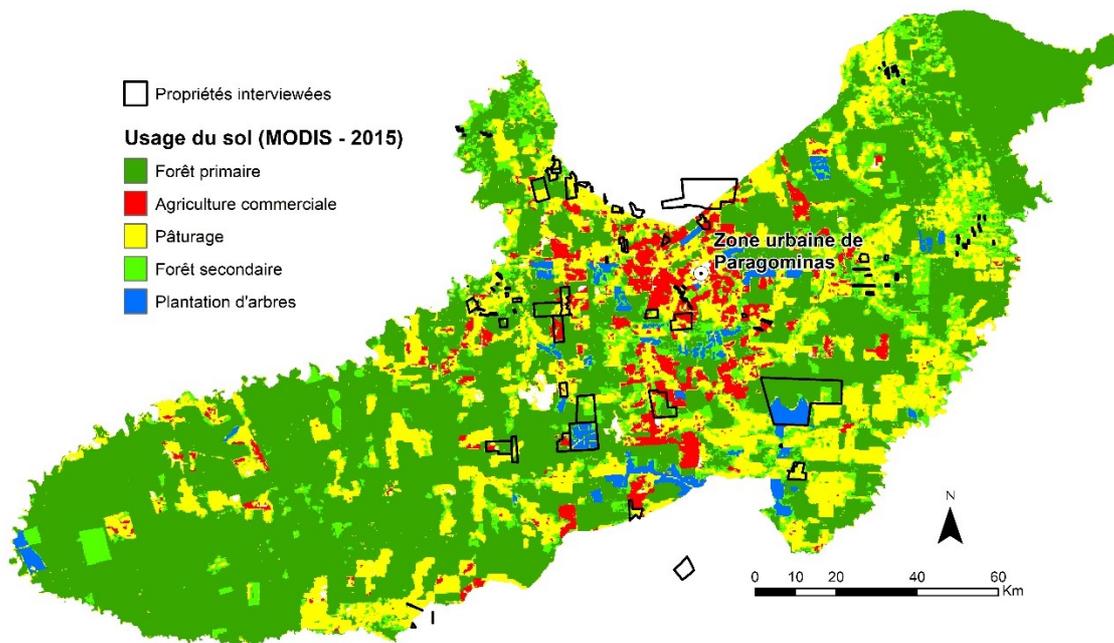


Figure 49. Emplacement des exploitations interviewées.

L'agrégation des données par type de production a été choisie en raison de la difficulté de définir au préalable les classes d'acteurs. Le type de production agricole intègre une série de facteurs ayant des conséquences directes sur le paysage. Il convient de noter que, comme les propriétés ont été regroupées par type de production et qu'une propriété peut avoir plus d'une production, la même propriété peut être contenue dans plus d'un des groupes définis et discutés ici. Cette procédure a été choisie parce que nous supposons que les logiques définies dans chaque groupe ne sont pas non plus étanches, mais au contraire complémentaires et peuvent se produire en même temps dans la même propriété.

3.1. L'élevage à grande échelle

L'élevage bovin était l'activité la plus fréquente dans les entretiens, couvrant des contextes contrastés (de 2 ha à 16.000 ha). Compte tenu de la grande disparité d'échelle de cette activité de production, les exploitations où elle est pratiquée ont été divisées en deux groupes, le premier étant appelé « élevage à grande échelle », en considérant les propriétés de plus de 60 ha de superficie, et les autres « l'élevage à petite échelle ». Ce seuil a été défini en fonction des caractéristiques observées dans les exploitations agricoles interrogées, ce qui permet de mieux distinguer les contextes des propriétés rurales liées aux programmes gouvernementaux de colonisation (élevage par de petits producteurs familiaux) de ceux des grandes exploitations privées. Dans cette section, les propriétés d'élevage bovin de plus de 60 ha sont

traitées, totalisant 37 fermes (Figure 50). Il faut noter que ces 37 propriétés présentent également une grande variation dans la superficie (Figure 51).



Figure 50. a) Bovins *nelore* (*Bos indicus*), largement utilisés pour l'élevage extensif à Paragominas (Photo : R. Osis, 2017).

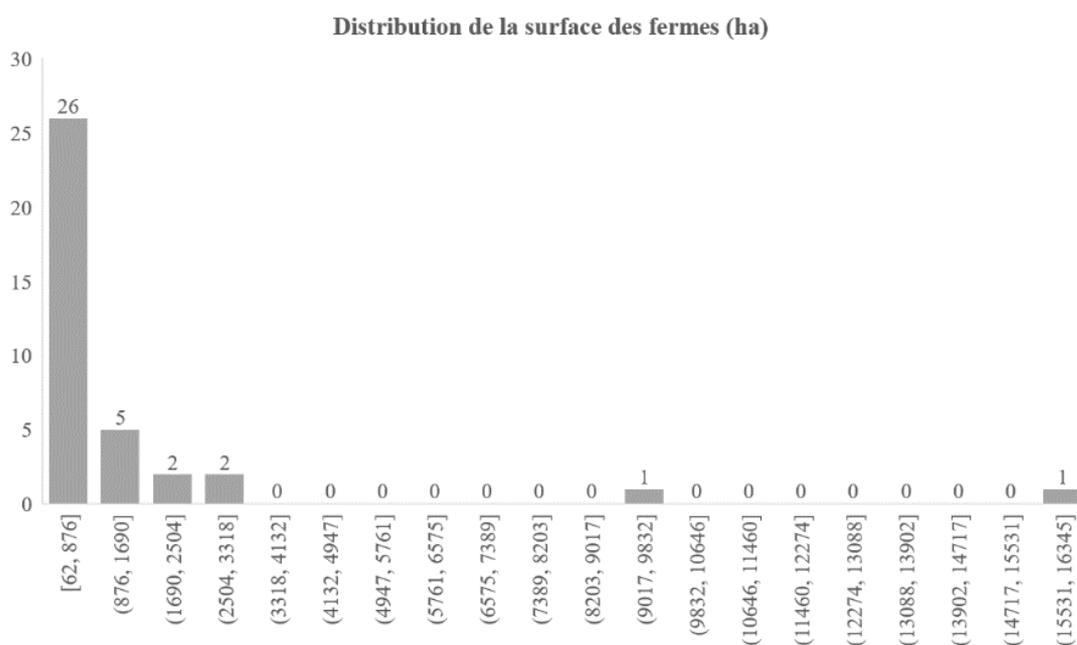


Figure 51. Répartition en surface des propriétés du groupe 'élevage à grande échelle' (n=37).

La grande taille de nombreuses exploitations (Figure 52) remonte à l'époque de la colonisation de la municipalité, lorsque des « *glebas* » ont été attribuées par le gouvernement à des acteurs privés (Leal, 2000). Au fil du temps, un processus de fragmentation de ces zones s'est produit (et se produit encore), réduisant la superficie des exploitations, mais 84 % de la surface agricole de Paragominas possèdent encore plus de 1.000 ha (Laurent, Arvor, et al. 2017).



Figure 52. a) et b) Grandes propriétés d'élevage extensif dans la région de Paragominas, situées en fond de la vallée. Les fourrages sont desséchés en raison de la saison sèche (Photo : R. Osis, 2017).

En ce sens, la plupart des propriétés interrogées correspondent à des propriétés considérées comme « privées », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas liées à des programmes de colonisation gouvernementaux visant l'agriculture familiale (Table 7). Ces propriétés sont principalement le résultat du début du processus de colonisation agricole après la construction de la route BR-010 et l'exploitation des ressources forestières, tel que décrit par Veríssimo et al. (1992).

Une grande partie de la superficie de ces fermes est non productive, avec des zones de forêts, des forêts secondaires et des pâturages dégradés. Il est fréquent que les propriétaires fonciers ne disposent pas de ressources suffisantes pour exploiter pleinement les zones déboisées, même dans les systèmes extensifs, comme le font remarquer certaines personnes interrogées.

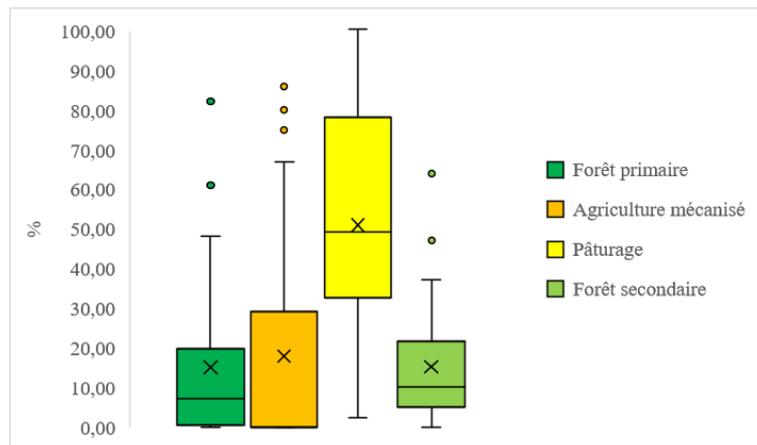


Figure 53. Répartition des classes d'occupation du sol sur les propriétés d'élevage à grande échelle (n=37).

Table 7. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de location dans les propriétés avec élevage à grande échelle (n=37), et en comparaison avec les autres groupes.

		Élevage grande échelle	Élevage petite échelle	Cultures de grains	Agriculture familiale
Type foncier (%)	Privé	75,0	16,7	82,8	1,9
	Projet INCRA	2,8	62,5	13,8	53,8
	Invasion	2,8	8,3	0,0	23,1
	Ancienne	0,0	4,2	0,0	13,5
	Fusion	19,4	4,2	3,4	1,9
	Parcelles petites	0,0	4,2	0,0	5,8
Main d'œuvre par surface (%)	Faible	35,1	4,0	41,4	3,8
	Moyenne	48,6	0,0	34,5	0,0
	Haute	16,2	96,0	24,1	96,2
Location (%)		28,6	8,0	67,9	7,5



a)



b)

Figure 54. a) et b) Pâturages dégradés, avec la présence de plantes invasives telles que la *vassoura-de-botão* (*Borreria verticillata*) (Photo : F. Laurent, 2015).

Il y a en général une faible densité de travailleurs pour s'occuper du troupeau. Cela s'explique principalement par la faible exigence en main-d'œuvre de cette activité (Table 7). D'autre part, certaines personnes interrogées affirment qu'il y a actuellement moins de main-d'œuvre par rapport à la période initiale de colonisation de la municipalité, mais aucune donnée plus approfondie n'a été obtenue sur cette question. Sur ces exploitations d'élevage extensif, la mécanisation est fortement présente, utilisée dans la plupart des étapes de la gestion des pâturages.

Table 8. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'élevage à grande échelle (n=37) et en comparaison avec les autres groupes.

		Élevage grande échelle	<i>Élevage petite échelle</i>	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Nombre de cultures (%)	1	43,2	32,0	24,1	34,0
	2	51,4	24,0	65,5	39,6
	>3	5,4	44,0	10,3	26,4
Cultures dans la ferme (%)	Grains	45,9	8,0	100,0	1,9
	Maraîchage	0,0	4,0	3,4	5,7
	Elevage	100,0	100,0	65,5	34,0
	Poivre noir	8,1	24,0	0,0	32,1
	Fruiticulture	2,7	32,0	10,3	24,5
	Manioc	5,4	56,0	3,4	100,0
	Plant. Arbres	2,7	0,0	3,4	0,0
	Açaí	0,0	0,0	0,0	3,8

Table 9. Proportions d'exploitations que sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'élevage à grande échelle (n=37) et en comparaison avec les autres groupes.

		Élevage grande échelle	<i>Élevage petite échelle</i>	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Mécanisation (%)		87	28	100	2
L'accès est important (%)		59	67	100	68
Intensification (%)		38	20	48	4
Types d'intensification (%)	Rotation des pâturages	21	0	14	0
	Irrigation des pâturages	0	60	7	0
	Irrigation de cultures annuelles	7	0	7	0
	Irrigation de cultures pérennes	0	40	21	100
	Intégration agriculture élevage	50	0	50	0
	Fertilisation des pâturages	21	0	0	0

L'interdiction de l'utilisation du feu pour le nettoyage des pâturages implique que leur gestion contre l'invasion rapide des espèces ligneuses doit se faire fréquemment, soit par l'utilisation de débroussailleuses, soit par l'application d'herbicides avec tracteur (Figure 55).



a)



b)

Figure 55. a) et b) Coupe des adventices ligneuses dans un pâturage (Photo : R. Osis, 2017).

En plus du contrôle des adventices (à une fréquence d'une fois par an ou tous les 2 ans), il est souvent nécessaire de « réformer » les pâturages, c'est-à-dire d'éliminer les vieux pâturages par le labour, la fertilisation et la correction du sol, et semer de nouvelles plantes fourragères (Figure 56).



a)



b)

Figure 56. a) Aspect de la réforme des pâturages, avec des « leiras » de matières végétales ramassées à l'aide d'un tracteur. b) La même procédure, mais avec une vue plus large du secteur sur des versants sableux (Photo : R. Osis, 2017).

Certains enquêtés le font tous les quatre ans. En ce sens, un processus naturel de changement de la couverture du sol se manifeste dès que les activités d'entretien des pâturages cessent. Cependant, même si l'élevage extensif est encore prédominant à Paragominas, nous avons observé qu'une partie des exploitations ont adopté l'intensification de la production, comme c'est le cas des systèmes de rotation, fertilisation et irrigation de pâturages, et l'abreuvement du bétail avec de réservoirs (Figure 57). Selon une société qui vend du matériel d'irrigation agricole, la plupart de ses ventes sont destinées aux systèmes d'irrigation des pâturages après l'irrigation de la culture du poivre noir.



Figure 57. a) Vue de deux parcelles de pâturages en système rotatif avec l'abreuvement du bétail avec des réservoirs. Photo : Osis, R. (2016). b) Irrigation de pâturages dans un système rotatif et plantes fourragères à haute productivité (*mombaça*⁴⁸) (Photo : R. Osis, 2017).

Une tendance progressive à l'amélioration des systèmes de gestion du bétail est observée en Amazonie, comme le soulignent (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012), qui mentionnent le rôle du développement des structures de transformation (abattoirs et industries laitières) à proximité des zones de production, favorisant l'intensification de la production.

La municipalité a joué un rôle de premier plan à cet égard avec l'émergence de programmes incitant à l'intensification, comme le programme « *Pecuária Verde* » (Piketty et al., 2015). Dans ce contexte, la proximité de ces structures et l'existence de routes en bon état peut avoir un poids important. Même si par rapport à d'autres activités récentes il s'agit de l'activité ayant le moins d'importance par rapport à la distance, la plupart des éleveurs interrogés mentionnent qu'un accès plus facile à la ferme par rapport à la ville ou aux routes asphaltées est important pour la production.

La principale forme d'intensification des pâturages à Paragominas est liée au phénomène d'expansion des cultures de grains. Ce processus peut impliquer un changement fondamental dans le mode de production de l'exploitation, qui consiste principalement en un système d'intégration cultures-pâturages, ceci est favorisé par la demande constante de terres pour la plantation de grains par des acteurs extérieurs à l'exploitation. Les fermes d'élevage extensif sont la principale « source » de terres pour l'expansion des cultures de grains (Table 8), ce qui explique le grand nombre de fermes ou parcelles en location (29% des exploitations interviewés), en particulier pour les parcelles situées sur les plateaux, telles qu'observées sur le terrain et décrites par les personnes interrogées. La location de terres pour l'agriculture a été une bonne

⁴⁸ *Panicum maximum*.

solution pour les éleveurs, en particulier ceux qui se trouvent dans une situation financière défavorable. La location garantit un revenu qui ne nécessite pas d'investissement, permet de capitaliser pour d'autres activités, améliore le sol (fertilisation et décompactage) et nettoie les plantes ligneuses invasives.

Trois situations ont été observées. Dans la première, l'éleveur de bétail, qui en général n'a pas l'intention de changer son activité (un fait commun selon certains producteurs interrogés), peut adopter une stratégie de récupération des pâturages. Lorsqu'il loue pour quelques années (un contrat de 4-5 ans en général) à des planteurs de soja, il obtient finalement une terre corrigée et peut recevoir un pâturage de meilleure qualité ensuite, comme mentionné par un interviewé.

Une autre situation vérifiée comprend l'adoption définitive d'un système intégré de cultures-élevage, qui peut se produire lorsque c'est le propriétaire de l'exploitation qui effectue la production de grains, et même une partie de la production de grains peut être utilisée pour nourrir le bétail. Une troisième situation est la location définitive de parcelles à bon potentiel agricole pour les producteurs de soja, et la continuité ou non de l'élevage bovin dans d'autres parties de l'exploitation de moindre potentiel agricole. Dans ce cas, il est même possible que l'ancien éleveur déménage vers une activité et/ou une résidence urbaine.

Interrogés sur les facteurs qui déterminent l'expansion ou le retrait de l'élevage, la plupart des producteurs ont cité le rôle du marché et des politiques publiques (Table 10). La variation du prix de la viande et du coût de production (par exemple, les vaccins) a souvent été citée comme un facteur important, qui peut influencer sur la capacité de mener à bien la gestion nécessaire des pâturages. Les entretiens avec les éleveurs de bétail mentionnent qu'il n'est pas rare que des difficultés économiques, parfois liées à un ralentissement du marché, empêchent le nettoyage des pâturages et ceux-ci sont envahis par des plantes adventices. Les événements extérieurs à la municipalité sont aussi importants pour la production bovine, comme l'accident du navire de transport de bétail à Barcarena en 2015, qui, selon une personne interrogée, a « refroidi » le marché local.

Table 10. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'élevage de grande échelle (n=37) et comparaison avec les autres groupes.

		Elevage grande échelle	<i>Elevage petite échelle</i>	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Facteurs de changement (%)	Inspection environnementale	10	0	20	4
	Politiques Publiques	31	83	25	74
	Marché	34	17	35	8
	Sécheresses	14	0	20	0
	Main d'œuvre	0	0	0	2
	Légalisation foncière	10	0	0	12
Projets futurs (%)	Diversification	13	19	7	32
	Expansion	32	44	32	33
	Intensification	18	0	18	0
	Changer/louer	18	7	18	10
	<i>Status quo</i>	16	26	25	20
	Mécaniser	3	4	0	5

Parallèlement au marché, les politiques publiques ont aussi souvent été citées comme un facteur pouvant favoriser ou nuire à la production. Les politiques publiques ont été l'un des principaux moteurs de l'expansion de l'élevage bovin en Amazonie, en particulier entre les années 1970 et 1990, comme par exemple les subventions de la SUDAM (Hecht, 1993). Les éleveurs interrogés s'attendent à ce que le gouvernement soutienne la production actuelle, par exemple en améliorant l'assistance technique.

Par la suite, l'un des facteurs fréquemment cités a été l'occurrence d'une sécheresse prolongée (Table 10). Les sécheresses ont un effet considérable sur ces systèmes de production, qui dépendent fortement des conditions météorologiques. Les effets peuvent être variés avec la mort de bétail ou l'obligation de le vendre à bas prix (faible poids et cours au plus bas) et affecter la qualité des pâturages, avec la mort des plantes fourragères, ce qui favorise la prolifération des plantes indésirables et exige la réforme des pâturages. La rareté de l'eau pour l'abreuvement du bétail entraîne également des pertes directes d'animaux, en particulier lorsqu'ils vont chercher de l'eau dans les zones humides et marécageuses et sont piégés (Figure 59).



a)



b)

Figure 58. a) e b) Pâturages envahis de plantes adventives (*mauva*, selon la personne interrogée), avec presque pas de graminées fourragères, à cause d'une sécheresse intense à 2015 (Photo : R. Osis, 2016).



a)



b)

Figure 59. a) Réservoir pour l'abreuvement du bétail, à faible niveau. b) Réservoir sec. (Photo : R. Osis, 2017).

Les exploitations agricoles disposant de ressources plus importantes peuvent déplacer le bétail vers des zones où les conditions de pâturage et d'eau sont meilleures. Cependant, ceux qui ne le peuvent pas, finissent par avoir des pertes importantes dans le nombre d'animaux, soit à la suite des décès, ou de ventes forcées. Ce problème a été largement commenté au cours des entrevues, car l'année précédente (2015), a subi une forte sécheresse, avec des pertes pour plusieurs éleveurs. Selon un éleveur, « *la sécheresse de 2015 a décapitalisé de nombreux éleveurs qui allaient réformer le pâturage cette année* ».

La réforme des pâturages a un coût relativement élevé⁴⁹ et la reconstitution du troupeau est retardée. Ces épisodes de sécheresse ont encore plus favorisé le processus d'expansion des cultures de grains. Un autre facteur de changement cité

⁴⁹ Dans le cas du défrichage d'un pâturage très dégradé ou d'une jeune forêt secondaire pour l'établissement d'un pâturage, les coûts sont d'environ R\$ 3.000/ha, selon les éleveurs.

par les éleveurs interrogés est la légalisation de la terre, puisque même si cette région peut être considérée comme une « ancienne frontière agricole » (Schielein et Börner 2018), les problèmes de régularisation foncière persistent. Le manque de documentation pour une terre implique, entre autres conséquences, la restriction de l'accès au crédit, également le manque de sécurité dans la production, en raison de l'impossibilité d'une planification à long terme.

Un autre facteur cité comme important est l'application du Code forestier. Certains éleveurs considèrent l'intensité du contrôle environnemental comme un facteur important pour la production (Table 10), puisqu'il limite les surfaces productives à l'intérieur des exploitations avec la délimitation des Aires de Préservation Permanente et la Réserve Légale (49% des interrogées disent qu'il existe des parcelles à usage limité en raison du Code Forestier).

Ceci peut être lié à un aspect mis en évidence dans la question de savoir quels sont les projets futurs pour l'exploitation. Cette catégorie d'éleveurs a le plus souvent cité l'objectif d'expansion de la production (Table 10), c'est-à-dire d'augmenter le nombre d'animaux et, en général, la superficie des pâturages également, ce qui indique également une certaine continuité d'une logique de production extensive. D'autre part, certains de ces éleveurs voient l'intensification (18%) et la diversification (13%) comme des alternatives futures, ce qui se reflète dans certaines pratiques déjà adoptées.

Relation avec les facteurs biophysiques : en plus des facteurs externes du marché, des mesures incitatives et des politiques environnementales, les éleveurs adaptent également leur production en fonction de l'hétérogénéité des facteurs biophysiques du paysage où se trouvent les propriétés. Environ 70 % d'entre eux considèrent qu'il y a une certaine forme de limitation physique à la production sur la propriété. Cette limitation peut être due principalement à des facteurs topographiques comme la forte pente qui prédomine sur les bords des plateaux et dans les vallons secs ou humides.

Comme dans ce système productif il est fait recours à la mécanisation, les fortes pentes sont une limite au passage du tracteur. En outre, les pâturages situés à flanc de colline sont plus sensibles à l'érosion de surface et peuvent se dégrader plus rapidement (Figure 60). Comme l'illustre la Figure 61, il est observé que la plupart des propriétés peuvent avoir jusqu'à 10% de leur surface en fortes pentes, ce qui limite la mécanisation.



Figure 60. Processus érosifs superficiels occasionnés par le piétinement bovin intensif dans les terrains en forte pente (Photo : R. Osis, 2017).

Une deuxième limite est celle des zones humides du fond de la vallée. Il s'agit de surfaces dans les plaines inondables où la nappe phréatique est relativement proche de la surface pendant une grande partie de l'année, ce qui rend difficile l'établissement de pâturages. Bien qu'il y ait des éleveurs qui plantent des graminées fourragères plus adaptées aux conditions humides (comme *Brachiaria humidicola*), ces zones peuvent présenter des difficultés de gestion, comme la limitation d'utilisation de tracteur, en raison du risque d'enlèvement dans le sol boueux. Ainsi, ces zones sont souvent abandonnées à la régénération naturelle, ce qui est évidemment utilisé aussi pour la constitution des Aires de Préservation Permanente et des Réserves Légales obligatoires.

Si l'on exclut les zones de forêt primaire, beaucoup d'exploitations ont jusqu'à 20% de forêt secondaire, ce qui peut être lié à la fois à la limitation économique de la gestion de toutes les zones, ainsi qu'à la limitation physique due à la topographie ou aux zones humides. En raison de leur grande surface, ce groupe de propriétés couvre souvent tous les domaines pédomorphologiques (Figure 61). Outre le fait que toute la surface de l'exploitation est rarement utilisée, les éleveurs utilisent donc les domaines où les coûts de production sont les moins élevés possible. Depuis le début de la colonisation, la formation des pâturages s'est produite préférentiellement au fond des vallées dans les versants sableux, à proximité du réseau hydrographique, car les plateaux manquent fortement de cours d'eau pérennes et les pentes présentent des difficultés de gestion.

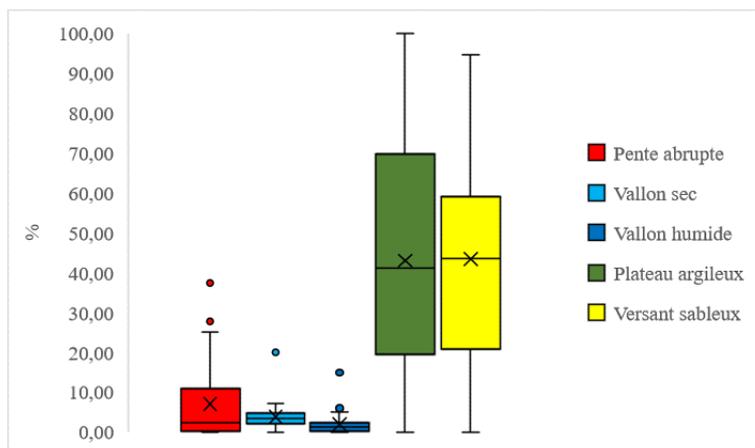


Figure 61. Proportion des unités pédomorphologiques dans les propriétés d'élevage à grande échelle.

Les ressources en eau jouent un rôle prépondérant, avec 84% des exploitations établies dans des zones avec au moins un cours d'eau. Interrogés sur la raison pour laquelle ils préfèrent établir des pâturages au fond des vallées, les éleveurs de bovins citent évidemment la dépendance de l'activité à l'égard des ressources en eau (Table 11). En outre, des parcelles avec la possibilité de mécanisation sont exploitées, tandis que les vallons et les pentes abruptes sont laissés à la régénération de la forêt secondaire, comme déjà mentionné ci-dessus. Toutefois, il peut arriver que des pâturages puissent être maintenus sur les pentes si l'exploitation n'a pas suffisamment de surfaces productives (Table 11).

Les pâturages établis sur les plateaux, en revanche, peuvent être le résultat d'une combinaison de facteurs qui peuvent se démarquer par rapport aux ressources en eau, ce qui peut être un stade plus avancé du front pionnier. Cela peut impliquer la fragmentation de grandes propriétés qui englobent plusieurs unités pédomorphologiques et une plus grande connexion avec les marchés, comme c'est le cas des fermes situées à proximité de routes asphaltées. Dans ces cas, l'exploitation est obligée d'avoir des forages d'eau pour l'abreuvement du bétail.

Table 11. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'élevage à grande échelle. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.

Unités pédomorphologiques	Occupation du sol	Raisons évoquées
Plateaux argileux	Cultures de grains	Topographie (10)
		Fertilité du sol (8)
		Loin des ressources en eau (1)
	Intensification	Fertilité du sol (4)
		Topographie (5)
	Forêt primaire	Code Forestier (6)
	Forêt secondaire	Limite de capital (1)
		Loin des ressources en eau (1)
	Pâturage	Seule unité à la ferme (1)
Topographie (5)		
Fertilité du sol (1)		
Pentes abruptes	Forêt secondaire	Pente forte (8)
		Code Forestier (1)
	Pâturage	Seule unité à la ferme (1)
		Proche des ressources en eau (1)
Vallons	Forêt secondaire	Pente forte (13)
		Code Forestier (9)
Versants sableux	Pâturage	Topographie (8)
		Proche des ressources en eau (12)
		Seule unité à la ferme (4)
		Proximité d'accès (1)
		Pente forte (1)
	Intensification	Topographie (3)
	Agriculture familiale	Seule unité à la ferme (1)
		Topographie (1)
		Proximité d'accès (1)
	Plantation d'arbres	Topographie (1)
Forêt Secondaire	Limite d'investissement (1)	
Cultures de grains	Topographie (1)	

3.2. Élevage à petite échelle

Comme déjà décrit dans la section précédente, ce groupe de propriétés a été défini en fonction de la superficie (< 60 ha), ce sont des propriétés issues de projets de colonisation.



Figure 62. Aperçu des exploitations d'élevage à petite échelle dans a) *Assentamento Águia* et b) *Invasão Oriente* (Photo : R. Osis, 2017).

Dans ce groupe de 25 propriétés, il y a une répartition de la superficie moins divergente par rapport au groupe des propriétés d'élevage à grande échelle. Plusieurs d'entre elles ont approximativement la superficie des parcelles habituellement attribuées dans les projets de colonisation à Paragominas (~24,2 ha), ou environ le double de cette superficie, ce qui suggère la fusion de deux lots (Figure 63). Cependant, lors des entretiens, peu de propriétés ont été décrites par les propriétaires comme étant le résultat de l'union de lots (Table 12), ce qui suggère qu'ils évitent la question en raison de l'interdiction de la vente des lots issus de la réforme agraire.

Dans ce contexte, la location de terres est moins présente que dans les grandes exploitations d'élevage, mais il peut exister d'autres formes de partenariat entre propriétaires, considérant que le transfert d'animaux d'une propriété à l'autre est facile à réaliser. En Amazonie, une partie des petits agriculteurs a progressivement adopté l'élevage, car il leur permet d'obtenir des rendements financiers plus sûrs, comme l'ont fait remarquer (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012). Ceci est d'autant plus évident si nous analysons la proportion de types d'occupation du sol dans ces propriétés, où l'on retrouve une forte prédominance des pâturages et de la forêt secondaire (Figure 64).

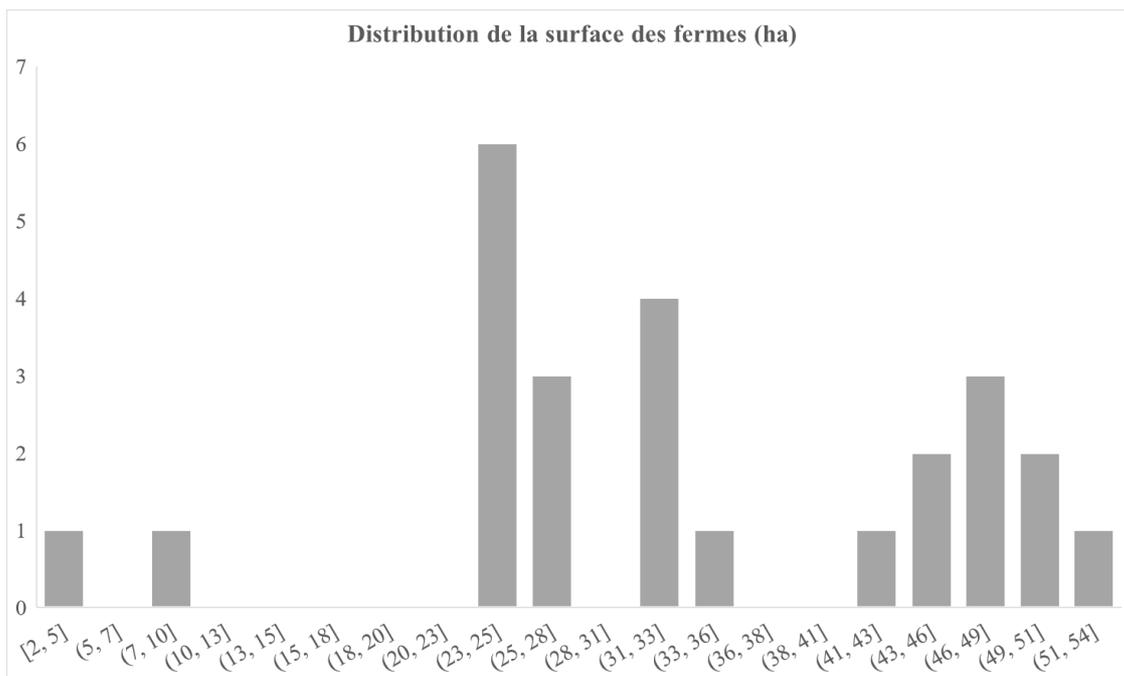


Figure 63. Répartition de la taille des exploitations au sein du groupe 'élevage de petite échelle' (n=25).

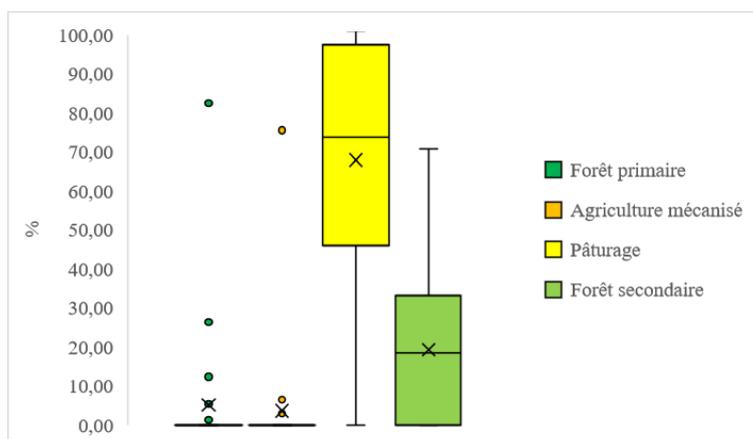


Figure 64. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations (n=25) d'élevage de petite échelle en 2015.

La proportion de forêt primaire est très faible sur ces exploitations, ce qui est le résultat de l'expansion maximale possible de la superficie utile en pâturages. Il faut également tenir compte du fait que le Code Forestier (Loi 12.561/2012, art. 67) n'exige pas 50% de la surface de l'exploitation pour la Réserve Légale pour les propriétés ayant moins de quatre modules fiscaux, mais exige de conserver la forêt primaire encore présente en 2008. Peu de propriétaires disent qu'il y a des restrictions sur l'utilisation des parcelles en raison des dispositions du Code Forestier (24% ont répondu oui à l'existence d'une zone non productive en raison de l'application de la législation environnementale, limité en général aux Aires de Préservation Permanente sur les

berges des cours d'eau) (Table 16).

Table 12. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de location dans les propriétés avec élevage de petite échelle (n=25), et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Elevage grande échelle</i>	Elevage petite échelle	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Type foncier (%)	Privé	75,0	16,7	82,8	1,9
	Projet INCRA	2,8	62,5	13,8	53,8
	Invasion	2,8	8,3	0,0	23,1
	Ancienne	0,0	4,2	0,0	13,5
	Fusion	19,4	4,2	3,4	1,9
	Subparcelles	0,0	4,2	0,0	5,8
Main d'œuvre par surface (%)	Faible	35,1	4,0	41,4	3,8
	Moyenne	48,6	0,0	34,5	0,0
	Haute	16,2	96,0	24,1	96,2
Location (%)		28,6	8,0	67,9	7,5

Comme mentionné au point précédent, l'élevage est rarement une activité exclusive de l'exploitation dans ce groupe et dans environ les deux tiers des cas, il y a plus de deux activités principales, parmi lesquelles le manioc (culture en général associée au maïs et aux haricots), la fruiticulture (comme les fruits de la passion et les noix de cajou) et le poivre noir, qui occupent en général un espace beaucoup plus petit que celui nécessaire à l'élevage, mais absorbent une bonne partie de la main-d'œuvre. Bien que l'élevage soit une activité relativement peu exigeante en termes de main-d'œuvre, la superficie moins importante et la présence fréquente d'autres activités rurales font que, par rapport aux autres exploitations de Paragominas, celles-ci ont une densité élevée de personnes impliquées dans la production l'exploitation (Table 12).

La présence de la culture du manioc (plantation en général associée au maïs et aux haricots) a été supposée être un indicateur de la capacité d'investir dans les activités agricoles. Le manioc dépend fortement de la main-d'œuvre familiale (bien que cela ne soit pas toujours le cas). En ce sens, ces propriétés d'élevage à petite échelle peuvent éventuellement être considérées comme représentant une transition dans le contexte du front pionnier, entre des acteurs presque exclusivement dépendants de la production agricole de subsistance (manioc, maïs, haricots, entre autres), vers une phase plus capitalisée dans laquelle l'élevage entre à la fois comme production et

comme réserve en capital, à utiliser au moment opportun⁵⁰. Dans ce contexte, les « *fazendinhas* » apparaissent : un agriculteur achète (illégalement) ou loue généralement des parcelles voisines, obtenant ainsi une superficie viable pour une production à plus grande échelle, avec toujours un système extensif prévalant. En même temps, il est également à noter que ces propriétés sont celles qui présentent la plus grande diversification d'activités parmi toutes les groupes d'activités (44 % des propriétés ont au moins trois productions). Il s'agit généralement d'activités qui utilisent peu de surface de l'exploitation, comme la culture du poivre noir, la fruiticulture et le manioc (Table 13).

L'élevage bovin peut représenter une forme de promotion sociale pour ces petits producteurs. Il nécessite un certain niveau d'investissement initial qui implique non seulement l'achat d'animaux, mais aussi la formation de pâturages. Dans une situation courante où une grande partie d'une petite propriété d'*assentamento* est dominée par la forêt secondaire, la transformation en pâturage de bonne qualité a un coût d'environ R\$3.000 par hectare, selon une personne interrogée.

Table 13. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de culture dans les fermes d'élevage de petite échelle (n=25) et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Élevage grande échelle</i>	Élevage petite échelle	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Nombre de cultures (%)	1	43,2	32,0	24,1	34,0
	2	51,4	24,0	65,5	39,6
	>3	5,4	44,0	10,3	26,4
Cultures dans la ferme (%)	Grains	45,9	8,0	100,0	1,9
	Maraîchage	0,0	4,0	3,4	5,7
	Elevage	100,0	100,0	65,5	34,0
	Poivre noir	8,1	24,0	0,0	32,1
	Fruiticulture	2,7	32,0	10,3	24,5
	Manioc	5,4	56,0	3,4	100,0
	Plant. Arbres	2,7	0,0	3,4	0,0
Açaí	0,0	0,0	0,0	3,8	

La fruiticulture a été une option pour certains producteurs qui ont un accès plus facile au marché (l'acheteur peut venir chercher la production par exemple, comme cela a été mentionné par un producteur) et/ou des prix de marché favorables, comme cela a été observé dans le cas du fruit de la passion, de la noix de cajou et de l'açaí sur certaines exploitations. La mécanisation est moins présente dans ces propriétés, ainsi

⁵⁰ Voir la théorie du « cycle de vie » au Chapitre 1.

que l'intensification (Table 14). L'intensification, lorsqu'elle se produit, est principalement liée à l'irrigation des cultures permanentes comme le poivre noir et l'irrigation des pâturages. L'irrigation des pâturages a été observée plus fréquemment dans les exploitations laitières. Ces propriétés en général ont un accès plus facile aux routes ou aux centres urbains et, par conséquent, réduisent le coût du transport quotidien de la production, rendant ce système viable.

Table 14. Proportions de fermes qui sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'élevage de petite échelle (n=25) et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Élevage grande échelle</i>	Élevage petite échelle	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Mécanisation (%)		87	28	100	2
L'accès est important (%)		59	67	100	68
Intensification (%)		38	20	48	4
Types d'intensification (%)	Rotation des pâturages	21	0	14	0
	Irrigation des pâturages	0	60	7	0
	Irrigation de cultures annuelles	7	0	7	0
	Irrigation de cultures pérennes	0	40	21	100
	Intégration agriculture élevage	50	0	50	0
	Fertilisation des pâturages	21	0	0	0

L'une des propriétés visitées, d'une superficie relativement faible (67,8 ha), irrigue les pâturages de *mombaça* (*Panicum maximum*), et vend la production à une laiterie située dans la municipalité de Mãe do Rio, à 112 km de la zone urbaine de Paragominas. La facilité d'accès à la route asphaltée permet de récupérer la production avec un coût relativement bas. Ce système productif peut soutenir des fermes d'élevage près de la zone urbaine de Paragominas, comme la ferme laitière de 'Wilson' (80 ha), qui est l'une des rares à ne pas avoir été vendue ou louée pour des agriculteurs qui font des cultures de grains. Dans ce contexte, un aspect fréquemment mentionné et affirmé par la personne interrogée est la résistance des éleveurs dits « traditionnels » à changer d'activité.

Les coûts de transport sont fondamentaux pour l'élevage laitier, et leur évolution peut avoir un impact sur le paysage d'une localité. Par exemple, une personne interrogée de l'*assentamento* Mandacaru commente que plusieurs fermes ont été contraintes de quitter l'élevage après que la ferme qui achetait le lait ait cessé ses activités. En d'autres termes, ils ne sont pas passés des bovins laitiers aux bovins de boucherie, mais ont complètement abandonné l'activité et se sont tournés vers d'autres activités comme l'aquaculture.

Pour le petit élevage, la production dépend fortement des politiques publiques et du marché (Table 15). Parmi les points soulevés figurent les subventions à la production, comme c'est le cas de PRONAF. Selon une personne interrogée, cette politique de financement du gouvernement est principalement utilisée pour acheter du bétail, et elle ne répond souvent pas aux souhaits de l'éleveur parce qu'il peut ne pas connaître à l'avance le troupeau financé, qui peut recevoir des animaux de moindre qualité que prévu. En ce sens, certains éleveurs espèrent que les élevages de petite échelle pourraient bénéficier des subventions plus importantes de la part du gouvernement.

D'autre part, les agriculteurs mentionnent également les difficultés imposées à la production par le gouvernement, telles que la réglementation et la supervision sanitaire des produits laitiers, en particulier le fromage, telles que cité par un agriculteur. Selon un autre interviewé, une installation de cette nature, « *queijaria* », nécessite un investissement d'environ R\$70.000, ce qui limite les possibilités de production pour les éleveurs. Par exemple, trois éleveurs interrogés dans la localité d'Água Suja, ne peuvent pratiquer l'élevage laitier que parce qu'ils vendent la production à une *queijaria* locale (à la localité de Novo Horizonte) établie conformément aux normes sanitaires.

Table 15. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'élevage de petite échelle (n=25) et comparaison avec d'autres groupes.

		<i>Elevage grande échelle</i>	Elevage petite échelle	<i>Cultures de grains</i>	<i>Agriculture familiale</i>
Facteurs de changement (%)	Inspection environnementale	10	0	20	4
	Politiques Publiques	31	83	25	74
	Marché	34	17	35	8
	Sécheresses	14	0	20	0
	Main d'œuvre	0	0	0	2
	Légalisation foncière	10	0	0	12
Projets futurs (%)	Diversification	13	19	7	32
	Expansion	32	44	32	33
	Intensification	18	0	18	0
	Changer/louer	18	7	18	10
	<i>Status quo</i>	16	26	25	20
	Mécaniser	3	4	0	5

Cependant, malgré les difficultés rencontrées, la plupart des personnes interrogées mentionnent que les plans futurs sont l'expansion de l'activité ou le maintien de l'état actuel (Table 15). Une petite partie prévoit d'entreprendre d'autres activités complémentaires afin de diversifier et d'assurer les revenus de la propriété.

Rapport avec le milieu biophysique : comme cela a déjà été souligné dans le contexte des grandes exploitations d'élevage, les ressources en eau sont fondamentales pour l'implantation d'une petite exploitation d'élevage, puisque la grande majorité d'entre elles ont été établies dans le fond des vallées et à proximité du réseau de drainage, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles disponibles.

D'autre part, la relation avec le potentiel naturel de la terre est différente. La proportion de parcelles non exploitables en raison de restrictions physiques est inférieure à celle observée dans les grands élevages bovins (28%). Cela s'explique par le fait que la faible superficie des propriétés exige l'utilisation de secteurs à faible potentiel naturel, tels que les fortes pentes et les vallons. C'est le cas de l'éleveur 'José', qui possède une propriété de 107 ha, issu de la fusion de lots de l'assentamento Camapuã (Água Suja). L'éleveur de bétail exerce exclusivement des activités d'élevage laitier avec environ 80 têtes et il a été constaté qu'il utilise comme pâturage non seulement le fond de la vallée, mais aussi les pentes raides et même le plateau argileux.

Le même éleveur affirme qu'il cherche à tirer le meilleur parti de la surface qu'il a, en effectuant l'entretien des adventices manuellement puisqu'il n'a pas de tracteur, et même s'il y avait, son utilisation serait limitée dans les terrains escarpés. Ceci conduit à la conclusion que cette situation est rendue possible par l'existence d'une main-d'œuvre familiale (deux personnes actives) et l'embauche sporadique de tiers, d'une part, et l'existence de la *queijaria* locale achetant sa production, d'autre part. Dans les questionnaires, il est apparu clairement que peu de parcelles étaient considérées comme improductives en raison de limitations financières (28%), puisque dans ce système, la surface de production est maximisée.

Dans certains cas plus rares, certains éleveurs peuvent réformer les pâturages dans des zones escarpées en louant un tracteur à chenilles, comme l'a indiqué une personne interrogée dans l'assentamento Mandacaru, mais la gestion des plantes adventices se fait toujours manuellement. Malgré cela, ces parcelles sont toujours subordonnées à celles qui se trouvent à proximité des sources d'eau, ce qui est plus fréquent au fond des vallées. Il a été constaté que la plus grande partie de la superficie des exploitations se trouve en fond des vallées (Figure 65), ce qui s'explique en partie par le choix initial de l'emplacement de la colonisation, qui a donné la préférence aux zones avec présence de ressources en eau (80% des exploitations interrogées ont au moins un cours d'eau que les traverse).

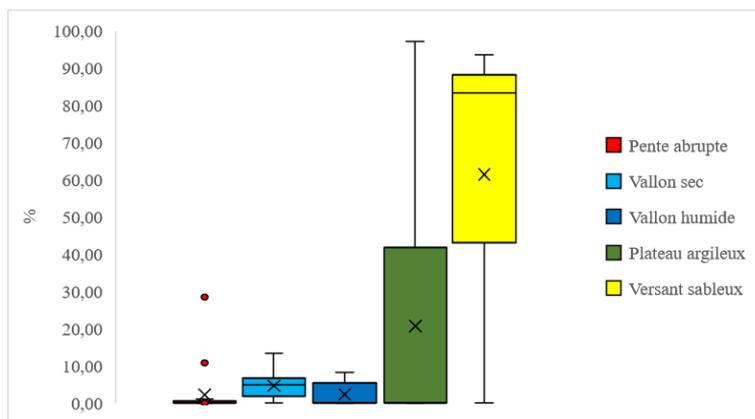


Figure 65. Proportion d'unités pédomorphologiques dans les exploitations (n=25) d'élevage de petite échelle.

Table 16. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'élevage à petite échelle. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.

Unités pédomorphologiques	Occupation du sol	Raisons évoquées
Plateau argileux	Pâturage	Seule unité à la ferme (1)
	Agriculture familiale	Seule unité à la ferme (1)
	Maraichage	Seule unité à la ferme (1)
	Intensification	Seule unité à la ferme (1)
		Topographie (1)
Pente abrupte	Forêt secondaire	Code Forestier (1)
		Limite d'investissement (1)
		Accès distant (1)
	Pâturage	Seule unité à la ferme (1)
Vallons	Forêt secondaire	Pente forte (3)
		Code Forestier (2)
		Limite d'investissement (1)
		Topographie (2)
Versants sableux	Pâturage	Proche des ressources en eau (1)
		Seule unité à la ferme (5)
		Proximité d'accès (1)
		Seule unité à la ferme (1)
	Agriculture familiale	Topographie (2)
		Proximité d'accès (2)
		Limite d'investissement (12)
	Zone inondable	Forêt Secondaire

Dans de nombreux cas, l'établissement de pâturages au fond des vallées est simplement dû à la faible superficie de l'exploitation, qui ne comprend que cette unité de relief (Table 16). Des pâturages mieux gérés sont également mis en place dans des

zones plus proches de l'habitation et des infrastructures telles que des corrals, et ceux-ci sont généralement établis proches des ressources hydriques (Table 16). Il peut en aller de même pour les lots qui, pour une raison ou pour une autre, se trouvent entièrement sur le plateau argileux, et qui nécessitent une alternative en matière de ressources en eau, comme les forages d'eau.

Dans les exploitations qui ont tout le spectre topographique fond de vallée/pente/plateau argileux, le plateau argileux peut être moins apprécié en raison de la rareté de l'eau, de la distance de l'habitation et même des problèmes d'attaque du bétail par des animaux carnivores. Cependant, l'éleveur 'Jose', qui a une grande partie de sa propriété avec des pâturages, mentionne que les pâturages sur le plateau ont l'avantage de se dégrader plus lentement, ce qui peut être attribué soit à la fréquence plus faible du pâturage du bétail, soit à la fertilité du sol. Les zones inondables, comme déjà mentionné au début, peuvent être l'une des rares restrictions naturelles efficaces pour l'élevage à petite échelle. Bien que les producteurs puissent gérer les zones inondables, en utilisant parfois des variétés fourragères résistantes aux inondations (e.g. *Brachiaria Humidicola*), ils suivent les restrictions déterminées par le Code Forestier (Aires de Préservation Permanente de cours d'eau).

3.3. Les cultures de grains

Dans cette section sont discutées des caractéristiques d'un total de 29 propriétés qui pratiquent les cultures de grains à grande échelle. Le soja est la principale production. Le soja étant le « produit phare » auquel d'autres productions sont associées, sa caractéristique fondamentale est la plantation à grande échelle et l'utilisation généralisée de la mécanisation pour la préparation du sol, la correction du pH, la fertilisation, la plantation et la récolte (Figure 66). Les propriétés où l'on plante du soja ont une répartition de la taille légèrement moins inégale que les autres groupes de production (Figure 67).

Comme cela a été vérifié lors de l'analyse par Poids d'Évidence au Chapitre 5, l'expansion du soja provenant des pâturages se fait principalement dans des propriétés qui n'appartiennent pas au groupe des propriétés qui ont les plus grandes surfaces dans la municipalité, ni aux plus petites.



Figure 66. a) Plantation de soja en phase de développement en saison des pluies à Paragominas (Photo : F. Araújo, 2012). b) Plantation de sorgho comme deuxième culture de fin de saison des pluies après le soja. (Photo : R. Osis, 2017).

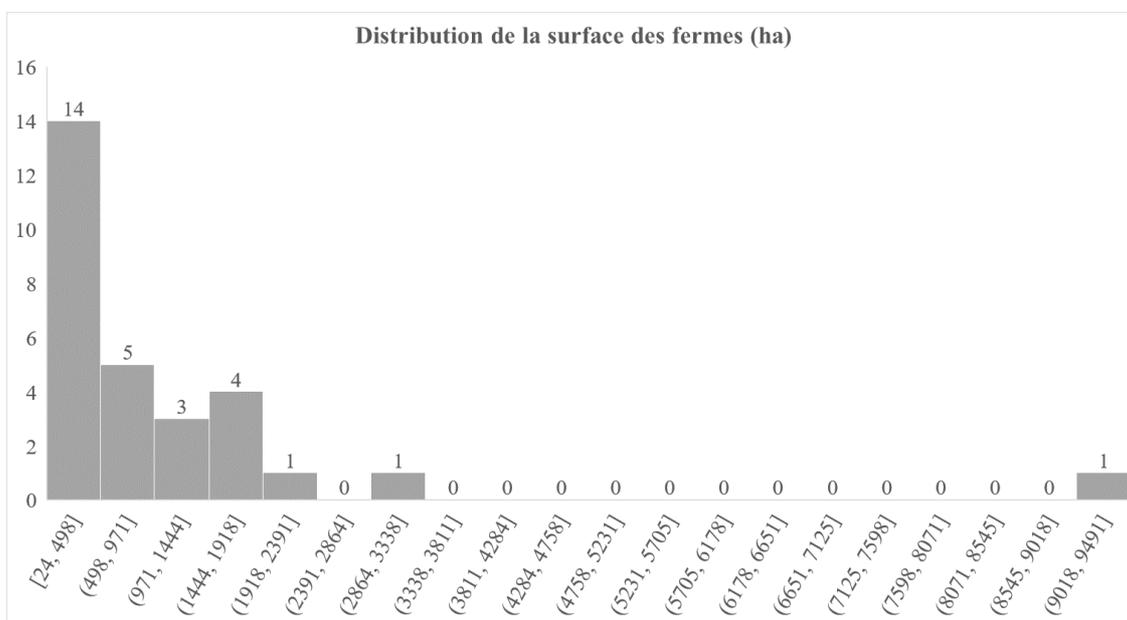


Figure 67. Répartition des superficies des propriétés du groupe 'cultures de grains' (n=29).

Cela signifie que si, d'une part, il existe une taille minimale pour la viabilité d'une plantation de soja, d'autre part, de grandes extensions de plantation peuvent être limitées soit par les conditions physiques (zones mécanisables limitées par exemple), soit par la capacité financière de l'agriculteur, le soja exigeant du matériel et des intrants. Comme discuté par Empinotti (2015), les surfaces des plantations de soja au Mato Grosso sont un héritage du processus historique d'occupation de ces zones par les migrants du sud du pays. Il n'est pas rare que les producteurs ruraux vendent leurs terres dans le Sud et acquièrent des superficies plusieurs fois supérieures à celles qu'ils possédaient. L'auteur souligne que les agriculteurs sont passés d'une catégorie qui pouvait être identifiée comme des agriculteurs familiaux dans leur région d'origine à

une catégorie de grands propriétaires fonciers dans la région d'arrivée. A Paragominas, il n'est pas possible de placer tous les producteurs de soja dans la même classe. Lors d'une communication personnelle avec René Pocard-Chapuis (2019), il convient de différencier deux types de producteurs. Tout d'abord, les producteurs qui sont en général le résultat du processus décrit ci-dessus de migration des agriculteurs qui viennent du Sud du pays. Ils s'installent dans la municipalité avec leur famille et y ont leur résidence permanente, rurale ou urbaine. Leur revenu peut provenir exclusivement de la production agricole, mais il peut aussi être dû à d'autres activités, comme le commerce dans la zone urbaine.

Au sein de ce même groupe, il est possible d'identifier d'anciens exploitants forestiers qui ont changé d'activité en plantant le soja, du fait de la possession et de la maîtrise techniques des engins, processus déjà identifié par Burlamaqui et al. (2013). C'est le cas, par exemple, du propriétaire de la ferme où 'Irmão' a été interviewé : le propriétaire possède une scierie, mais passe progressivement à la plantation de soja, car après l'effondrement de l'activité d'exploitation de bois vécue au cours de années 2000, la filière bois n'est pas considérée comme ayant de bonnes perspectives d'avenir. L'autre type correspond à des agriculteurs « émergents » qui représentent des organisations extérieures à la municipalité, avec une grande capacité d'investissement.

Pour faciliter la lecture dans le texte qui suit, la première catégorie est désignée de « *sojeiro*⁵¹ local » et la seconde de « *sojeiro* de groupe industriel ». Bien entendu, ces catégories ne sont pas exclusives et une série de situations intermédiaires et d'interactions entre ces deux systèmes est possible. Par exemple, tous sont plus ou moins liés à des entreprises de semences, d'intrants et stockage de grains (e.g. Cargill, Syngenta, Bunge). Des exemples de *sojeiro* de groupe industriel sont le groupe Juparanã (non interviewé) et Fazenda Água Parada.

Mais dans tous les cas, l'expansion de la culture du soja est liée à la phase plus avancée du front pionnier, comme en témoignent les proportions d'occupation du sol dans les propriétés interrogées (Figure 68). On observe que ces propriétés ont une faible proportion de forêts primaires et secondaires, et des proportions élevées de pâturage et d'agriculture.

⁵¹ Nom local donné aux producteurs de soja et autres grains.

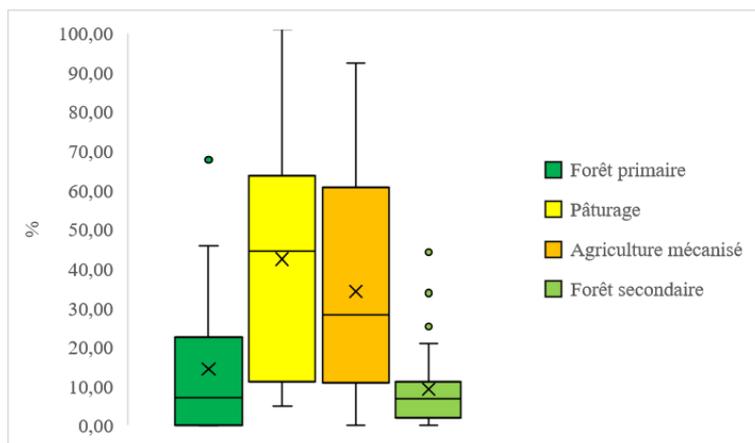


Figure 68. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations de cultures de grains en 2015 (n=29).

Table 17. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de la location dans les propriétés avec élevage d'agriculture commerciale (n=29), et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Elevage grande échelle</i>	<i>Elevage petite échelle</i>	Cultures de grains	<i>Agriculture familiale</i>
Type foncier (%)	Privé	75,0	16,7	82,8	1,9
	Projet INCRA	2,8	62,5	13,8	53,8
	Invasion	2,8	8,3	0,0	23,1
	Ancienne	0,0	4,2	0,0	13,5
	Fusion	19,4	4,2	3,4	1,9
	Subparcelles	0,0	4,2	0,0	5,8
Main d'œuvre per area (%)	Faible	35,1	4,0	41,4	3,8
	Moyenne	48,6	0,0	34,5	0,0
	Haute	16,2	96,0	24,1	96,2
Location		28,6	8,0	67,9	7,5

Cette dynamique pionnière de phase finale de front pionnier se caractérise la plupart du temps par des propriétés considérées comme « privées ». Une faible proportion d'entre elles sont en lots d'*assentamento* (Table 17). L'expansion du soja sur des lots d'*assentamento* est possible par la location (Figure 69). Comme le montre la Table 17, la plupart des fermes avec soja sont dans un contexte de location (ce qui est décrit plus en détail à la section 'Élevage à grande échelle'). Les caractéristiques de la culture du soja permettent de louer des terres à des tiers, généralement des éleveurs pour ne pas immobiliser le capital dans la propriété foncière mais le consacrer au machinisme.



Figure 69. a) e b) Des parcelles de soja, en période post-récolte, sur une ferme près de la route asphaltée BR-010 à Paragominas. Il est à noter que la zone a des auges et des clôtures, ce qui indique que la zone est également (ou a été) utilisée pour l'élevage. Photo : Osis, R. (2016).

Compte tenu de l'existence ou non de parcelles de pâturage dégradé, dépourvu de restes de troncs d'arbres (parcelle « *destocada* ») et surtout de relief plat et non saturé en eau, ce type d'espace peut être loué pour la plantation du soja. Selon un entretien, la location peut être faite pour un certain nombre de sacs de soja définis a priori (8 sacs/ha dans le cas de l'interviewé).

En ce qui concerne la taille minimale pour une parcelle de soja, cela dépend de l'emplacement. S'il s'agit d'une superficie proche ou même voisine d'une parcelle déjà cultivée en soja par un agriculteur, cette superficie peut présenter une superficie minimale de l'ordre d'une dizaine d'hectares. S'il s'agit d'une parcelle éloignée, cette superficie minimale possiblement augmentera, due à l'augmentation du coût de transport. La culture du soja ne nécessite pas obligatoirement d'infrastructures permanentes sur la parcelle, comme c'est le cas pour l'élevage, qui nécessite au moins la fermeture avec de clôtures, mais elle dépend obligatoirement de la mécanisation.

Le machinisme impliqué dans les opérations peut être transporté à partir d'autres endroits, avec une certaine flexibilité, mais doit emprunter des chemins carrossables. Tous les agriculteurs ont répondu que la distance est essentielle pour que l'activité puisse avoir lieu (Table 19). Quelques dizaines de kilomètres en plus à parcourir impliquent des coûts de carburant importants et du temps souvent précieux en période de semis et de récolte qui réduisent la marge de revenu final. Selon Vera-Diaz et al. (2008), les coûts de transport élevés réduisent le prix perçu par les agriculteurs, ce qui, à son tour, réduit le niveau d'investissement dans les intrants pour la correction et la fertilisation des sols. Mais il n'y a pas que la distance qui compte. La grande majorité des accès de Paragominas étant des routes non asphaltées, la qualité de la route est fondamentale pour le transport des machines, et en particulier le passage des camions

en période de récolte, véhicules qui ne sont pas adaptés aux mauvaises conditions routières. C'est pourquoi des groupes d'exploitations agricoles se regroupent pour assurer l'entretien de ces routes, qui consiste essentiellement à niveler et à utiliser de la « *piçarra* », c'est-à-dire des fragments de croûte de latérite, afin de créer une chaussée relativement stable. Dans ce cas, ils peuvent même établir une sorte « péage » non officiel pour la collecte d'argent de ceux qui empruntent cette route afin de l'entretenir (Figure 70).



Figure 70. a) Route non asphaltée conservée par un groupe de producteurs de soja. b) Panneau de signalisation non officielle placée par les producteurs de soja. Photos : Osis, R. (2016).

Un autre aspect est lié au temps nécessaire à la préparation initiale de la parcelle, notamment en ce qui concerne la fertilisation et la correction (Figure 71), les premières cultures étant moins productives. Une autre limitation concerne la situation foncière des parcelles en location. Selon un interviewé, les exploitations non légalisées limitent l'obtention de crédit, qui est basé sur la capacité de production de l'unité productive, et les zones non légalisées ou les assentamentos ne peuvent pas être incluses comme des zones productives. La plupart des exploitations qui plantent du soja ont une deuxième activité principale (66 %), et cette deuxième activité est presque toujours l'élevage (Table 18). D'autres activités comprennent l'horticulture, la plantation d'arbres pour le bois, la fruiticulture, la pisciculture et même le manioc. Cela explique peut-être pourquoi ils disposent d'une densité de main d'œuvre plus importante dans la classe « haute » par rapport aux exploitations d'élevage de grande échelle (Table 17).



Figure 71. Calcaire agricole avant d'être épandu sur les parcelles. a) Sur une parcelle du plateau argileux et ; b) sur une parcelle des versants sableux. Photos : Osis, R. (2016).

Certaines activités secondaires sur ces propriétés peuvent être exercées par les habitants de la ferme (employés, par exemple) ou par des tiers, comme dans le cas d'un producteur de pastèques irriguées, qui loue une partie d'une ferme de soja près de Paragominas. La plus grande proportion de mécanisation (Table 19) et d'intensification s'observe dans les fermes qui produisent du soja, avec 48% des fermes avec intensification, contre 38% dans le cas de l'élevage à grande échelle, 20% dans le cas de l'élevage à petite échelle et 4% dans le cas des exploitations familiales (Table 19). Il n'est pas surprenant que l'intensification soit concentrée dans ces propriétés où, selon les personnes interrogées, les plus grandes limitations pour l'utilisation de certaines parcelles de la ferme sont de nature biophysique (19% des fermes) et celles liées au Code Forestier (31% des fermes). Alors qu'aucun des producteurs de soja interrogé ne mentionne la limitation du capital pour le plein usage des parcelles de la ferme.



Figure 72. a) Hersage du sol avant la plantation principale de soja. b) Récolte du maïs en *safrinha* avec moissonneuse-batteuse. Photos : Osis, R. (2016).

Table 18. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'agriculture commerciale (n=29) et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Élevage grande échelle</i>	<i>Élevage petite échelle</i>	Cultures de grains	<i>Agriculture familiale</i>
Nombre de cultures (%)	1	43,2	32,0	24,1	34,0
	2	51,4	24,0	65,5	39,6
	>3	5,4	44,0	10,3	26,4
Cultures dans la ferme (%)	Grains	45,9	8,0	100,0	1,9
	Maraîchage	0,0	4,0	3,4	5,7
	Elevage	100,0	100,0	65,5	34,0
	Poivre noir	8,1	24,0	0,0	32,1
	Fruiticulture	2,7	32,0	10,3	24,5
	Manioc	5,4	56,0	3,4	100,0
	Plant. Arbres	2,7	0,0	3,4	0,0
Açaí	0,0	0,0	0,0	3,8	

La mécanisation, est un aspect fondamental de la production, fruit de la Révolution Verte, elle permet la production agricole à grande échelle. Le recours à la mécanisation dépend du capital et de l'accès au crédit de l'agriculteur, mais peut aussi dépendre de la main-d'œuvre disponible. L'interviewé 'Ozni' souligne qu'à Paragominas il y a une pénurie de main d'œuvre qualifiée pour manipuler des machines agricoles, ce qui pourrait être aussi une restriction à la production.

Table 19. Proportions de fermes que sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes de cultures de grains (n=29) en comparaison avec les autres groupes

		<i>Élevage grande échelle</i>	<i>Élevage petite échelle</i>	Cultures de grains	<i>Agriculture familiale</i>
Mécanisation (%)		87	28	100	2
L'accès est important (%)		59	67	100	68
Intensification (%)		38	20	48	4
Types d'intensification (%)	Rotation des pâturages	21	0	14	0
	Irrigation des pâturages	0	60	7	0
	Irrigation de cultures annuelles	7	0	7	0
	Irrigation de cultures pérennes	0	40	21	100
	Intégration agriculture élevage	50	0	50	0
	Fertilisation des pâturages	21	0	0	0

En ce qui concerne le processus d'intensification dans ces exploitations, il est principalement représenté par l'intégration agriculture-élevage, dans laquelle les plantes fourragères sont semées avec la deuxième culture (*safrinha*), comme le maïs

(Table 19). Dès que la deuxième culture est récoltée, le fourrage est déjà développé et permet la réception du troupeau, qui peut consommer un bon fourrage pendant la saison sèche (Figure 73).



Figure 73. a) Parcelle dans laquelle s'effectue l'intégration agriculture-élevage. On observe la croissance de l'herbe fourragère sur la paille sèche de la dernière récolte de maïs. b) L'ensilage pour l'alimentation animale, réalisé avec la production agricole de l'exploitation elle-même.

Ce système nécessite un investissement plus important, notamment pour enclore la zone et établir un système d'abreuvement pour le bétail, car une grande partie des cultures de grains se fait sur le plateau argileux, loin des cours d'eau. Les producteurs de soja peuvent profiter de leur production agricole pour la formation d'un pâturage de bonne qualité pendant la saison sèche, ainsi que de la possibilité de produire de l'ensilage. Ceci constitue un avantage compétitif car une grande partie des pâturages souffre d'une forte baisse de productivité pendant la saison sèche, obligeant l'éleveur à vendre une partie de son troupeau au moment où les prix sont au plus bas. Bien qu'il s'agisse encore d'une exception, l'irrigation du grain avec système de pivot central a été testée dans certaines propriétés, comme la ferme São Lucas à Ulianópolis.

Si l'intensification n'implique pas nécessairement l'adoption de nouvelles technologies, elles vont souvent de pair. Dans ce contexte, nous pouvons décrire deux situations extrêmes concernant l'utilisation des nouvelles technologies. D'une part, les « *sojeiros locais* » peuvent avoir une contrainte importante de capital (ou de crédit), qui peut limiter considérablement l'accès à la technologie, en produisant avec un nombre limité de machines, d'intrants et de main-d'œuvre.

D'autre part, les *sojeiros* de groupe industriel peuvent utiliser une grande variété de technologies pour maximiser les profits, ce qui peut inclure des technologies pour i) augmenter la productivité : cultivars et intrants de nouvelle génération, fertilisation des sols basée sur des données à échelle spatiale précise - agriculture de précision ; ii) augmenter la capacité de plantation : machines avec une capacité de charge et de

travail plus élevée, aviation agricole et ; iii) augmenter la capacité des stockage (séchoirs et silos) et de transport (entretien routier) (Figure 74). En d'autres termes, les *sojeiros d'entreprise* ont une logique de maximisation des profits avec moins de contraintes d'investissement.



Figure 74. a) Silos de stockage de grains. Photo : R. Osis (2016). b) Machines de grande capacité de travail. Photo : Juparanã (2017).

L'intensification et l'adoption de nouvelles technologies impliquent un changement dans les pratiques ou la gestion agricoles. Bien que chaque producteur puisse gérer en fonction de ses propres ressources et de la situation, la gestion varie autour de certaines pratiques courantes. Il s'agit notamment du système appelé « Barreirão ». Dans ce cas, l'objectif est de réformer les pâturages dégradés dans les exploitations d'élevage de grande échelle par des cultures de grains, qui financent la réforme. En général cette gestion suit la technique suivante : 1^{ère} année (riz + correction de pH + fertilisation) ; 2^{ème} année (maïs + *mombaça* + fertilisation) et 3^{ème} année (pâturage). Dans les zones où l'objectif est la culture continue du soja, en général, le soja est suivi par une deuxième culture, comme le maïs, le sorgho et le millet.

Le système de semis direct, qui consiste à planter la culture directement sur la paille laissée par la culture précédente, sans travail du sol, a également été adopté par une partie des agriculteurs, comme l'interviewé 'Marcos'. Des gestions plus sophistiquées sont aussi adoptées visant la conservation/amélioration des conditions de production, en particulier la qualité des sols, ainsi que la diversification des activités de l'exploitation, ce qui augmente la sécurité des investissements. C'est le cas, par exemple, du système « Santa Fé » (réalisé par 'Fazenda Elisabeth'), qui consiste à pratiquer le semis direct et l'intégration agriculture-élevage avec une plante fourragère se développant en saison sèche à la suite d'une culture en saison des pluies, ce qui permet d'alimenter le bétail lorsque les cours de la viande sont bas et de le vendre lorsqu'ils sont élevés.

L'intensification est non seulement plus présente dans ce contexte agricole, mais c'est aussi un objectif d'avenir fréquent que les interviewés citent, ce qui est similaire avec les fermes d'élevage extensif à grande échelle, avec 18% des réponses (Table 20). Si l'expansion de la production reste l'objectif le plus souvent cité (32%), par rapport aux autres systèmes considérés, ici la proportion de réponses positives à l'expansion de la production est la plus faible (les plus élevées concernent l'élevage à petite échelle). Cela donne une indication que la logique généralisée d'expansion dans le front pionnier est moins forte chez les producteurs de soja, qui choisissent de s'intensifier davantage.

Table 20. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés avec cultures de grains (n=29) et comparaison avec les autres groupes.

	<i>Elevage grande échelle</i>	<i>Elevage petite échelle</i>	Cultures de grains	<i>Agriculture familiale</i>	
Facteurs de changement (%)	Inspection environnementale	10	0	20	4
	Politiques Publiques	31	83	25	74
	Marché	34	17	35	8
	Sécheresses	14	0	20	0
	Main d'œuvre	0	0	0	2
	Légalisation foncière	10	0	0	12
Projets futurs (%)	Diversification	13	19	7	32
	Expansion	32	44	32	33
	Intensification	18	0	18	0
	Changer/louer	18	7	18	10
	<i>Status quo</i>	16	26	25	20
	Mécaniser	3	4	0	5

Les conditions du marché, les politiques publiques et l'application des lois environnementales sont les facteurs les plus importants pour un changement dans la production de soja, selon les répondants (Table 20). Le soja, étant une *commodité*, son prix est largement contrôlé par le marché mondial (Nepstad, Stickler, et Almeida 2006). De bons prix, qui reflètent une demande pour le produit, peuvent être un facteur dans l'expansion de la culture du soja, tandis que la chute des prix peut peser sur la décision du producteur d'établir la superficie à planter. Cependant, les fermes qui ont des silos peuvent réserver la production pour la vente à des moments plus favorables, ce qui permet une brève déconnexion des variations de prix sur les surfaces plantées pour certaines fermes.

Les politiques publiques et les inspections environnementales sont citées par les personnes interrogées, notamment en ce qui concerne les restrictions imposées par le Code Forestier. Si, d'une part, il peut y avoir certains producteurs qui sont ouvertement

hostiles aux règles du Code Forestier⁵², il y en a d'autres qui acceptent les conditions, puisqu'elles sont imposées non seulement par le gouvernement, mais également par le marché. Mais une question fréquemment citée par les agriculteurs est la possibilité d'une compensation forestière qui permet la déforestation de parcelles à bon potentiel agricole et la récupération dans les zones à faible potentiel, ce qui sera discuté à la fin.

Après ces points, un autre aspect fréquemment cité par les producteurs et qui a des influences importantes sur la production de soja sont les épisodes de sécheresse intense. La sécheresse peut avoir paradoxalement un effet positif ou négatif sur la superficie plantée en soja. D'une part, les épisodes de sécheresse affectent considérablement les pâturages existants et réduisent la productivité de l'élevage, comme indiqué dans la section précédente sur l'élevage à grande échelle. Cet effondrement de la production animale sur une ferme d'élevage peut favoriser la location de la ferme à des agriculteurs pour la plantation de soja. Les sécheresses intenses favorisent également l'apparition d'incendies forestiers (accidentels ou intentionnels), ce qui contribue à la dégradation progressive et à une plus grande ouverture à la conversion d'occupation du sol. Un agriculteur a mentionné que parfois le feu est intentionnel de la part des producteurs de soja, qui visent une expansion sur le plateau argileux. Ces deux mécanismes peuvent avoir pour effet d'augmenter la superficie de la production de soja. D'autre part, les sécheresses affectent également négativement la production de grains et les cultures associées. Par exemple, un interviewé a mentionné que la sécheresse de 2015 a endommagé la récolte de maïs. Les sécheresses de début de saison des pluies, même de courte durée (1 à 2 semaines) détruisent les jeunes semis. Cette situation peut réduire le potentiel d'investissement pour les prochaines saisons, réduisant ainsi les possibilités d'expansion.

Rapport avec le support biophysique : la relation entre la production de soja et le cadre biophysique est contradictoire sur le front pionnier. En même temps que les technologies de la « Nouvelle Révolution Verte » permettent de surmonter les limites de fertilité des sols tropicaux, cette production se développe d'abord dans des zones à potentiel agricole plus favorable. À Paragominas, cette caractéristique est évidente. Si l'on observe la proportion des surfaces de plateau argileux dans les propriétés productrices de soja, rares sont celles qui possèdent moins de 30% de cette unité topographique (Figure 75). En interrogeant les producteurs sur les raisons de la

⁵² Comme, par exemple, la citation d'un producteur, pour qui le déboisement pourrait être admis jusqu'au fleuve Amazone, et le reste au Nord conservé.

préférence du soja sur le plateau argileux, ils soulignent les bonnes conditions pour la mécanisation, la fertilité des sols et l'altitude (Table 21).

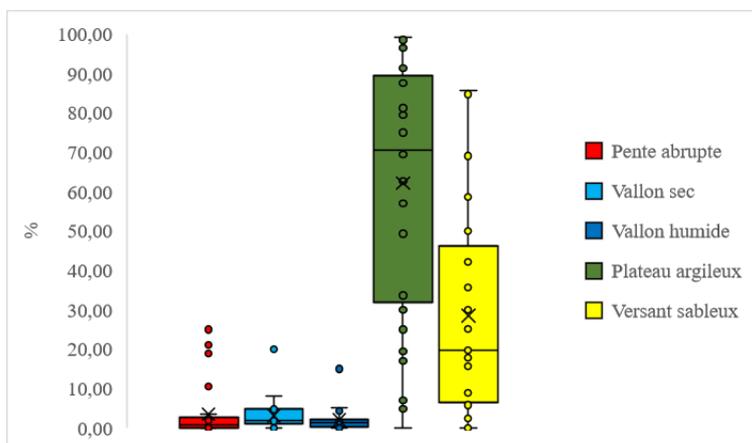


Figure 75. Proportion d'unités pédomorphologiques dans les exploitations avec cultures de grains (n=29).

Table 21. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés avec cultures de grains. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.

Unités pédomorphologiques	Occupation du sol	Raisons évoquées
Plateau argileux	Cultures de grains	Topographie (19)
		Fertilité du sol (13)
		Seule unité à la ferme (3)
		Loin des ressources en eau (1)
		Altitude (2)
	Intensification	Fertilité du sol (4) Topographie (7)
	Forêt primaire	Code Forestier (8)
Pentes abruptes	Forêt secondaire	Pente forte (3)
Vallons	Forêt secondaire	Pente forte (9)
		Code Forestier (4)
Versants sableux	Pâturage	Topographie (2)
		Proche des ressources en eau (7)
	Intensification	Topographie (2)
	Cultures de grains	Topographie (2)

En ce qui concerne la fertilité, il faut la considérer par rapport aux autres sols de la région. Les sols les plus argileux des plateaux sont plus fertiles que ceux que l'on trouve au fond des vallées, tel que décrit par (Rodrigues et al., 2003). Ceci peut être attribué en partie à la texture plus argileuse de ces sols qui élève la Capacité d'Echange Cationique (Kotschoubey et al. 2005). La couverture d'argile de Belterra des plateaux présente entre 70 et 80% de kaolinite, un aspect qui contribue également

à une plus grande capacité de rétention de l'eau et favorise l'accumulation de matière organique. De plus, la spécificité de l'argile de Belterra est que, même si elle a une texture argileuse, elle a une macro-structure verticale bien développée, ce qui empêche l'accumulation excessive d'eau pendant la saison humide (Figure 76).



Figure 76. a) Apparence des agrégats de l'argile de Belterra peu après l'hersage. b) Fissures de contraction dans l'argile de Belterra, qui dénotent une structure verticale dans le profil pédologique. Photos : Osis, R. (2017).

L'ensemble de ces caractéristiques contribue à une productivité considérablement plus élevée du soja sur le plateau argileux par rapport aux vallées sableuses. 'Sergio' indique que le rendement dans les zones de sable est de 15 à 20 sacs⁵³ par hectare, tandis que 'Marcos', sur le plateau argileux, produit en moyenne 50 sacs. Cependant, la fertilité n'est pas seule à expliquer la préférence du plateau argileux pour les grains. Une topographie qui favorise la mécanisation est fondamentale.

Ainsi, le relief pratiquement plat des plateaux à Paragominas permet de réduire au maximum les coûts de mécanisation (tels que la consommation de carburant, le temps, la dégradation des machines). La topographie plane présente également le degré de susceptibilité à l'érosion du sol le plus faible possible dans un système agricole, avec des pertes minimales de sol, de matière organique et de nutriments naturellement présents dans le sol ou ajoutés par l'agriculteur.

Un deuxième aspect lié à la topographie du plateau argileux est qu'il présente des extensions continues d'ordre kilométrique sans interruption, soit par des cours d'eaux, soit par des reliefs. Cela favorise l'établissement de parcelles continues dont la limitation de l'extension peut être définie moins par la taille de la surface disponible que par la capacité de plantation de l'agriculteur (quantité et capacité des machines, intrants et main-d'œuvre). Cet aspect n'est évidemment possible que par la présence

⁵³ Un sac de soja a 60 kg ou 2,20 *bushels*.

de grandes exploitations, qui sont majoritaires à Paragominas (Figure 77). Une faible densité de cours d'eau et de reliefs signifie facilite le semis, l'application des intrants et la récolte. En même temps, la croissance des plantes est homogène et favorise l'opération de la moissonneuse-batteuse (René Pocard-Chapuis, 2019, communication personnelle).



Figure 77. a) et b) Exemples de parcelles de cultures agricoles d'échelle spatiale kilométrique. Photos : Osis, R. (2017).

Les avantages en termes de potentiel agricole des plateaux sont si importants qu'ils peuvent même permettre des investissements pour l'élimination mécanique des "*murunduns*", petits reliefs convexes de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à un peu plus d'un mètre, qui se répètent à intervalles réguliers sur une partie des plateaux argileux à Paragominas⁵⁴.

Ces micro-reliefs peuvent engendrer des différences dans le développement des plantes et, surtout, entraver le fonctionnement des moissonneuses-batteuses. Selon un commerçant de machines agricoles de Paragominas, la présence de *murunduns* entraîne une augmentation considérable du temps nécessaire pour la récolte par unité de surface. En ce sens, certaines fermes procèdent à l'élimination de ces reliefs avec des machines spéciales, ce qui peut être observé surtout dans les fermes plus proches des routes asphaltées à Paragominas (Figure 78). Cependant, l'expansion de la culture du soja sur le plateau argileux se confronte à deux limitatons cruciales liés à l'histoire de l'occupation du sol et aux politiques environnementales. D'une part, l'occupation du territoire qui a eu lieu dès le début, basée sur l'élevage du bétail, a concentré le déboisement dans les vallées, le long des cours d'eaux, tandis que les plateaux argileux étaient maintenus en forêt. Après le début des années 2000, l'arrivée

⁵⁴ Et dont la formation fait encore débat, avec une hypothèse géomorphologique, par des processus érosifs, et une autre biologique, par l'action de termites.

du soja a inversé la situation, avec une valorisation des plateaux. Mais avec les politiques de lutte contre la déforestation du milieu des années 2000, l'expansion de l'agriculture sur les plateaux a été fortement limitée.



Figure 78. Parcelles agricoles avec des *murunduns* à Paragominas. a) *Murunduns* avec des sommets visibles. b) *Murunduns* peu après avoir été aplatis avec des machines. La distance entre les *murunduns* varie autour de 50 m. Source : Google Earth (2019).

Dans ce contexte, la question du potentiel productif du plateau conduit directement à un point souvent soulevé par les agriculteurs lors des entretiens : la compensation forestière. Leur proposition serait, dans le contexte de l'exploitation, de déboiser la forêt existante dans le plateau et permettre la régénération forestière en une surface équivalente en dehors du plateau, comme sur les pentes et dans les vallons humides. On peut citer le cas de l'interviewé 'Ozni', qui a été contraint par le SEMMA (Secrétariat Municipal de l'Environnement de Paragominas) à récupérer 13 hectares de forêt déboisée après 2008 sur le plateau, alors qu'il permet la régénération forestière sur une surface plus grande sur les flancs du plateau. Cependant, le Code Forestier actuel ne permet pas la conversion des forêts primaires, même avec un niveau élevé de dégradation. Cette situation a conduit à l'articulation des acteurs locaux et des chercheurs pour l'élaboration d'un projet d'aménagement du territoire basé sur le potentiel des services environnementaux du paysage (Terracert) (Poccard-Chapuis et al. 2019).

D'autre part, cette limitation des terres disponibles sur les plateaux peut conduire à l'idée que, si le marché continue à être favorable à l'expansion de la plantation de commodities, deux phénomènes peuvent augmenter : l'expansion du soja dans les vallées et l'intensification agricole. En ce qui concerne le premier point, la production de soja en dehors des plateaux est progressivement annoncée à Paragominas. Une partie du soja est plantée en dehors du plateau afin de tirer le meilleur parti de l'espace disponible en machines et intrants, en étendant la plantation même dans les zones à faible potentiel agricole, tel que cité par 'Sergio', 'Maria' et 'Oziel'. Cela peut être

particulièrement le cas lorsqu'il s'agit de la location d'une ferme entière ou une partie d'une ferme avec différents secteurs pédomorphologiques.

D'autres cas, comme celui de la Fazenda São Lucas, les zones de vallée avec des surfaces topographiques mécanisables étendues ont favorisé le développement de la culture de grains avant même de commencer sur le plateau. D'éventuelles vallons ont même été enterrées pour créer des parcelles avec une plus grande continuité. 'Tiago', responsable d'une exploitation agricole, rapporte que la productivité dans les vallées sableuses est légèrement inférieure à celle du plateau. Selon lui, l'altitude du plateau est responsable des meilleurs résultats de productivité du soja. Mais il mentionne que dans les vallées le coût des engrais par unité de surface n'est pas forcément plus élevé, car en raison de la texture sableuse, la « boîte » du sol est plus petite⁵⁵ et, par conséquent, une plus petite quantité d'engrais est appliqué.

'Tiago' différencie également deux types de sols dans les vallées, l'un moins sableux (environ 30% d'argile), où l'on cultive des grains, et l'autre plus sableux, situé près des axes de drainage. De plus, il s'agit de l'une des seules fermes de la région à avoir exploité un système d'irrigation à pivot central, qui, selon la personne interrogée, a pour objectif de planter du soja hors de saison. Une autre ferme qui cultive du soja dans les vallées est la Fazenda Pagrisa. Propriété orientée sur la production à grande échelle de la canne à sucre, elle produit du soja en particulier pendant la période de vide sanitaire⁵⁶ (René Pocard-Chapuis, communication personnelle, 2019).



Figure 79. Fermes qui cultivent du soja dans les vallées. a) Fazenda São Lucas. b) Fazenda Pagrisa. Source : Google Earth (2019).

⁵⁵ En raison de sa texture plus grossière, le sable a une plus petite surface de contact et a donc moins de capacité à retenir les engrais.

⁵⁶ Période au cours de laquelle la plantation d'une certaine culture est interdite par les organismes gouvernementaux, dans le but de prévenir la prolifération des ravageurs et des maladies.

Dans la Fazenda Pagrisa, la question de la pauvreté des sols sableux du fond des vallées a été contournée par l'adoption de variétés de soja plus adaptées, telles que celles développées pour la région du MAPITO (Zone frontière entre Maranhão, Piauí et Tocantins), et une application accrue d'engrais (comme l'urée) par rapport aux cultures au plateau. En ce sens, il convient de noter que, compte tenu de certaines conditions, la culture du soja dans les vallées s'est avérée viable. Parmi ces conditions, la présence de parcelles suffisamment grandes, sans vallons ni zones saturées en eau, et la production concomitante avec une autre activité principale, comme la plantation de soja sur les plateaux, où l'essentiel de la production est garanti par la bonne productivité.

Poursuivant la question de la limitation de la disponibilité des terres « libres » sur le plateau, cette fermeture du front pionnier conduit également à l'idée que les agriculteurs sont conduits à produire davantage dans le même espace, c'est-à-dire de s'intensifier, tel que discuté au début de cette section. D'autres mécanismes permettant de tirer pleinement parti des espaces ouverts des plateaux ont également été utilisés par les producteurs, tels que la compensation de l'absence de Réserve Légale par l'acquisition par le même exploitant d'une autre propriété avec des réserves forestières plus importantes. Cette propriété peut être généralement moins chère, avec potentiel agricole inférieur et/ou plus éloignée des zones centrales. C'est le cas de la propriété de 'Zé Maria', producteur de soja sur le plateau près de la route asphaltée. L'exploitation disposait d'une Réserve Légale dont la superficie était inférieure à la limite légale, et pour ne pas perdre des parcelles productives dans le plateau argileux, il a fait l'achat d'une autre ferme avec couverture forestière proche de l'*assentamento* Camapuã, c'est-à-dire, plus loin des routes asphaltées et sur des terres bon marché.

3.4. Agriculture familiale

Pour la présente analyse, l'agriculture familiale est le terme utilisé pour désigner les exploitations regroupées selon le critère de la présence de la culture du manioc. Ce critère a été choisi parce que le manioc est la production fondamentale de l'agriculture familiale en Amazonie, en raison de ses caractéristiques polyvalentes qui répondent à la consommation interne de l'unité familiale, à la vente des surplus de farine sur le marché local, et les sous-produits ont une bonne liquidité au marché avec l'avantage de pouvoir être stockés pendant de longues périodes. Toutefois, comme l'ont déjà fait remarquer d'autres auteurs (e.g. Angelsen et Kaimowitz (2001), l'agriculture familiale a tendance à diversifier ses activités. Dans cette catégorie, 53 propriétés ont été analysées. Les propriétés interrogées s'élevaient en moyenne à 29,1 ha, la plupart ayant moins de 50 ha (Figure 80). Plus de la moitié d'entre elles (54%) sont des parcelles de projets de colonisation INCRA ou Terra Legal, environ un tiers sont des occupations (invasions) et le reste sont d'autres situations comme les occupations anciennes de *ribeirinhos* (Table 22).

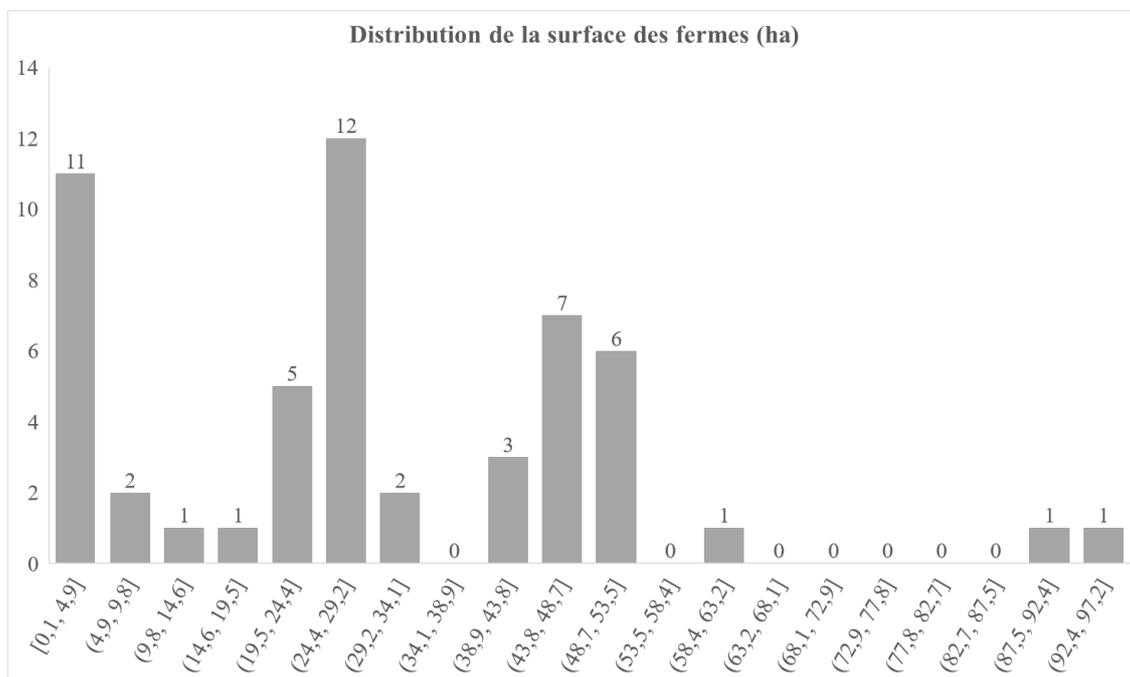


Figure 80. Distribution de taille des exploitations d'agriculture familiale (n=53).

A l'exception de quelques noyaux de petits producteurs proches de la zone urbaine de Paragominas (par exemple, la colonie d'Uraim) et les *ribeirinhos*, les principaux projets de colonisation sont très récents dans la municipalité, la plupart ayant débuté à la fin des années 90. Selon un fonctionnaire de l'INCRA de Paragominas, l'établissement

d'un lot de colonisation est lié à deux processus possibles : a) soit la population a accepté la délimitation proposée de l'INCRA aux agriculteurs venant d'un autre endroit ; b) soit la population était déjà établie dans la zone (invasion). Actuellement (2015), ces propriétés ont de fortes proportions de pâturages et de forêts secondaires, comme on peut l'observer dans la Figure 81.

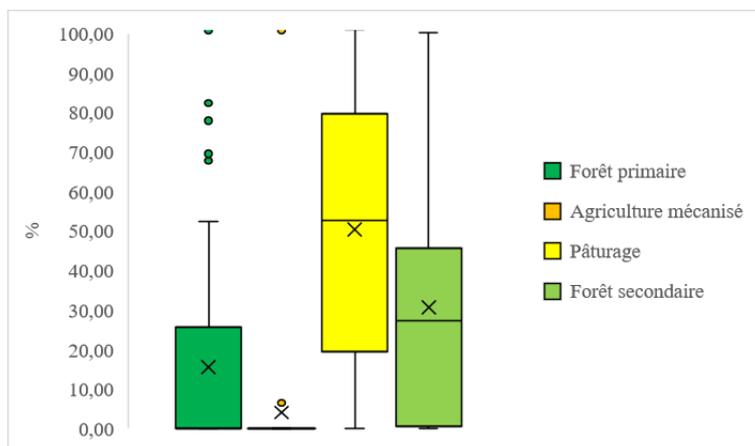


Figure 81. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations d'agriculture familiale en 2015 (n=53).

Cette forte présence de forêt secondaire (la plus importante parmi les groupes analysés) est le résultat d'une combinaison de facteurs. D'une part, la limitation de capital, puisque 66% des personnes interrogées ont déclaré que la plupart de l'exploitation n'as pas de production (pâturage ou cultures) en raison de ressources limitées ; d'autre part, le système d'agriculture sur brûlis qui est basé sur la jachère forestière. De ce point de vue, la forêt secondaire n'est pas nécessairement une zone sous-exploitée, mais une « réserve de fertilité », comme déjà souligné par (Ballon et al. 2016) (Figure 82).

Compte tenu de la plus petite superficie des exploitations par rapport aux autres propriétés de Paragominas et de la faible mécanisation, il est évident que le rapport main-d'œuvre/surface est le plus important, ayant dans sa majorité plus d'une personne active par module rural de 55 ha (Table 22). Cependant, aucune donnée n'a été collectée sur la mobilité de la main-d'œuvre, qui peut être importante, comme dans le cas de l'agriculteur 'Lucilane', qui est engagé par des spéculateurs pour réaliser des améliorations sur une propriété en vue d'une vente ultérieure, alors que sur sa propre exploitation il ne réalise aucune culture agricole, couverte de forêt secondaire.



Figure 82. a) Succession forestière initiale au premier plan et forêt primaire dégradée à l'arrière-plan, dans l'assentamento Camapuã. b) Suppression de la forêt dégradée avec un bulldozer sur chenilles, près de l'invasion Oriente. Photos : R. Osis (2017).

La dépendance à l'égard de la main-d'œuvre familiale est évidente dans ces systèmes, la période de production la plus élevée étant celle où il y a le plus de membres de la famille. Si les enfants quittent la propriété, comme dans le cas rapporté par 'Adilson' (assentamento Paragonorte) et 'Cipriano' (village de Nazaré), ou si le chef de famille est décédé, comme dans le cas de 'Raimundo' (village de Nazaré), la production agricole est réduite ou même interrompue, comme déjà indiqué dans les théories du « cycle de vie » du front pionnier. Les deux tiers de ces exploitations ont deux activités principales ou plus, et en plus du manioc, les plus fréquentes sont l'élevage bovin (33%), le poivre noir (31%) et la fruiticulture (24%). En plus faible proportion, l'horticulture et la cueillette de l'açaí dans les ripisylves ont également été observées (Table 23).



Figure 83. a) Plantation de manioc dans le village de Nazaré. b) Plantation de poivre noir dans l'assentamento Mandacaru. Photos : R. Osis (2017).

A l'exception de l'élevage, il s'agit d'activités à forte intensité de main-d'œuvre, ce qui signifie que ces surfaces cultivées occupent une faible proportion de la superficie totale de la propriété, car en général elles ne disposent pas de capitaux suffisants pour la mécanisation (79% ne possèdent pas de tracteur et 19% l'utilisent éventuellement, soit

en location, soit par le biais des associations de producteurs). Bien que cet aspect n'ait pas été pris en compte dans les questionnaires, le rôle de l'aide publique aux familles à faible revenu, comme la « *Bolsa Família* », ne devrait pas être négligeable dans les choix d'activité de l'agriculture familiale. Elle peut, soit avoir un effet incitatif avec la gestion d'une parcelle plus vaste grâce au revenu externe obtenu, soit, au contraire, réduire la parcelle gérée en raison de la couverture des besoins vitaux des familles par l'aide reçue.



Figure 84. Plantation de bananiers près de Colônia Uraim. b) Palmiers d'Açaí se développant le long d'un cours d'eau. Photos : R. Osis (2017).

Table 22. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de la location dans les propriétés avec élevage d'agriculture familiale (n=53), et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Elevage grande échelle</i>	<i>Elevage petite échelle</i>	<i>Culture de grains</i>	Agriculture familiale
Type foncier (%)	Privé	75,0	16,7	82,8	1,9
	Projet INCRA	2,8	62,5	13,8	53,8
	Invasion	2,8	8,3	0,0	23,1
	Ancienne	0,0	4,2	0,0	13,5
	Fusion	19,4	4,2	3,4	1,9
	Parcelles petites	0,0	4,2	0,0	5,8
Main d'œuvre per area (%)	Faible	35,1	4,0	41,4	3,8
	Moyenne	48,6	0,0	34,5	0,0
	Haute	16,2	96,0	24,1	96,2
Location (%)		28,6	8,0	67,9	7,5

L'intensification, telle que considérée dans cette étude (intégrations, irrigation et fertilisation), est peu fréquente (seulement 4% des exploitations), et inclut à titre d'exemple l'irrigation du poivre noir, comme l'indique une entreprise de matériel agricole à Paragominas et comme nous l'avons aussi observé sur le terrain (Table 24).

L'éloignement de l'exploitation des marchés est un facteur important qui définit les productions à réaliser. Dans celles qui sont plus éloignées, il y a une prédominance du manioc, de l'élevage et du poivre noir, tandis que les productions de produits périssables sont viables seulement dans les propriétés proches des zones urbaines, comme c'est le cas pour l'horticulture et l'élevage laitier.

Table 23. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'agriculture familiale (n=53) et en comparaison avec les autres groupes.

		<i>Élevage grande échelle</i>	<i>Élevage petite échelle</i>	<i>Culture de grains</i>	Agriculture familiale
Nombre de cultures (%)	1	43,2	32,0	24,1	34,0
	2	51,4	24,0	65,5	39,6
	>3	5,4	44,0	10,3	26,4
Cultures dans la ferme (%)	Grains	45,9	8,0	100,0	1,9
	Maraîchage	0,0	4,0	3,4	5,7
	Elevage	100,0	100,0	65,5	34,0
	Poivre noir	8,1	24,0	0,0	32,1
	Fruiticulture	2,7	32,0	10,3	24,5
	Manioc	5,4	56,0	3,4	100,0
	Plant. Arbres	2,7	0,0	3,4	0,0
	Açaí	0,0	0,0	0,0	3,8

Table 24. Proportions de fermes qui sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'agriculture familiale (n=53) et en comparaison avec les autres groupes

		<i>Élevage grande échelle</i>	<i>Élevage petite échelle</i>	<i>Culture de grains</i>	Agriculture familiale
Mécanisation (%)		87	28	100	2
L'accès est important (%)		59	67	100	68
Intensification (%)		38	20	48	4
Types d'intensification (%)	Rotation des pâturages	21	0	14	0
	Irrigation des pâturages	0	60	7	0
	Irrigation de cultures annuelles	7	0	7	0
	Irrigation de cultures pérennes	0	40	21	100
	Intégration agriculture élevage	50	0	50	0
	Fertilisation des pâturages	21	0	0	0

L'horticulture est une activité à forte intensité de capital et de main-d'œuvre, qui se déroule dans des petites exploitations à quelques kilomètres du centre-ville de Paragominas, comme le cas du « *Condomínio Rural* », un ensemble de parcelles d'un hectare chacune, où sont réalisées diverses productions pour le marché local.

Si l'on considère les principaux moteurs de changement pour l'agriculture familiale, la réponse la plus fréquente est la politique publique (74% des réponses) et, lié à cela, la légalisation des terres (12%) (Table 25). En d'autres termes, la plupart des agriculteurs familiaux considèrent le gouvernement comme un acteur clé dans le changement de la production rurale. Si, d'une part, elle a pour rôle de promouvoir l'expansion et l'intensification des activités, comme dans le cas de la fourniture de tracteurs pour le défrichement des forêts secondaires et l'établissement de cultures, d'autre part, elles subissent ses pressions pour changer leur gestion, notamment le respect des Aires de Préservation Permanente et la non-utilisation du feu.

En ce qui concerne le feu, peu d'agriculteurs affirment l'utiliser dans sa gestion de parcelles, et s'ils le font, ils précisent qu'ils font des *aceiros*⁵⁷ pour éviter la propagation. Cependant, dans une communication personnelle avec Thomas Abrell (2017), le feu est encore largement utilisé, ce qui est compréhensible, puisqu'il n'existe aucune alternative économique viable pour le système de culture sur brûlis. En ce qui concerne les tracteurs fournis par la municipalité⁵⁸ par le biais des associations de agriculteurs, il est possible de faire une gestion sans feu. Mais plusieurs agriculteurs affirment que ce n'est pas suffisant pour satisfaire tous les demandeurs dans les délais requis.

Table 25. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'agriculture familiale (n=53) et comparaison avec les autres groupes.

		<i>Elevage grande échelle</i>	<i>Elevage petite échelle</i>	<i>Culture de grains</i>	Agriculture familiale
Facteurs de changement (%)	Inspection environnementale	10	0	20	4
	Politiques Publiques	31	83	25	74
	Marché	34	17	35	8
	Sécheresses	14	0	20	0
	Main d'œuvre	0	0	0	2
	Légalisation foncière	10	0	0	12
Projets futurs (%)	Diversification	13	19	7	32
	Expansion	32	44	32	33
	Intensification	18	0	18	0
	Changer/louer	18	7	18	10
	<i>Status quo</i>	16	26	25	20
	Mécaniser	3	4	0	5

⁵⁷ Type de coupe-feu, réalisé en nettoyant toute la matière végétale sèche dans une bande autour de la parcelle à brûler.

⁵⁸ Où l'agriculteur ne paie que le carburant.

Un autre facteur important est la légalisation des terres occupées, une situation rencontrée par plusieurs colons qui a un impact direct sur les stratégies d'occupation du sol. S'il est reconnu que les grands propriétaires fonciers dans le contexte du front pionnier peuvent déboiser une zone dans l'attente d'une légalisation future de cette exploitation, dans le cas de 'Jonas', petit agriculteur de l'invasion Oriente, le fait d'avoir des difficultés à légaliser la terre qu'il occupe décourage la réalisation des cultures ou l'entretien des pâturages, sa superficie étant reprise par la forêt secondaire. En ce qui concerne les projets futurs, les objectifs d'expansion (33% des réponses) et de diversification (32 %) de la production peuvent être soulignés (Table 25).

Rapport avec le support biophysique : en ce qui concerne la relation entre l'agriculture familiale et les ressources biophysiques, on peut souligner qu'il s'agit en général d'exploitations situées au fond des vallées avec des sols sableux (Figure 85), et à proximité des ressources en eau nécessaires à l'habitation, à l'élevage et à l'éventuelle irrigation (73% de ces propriétés ont un cours d'eau). Lorsqu'on leur demande pourquoi ils cultivent au fond de la vallée, la réponse est souvent simplement parce qu'ils n'ont pas le choix, la petite surface de ces exploitations ne couvre qu'une unité pédomorphologique en plusieurs cas (Table 26). C'est le cas de la plupart des exploitations situées dans le plus grand *assentamento* de la municipalité : Paragonorte, établie sur une large surface de sols sableux et de relief de collines, sans la présence des plateaux argileux.

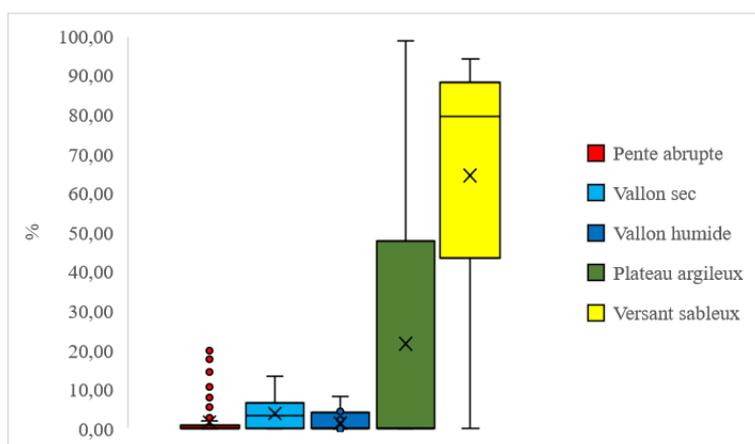


Figure 85. Répartition des proportions d'unités pédomorphologiques dans les exploitations (n=53) du groupe agriculture familiale.

Cependant, les autres zones de colonisation sont souvent situées dans des zones de transition entre les vallées et les plateaux, comme c'est le cas des *assentamentos* Camapuã, Luiz Inácio, Mandacaru, Águia et la « région du Capim » et invasion Oriente. Dans ces cas, une grande partie des propriétés ont une configuration allongée

qui s'étend du fond de la vallée au sommet du plateau. Cette configuration est le fruit d'une définition de lots à partir d'une route ou d'un cours d'eau qui passe au fond de la vallée, tel que discuté au chapitre 3. En moyenne, 21% de la surface de ces propriétés sont situées sur le plateau.

Table 26. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'agriculture familiale. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.

Unités pédomorphologiques	Occupation du sol	Raisons évoquées
Plateau argileux	Cultures de grains	Topographie (1)
		Seule unité à la ferme (1)
	Forêt primaire	Code Forestier (2)
		Limite d'investissement (4)
	Forêt secondaire	Limite d'investissement (5)
		Accès distant (1)
	Pâturage	Proximité d'accès (1)
		Topographie (1)
	Agriculture familiale	Seule unité à la ferme (3)
		Topographie (1)
Proximité d'accès (1)		
Maraichage	Seule unité à la ferme (3)	
Pentes abruptes	Forêt secondaire	Pente forte (2)
		Code Forestier (2)
		Limite d'investissement (1)
		Accès distant (1)
	Pâturage	Pente forte (1)
		Proche des ressources en eau ()
Agriculture familiale	Proximité d'accès (1)	
Vallons	Forêt secondaire	Pente forte (6)
		Code Forestier (3)
		Limite d'investissement (3)
Versants sableux	Pâturage	Topographie (1)
		Proche des ressources en eau (1)
		Seule unité à la ferme (4)
	Agriculture familiale	Seule unité à la ferme (19)
		Topographie (6)
		Proximité d'accès (11)
		Limite d'investissement (1)
		Proche des ressources en eau (1)
	Forêt Secondaire	Limite d'investissement (46)
Code Forestier (1)		
Zone inondable	Forêt Secondaire	Code Forestier (2)

Alors que la plupart des activités les plus intensives se déroulent au fond de la vallée, comme le manioc, ainsi que les résidences, les corrals et autres infrastructures, les activités plus extensives prédominent sur les plateaux et les pentes, un aspect déjà observé par Plassin et al. (2015).

La question de l'emplacement des parcelles agricoles est un processus de prise de décision complexe. La proximité de la résidence est un avantage en termes d'énergie et de temps pour l'agriculteur. En ce sens, il n'est pas rare d'observer les parcelles de manioc, des pâturages, des jardins, des vergers, des systèmes agroforestiers (SAF) gravitant autour de la résidence de l'agriculteur (comme dans les propriétés de 'Chiquinho' à l'*assentamento* Mandacaru et 'Isaias' au village de Nazaré), composant une variété de produits pour l'alimentation de la famille ou éventuellement la commercialisation (Figure 86). L'emplacement de la résidence, cependant, est aussi une décision qui tient compte de multiples facteurs, comme la présence d'un cours d'eau. La ressource en eau, bien sûr, est essentielle dans la plupart des activités rurales et familiales et, par conséquent, fondamentale dans la définition « spontanée » des lots et des résidences dans les invasions, comme le souligne le fonctionnaire de l'INCRA de Paragominas.



Figure 86. a) Vue d'ensemble d'une exploitation familiale dans l'*assentamento* Luiz Inácio : vergers, plantation de poivre noir et un réservoir d'eau sur la gauche de l'habitation. b) Verger à proximité d'une résidence, dans l'invasion Oriente. Photos : R. Osis (2017).

A Paragominas, le contraste entre le plateau argileux dépourvu d'eau superficielle en saison sèche et les vallées à forte densité de cours d'eau, a conduit à la colonisation des vallées par les agriculteurs familiaux. Cependant, les zones inondées ou excessivement saturées en eau ont également été évitées en raison des difficultés à cultiver et à habiter dans ces conditions. En ce sens, du point de vue topographique, l'emplacement des résidences peut être en général intermédiaire entre les fonds de vallées saturées d'eau et les escarpements des plateaux. Dans ce cas, les

exploitations sans accès direct à un cours d'eau utilisent des puits creusés à la main pour la consommation de l'habitation, puisqu'elle est située souvent légèrement un peu en amont par rapport au niveau le plus bas des plaines. Lorsque le lot est situé sur le plateau, les activités ne sont possibles que s'il y a accès à une technologie permettant de pomper l'eau en profondeur. Dans le cas de la localité de Perac (*assentamento Camapuã*), l'INCRA a fait un forage d'eau pour résoudre cette situation paradoxale en Amazonie (Figure 87).



Figure 87. a) Puits creusé à la main dans une exploitation dans l'invasion Oriente. b) Forage d'eau et réservoir réalisé par l'INCRA, dans la localité de Perac, *assentamento Camapuã*. Photos : Osis, R. (2016).

La répartition des lots par rapport aux ressources en eau est l'un des problèmes identifiés dans la mise en œuvre des projets de colonisation en Amazonie (Ferreira 2015; Wolstein et al. 1998) car ceux-ci sont souvent définis sous forme de polygones réguliers. Un autre facteur pris en considération pour l'emplacement de la résidence est la relation avec les voies d'accès. Cela peut être dû à un besoin de « socialisation⁵⁹ », d'accès à l'infrastructure et de réduction des coûts de transport.

Apparemment, tant que l'approvisionnement en eau n'a pas un coût très élevé, l'agriculteur peut choisir d'installer sa résidence à proximité de la route. Selon 'Jonas' de l'invasion Oriente, il a d'abord installé sa résidence près du cours d'eau, ce qui a facilité l'accès à cette ressource. Toutefois, après un certain temps, il a déplacé la résidence au bord de la route, qui monte le flanc de la colline sur son exploitation. Selon lui, la route en bon état d'entretien et l'arrivée du réseau électrique ont été les déclencheurs de ce changement, et il a réussi à se déconnecter du fond de la vallée grâce à la possibilité d'utiliser l'eau du puits d'un voisin. Après la résidence, l'eau et l'accès, d'autres facteurs peuvent entrer en jeu selon le type de production agricole.

⁵⁹ Besoin d'être plus proche ou en contact avec d'autres, comme l'ont mentionné certains enquêtés.

Compte tenu des productions annuelles les plus fréquentes, à savoir le consortium manioc, maïs et haricots, sa localisation peut tenir compte du niveau de développement de la forêt secondaire, voire de la présence de forêt primaire.

Les caractéristiques de la forêt secondaire sont fondamentales dans le système d'agriculture sur le brûlis, parce qu'elles définissent la quantité de matière organique qui s'est accumulée dans le sol pendant le développement de la végétation et la quantité de matière qui sera brûlée et incorporée comme nutriments dans le sol. Mais c'est aussi fondamentalement dû à la facilité de gestion, car les très jeunes forêts secondaires (« *juquirinhas* ») nécessitent plus de travail pour la coupe. Selon 'Maria', une végétation de moins de trois ans de développement n'est pas adéquate au système d'agriculture sur le brûlis.



Figure 88. a) Culture du riz dans le système d'agriculture sur le brûlis, dans l'invasion Orientale. b) Détail de la même plantation, également appelée « *plantio no toco* », du fait qu'elle se fait au milieu des troncs résiduels. Photos : Osis, R. (2016).

Ce sont là quelques-uns des aspects qui entrent en jeu dans la stratégie de production de l'agriculteur familial. Cependant, compte tenu de la spécificité du manioc, une production extrêmement polyvalente qui, en général, n'est pas soumise à de sérieuses restrictions en ce qui concerne les conditions du sol, l'emplacement de sa plantation peut être conditionné par le contexte biophysique dans plusieurs cas. D'abord, de nombreux agriculteurs disent que le manioc est mieux adapté aux sols sableux, ce qui est reconnu non seulement en Amazonie mais dans d'autres contextes.

Mais les situations ne sont pas si simples. Selon 'Jose', de l'*assentamento* Luiz Inácio, il affirme aussi que le manioc peut avoir une productivité différente selon les conditions du sol. Détenteur de deux lots, l'un plus en amont dans le relief local et l'autre au fond de la vallée, il dit que dans le lot le plus en amont, où se trouve le sol « *piçarra* » (sol avec une grande quantité de fragments de croûte de latérite), le manioc a une productivité supérieure. En revanche, dans le lot au fond de la vallée, plus sableux,

l'excès d'humidité nuit la production (pourrit les racines). Mais cela ne l'empêche pas de planter dans la vallée, et il choisit une alternative « technologique », en choisissant une variété qu'il dit mieux adaptée aux sols plus humides, le manioc type « *cearense* ».

L'agriculteur 'Chiquinho' identifie trois qualités de sol dans sa propriété située en fond de vallée : « argile blanche », « argile jaune » et « argile dure » (la dernière correspondant à l'argile tachetée dans les pentes fortes). Il affirme qu'il n'y a pas de différence dans la production de manioc entre l'argile jaune et l'argile blanche, mais le poivre noir a une meilleure productivité dans l'argile jaune. Toutefois, il s'agit de variations subtiles dans la texture du sol provenant probablement de couches la formation d'Ipixuna, et en général beaucoup moins évidentes comme la différence entre les sols plus sableux du fond de la vallée et le plateau argileux de Belterra. Aucun autre agriculteur n'a fait ce genre de différenciation des sols.

Lorsque la production est pluriannuelle, le système d'agriculture sur brûlis ne s'applique pas pleinement, car la fertilité provenant de la combustion de la matière végétale est rapidement perdue, et le rôle de la fertilité et des caractéristiques physiques naturelles du sol, plus stables, peut gagner en importance. Cela s'est apparemment produit dans le cas du poivre noir, qui a été cultivé dans divers contextes, mais surtout sur le plateau argileux, car les agriculteurs considèrent que cette culture est plus productive dans les sols argileux des plateaux (sol type « *barro* »).

Les recommandations de l'EMBRAPA pour cette culture consistent notamment à éviter les zones excessivement humides, tout en privilégiant davantage de sols argileux pouvant retenir l'humidité pendant les périodes sèches (Kellner, 2001). Pendant la saison sèche, un producteur du *assentamento* Luiz Inácio irrigue sa plantation de poivre noir en transportant l'eau avec un tracteur à partir de la vallée⁶⁰, et cite aussi des plans futurs d'une forage d'eau. Ceci illustre l'importance du potentiel agricole de ce sol pour cet agriculteur dans cette production. Mais cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de production de poivre noir au fond des vallées (Figure 89).

⁶⁰ Il est important de souligner un dénivelé d'environ 100 m entre le fond de la vallée et le plateau dans cette partie de Paragominas.



Figure 89. a) Culture de poivre noir sur un sol sableux au fond de la vallée, *assentamento* Mandacarú. b) Culture de poivre noir sur un sol argileux sur le plateau, dans l'*assentamento* Camapuã, localité de Perac. Il convient de noter le système d'irrigation, ce qui est alimenté par un forage d'eau. Photos : Osis, R. (2016).

Une autre production liée à un secteur pédomorphologique spécifique est l'açaí, qui pousse naturellement dans des sols saturés en eau la majeure partie de l'année. Cela concentre cette production aux fonds des vallons humides et aux plaines inondables, sauf lorsque le producteur investit dans un système d'irrigation. Il convient de mentionner qu'il s'agit d'une production susceptible de valoriser les APP, car il s'agit d'une activité extractiviste.

Mais revenons à la situation où la propriété présente peu de diversité en matière de secteurs biophysiques : les agriculteurs peuvent donc faire des choix productifs qui correspondent mieux aux conditions existantes. Dans l'*assentamento* Paragonorte, où prédominent les sols sableux et pauvres, cela pourrait être l'une des raisons de programmes tels que l'encouragement du consortium d'ananas et de noix de cajou, des plantes qui tolèrent ces conditions pédologiques restrictives. D'autre part, les propriétés situées complètement sur le plateau argileux, telles que les lots de la localité de Perac dans l'*assentamento* Camapuã, bénéficient de la présence d'un sol de meilleure qualité. Cependant, ces occupations ne sont possibles qu'en raison de l'existence de forage d'eau. Sinon, l'occupation est fortement limitée.

Dans ce sens, on peut souligner que les stratégies d'occupation du sol dans le contexte de l'agriculture familiale sont diverses et résultent d'une décision prise en fonction de multiples facteurs, et les ressources biophysiques comptent parmi celles qui ont un poids significatif dans Paragominas. Selon Arnauld de Sartre et al. (2005), la logique de choix des populations d'agriculteurs peut potentiellement tirer parti de la diversité des contextes biophysiques. Cette situation de décision multifactorielle est bien illustrée dans la déclaration de l'interviewé 'Raimundo', pour qui « les nouvelles zones de terre sont définies en fonction de l'âge de la forêt secondaire et de la

proximité de la maison, mais pas très près de celle-ci, car le sol est très sec ». Dans une formule simple, l'agriculteur a résumé un système complexe de prise de décision qui tient compte de la distance, des trajectoires d'occupation du sol et du potentiel biophysique.

3.5. *Plantation d'arbres à bois*

Bien qu'il s'agisse d'une activité importante à Paragominas, peu d'acteurs directement liés aux plantations d'arbres ont été interviewés, en raison de la difficulté de trouver un acteur responsable de la production sur le terrain. En ce sens, aucune statistique n'a été faite sur cette activité, mais les aspects soulevés dans les entretiens et dans les observations de terrain ont été discutés.

D'abord, il y a plusieurs échelles de plantations d'arbres dans Paragominas, mais les grandes propriétés occupent un espace important (voir Partie III). Si l'on considère les trois propriétés interrogées, avec 24 ha, 4.501 ha et 16.344 ha, l'écart entre les superficies est évident et, par conséquent, des logiques distinctes peuvent être supposées.

La plus grande propriété est liée au *boom* initial avec la demande de charbon de bois de la sidérurgie liée au complexe de Carajás, la propriété répond à présent à la demande de l'industrie de papier d'Imperatriz (Maranhão). Il s'agit d'une grande propriété d'élevage extensif avec environ 4.000 têtes de bétail qui, selon la personne interrogée, ont été progressivement réduites parce que les pâturages laissent place à la plantation d'eucalyptus. Il s'agit d'une propriété qui illustre un processus accéléré de changement d'occupation du sol, et le projet est d'étendre les plantations jusqu'à 3.000 ha d'eucalyptus par an, ce qui est rendu possible par la plantation même en période sèche, quand l'irrigation est utilisée pour les phases initiales de la croissance. Selon la personne interrogée, 'Grande', la raison pour laquelle la propriété est en train de changer radicalement d'activité productive est la plus grande rentabilité de la plantation d'arbres par rapport à l'élevage.

La propriété possède également d'importantes zones forestières, tant primaires que secondaires, qui constituent les zones de réserve exigées par la loi. L'expansion de l'eucalyptus se fait principalement sur les pâturages qui dominent les versants sableux des larges vallées, et les critères spatiaux sont, dans un premier temps, les Aires de Préservation Permanente de cours et sources d'eau.

Dans un deuxième temps, le relief est considéré en évitant les zones de forte pente, telles que les vallons, les bords des plateaux et les zones inondables. Les zones non mécanisables de pâturages dégradés et de pâturages sont donc laissées à la régénération forestière. La personne interrogée rapporte qu'il n'y a pas de différence de gestion due aux variations du sol, ce qui suggère une relative adaptabilité de cette culture aux différents potentiels de fertilité de Paragominas. Les plateaux argileux ne sont pas cultivés parce que les forêts primaires y sont concentrées. Selon l'interviewé, 'Vander', responsable d'une importante pépinière d'eucalyptus à Paragominas, la plantation d'arbres est favorisée par une topographie en pente douce, ce qui favorise la mécanisation.

Comme le soja, la mécanisation est très importante dans cette production et comprend le travail initial du sol, la plantation (avec parfois l'irrigation les premiers mois) et le passage des herbicides une ou deux fois par an, et enfin, la coupe et le transport des grumes. Il indique également que la plantation est préférable pendant la saison sèche, car l'excès de boue nuit considérablement au passage des tracteurs.



Figure 90. a) Aspect d'une plantation d'eucalyptus à grande échelle. b) Identification de la parcelle. Photos : Osis, R. (2016).

La deuxième exploitation (4.501 ha) est liée à l'industrie du bois à Paragominas (pour la fabrication de MDF⁶¹). Sa surface de production est composée exclusivement de plantations d'eucalyptus, et les autres parties sont destinées à la réserve forestière obligatoire (Aires de Préservation Permanente et Réserve Légale). Etabli dans une ancienne ferme d'élevage, les pâturages étaient situés principalement dans les secteurs des versants sableux et pentes abruptes, et le plateau argileux était couvert de forêts. La ferme est passée par une phase d'intense d'exploitation de bois sur le plateau argileux (entre 1995 et 2000), puis de grandes parcelles ont été déboisées et

⁶¹ *Medium Density Fiberboard*.

la culture de l'eucalyptus s'est implantée en parallèle à la dégradation des anciens pâturages. Selon l'interviewé 'Ailton', le plateau offre de grands avantages pour planter des eucalyptus en raison de la facilité de mécanisation. La troisième et plus petite propriété est située près de la zone urbaine de Paragominas et couvre principalement le plateau argileux.

Cette propriété se caractérise par une plus grande diversification des activités. Une partie est louée pour la plantation de soja, sur environ 9 ha elle est plantée d'eucalyptus et d'acajous d'Afrique (*Khaya spp.*) et, à une plus petite échelle, l'horticulture y est pratiquée. Dans ce contexte, la plantation d'arbres est une forme d'investissement futur à long terme fait par le propriétaire. En même temps, il obtient un revenu à court terme avec la location pour le soja, et profite de l'entretien et de la surveillance assurés par les résidents. Le bois produit sera destiné à une société de fabrication de palettes, c'est-à-dire qu'il quitte le circuit du bois de grande échelle.



Figure 91. a) Aspect de la plantation de *paricá* dans le plateau argileux. En premier plan, parcelle préparée pour la plantation de grains. b) Plantation d'acajou d'Afrique (*Khaya Ivorensis*). Photos : Osis, R. (2016).

La famille résidente, qui n'est pas propriétaire du terrain, pratique l'horticulture, qui occupe une superficie minimale et peut générer des revenus grâce à sa proximité du centre urbain de Paragominas. Selon 'Vander', il existe une demande à Paragominas non seulement pour les espèces exotiques à haute productivité comme l'eucalyptus et l'acajou d'Afrique, mais aussi pour les espèces indigènes comme le *paricá* (*Schizolobium amazonicum*), qui s'est révélé être une option viable en raison de sa croissance rapide par rapport aux autres espèces d'Amazonie et de la bonne qualité du bois. La personne interrogée confirme également qu'il n'y a pas trop d'exigences pour la plantation d'eucalyptus en relation avec la qualité du sol à Paragominas, mais souligne deux autres facteurs que divers acteurs qui investissent dans la pratique considèrent importants : l'accès et la proximité avec des propriétés rurales qui utilisent

le feu (agriculture sur brûlis). L'accès est un facteur important, surtout en ce qui concerne le temps passé à se rendre à la plantation pour y effectuer des travaux d'entretien fréquents, étant donné qu'ils doivent durer des années. Pour l'établissement d'une nouvelle parcelle, parmi les facteurs pris en compte figurent ceux liés aux risques que la plantation peut subir, puisqu'il s'agit d'un investissement à long terme. Le feu est l'un des principaux, et c'est en ce sens que certaines zones peuvent être évitées, comme les endroits proches des propriétés qui pratiquent l'agriculture sur brûlis.

Synthèse de la partie II

Dans cette partie, nous avons analysé les relations entre certaines dynamiques agricoles et les ressources et contraintes biophysiques du territoire. Ces éléments peuvent être pris en compte de diverses manières par les acteurs, parfois de manière décisive, parfois de manière secondaire. Dans l'environnement biophysique hétérogène de Paragominas, l'évolution du paysage montre des signes évidents de contrôle spatial par les conditions liées aux ressources en eau, à la topographie et à la qualité du sol.

Les vallées, qui comprennent une série de secteurs géomorphologiques : zones inondables, versants sableux, vallons humides, vallons secs et pente abruptes. Ces secteurs ont été le contexte principal du début de l'occupation par le front pionnier avec l'élevage à grande échelle, matrice de la plupart des transformations qui ont eu lieu à Paragominas depuis le début de sa colonisation. Son expansion à travers le territoire s'est produite principalement suivant les axes des vallées principales, dans les versants sableux, les vallons humides et secs. Ceci était principalement dû à la forte dépendance de l'élevage extensif vis-à-vis des ressources en eau pour l'abreuvement du bétail, ainsi que pour la résidence des propriétaires et employés. Les parcelles de pâturages étaient établies après l'abattage de la forêt et l'entretien contre les plantes invasives par des brûlages périodiques. Cette expansion s'est étendue depuis le centre urbain de Paragominas et le long des principales voies accès de l'époque, comme la route BR-010. La déforestation de ces secteurs, si elle a été initialement encouragée principalement par le besoin de pâturages pour le bétail, a eu comme moteur pour un certain temps l'exploitation du bois.

La diminution des activités d'exploitation forestière et d'élevage dans les années 2000 ont donné lieu à plusieurs invasions de terres. Des colonisations par la réforme agraire se sont implantées dans la municipalité, sur ses marges de l'est, du nord-ouest et du sud. Ces colonisations suivaient la matrice des exploitations d'élevage, qui étaient centrés sur le fond des vallées.

Ces zones ont également une densité de drainage plus élevée, ce qui est fondamental pour l'installation de la résidence du colon. Ainsi, les activités agricoles les plus intensives (manioc, poivre noir, fruits et horticulture) sont réalisées surtout en tenant compte des ressources en eau, et aussi de la distance qui les sépare de la maison. Cependant, la proximité de l'eau implique la présence de sols saturés d'eau, ce qui est évité pour les cultures de manioc en particulier. Les plantations sont donc souvent

situées dans ce contexte intermédiaire entre des sols saturés et des zones éloignées des ressources en eau et/ou en forte pente. Certaines différenciations peuvent être faites en termes de qualité du sol (texture par exemple) au sein d'une exploitation familiale, ce qui peut entraîner de légers changements dans la gestion de la production. Mais la localisation d'une culture de manioc et des cultures associées est conditionnée surtout par la présence d'une forêt primaire ou secondaire suffisamment développée pour effectuer la coupe et le brûlage, c'est-à-dire une culture qui dépend de la fertilité contenue dans la forêt. Mais la forêt, d'autre part, est protégée par la législation environnementale. En ce sens, la logique de localisation d'une culture tient compte l'interdiction de déboisement des Aires de Préservation Permanente, ce qui limite une partie des activités productives.

L'élevage à petite échelle peut parfois représenter l'essor économique d'un agriculteur familial. Le capital plus important de ces producteurs permet dans certains cas d'exploiter deux ou plus lots de réforme agraire, et ces zones sont encore concentrées sur les versants sableux, les vallons et les pentes abruptes de bord de plateau, comme héritage de la colonisation initiale qui cherchait une proximité avec les cours d'eau.

Avec l'évolution du front pionnier et l'apparition de nouvelles cultures et pratiques (telles que l'élevage plus intensif, la culture de grains et la plantation d'arbres), les vallées ont été remodelées en fonction de ces nouvelles conditions. Le potentiel de mécanisation des parcelles est un facteur clé dans ce contexte. Les fortes pentes, les vallons et les sols saturés des zones inondables perdent de leur valeur et sont plus sujets à la régénération forestière, qui est également influencée par les obligations du Code Forestier. L'élevage à grande échelle, qui profitait autrefois dans les zones moins attractives telles que les pentes fortes et les zones inondables de la gestion manuelle et du feu, dépend aujourd'hui essentiellement de la mécanisation, ce qui conduit parfois à l'abandon de ces zones. Des vastes plantations d'eucalyptus ont été implantées sur des versants sableux dans les vallées, car les surfaces déboisées sont des héritages de la période d'expansion de l'élevage. La topographie favorable à la mécanisation et les sols bien drainés sont les facteurs biophysiques fondamentaux à cette production, qui ne présente pas de fortes contraintes en termes de fertilité des sols. Il n'en va pas de même pour le soja, qui est encore peu présent dans les fonds de vallée, même dans les zones à potentiel de mécanisation, car les avantages de la plantation sur le plateau sont encore plus grands.

Contrairement aux fonds de vallées, les plateaux représentent un contexte biophysique contraignant à l'élevage. Dans un premier temps, les pénuries d'eau sur de grandes

étendues ont fortement limité l'expansion de l'élevage dans ce contexte. Avec le *boom* de l'exploration du bois, le capital obtenu grâce à cette activité a été important pour financer l'expansion de l'élevage bovin, y compris l'expansion sur les plateaux argileux dans les zones les plus proches des routes asphaltées. Mais c'est seulement avec l'arrivée des grains que cette unité pédomorphologique a gagné en importance pour les producteurs de Paragominas. Le culture du soja implique une décision basée sur une série de facteurs, parmi eux le coût de mécanisation. Après l'accès aux routes asphaltées, déjà bien connu, la topographie joue un rôle fondamental. Le relief plat du plateau argileux est un facteur qui minimise le coût de mécanisation de la parcelle. En même temps, il réduit les problèmes de dégradation des sols. L'argile de Belterra, en plus d'une plus grande fertilité par rapport aux sols de la vallée, a une bonne structure physique, ce qui favorise le développement des cultures et contribue à la réduction des coûts des intrants. Il possède également un bon drainage naturel, ce qui réduit la saturation excessive du sol argileux en saison des pluies, ce qui élimine un coût possible de mécanisation visant à drainer le sol. Une autre caractéristique du plateau argileux est sa faible densité de drainage, qui contribue à réduire les coûts de mécanisation dus aux variations de relief qui peuvent provoquer des variations dans le développement des plantes. Par ailleurs, la topographie du plateau permet l'établissement de grandes parcelles sans interruption, optimisant ainsi le travail mécanisé. Ces avantages du plateau argileux ont fait en sorte que la plantation du soja a concurrencé les pâturages existants et a exercé une pression sur les forêts secondaires et primaires, ces dernières représentant une grande partie du plateau. Enfin, la rentabilité moindre de l'élevage a largement favorisé l'achat et la location de terres d'anciennes fermes d'élevage extensif.

Les activités agricoles familiales sont moins présentes sur le plateau argileux. Cependant, une grande partie des propriétés couvre l'ensemble de la séquence des secteurs pédomorphologiques. Ainsi, l'expansion de la déforestation se produit en général du fond de la vallée vers le plateau. Bien que la plupart des activités agricoles familiales les plus intensives se déroulent au fond des vallées, certaines cultures sont plus appréciées sur le plateau. Les cultures pluriannuelles, comme le poivre noir, bénéficient moins de la fertilité produite par le système d'agriculture sur brûlis, qui a une durée limitée. Par conséquent, la fertilité naturelle et les bonnes conditions physiques du sol du plateau argileux sont mieux valorisées pour le poivre noir.

La dépendance à l'égard des ressources en eau dans les premières phases du front pionnier est remarquable. Dans les régions où la densité de drainage est élevée et

plus ou moins homogène, ce facteur aura peu d'influence sur la configuration spatiale du front. Mais dans des contextes contrastés comme Paragominas, cette condition est déterminante pour l'évolution spatiale de la déforestation et de ses utilisations ultérieures. Puis, avec la consolidation du front et la mise en place de systèmes plus intensifs, la qualité des sols peut constituer un nouveau facteur biophysique déterminant l'évolution spatiale.

PARTIE III - Modélisation de la dynamique
d'occupation du sol à Paragominas : interactions
entre facteurs biophysiques et autres dans le temps
et dans l'espace

Introduction de la Partie III

L'objet de cette partie est de modéliser la dynamique de d'occupation du sol à Paragominas et développer des scénarios futurs du paysage, en prenant compte des facteurs biophysiques comme fil conducteur et leurs interactions avec d'autres facteurs spatiaux qui conditionnent la dynamique du paysage. Le Chapitre 5 analyse l'évolution du rôle des déterminants spatiaux dans les transitions d'occupation du sol. Le Chapitre 6 décrit les étapes de calibrage et de validation d'un modèle d'occupation du sol pour la municipalité, un modèle qui est utilisé ensuite pour explorer des scénarios futurs de distribution de l'occupation du sol. Le Chapitre 7 décrit une spatialisation des unités d'exploitations similaires en ce qui concerne la production agricole, l'occupation du sol et le potentiel biophysique, à l'aide de techniques de regroupement des données, et évalue les conséquences spatiales d'un scénario futur. Enfin, le chapitre 8 résume les principaux points abordés dans la thèse sur le rôle des facteurs biophysiques dans ce front pionnier.

Chapitre 5 - La dynamique temporelle des déterminants spatiaux d'occupation du sol à

Paragominas

Ce chapitre vise à vérifier la troisième hypothèse, selon laquelle l'importance des facteurs biophysiques varie dans le temps et selon les phases des systèmes de décision d'occupation du sol. Pour effectuer ce test, la méthode des Poids d'Évidence (*Weight of Evidence* - WoE) est utilisée pour évaluer l'évolution temporelle du poids de chaque variable pour les transitions d'occupation du sol.

1. La méthode des Poids d'Évidence

Il s'agit de caractériser la dynamique des principales occupations du sol et les variables spatiales auxquelles les changements sont liés, servant de base à la modélisation dynamique de l'occupation du sol. Pour ce faire, la méthode des Poids d'Évidence a été utilisée avec des données d'occupation du sol (classification MODIS entre 2004 et 2015, décrite dans la Partie II) et des données spatiales biophysiques, d'accessibilité ou de taille d'exploitation. Le Poids d'Évidence est une méthode bayésienne basée sur la probabilité d'occurrence d'un événement sur une carte binaire de présence ou d'absence d'un facteur donné. Les Poids d'Évidence permettent d'évaluer l'importance d'une variable spatiale donnée dans l'occurrence d'un événement donné.

Selon (Kemp, Bonham-Carter, et Raines 1999), une variable spatiale est définie avec deux classes 1 (absence) et 2 (présence) et un ensemble de points d'événements qui, dans le cas de la modélisation de la dynamique de l'occupation du sol, est la distribution d'une transition d'occupation du sol donnée. Considérant que l'unité des cellules de la carte est u en km^2 , la surface du fond de carte en unités de cellules est $A(T)/u=N(T)$, où T est la carte de base, $A()$ est la surface et $N()$ est le nombre d'unités de cellules. Ensuite, dans la carte de base, le nombre de points d'événements est indiqué par $N(D)$. En supposant que la variable spatiale est dénotée par B , $A(B)/u=N(B)$ est la superficie en unités cellulaires de la région où B est présent (e.g. présence de la classe argile). De manière similaire, $A(\bar{B})/u=N(\bar{B})$ est la superficie en unités cellulaires où B est manquant (e.g. absence de la classe argile). S'il n'y a pas de données manquantes, alors $N(B)+N(\bar{B})=N(T)$. Avec l'utilisation des SIG, il est possible de mesurer $N(T)$, $N(B)$ et $N(\bar{B})$. Il est également possible de compter le nombre de

points d'événement en B et \bar{B} , dénotés par $N(B \cap D)$ et $N(\bar{B} \cap D)$, respectivement. La définition des poids positifs et négatifs pour les thèmes binaires est donnée par la raison des probabilités conditionnelles suivantes :

$$W^+ = \ln \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (1)$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (2)$$

où $P()$ représente la probabilité et \ln représente les logarithmes naturels. On suppose que ces probabilités sont estimées comme étant des simples ratios de surface, comme suit :

$$P(B|D) = \frac{N(B \cap D)}{N(D)} \quad (3)$$

$$P(B|\bar{D}) = \frac{N(B \cap \bar{D})}{N(\bar{D})} \quad (4)$$

$$P(\bar{B}|D) = \frac{N(\bar{B} \cap D)}{N(D)} \quad (5)$$

$$P(\bar{B}|\bar{D}) = \frac{N(\bar{B} \cap \bar{D})}{N(\bar{D})} \quad (6)$$

où $N(B \cap D)$ est le nombre de points des événements sur la variable spatiale B, etc. Ainsi, l'expression finale peut être présentée comme suit :

$$W^+ = \ln \frac{N(B \cap D)/N(D)}{[N(B) - N(B \cap D)]/[N(T) - N(D)]} \quad (7)$$

En général, les valeurs absolues entre 0 et 0,5 de W^+ sont considérées faiblement prédictives, entre 0,5 et 1 elles sont modérément prédictives, entre 1 et 2 elles sont fortement prédictives et plus que 2 elles sont extrêmement prédictives (Kemp, Bonham-Carter, et Raines 1999). Les valeurs positives de W^+ indiquent qu'il y a plus d'occurrences d'un événement donné qu'il n'y en aurait par hasard. Un poids égal ou proche de zéro indique que les événements sont assignés de façon aléatoire par rapport à la classe, tandis que les valeurs négatives indiquent qu'il y a moins d'occurrences de l'événement qu'on peut s'y attendre par hasard (Raines, Carter, et Kemp 2000). En ce sens, des valeurs extrêmement positives indiquent qu'en présence de la variable, la probabilité d'occurrence de l'événement est élevée. Valeurs proches de zéro la variable a peu d'influence sur l'occurrence d'un événement, et des valeurs

extrêmement négatives indiquent que c'est très peu probable que l'événement se produise.

2. La dynamique temporelle des règles spatiales

Grâce à la méthode des Poids d'Évidence, il a été possible de vérifier l'évolution dans le temps de l'importance des règles d'occupation du sol à Paragominas. Pour ce faire, nous avons sélectionné les principales transitions qui se sont produites en termes de superficie dans la municipalité entre 2004 et 2015 : i) forêt primaire vers pâturage, considérée comme le principal processus de déforestation ; ii) pâturage vers forêt secondaire, le principal processus de régénération forestière ; iii) pâturage vers cultures de grains, représentant l'expansion des cultures de grains (soja et maïs principalement) et ; iv) pâturage vers la plantation d'arbres à bois, représentant l'expansion de la plantation des arbres.

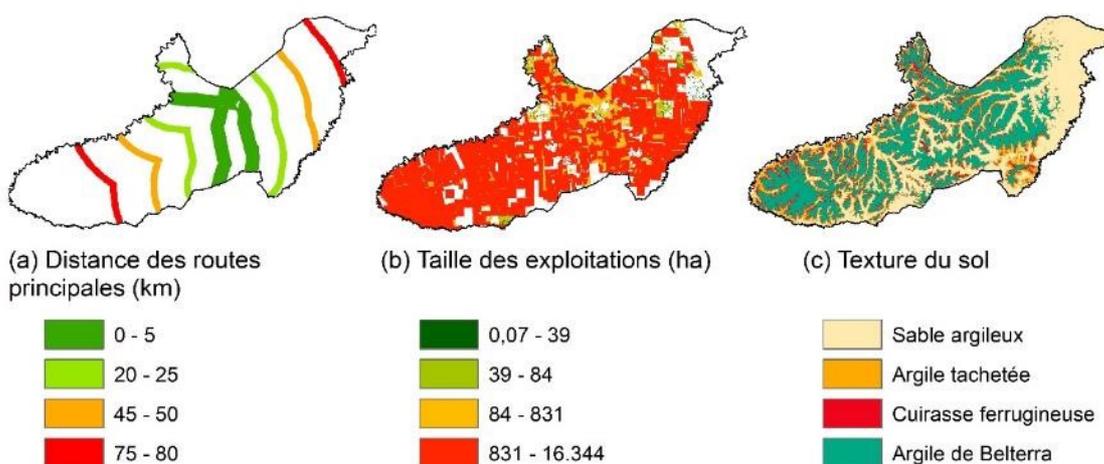


Figure 92. Variables utilisées pour l'analyse temporelle des règles spatiales.

Ces transitions ont été analysées en fonction de trois variables spatiales jugées pertinentes dans la hypothèse ⁶² de cette étude : i) la distance des routes principales (Figure 92 (a)), discrétisée en quatre à partir des routes principales, tous les 5 km (pour des raisons de lisibilité, nous ne montrerons par la suite que certains intervalles de distance : 0-5, 20-25, 45-50 et 75-80); ii) la taille des exploitations (Figure 92 (b)), avec quatre classes de taille, représentant les quartiles de taille des exploitations et ; iii) la texture du sol (Figure 92 (c)) pour représenter les facteurs

⁶² « Les systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques varient en fonction de la taille et de l'emplacement de la propriété, ainsi que de la répartition des ressources biophysiques dans l'exploitation ».

biophysiques, car elle est étroitement liée aux domaines du relief, à la fertilité du sol et au système hydrographique.

2.1. De la forêt primaire vers le pâturage

La transition de la forêt primaire vers le pâturage (environ 107 km²/an entre 2004 et 2015⁶³), est l'un des principaux processus qui caractérisent la déforestation et présente une tendance générale à la perte de poids dans le temps des zones les plus proches des routes principales (0-5 km), en parallèle d'une augmentation du poids des zones les plus éloignées (20-25 et 45-50 km) (Figure 93).

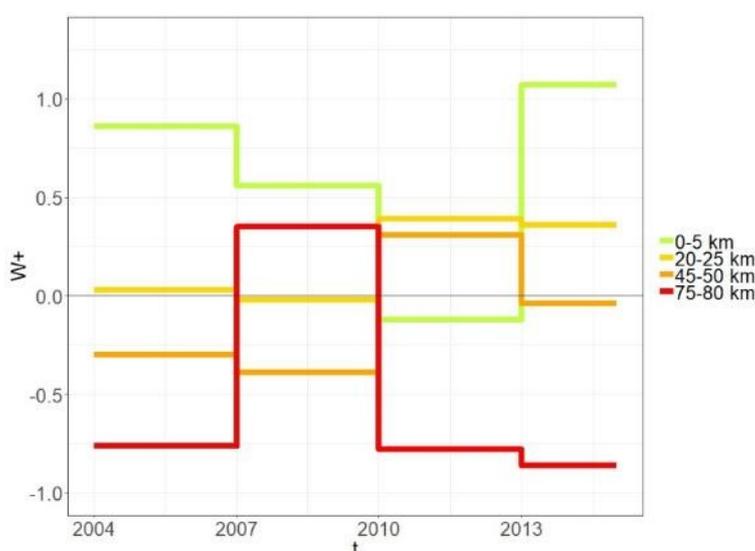


Figure 93. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition forêt primaire vers pâturage.

Si l'on considère qu'en 2004, le réseau des routes principales (asphaltées ou en bon état toute l'année) et qu'une grande partie des forêts de la municipalité était déjà fragmentée (à l'exception des zones très éloignées du centre : la réserve indigène et la ferme Cikel), les Poids d'Évidence suggèrent que la fréquence de la déforestation a changé des zones les plus proches des routes principales aux zones plus éloignées. Deux hypothèses peuvent être formulées en ce sens : a) avec le renforcement de la lutte contre la déforestation après 2008 (notamment après la liste noire), la déforestation à proximité des routes asphaltées a été évitée, en raison de la facilité d'accès pour l'inspection environnementale et b) pendant que la déforestation a baissé considérablement dans les grandes fermes, celle-là a continué dans les zones

⁶³ Valeur obtenue en multipliant le taux de transition 2004-2015 par la superficie de la forêt primaire en 2004.

d'agriculture familiale, situées en grande partie loin des routes principales (Figure 94).

L'analyse des Poids d'Évidence de la transition selon la taille des propriétés confirme la seconde hypothèse jusqu'en 2013 (Figure 94), à savoir que dans les propriétés inférieures à 84 ha, la transition forêt vers pâturage est forte et en croissance jusqu'en 2013 ; dans les propriétés entre 84 et 831 ha, elle est forte mais quasiment stable et dans les grandes propriétés de plus de 831 ha, elle n'est pas présente de façon significative. Il convient de noter que, pour la classe d'exploitations de plus de 831 ha, le fait qu'elle possède tout au long de la période un poids négatif ne signifie pas qu'elle n'y a pas de déforestation, mais que la probabilité d'occurrence d'une déforestation est beaucoup moindre si on la compare aux exploitations plus petites.

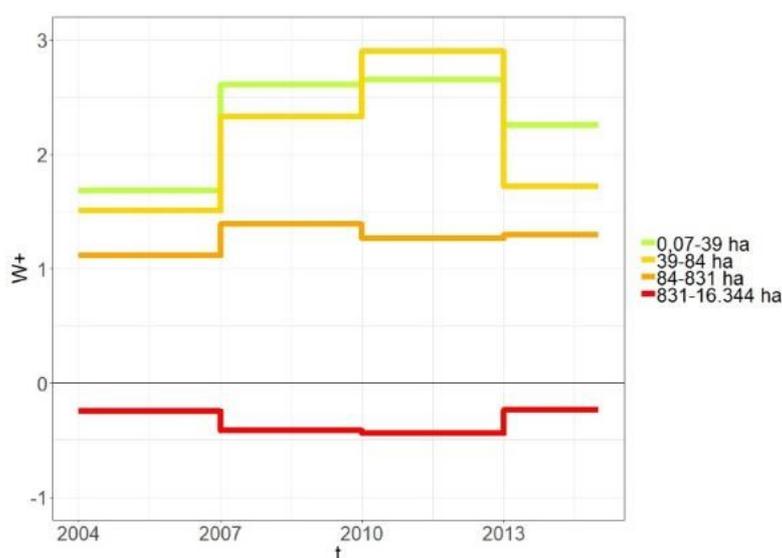


Figure 94. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition forêt primaire vers pâturage.

Cette tendance à une réduction plus lente de la déforestation dans le cadre des *assentamentos* notamment a été mise en évidence à l'échelle de l'Amazonie (Godar et al. 2014; Yanai et al. 2017). A Paragominas, alors que la plupart des grands propriétaires fonciers se sont adaptés au Code Forestier, les exploitations familiales trouvent difficilement des alternatives au système d'agriculture sur brûlis. Les sols sableux (ce sont plus exactement des sables argileux) sont ceux où la déforestation prédomine tout au long de la période analysée (Figure 95). La plupart des zones déjà ouvertes en 2004 étaient situées au fond de vallées sableuses, et après la réduction de la déforestation dans les grandes propriétés, le processus de déboisement s'est poursuivi en partie dans les petites propriétés, situées principalement dans les vallées. Cependant, nous observons une légère diminution du poids des sols sableux, alors que l'argile Belterra, l'argile tachetée et la cuirasse ferrugineuse augmentent de poids,

surtout après 2010 (Figure 95).

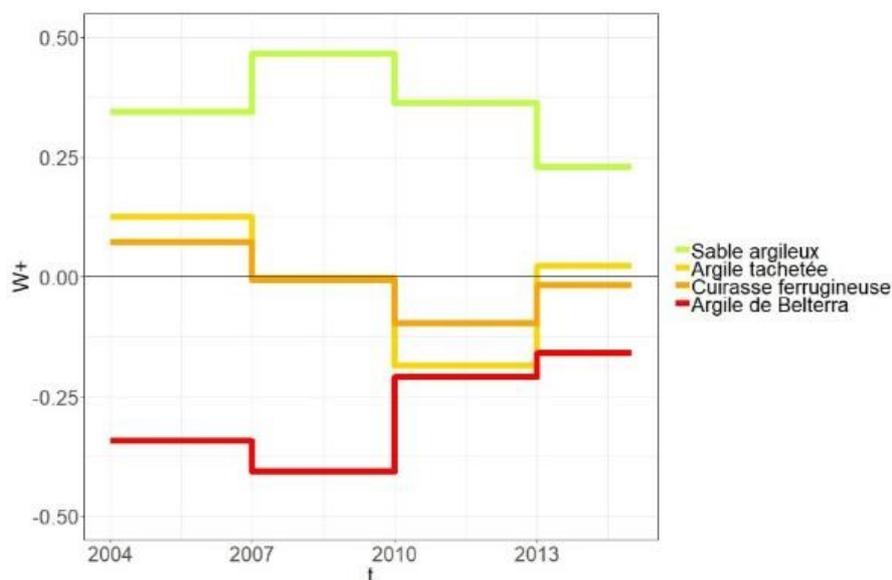


Figure 95. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition forêt primaire vers pâturage.

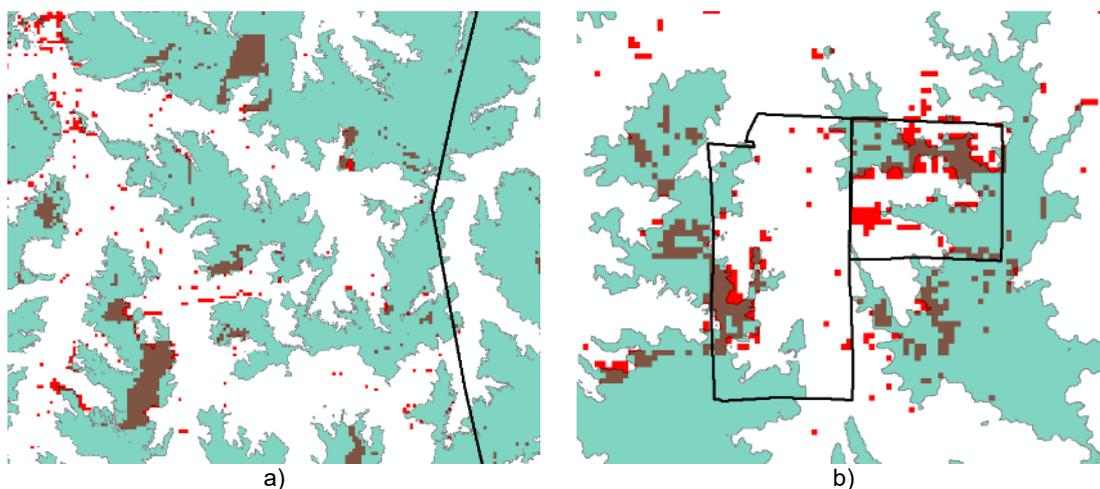


Figure 96. a) Déforestation (en rouge) entre 2010 et 2015 dans la région à l'ouest de la route BR-010 (ligne noire), en vert, les plateaux argileux. b) Déforestation (en rouge) entre 2010 et 2015 dans la région du *assentamento* Camapuã (polygones de lignes noires), en vert, les plateaux argileux.

Ceci peut être lié à deux processus : i) le développement de la culture du soja dans la municipalité, qui a contribué à la pression sur les forêts des plateaux argileux, en particulier dans la région à l'ouest de la route BR-010 (Figure 96 (a)) ; et ii) dans de nombreuses zones de petites propriétés, la seule possibilité d'expansion de la déforestation est vers le plateau, puisque les vallées sont déjà largement ouvertes. Il est possible d'observer plusieurs déforestations de cette nature dans le *assentamento* Camapuã et l'invasion Oriente (Figure 96 (b)). Cependant, ces poids restent toujours négatifs ou proches de zéro, ce qui indique que la déforestation reste un processus

secondaire dans les zones d'argile tachetée, de cuirasse ferrugineuse et d'argile de Belterra.

2.2. Du pâturage vers la forêt secondaire

Le processus de régénération forestière, qui intervient dès que le pâturage n'est plus géré, est également une transition importante, avec environ 95 km²/an entre 2004 et 2015. Nous pouvons souligner tout d'abord que la distance par rapport aux routes asphaltées n'a pas d'influence significative sur la régénération forestière dans le temps. Ce n'est qu'entre 2007 et 2010 que le poids de la distance inférieure à 0-5 km a été supérieur à 0,5 (Figure 97).

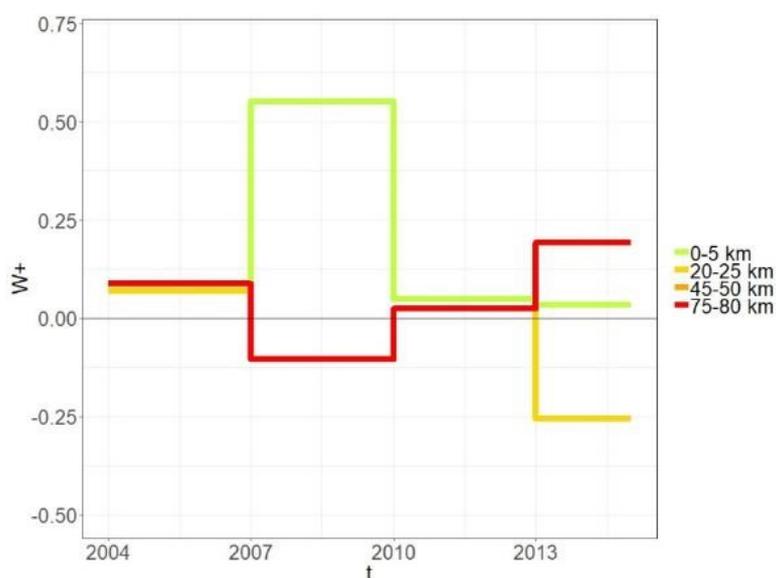


Figure 97. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes asphaltées lors de la transition pâturage vers forêt secondaire.

D'autre part, lorsque nous considérons la variable de la taille des exploitations, nous observons que si pour les propriétés de taille moyenne à grande (>84 ha) le poids n'est pas important pour la régénération forestière, en revanche pour les petites propriétés, la probabilité de régénération forestière augmente avec le temps (Figure 98). Cette augmentation de la forêt secondaire dans les petites fermes peut être liée au système d'agriculture sur brûlis, qui transforme progressivement la forêt primaire en forêt secondaire après un certain temps de culture (les mosaïques de cultures et forêt sont facilement confondues avec des pâturages dans les petites parcelles familiales, du coup la transition culture vers forêt apparaît comme pâturage vers forêt).

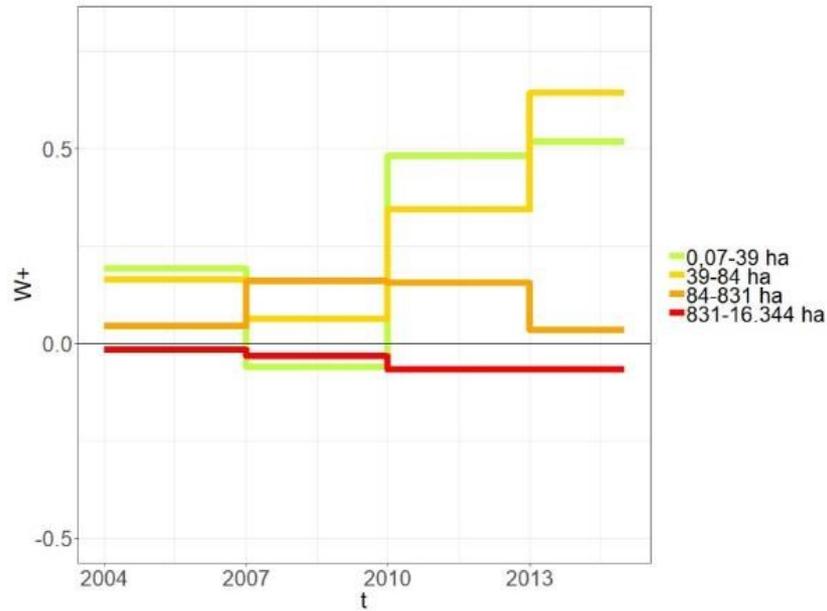


Figure 98. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers la forêt secondaire.

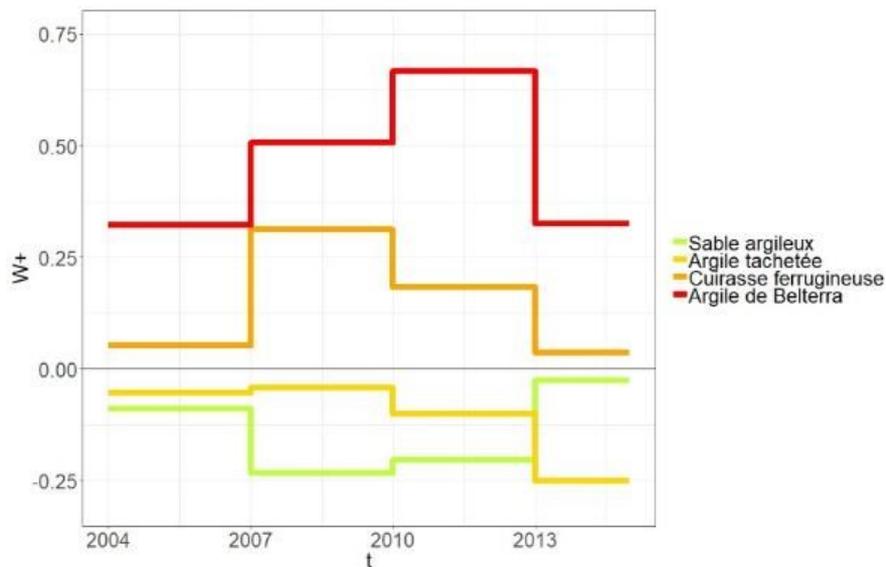


Figure 99. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition pâturage vers forêt secondaire.

Cependant, il est intéressant de noter que, bien que la régénération forestière soit plus fréquente dans les petites propriétés, elle s'est surtout produite dans les zones difficiles à utiliser pour les agriculteurs familiaux, c'est-à-dire les plateaux argileux (Figure 99). Cette plus grande régénération forestière s'est accentuée sur les plateaux argileux entre 2007 et 2013, ce qui suggère que c'est l'influence des politiques de lutte contre la déforestation et dans l'utilisation du feu qui a pu contribuer à l'abandon de ces zones.

2.3. Du pâturage vers les cultures de grains

En ce qui concerne la transition du pâturage vers les cultures de grains (environ 68 km²/an entre 2004 et 2015), on observe que la classe de distance des routes principales de 0-5 km est toujours positive (et poids supérieur à 0,5 donc significatif), avec une légère augmentation au fil du temps. Cela indique une valorisation et un « remplissage » de toutes les possibilités d'expansion du soja dans ces zones plus proches des routes principales.

En ce qui concerne les distances plus importantes par rapport aux routes principales, elles ont des rôles confus, avec des grandes variations dans le temps. Compte tenu de la distance de 20-25 km, le poids est toujours négatif, augmentant entre 2010-2013 en raison de l'apparition de quelques fermes avec cultures de grains dans cette gamme de distance. La distance de 45 à 50 km, en revanche, est extrêmement négative (avec des valeurs inférieures à -1, que n'apparaissent pas dans le graphique), ce qui montre que dans cette distance spécifique la présence de grains est très rare (Figure 100).

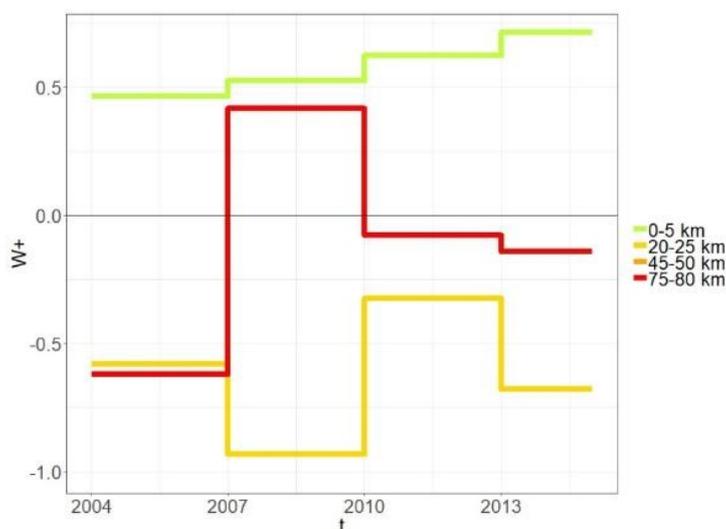


Figure 100. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition du pâturage vers les cultures de grains (la classe 45-50 km n'apparaît pas sur le graphique car elle est inférieure à -1).

Il est possible d'expliquer cela par les difficultés d'accès aux parcelles avec du machinisme agricole nécessaire. La hausse de la probabilité de valeurs a 75-80 km, cependant, correspond à quelques très grandes exploitations orientées vers les cultures de grain dans les confins à ouest de la municipalité, avec des stratégies s'éloignant du comportement général.

En ce sens, il est possible que deux phénomènes spatiaux agissent en relation au soja à Paragominas, le premier étant la concentration des cultures de grains dans les zones les plus proches des routes asphaltées ou bien entretenues toute l'année, avec l'occupation de la plupart des espaces disponibles. Et le second concerne des logiques d'expansion des cultures de grains dans de grandes fazendas enclavées mais disposant de pistes en terre privées entretenue comme nous l'avons observé dans quelques cas sur le terrain.

Compte tenu de la taille des exploitations (données issues du CAR de 2015), nous observons que les petites propriétés (moins de 39 ha) ont une probabilité de transition très faible et qui baisse très nettement dans le temps, les propriétés moyennes (entre 39 et 84 ha) ont une probabilité également très faible dans cette transition qui perd du poids dans le temps, tandis que les moyennes à grandes (de 84 à 831 ha) ont une probabilité positive dans cette transition qui se réduit dans le temps, enfin les grandes propriétés ont peu de probabilité à passer du pâturage aux cultures de grains, mais avec le temps cette tendance est de moins en moins négative (Figure 101).

Cela indique que le soja s'étend dans un certain type de propriété, les moyennes à grandes, et qu'il progresse légèrement vers les exploitations occupant les plus grandes surfaces. Cependant, il convient de prêter attention à cette relation qui peut être perturbée lorsque la structure foncière change avec le temps : les poids ont été calculés uniquement avec les propriétés de 2015 (CAR de 2015).

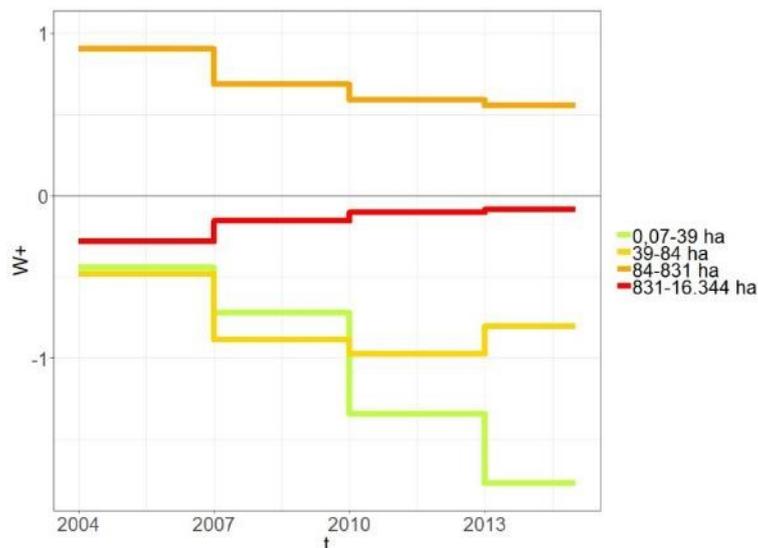


Figure 101. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers les cultures de grains.

En ce qui concerne le rôle du potentiel agronomique des terres, l'argile de Belterra est toujours très prisée pour les cultures des grains (particulièrement pour le soja) par rapport aux autres classes de texture du sol, comme attestent les entretiens, cette préférence est encore plus significative en 2004-2007 et en 2010-2013 (Figure 102). A l'inverse, les sables argileux des vallées et de la plaine orientale sont très fortement défavorables à la transition pâturages – cultures de grains.

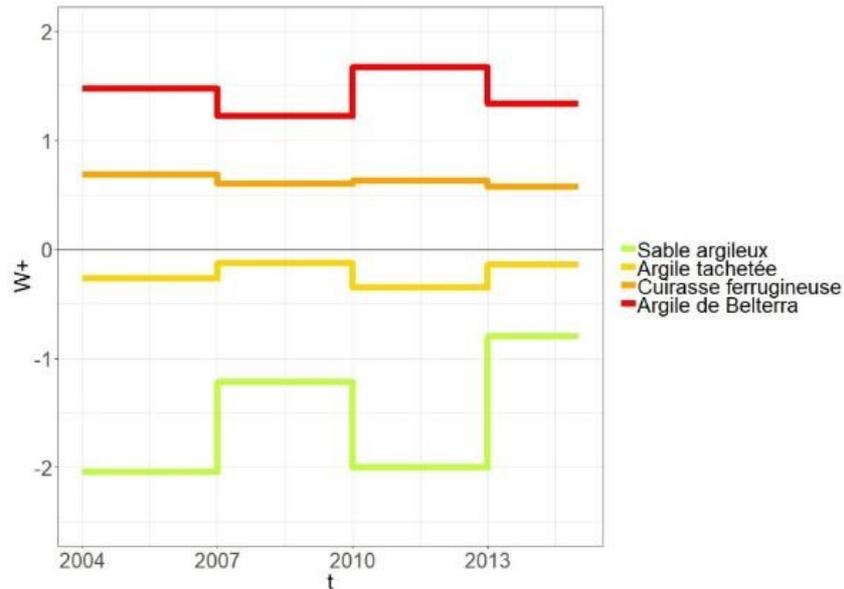


Figure 102. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition du pâturage vers les cultures de grains.

Il est à noter que la période intermédiaire de faible Poids d'Évidence de l'argile Belterra et de léger accroissement du poids des sables argileux (2007-2010) correspond à une phase où la superficie plantée en soja sur les plateaux argileux diminue (Figure 103).

Ce comportement nous conduit à supposer qu'après l'application de mesures anti-déforestation, les agriculteurs ont temporairement choisi de planter plus dans des zones en dehors des plateaux argileux par manque d'espace disponible, ce qui a réduit légèrement le poids de l'argile pour cette transition en 2007-2010. Toutefois, d'autres sources devraient être utilisées pour confirmer ce lien. Il convient de noter que, si la superficie plantée augmente constamment, il y a aussi une légère tendance à réduire la proportion des plateaux argileux dans les cultures de grains au fil du temps (79,5% en 2004 et 71,9% en 2015).

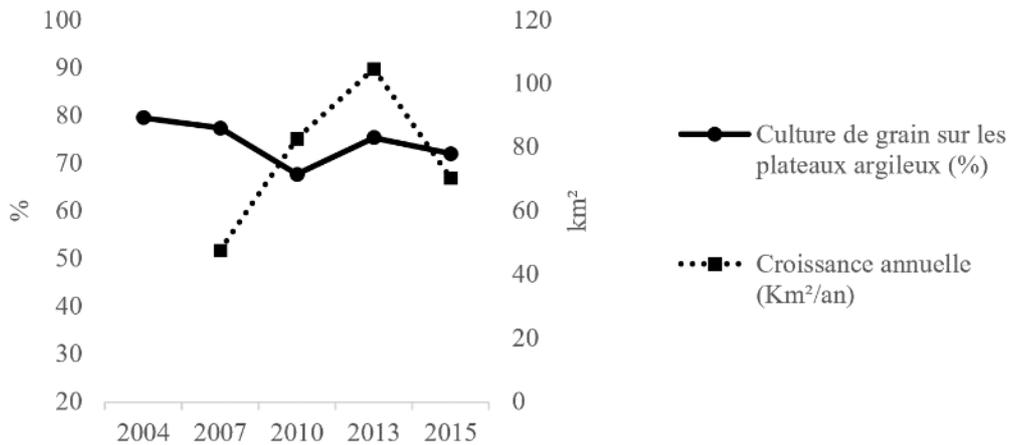


Figure 103. Evolution de la part des cultures de grains sur les plateaux argileux et croissance annuelle des espaces de culture de grains à partir de 2004. Source : classification basée sur les données MODIS.

2.4. Du pâturage vers la plantation d'arbres à bois

La transition du pâturage vers la plantation d'arbres est en moyenne de 34 km²/an entre 2004 et 2015. Les zones à proximité des routes principales sont privilégiées sur toute la période analysée, à l'exception de la dernière période 2013-2015, où le poids de toutes les classes de distance est proche de zéro (toutefois, cette approximation de toutes les classes de distance à un W^+ proche de zéro est fortement influencée par la faiblesse de cette transition après 2013). Apparemment comme pour le soja, le coût du transport est un facteur fondamental dans l'implantation des parcelles (Figure 104).

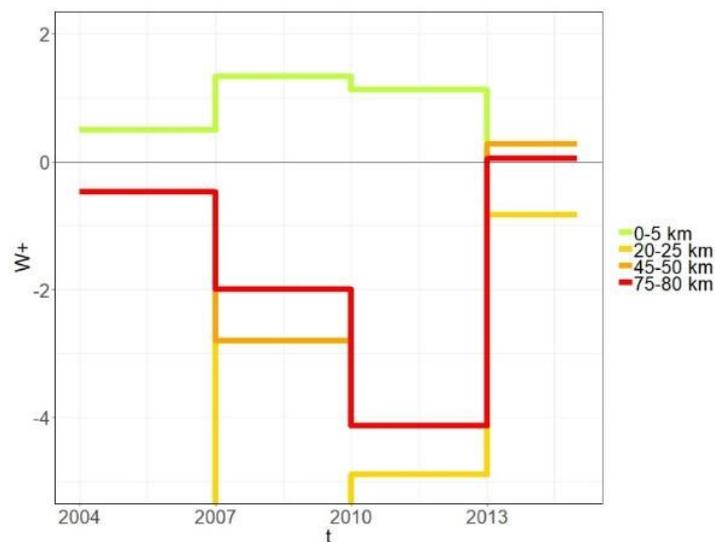


Figure 104. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition du pâturage vers les plantations d'arbres à bois.

Par rapport à la taille des propriétés, cette transition présente tout au long de la période des valeurs légèrement positives pour les propriétés de plus de 831 ha, tandis que les propriétés plus petites ont toujours un poids négatif, voire très négatif. Le fait qu'il n'y ait pas de classe avec des poids positifs expressifs est dû au fait que, considérant que les Poids d'Évidence sont calculés avec des rapports de surface, la surface des pâturages est grande par rapport à la surface des plantations d'arbres, et la surface de la classe des propriétés supérieures à 831 ha est également grande. Cela signifie que la probabilité que les plantations d'arbres apparaissent sur les pâturages de grandes propriétés est relativement faible, mais toujours positif (Figure 105).

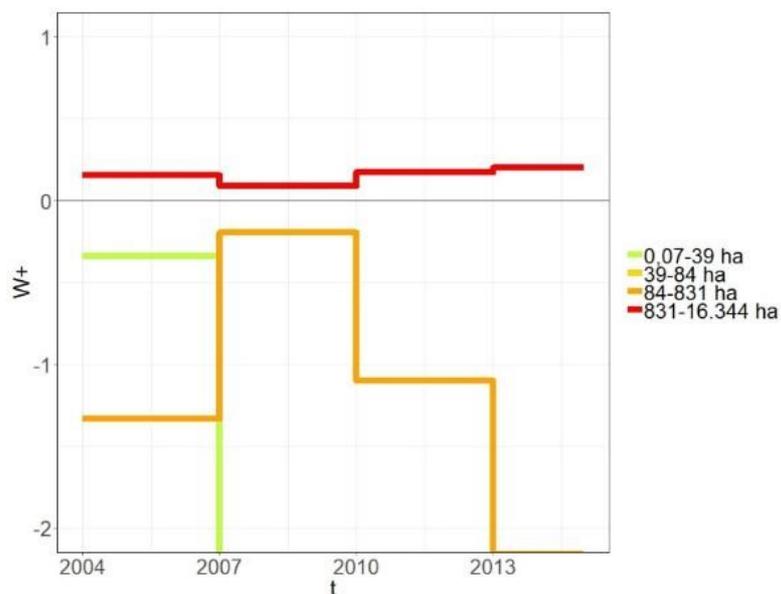


Figure 105. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers les plantations d'arbre à bois. La classe de taille 39-84 ha est inférieure à -2 et n'apparaît pas sur le graphique.

En ce qui concerne la texture du sol, il a été observé que les sols à argile tachetée et cuirasse ferrugineuse ont la plupart du temps des valeurs positives, ce qui suggère que ce sont donc des zones de potentiel agricole moins important qui sont utilisées pour cette activité (Figure 106). Les argiles de Belterra longtemps réservées à d'autres usages, prennent cependant un poids légèrement positif après 2010, ce qui semblerait indiquer une évolution des logiques de production sur ces terres, avec notamment l'implantation d'une grande plantation d'eucalyptus située en majeure partie sur les plateaux argileux (Fazenda Cinderela et Janaina, 3°09'13,70" S ; 47°19'57,39" O). Ici aussi, des logiques individuelles s'écartant de la tendance collective peuvent venir perturber la lecture globale.

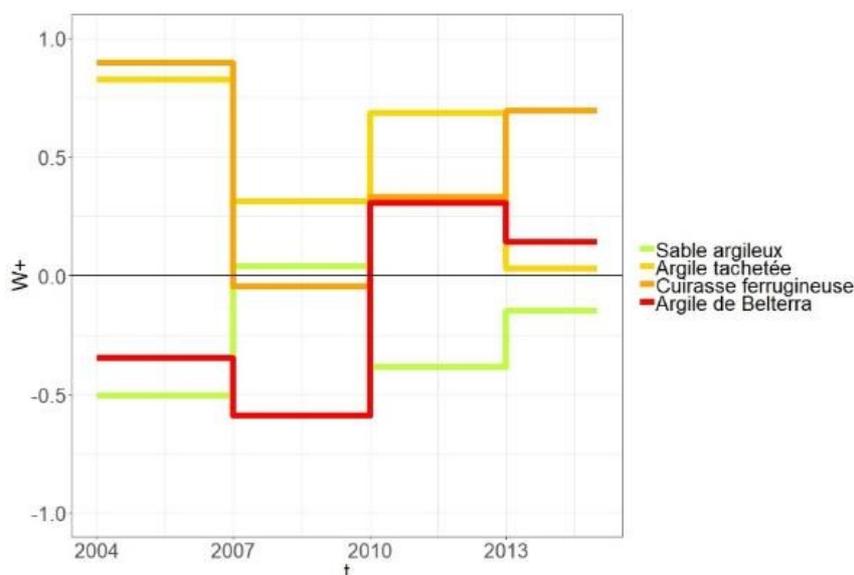


Figure 106. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition du pâturage vers plantations d'arbre.

3. Phases de la dynamique de l'occupation du sol à Paragominas

La méthode des Poids d'Évidence a présenté des résultats permettant de déterminer le rôle de chaque variable dans les transitions au fil du temps. En considérant chaque classe de variables individuellement, il est possible d'identifier des relations complexes régissant des phénomènes spatiaux. Cependant, la méthode dépend de la délimitation des classes utilisées et, dans le cas de transitions de faible emprise spatiale (comme les plantations d'arbres à bois dans certains cas), cela peut entraîner de fortes variations qui peuvent représenter des phénomènes plus spécifiques à quelques unités de production, et peuvent masquer une logique plus générale.

Ceci a déjà été souligné par Mas et al. (2011) qui montrent, dans un contexte de détermination des probabilités spatiales de transition, que des méthodes linéaires peuvent mieux représenter le comportement général d'une dynamique. Cependant, l'analyse que nous avons conduite s'est avérée être une base satisfaisante pour délimiter les phases générales de la dynamique d'occupation du sol. Sur la base de l'hypothèse n°3⁶⁴, les événements et les processus qui permettent de définir des

⁶⁴ Hypothèse 3 : « l'importance des facteurs biophysiques varie dans le temps et selon les phases des systèmes de décision d'occupation du sol ».

phases de la dynamique récente de l'occupation du sol ont été répertoriés. Cette définition des phases vise à la fois à évaluer l'hypothèse et à servir de base à la modélisation de la dynamique d'occupation du sol avec le modèle DINAMICA. Ainsi, deux phases ont été retenues en fonction de la série temporelle d'occupation du sol disponible, appelées phase 1 ou P1, comprenant la période 2004-2007, et phase 2 ou P2, portant sur la période 2010-2013. Ce choix se justifie du fait que :

- Ces phases représentent une période avant et après le renforcement du contrôle sur la déforestation : inscription de la municipalité dans la liste noire des municipalités qui déboisent le plus en Amazonie, moratoire du soja, opérations de la police fédérale *Arco de Fogo* et *Boi Pirata* pour les principales actions.
- La phase P1 représente une période de forte déforestation (avec notamment plus de 300 km² en 2005, INPE) et P2 avec une déforestation beaucoup plus faible (~30 km²/an, soit 0,15 % de la surface municipale) (Figure 107).
- La plantation d'arbres à bois n'était pas encore très expressive en P1, mais elle devient importante en P2 (Figure 107).
- Dans la phase P1, les surfaces de pâturages étaient encore en forte expansion, alors que pour la phase P2 il y a une inflexion de la courbe : une partie des pâturages laisse place aux cultures de grains (Figure 107). Dans la phase P1, le cheptel bovin est établi autour de 500.000 têtes, contre environ 350.000 têtes dans la phase P2 (Figure 108).
- La phase P2 présente un poids plus important pour la régénération forestière des petites propriétés (Figure 98).
- Durant la phase P1 le soja étaient à des prix inférieurs au marché globaux que durant la phase P2 (Figure 109).
- Il y a une augmentation du poids de l'argile pour la déforestation entre P1 et P2 (Figure 95).

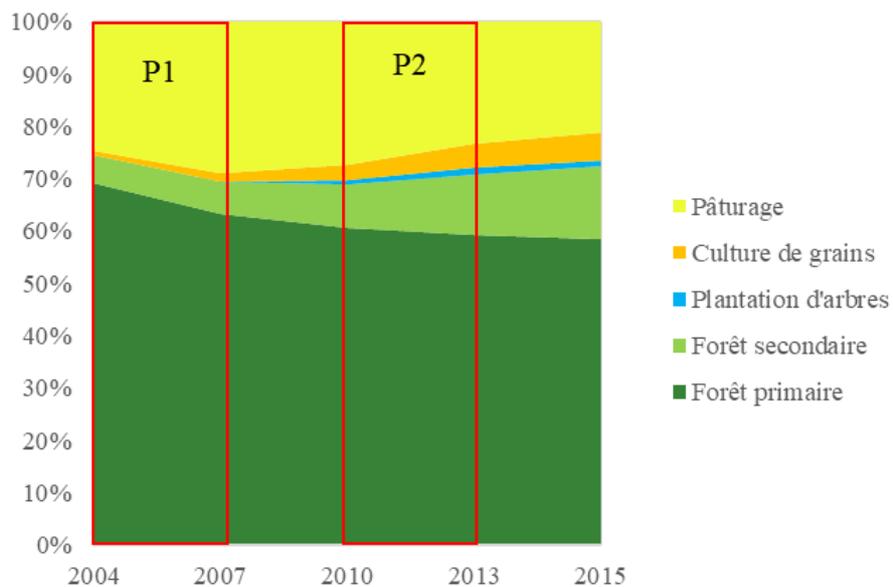


Figure 107. L'évolution des principales classes d'occupation du sol à Paragominas. Basé sur les données du capteur MODIS, classification décrite dans la partie II.

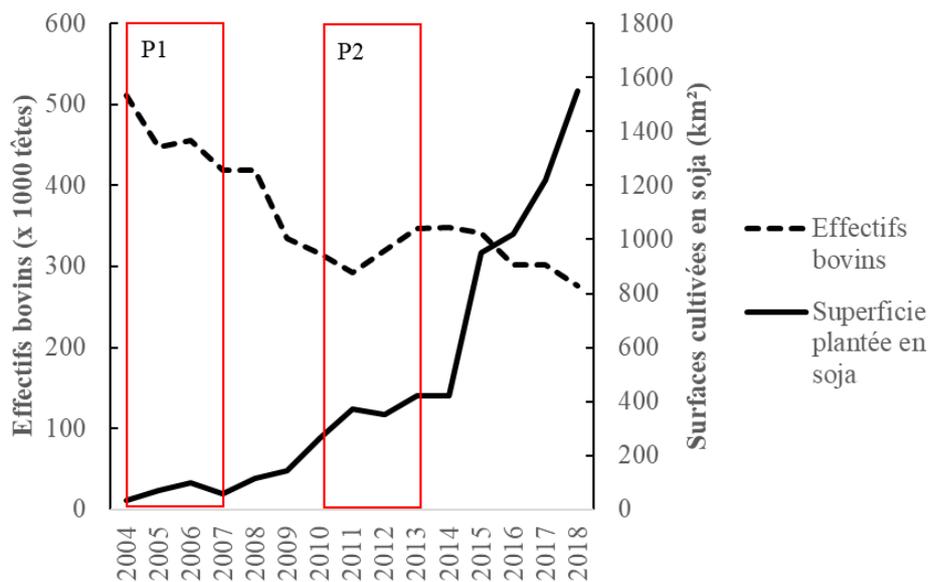


Figure 108. Évolution des surfaces cultivées en soja et des effectifs bovins à Paragominas entre 2004 et 2018. Source : IBGE (2019).

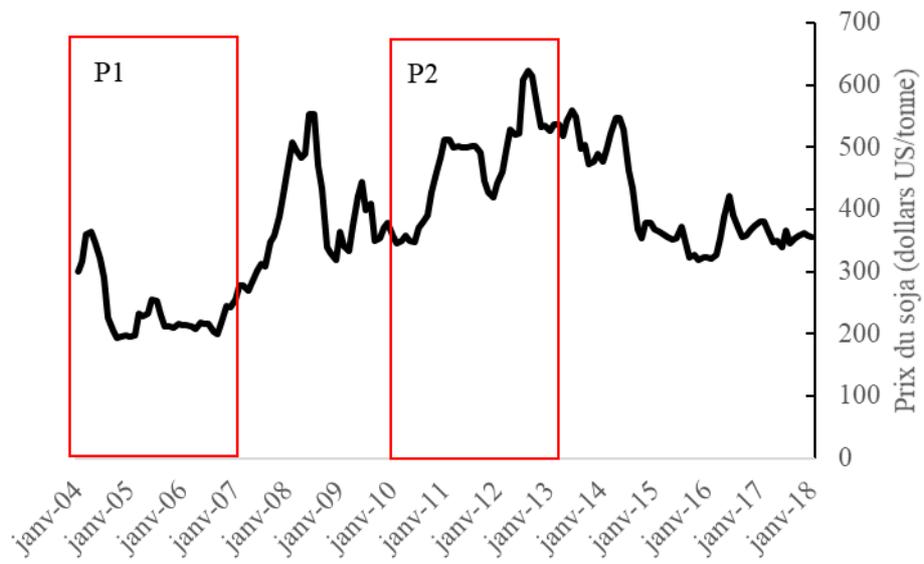


Figure 109. Cours du soja sur le marché global (déterminée par le plus grand marché importateur).
 Source : Primary Commodity System (2019) (<https://data.imf.org:443>).

Chapitre 6 - Déterminants spatiaux et scénarios d'occupation du sol future de la municipalité de Paragominas, une ancienne frontière agricole en Amazonie⁶⁵

L'objectif premier de ce chapitre était de réaliser une modélisation spatialement explicite de Paragominas pour le période de transition agricole entre 2004 et 2015. Pour y parvenir, nous avons évalué l'importance de différents facteurs socio-économiques et biophysiques - y compris le sol, la topographie et l'eau - dans la dynamique de la déforestation et dans la concurrence entre les pâturages, les terres cultivées, les plantations d'arbres à bois et les forêts secondaires. La modélisation a été réalisée en tenant compte de l'analyse temporelle effectuée au chapitre 5, en particulier pour la définition des phases d'occupation du sol. La discussion s'est appuyée sur les informations tirées du travail sur le terrain, dont il a été question au chapitre 4. Ensuite, le modèle a été utilisé pour simuler les impacts futurs sur le paysage jusqu'en 2030, avec deux approches : une approche exploratoire pour évaluer l'évolution du paysage à l'aide des coefficients observés dans le passé ; et une approche anticipative pour simuler la réduction progressive de la déforestation dans le temps jusqu'à l'arrivée d'un taux de déforestation « zero ».

1. La procédure de modélisation

1.1. *Le modèle dynamique de changement d'occupation du sol*

Une modélisation spatialement explicite a été réalisée avec le modèle DINAMICA sur la plateforme de modélisation Dinamica EGO (version 4.0.10.0). Ce modèle a été choisi car il a déjà été largement utilisé pour la modélisation de simulation d'occupation du sol en Amazonie à plusieurs échelles. Le modèle DINAMICA utilise des pas de temps discrets, et à chaque étape, les variables dynamiques, par exemple la distance par rapport aux pâturages, sont d'abord calculées. Ensuite, les cartes des probabilités

⁶⁵ Article publié. Osis, R., Laurent, F., & Pocard-Chapuis, R. (2019). Spatial determinants et future land use scenarios of Paragominas municipality, an old agricultural frontier in Amazonia. *Journal of Land Use Science*, 1–22.
<https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1643422>

de transition sont calculées à l'aide des variables dynamiques et statiques, en fonction des transitions entre t_0 et t_1 . En même temps, la quantité de transitions à exécuter est définie sur la base des taux de transition globaux. Les transitions sont ensuite effectuées sur la carte t_0 par les fonctions *patcher* et *expand*. La carte résultante est alors définie comme un nouveau t_0 et le processus recommence (Figure 110).

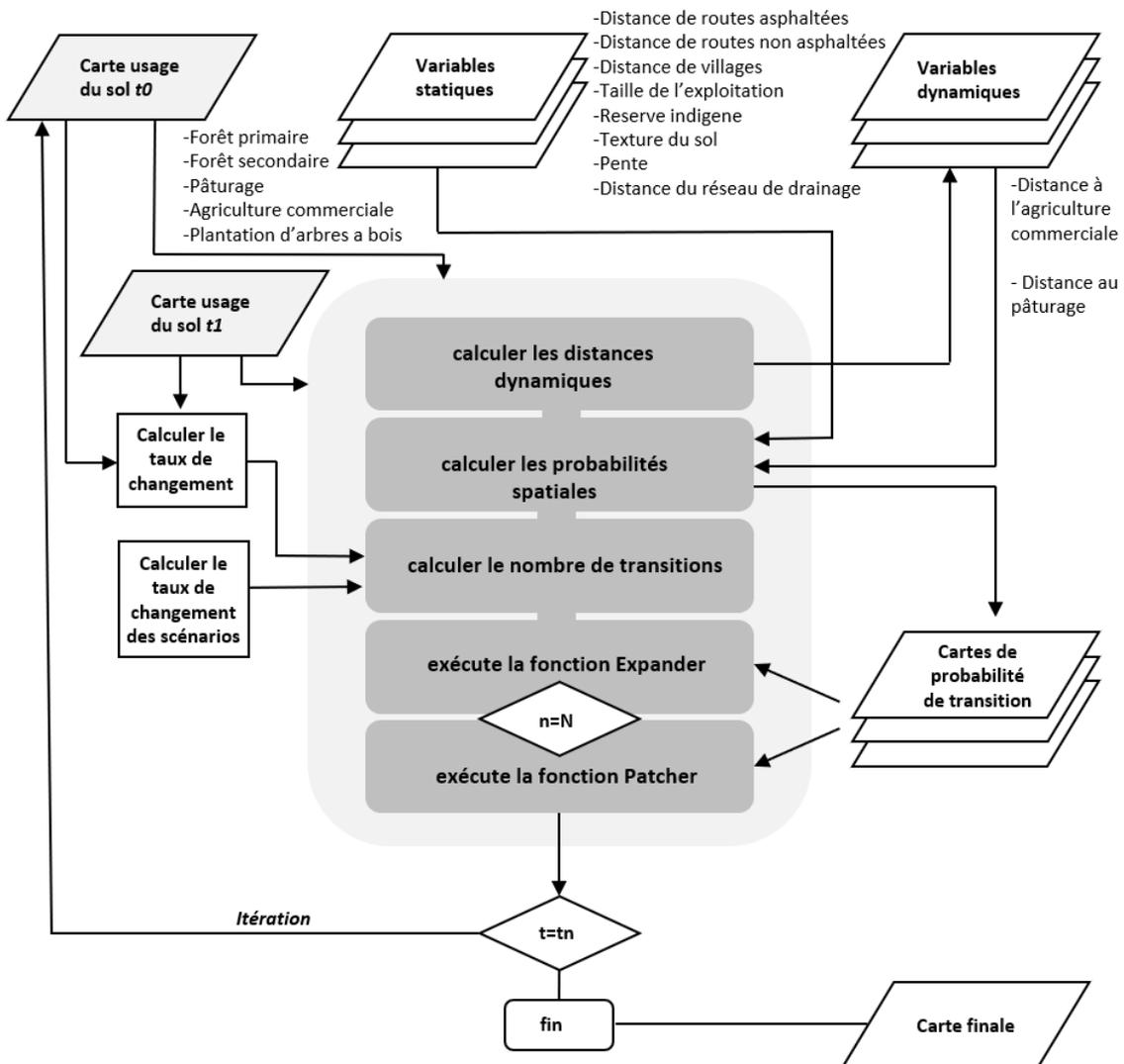


Figure 110. Schéma conceptuel du modèle DINAMICA.

Trois procédures de calibrage sont effectuées. La première consiste à calculer les taux de transition globaux, c'est-à-dire le montant total de la variation de surface pour chaque classe d'occupation du sol entre les cartes d'occupations du sol t_0 et t_1 . La deuxième étape consiste à définir les probabilités de transition locales P , ce qui se fait à l'aide de la méthode des Poids d'Évidence, déjà présentée au Chapitre 5.

Selon Soares-Filho et al. (2010), la probabilité postérieure d'une transition (D) en fonction de la présence d'une configuration spatiale binaire donnée (B), exprimée en termes de probabilités est égale à

$$O\{D|B\} = O\{D\} * \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (8)$$

Le terme $P\{B|D\}/P\{B|\bar{D}\}$, connu sous le nom de « rapport suffisant » (*sufficient ratio*) peut être utilisé pour évaluer la relation entre une configuration spatiale et la probabilité d'occurrence d'un événement spatial D . Le logarithme naturel de ce terme est W^+ . Ainsi, la probabilité conditionnelle de D compte tenu de la co-occurrence d'un ensemble de configurations spatiales est la suivante

$$P\{D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_i\} = \frac{e^{(w_d^+ + \sum w_i^+)}}{1 + e^{(w_d^+ + \sum w_i^+)}} \quad (9)$$

où W_d^+ est le logarithme naturel des probabilités antérieures de D :

$$O\{D\} = \frac{(D \cap B + D \cap \bar{B})}{(\bar{D} \cap B + \bar{D} \cap \bar{B})} \quad (10)$$

et W_i^+ est le Poids d'Évidence de la transition qui se produit pour la configuration spatiale B_i .

La troisième étape de calibrage du modèle DINAMICA comprend la règle locale d'automate cellulaire composée de deux fonctions complémentaires : l'*expander* et la *patcher*, la première étant responsable de l'expansion des patches existants et la seconde de la création de nouveaux patches. Les deux fonctions intègrent également un mécanisme d'allocation stochastique qui localise les cellules avec la plus grande probabilité pour chaque transition. Ce mécanisme consiste à parcourir la carte d'occupation du sol pour sélectionner les cellules ayant la plus forte probabilité de transition. Ces cellules sont ensuite organisées dans une liste et sélectionnées au hasard dans la même liste. Les transitions sont ensuite appliquées sur la carte en fonction de l'emplacement des cellules sélectionnées. Les fonctions sont combinées selon l'équation suivante :

$$Q_{ij} = r \times (\text{expander function}) + s \times (\text{patcher function}) \quad (11)$$

où Q_{ij} représente le nombre de transitions de type ij à r et s est le pourcentage de transitions effectuées par chaque fonction, avec $r + s = 1$.

La fonction *expand* est exprimée par l'équation suivante :

$$\text{if } n_j > 3 \text{ then } P'_{ij}(x, y) = P_{ij}(x, y),$$

$$\text{else } P'_{ij}(x, y) = P_{ij}(x, y) \times \left(\frac{n_j}{4}\right) \quad (12)$$

où n_j correspond au nombre de cellules de type j présentes dans une fenêtre de 3×3 ; P_{ij} et P'_{ij} représentent les probabilités de transition de la classe i pour la classe j . L'objectif de cet algorithme est de s'assurer que les valeurs maximales de P'_{ij} peut être l'original P_{ij} , chaque fois qu'un type de cellule i est entouré d'au moins 50 % du type j (Figure 111 (a)). La fonction *patcher*, à son tour, recherche des cellules près d'un endroit pour effectuer une transition conjointe. Le processus commence par la sélection d'une cellule « *seed* » à partir du nouveau patch, puis la sélection d'un nombre spécifique de cellules dans le voisinage en fonction de leurs probabilités de transition pour exécuter une transition combinée (Figure 111 (b)).

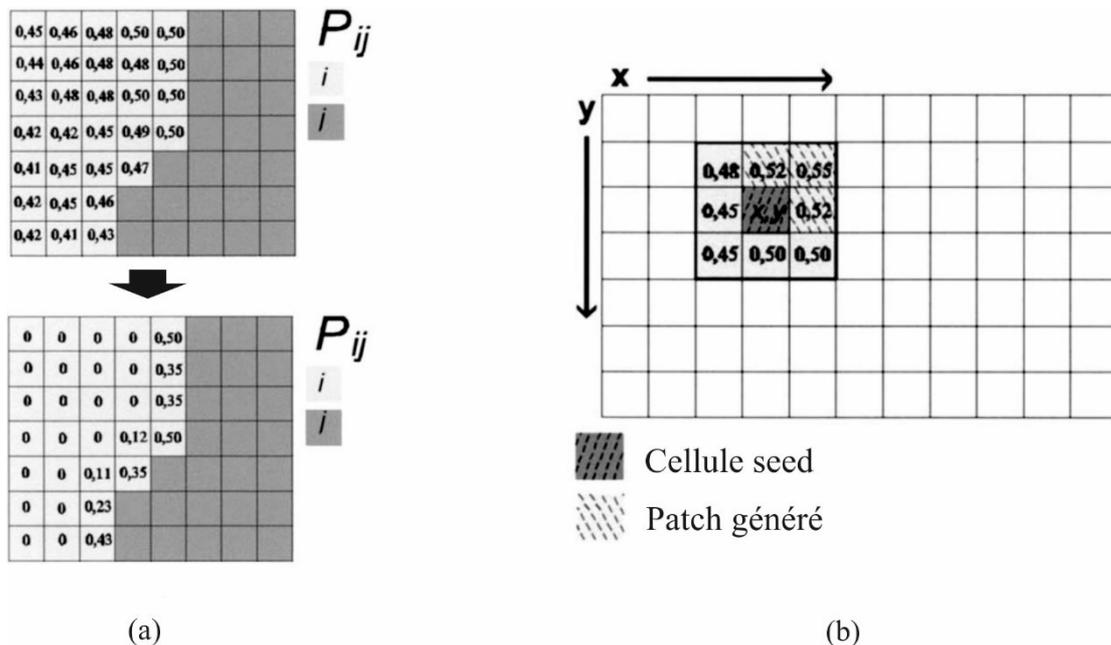


Figure 111. (a) Collection de cellules P_{ij} avant et après la convolution de l'opérateur *Expand*. (b) Sélection de cellules autour d'une cellule centrale affectée par la fonction *Patcher* Source : Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin (2002).

Pour chaque phase d'une simulation, le pourcentage de transitions est établi pour chaque fonction mentionnée. Les fonctions *patcher* et *expand* suivent une distribution log-normale, et le calibrage de la taille moyenne et de la variance de taille des patches permet de contrôler la formation des motifs des patches. L'isométrie des patches permet de définir des patches aux formats plus compacts ou plus complexes

(Soares-Filho et al., 2002). Dans le cas présent, les simulations ont été réalisées avec des valeurs de calage différentes et nous avons retenu celle dans laquelle les indices de structure du paysage i) superficie moyenne des parcelles et ii) indice de forme moyenne pondérée en fonction de la superficie⁶⁶ ressemblaient le plus à ceux de la carte d'occupation du sol a été choisie. Deux modèles ont été construits pour simuler les conditions avant et après le programme *Município Verde*, qui a débuté en 2008. Ainsi, deux phases ont été définies pour la calibration : P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013) (Table 27) (Figure 116), nous expliquerons plus en détail par la suite les différences de dynamique entre ces deux phases.

Table 27. Taux globaux annuels de transition de classes de d'occupation du sol pour les phases P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013).

Transitions		Taux de transition à intervalles de temps (années)	
De	Vers	P1 (2004-2007)	P2 (2010-2013)
Forêt primaire	Cultures de grains	0,00079	0,00111
Forêt primaire	Pâturage	0,02740	0,00545
Forêt primaire	Plantation d'arbres	0,00090	0,00007
Cultures de grains	Pâturage	0,11587	0,08836
Cultures de grains	Plantation d'arbres	0,00257	0,00286
Pâturage	Cultures de grains	0,01149	0,02545
Pâturage	Forêt secondaire	0,02785	0,06512
Pâturage	Plantation d'arbres	0,00237	0,00796
Forêt secondaire	Cultures de grains	0,00586	0,02162
Forêt secondaire	Pâturage	0,12279	0,11026
Forêt secondaire	Plantation d'arbres	0,00396	0,00349

1.2. Sélection et traitement de données

La classification annuelle d'occupation du sol basée sur les séries temporelles MODIS, a été utilisée comme entrée du modèle (Chapitre 4 – 'Série temporelle d'occupation du sol', Annexe 2). Les variables spatiales ont été sélectionnées sur la base d'études antérieures en Amazonie. Le modèle DINAMICA distingue les variables statiques et dynamiques. Les variables statiques dans ce cas, sont : (i) la distance par rapport aux routes principales (Figure 44), (ii) la distance par rapport à toutes les routes (Figure 45), (iii) la distance par rapport aux villages (Figure 46), (iv) la taille des exploitations agricoles (Figure 47), (v) l'existence de réserves indigènes (Figure 48), (vi) la pente

⁶⁶ Les calculs ont été faits avec le logiciel FRAGSTATS (McGarigal 2015).

(Figure 39), (vii) la distance euclidienne du réseau de drainage (Figure 40), et (viii) la texture du sol (Figure 41). Les variables dynamiques sont : la (ix) distance aux pâturages et (x) la distance à les cultures de grains, elles sont mises à jour à chaque itération du modèle.

Calcul de intervalles pour catégoriser les variables continues : la méthode des Poids d'Évidence ne s'applique qu'aux données catégorielles, de sorte que les variables continues doivent être discrétisées. Dans un processus de catégorisation, la préservation de la structure des données est une question essentielle. Pour ce faire, la méthode de Bonham-Carter (1990) a été adaptée à Dinamica EGO (Soares-Filho, Rodrigues, et Costa 2009), d'abord en établissant un delta minimum, spécifié comme l'incrément dans l'interface graphique Dx pour une variable continue x qui est utilisé pour construire n buffers incrémentaux (Nx) comprenant des intervalles de X_{min} vers $X_{min} + nDx$. Chaque n définit un seuil qui divise la carte en deux classes : (Nx) et ($Nx2$). An est le nombre de cellules pour un buffers (Nx) multiple de n et dn est le nombre d'occurrences de l'événement modélisé (D) à l'intérieur du *buffer*.

Les quantités An et dn sont obtenus par une séquence ordonnée de *buffer* $N(X_{min} + nDx)$. Alors, W^* est calculé pour chaque *buffer* selon l'Equation 8. Une séquence de quantités An est projetée en fonction de $An \cdot \exp(W^*)$. Les points d'inflexion sont ensuite déterminés en appliquant un algorithme de généralisation linéaire qui contient trois paramètres : (a) intervalle de distance minimale le long de x ($mindx$) ; (b) intervalle de distance maximal le long de x ($maxdx$) et (c) un angle de tolérance ft . Pour dx (la distance entre deux points le long de x) entre $mindx$ et $maxdx$, un nouveau point d'inflexion est placé chaque fois que $dx \geq maxdx$ (un angle entre les vecteurs v et v' reliant le courant au dernier point et le dernier point à son antécédent, respectivement) dépasse l'angle de tolérance ft . Ainsi, le nombre d'intervalles diminue en fonction de ft . Les intervalles sont finalement définis en reliant les points d'inflexion par des lignes droites.

Indépendance spatiale des variables : une condition préalable de la méthode des Poids d'Évidence est que les différentes variables utilisées doivent être indépendantes sur le plan spatial (Bonham-Carter 1994). A cette fin, le coefficient de Cramer (V) et le *Joint Information Uncertainty* (U) ont été appliqués pour évaluer la similarité des paires de variables spatiales. Le coefficient de Cramer est défini comme suit :

$$V = \sqrt{\frac{x^2}{\Gamma..M}} \quad (13)$$

où x^2 est la statistique du tableau de contingence reliant deux variables ; $\Gamma_{..}$ est la somme totale des valeurs de la table de contingence; M est le minimum de $(n-1, m-1)$, où n est le nombre de lignes, et m , le nombre de colonnes. Comme il appartient à la classe des mesures d'entropie, le *Joint Information Uncertainty* peut également être calculé avec la tabulation croisée des surfaces $\Gamma_{..}$, mais dans ce cas, il est utilisé pour mesurer les associations. Alors que Γ_{ij} est transformé en proportions de surface p , en divisant chaque élément de la surface par le total $\Gamma_{..}$. Alors, $p_{ij} = \Gamma_{ij} / \Gamma_{..}$, et les proportions marginales sont définies comme suit $p_i = \Gamma_i / \Gamma_{..}$ et $p_j = \Gamma_j / \Gamma_{..}$. Ainsi, l'entropie H pour deux cartes A et B et l'entropie combinée $H(A, B)$ des deux peuvent être déterminées par

$$H(A) = - \sum_{j=1}^m [p_j - \ln(p_j)] \quad (14)$$

$$H(B) = - \sum_{i=1}^n [p_i - \ln(p_i)] \quad (15)$$

$$H(A, B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (16)$$

Ensuite, le *Join Information Uncertainty* des deux variables A et B peuvent être calculées par

$$U(A, B) = 2 \left[\frac{H(A)+H(B)-H(A,B)}{H(A)+H(B)} \right] \quad (17)$$

Selon Bonham-Carter (1994), des valeurs inférieures à 0,5 pour V et U suggèrent moins d'association entre variables. La Table 28 énumère les coefficients Cramer et *Joint Information Uncertainty* les plus élevés pour les quatre principales transitions d'occupation du sol dans la zone d'étude. Il convient de noter qu'aucune n'a des valeurs supérieures à 0,5, de sorte que toutes ont été retenues dans le modèle. Par la suite, les variables suivantes ont été sélectionnées pour les essais de modélisation : taille de l'exploitation, pente, texture du sol, réserve indigène, distances par rapport aux villages, aux routes asphaltées, aux routes non asphaltées, aux rivières principales, aux pâturages et aux cultures de grains.

Table 28. Valeurs plus élevées de Cramer (V) et de *Joint Information Uncertainty* (U) entre les variables utilisées dans l'étude pour les principales transitions de l'étude.

Transitions de	Vers	Première variable	Deuxième variable	V	U
Forêt primaire	Pâturage	Dist. routes princip.	Reserve indigène	0,4813	0,0514
		Dist. routes princip..	Dist. de villages	0,2799	0,1844
Pâturage	Forêt secondaire	Dist. routes princip.	Reserve indigène	0,4813	0,0514
		Dist. routes princip.	Dist. de villages	0,2166	0,0849
Pâturage	Cultures de grains	Dist. routes princip.	Reserve indigène	0,4813	0,0514
		Dist. routes princip.	Dist. de villages	0,2681	0,1850
Pâturage	Plantation d'arbres	Dist. routes princip.	Reserve indigène	0,4813	0,0514
		Dist. routes princip.	Dist. de villages	0,1996	0,1519

1.3. Performance spatiale du modèle

La comparaison d'un modèle spatialement explicite cellule par cellule avec des données observées donne presque toujours lieu à une très faible précision, en raison de nombreux facteurs dont la simulation ne tient pas compte et le chevauchement de nombreuses cartes rend l'emplacement final pas toujours exactement le même. Dans ce sens, l'allocation des changements résultant des simulations a été validée à l'aide de la méthode d'ajustement à résolutions multiples avec fonction de décroissance constante⁶⁷. Cette méthode tient compte du flou (*fuzzy*) de l'emplacement et de la catégorie au sein d'un voisinage cellulaire, ce qui signifie que la représentation d'une cellule est influencée par la cellule elle-même et, dans une moindre mesure, par les cellules voisines. La méthode a été adaptée dans Dinamica EGO à partir du travail de (Hagen 2003). Tout d'abord, un vecteur « *crisp*⁶⁸ » est associé à chaque cellule de la carte, et ce vecteur a plusieurs positions de classes de catégorie (dans ce cas, d'occupation du sol). Le vecteur du voisinage flou (V_{nbhood}) pour chaque cellule est défini par :

$$V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood1} \\ \mu_{nbhood2} \\ \vdots \\ \mu_{nbhoodC} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mu_{nbhood_i} = |\mu_{crisp\ i,1} \times m_1, \mu_{crisp\ i,2} \times m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,n} \times m_N|_{max} \quad (19)$$

⁶⁷ *Multiple resolution fitting with a constant decay.*

⁶⁸ L'opposé d'une valeur floue.

où μ_{nbhood_i} représente l'appartenance à la catégorie i dans un voisinage de cellules N ; $\mu_{crisp_{ij}}$ est un membre de la catégorie i par rapport à une cellule j voisine, en supposant, comme dans un vecteur *crisp* (V_{crisp}), 1 pour i et 0 pour les autres catégories en plus de i ($i \in C$); m_j est la distance par rapport à l'élément de cellule voisine j , où m est la fonction de décroissance, qui dans le cas présent a été définie comme constante. La catégorie de membre de la cellule centrale, en supposant la plus grande contribution trouvée dans le voisinage d'une fenêtre $n \times n$, est définie par l'Equation 21. Ensuite, la mesure de la similarité d'une paire de cartes peut être obtenue au moyen d'une intersection cellule-à-cellule floue et de vecteurs *crisp* dans l'équation :

$$S(V_A, V_B) = \left[\left| \mu_{A,1}, \mu_{B,1} \right|_{Min}, \left| \mu_{A,2}, \mu_{B,2} \right|_{Min}, \dots, \left| \mu_{A,i}, \mu_{B,i} \right|_{Min} \right]_{Max} \quad (20)$$

où V_A et V_B représentent les vecteurs flous de voisinage pour les cartes A et B et $m_{A,j}$ et $m_{B,j}$ sont les membres du voisinage pour les catégories $i \in C$ pour les cartes A et B , comme dans l'Equation 20. Selon Hagen (2003), étant donné que les mesures de similarité $S(V_A, V_B)$ tendent à surestimer l'ajustement spatial, la similarité bidirectionnelle (*two-way*) est appliquée :

$$S_{TwoWay}(A, B) = \left| S(V_{nbhood_A}, V_{crisp_B}), S(V_{crisp_A}, V_{nbhood_B}) \right|_{Min} \quad (21)$$

La similarité globale de la paire de cartes peut être calculée au moyen de la similarité bidirectionnelle pour toutes les cellules de la carte. Comme les cartes aléatoires ont tendance à être très similaires, il est recommandé de choisir la valeur la plus basse dans la comparaison bidirectionnelle (similarités minimales) (Figure 112).

Les similarités ont été calculées pour chaque modèle à l'aide d'une carte d'occupation du sol utilisée pour le calibrage et d'une carte non utilisée pour le calibrage. Ainsi, le modèle calibré avec les données 2004-2007 a été validé avec les cartes 2007 et 2010, tandis que le modèle 2010-2013 a été validé avec les cartes observées 2013 et 2015 (Figure 116). Finalement, les similitudes à résolution multiple des cartes simulées ont ensuite été évaluées en les comparant à un modèle nul (*null model*).

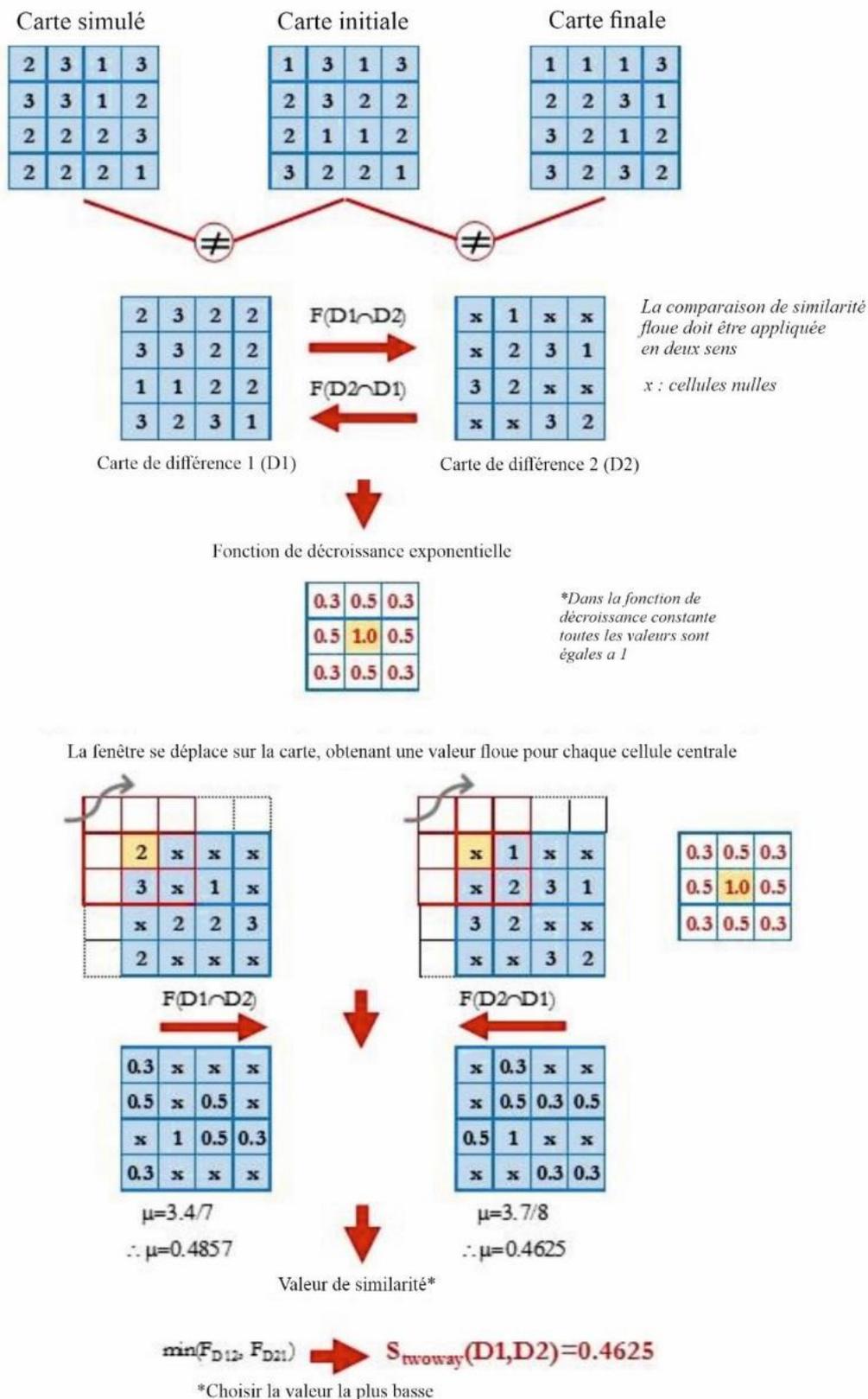


Figure 112. Schéma de la méthode d'ajustement à résolution multiple. Basée sur (Soares-Filho, Rodrigues, et Costa 2009).

1.4. Scénarios exploratoires et d'anticipation

Scénarios exploratoires *Ep* et *Ea* : un scénario exploratoire est une séquence d'événements émergents (Alcamo 2001). Dans le cas présent, les scénarios exploratoires répètent les taux de transition globaux annuels moyens observés dans la période passée jusqu'en 2030. Les scénarios exploratoires sont basés sur des taux de transition globaux dans la municipalité à différentes périodes. Le premier scénario exploratoire (*Ep*) est basé sur les taux global de transition et les probabilités locales de la phase P1 (Table 27), une période de forte déforestation. Le second scénario (*Ea*) sur les taux de la phase P2 (Table 27), une période de déforestation réduite et d'importante expansion des cultures de grains et des plantations d'arbres à bois.

Scénarios anticipation *ZD* et *ZDi* : un scénario d'anticipation commence par une vision prescriptive de l'avenir (Alcamo, 2001). Dans l'Accord de Paris (MMA 2015), le gouvernement brésilien s'est engagé à réduire la déforestation illégale ⁶⁹ à zéro d'ici 2030. Cette situation a été atteinte à Paragominas après le programme *Município Verde*, cependant, nous avons cherché à aller plus loin et deux scénarios d'anticipation ont été conçus pour évaluer l'impact de la déforestation zéro des forêts primaires et secondaires sur le paysage.

Dans le scénario de zéro déforestation (*ZD*), les taux de la phase P2 de transitions des forêts primaires et secondaires vers d'autres classes d'occupation du sol ont été progressivement réduits à chaque étape de la simulation⁷⁰ jusqu'à ce qu'ils atteignent un taux zéro en 2030 (Table 29). Dans le scénario de zéro déforestation avec intensification (*ZDi*), il a été supposé qu'avec la limitation de la déforestation (c'est-à-dire la conversion des forêts en pâturages) et l'expansion des cultures commerciales de grains, les surfaces de pâturage existantes seraient gérées plus strictement et seraient aussi moins enclines à la régénération forestière.

En ce sens, à chaque étape de simulation du scénario *ZDi*, la surface représentant la réduction de déforestation a été transformée en une réduction équivalente de la régénération forestière sur les pâturages (Figure 113, flèches *a* et *b*). De même, la réduction de la transformation des forêts primaires et secondaires en terres agricoles

⁶⁹ Selon le Code Forestier, à Paragominas seules les propriétés ayant plus de 80% de forêt primaire peuvent entreprendre une déforestation légale. Ceux dont les forêts primaires et secondaires représentent plus de 50%, l'autorisation de coupes forestières secondaires est possible.

⁷⁰ La simulation des scénarios *ZD* et *ZDi* ont été simulés avec des pas de temps de trois ans.

s'est traduite par une augmentation équivalente des transitions des pâturages en terres agricoles (Figure 113, flèches *c* et *d*). Ce dernier processus pourrait réduire encore davantage le taux d'émergence de nouvelles forêts secondaires dans les pâturages (Figure 113, flèche *e*).

Table 29. Taux de transition avec des valeurs décroissantes pour les transitions relatives à la déforestation (en gras), utilisés dans le scénario *ZD*.

Transitions		Taux de transition à intervalles de temps (années)				
De	Vers	2015-18	2018-21	2021-24	2024-27	2027-30
Forêt primaire	Cultures de grains	0,00092	0,00069	0,00046	0,00023	0,00000
Forêt primaire	Pâturage	0,00451	0,00338	0,00226	0,00113	0,00000
Forêt primaire	Plantation d'arbres	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008
Cultures de grains	Pâturage	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865
Cultures de grains	Plantation d'arbres	0,00157	0,00157	0,00157	0,00157	0,00157
Pâturage	Cultures de grains	0,03096	0,03096	0,03096	0,03096	0,03096
Pâturage	Forêt secondaire	0,07921	0,07921	0,07921	0,07921	0,07921
Pâturage	Plantation d'arbres	0,00968	0,00968	0,00968	0,00968	0,00968
Forêt secondaire	Cultures de grains	0,01158	0,00869	0,00579	0,00290	0,00000
Forêt secondaire	Pâturage	0,05907	0,04430	0,02954	0,01477	0,00000
Forêt secondaire	Plantation d'arbres	0,00234	0,00234	0,00234	0,00234	0,00234

Table 30. Taux de transition avec des valeurs décroissantes pour les transitions relatives à la déforestation et compensation sur la régénération forestière et sur l'expansion des cultures de grains (en gras), utilisés dans le scénario *ZDi*.

Transitions		Taux de transition à intervalles de temps (années)				
De	Vers	2015-18	2018-21	2021-24	2024-27	2027-30
Forêt primaire	Cultures de grains	0,00092	0,00069	0,00046	0,00023	0,00000
Forêt primaire	Pâturage	0,00451	0,00338	0,00226	0,00113	0,00000
Forêt primaire	Plantation d'arbres	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008
Cultures de grains	Pâturage	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865
Cultures de grains	Plantation d'arbres	0,00157	0,00157	0,00157	0,00157	0,00157
Pâturage	Cultures de grains	0,03221	0,03345	0,03470	0,03594	0,03719
Pâturage	Forêt secondaire	0,07173	0,06425	0,05677	0,04928	0,04180
Pâturage	Plantation d'arbres	0,00968	0,00968	0,00968	0,00968	0,00968
Forêt secondaire	Cultures de grains	0,01158	0,00869	0,00579	0,00290	0,00000
Forêt secondaire	Pâturage	0,05907	0,04430	0,02954	0,01477	0,00000
Forêt secondaire	Plantation d'arbres	0,00234	0,00234	0,00234	0,00234	0,00234

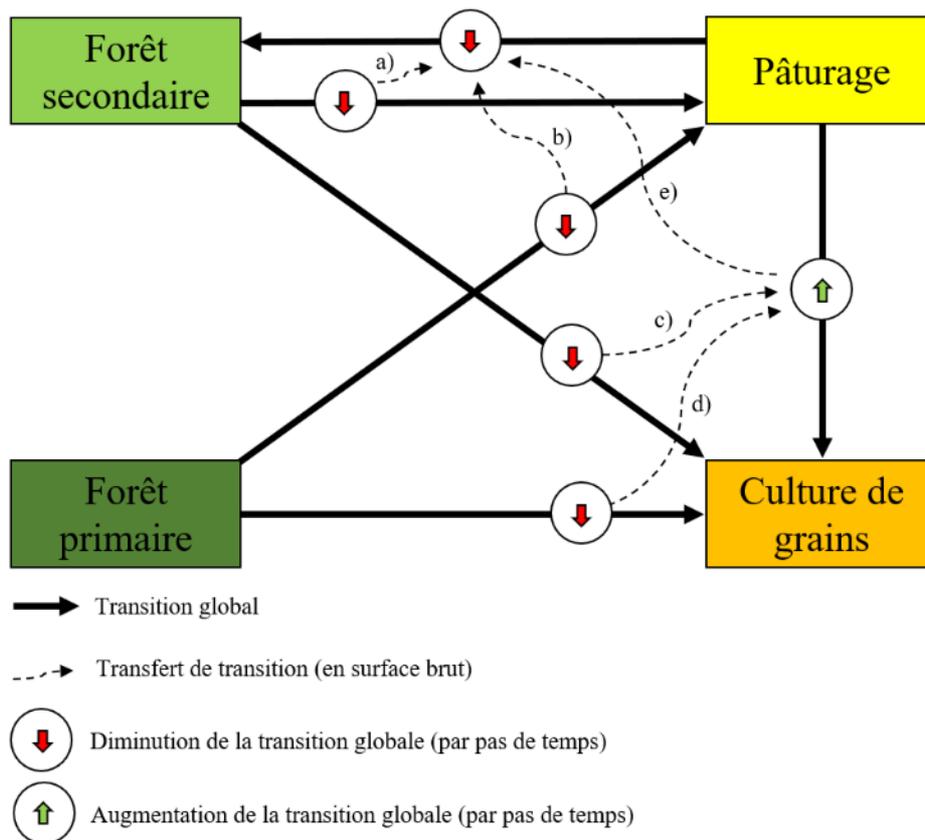


Figure 113. Représentation du transfert en superficie équivalente en fonction de la réduction forcée de la déforestation pour l'expansion des cultures de grains et la régénération forestière sur les pâturages (scenario ZD).

2. Résultats

2.1. Déterminants spatiaux des changements d'occupation du sol à Paragominas

Pour analyser la pertinence des déterminants spatiaux dans la dynamique de l'occupation du sol, nous avons utilisé les Poids d'Évidence positifs (W^+) des variables spatiales des principales transitions observées à chaque phase P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013).

Facteur distance aux routes et aux villages : la transition forêt primaire - pâturage est plus probable à proximité des routes principales, cette probabilité était plus importante durant la phase P1 que durant la phase P2 (Figure 114 (b)). Elle est également plus probable à proximité des routes secondaires jusqu'à un seuil de 875 à 1 000 m pour les deux phases. La transition pâturage vers forêt secondaire n'est pas influencée par

la distance aux routes principales ou secondaires. La proximité des villages ruraux (moins de 1000 m) favorise la déforestation pour le pâturage et s'oppose à la régénération en forêt secondaire, en particulier dans la phase P1 (Figure 114 (c)), ceci s'explique par le fait que les pâturages à proximité des villages sont plus facilement entretenus et surveillés.

La transition des pâturages en cultures de grains n'est pas sensible à la distance aux routes secondaires. Elle était nettement sensible à la distance aux routes principales lors de la phase P1, mais ce facteur s'atténue lors de la phase P2 semblant indiquer une expansion des terres à cultiver par saturation des zones proches des routes principales.

La transition des pâturages en plantations d'arbres à bois n'est pas sensible à la distance aux routes secondaires, elle l'est à la distance aux routes principales bien que là aussi les espaces éloignés soient plus favorables à cette transition qu'auparavant. A l'opposé, à proximité des villages ruraux il y a moins de probabilité de mise en culture ou de reboisement en espèces à bois, vraisemblablement parce que la proximité des villages est utilisée par l'agriculture familiale.

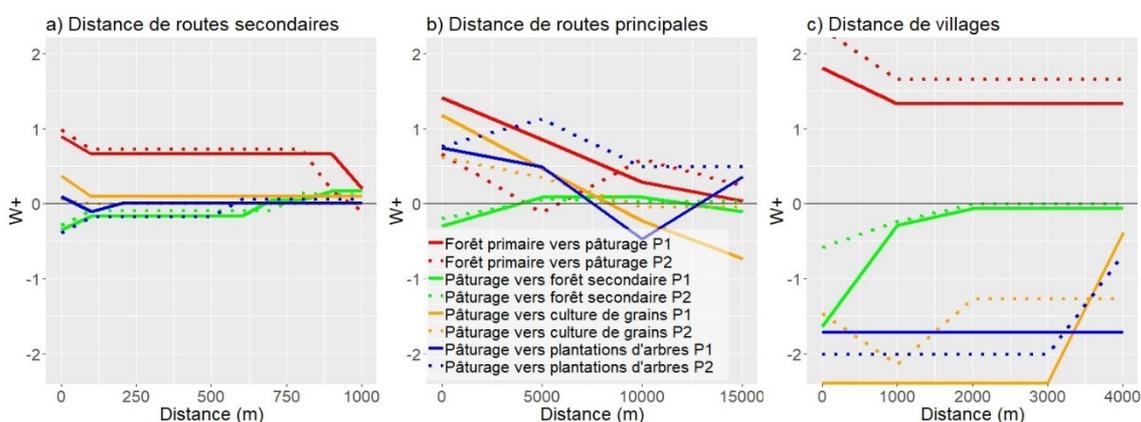


Figure 114. Valeurs de W^+ en fonction des variables distance par rapport aux routes principales et secondaires et aux villages ruraux pour les principales transitions d'occupation du sol dans les phases P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013).

Facteur taille d'exploitation : pour la transition forêt primaire – pâturages, le poids des petites exploitations agricoles (< 84 ha) augmente en passant de la phase P1 à la phase P2 (Table 31), avec des valeurs de Poids d'Évidence élevées, montrant un important déboisement dans cette classe de taille d'exploitation. La régénération en forêt secondaire est plus importante dans les petites propriétés et elle augmente nettement entre les deux phases, alors que la régénération forestière est peu probable dans les grandes propriétés. Seules les exploitations moyennes à grandes (84 à 831 ha) sont favorables à la transition des pâturages en cultures de grains, tandis que les

petites exploitations sont au contraire un frein à cette transition (Table 31). De même, les petites exploitations s'opposent nettement à la transition des pâturages en plantations d'arbres à bois, et ceci se renforce entre les deux phases, tandis que les très grandes exploitations y sont légèrement favorables.

Table 31. Poids d'Évidence (W^+) pour la taille des exploitations agricoles dans la municipalité de Paragominas pendant les phases P1 (2004-2007) et P2 (2010-2013).

Phase	Taille de l'exploitation (ha)*	W^+			
		Forêt primaire vers pâturage	Pâturage vers forêt secondaire	Pâturage vers agriculture commerciale	Pâturage vers plantation d'arbres
P1	0-39	1.6780	0.1902	-0.4429	-0.3411
	39-84	1.6780	0.1619	-0.4828	-12.3607
	84-831	1.1153	0.0445	0.9038	-1.3326
	>831	-0.2479	-0.0161	-0.2789	0.1529
P2	0-39	2.6501	0.4809	-1.3429	-13.9987
	39-84	2.8991	0.3428	-0.9738	-14.8210
	84-831	1.2622	0.1552	0.5891	-1.0993
	>831	-0.4406	-0.0667	-0.1006	0.1760

* Classes de taille des exploitations définies par quartiles de taille des exploitations dans la municipalité de Paragominas.

Facteur sol : durant les deux phases, seul le sol sableux montre une légère influence sur la transition forêt primaire - pâturage, alors que les autres textures de sol ont des valeurs très proches de zéro, c'est-à-dire des classes qui ont peu d'influence sur la déforestation (Table 32).

Table 32. Poids d'Évidence (W^+) pour la texture du sol dans la municipalité de Paragominas pendant les phases P1 (2004-2007) et P2 (2010-2013).

Phase	Texture	W^+			
		Forêt primaire vers pâturage	Pâturage vers forêt secondaire	Pâturage vers cultures de grains	Pâturage vers plantation d'arbres
P1	Sable	0.3436	-0.0899	-2.0449	-0.5062
	Argile tachetée	0.1253	-0.0540	-0.2677	0.8264
	Cuirasse ferrugineuse	-0.0722	0.0532	0.6821	0.8964
	Argile de Belterra	-0.3431	0.3227	1.4730	-0.3473
P2	Sable	0.3628	-0.2033	-2.0023	-0.3838
	Argile tachetée	-0.1859	-0.1015	-0.3518	0.6865
	Cuirasse ferrugineuse	-0.0967	0.1837	0.6274	0.3295
	Argile de Belterra	-0.2092	0.6661	1.6715	0.3059

La régénération en forêt secondaire n'a pas de relation significative avec la texture du sol dans la phase P1, mais dans la phase P2, elle est plus présente dans l'argile de Belterra. La transition des pâturages en cultures de grains est plus probable dans l'argile de Belterra avec une valeur W^+ qui atteint 1,47 dans la phase P1 et 1,67 dans la phase P2 (Table 32). La transition des pâturages en plantations d'arbres à bois est plus probable pour les sols d'argile tachetée et de cuirasse ferrugineuse dans la phase P1, dans la phase P2, l'argile de Belterra s'y ajoute (Table 32).

Facteur pente : les zones à forte pente sont principalement liées à la régénération forestière dans la phase P2, où elle est plus fréquente. En revanche, la plantation d'arbres à bois est très rare dans les zones à forte pente dans la phase P2. Les cultures de grains ont un poids positif sur les pentes faibles dans les deux phases, tandis que la déforestation n'a aucun rapport avec la pente (Figure 115 (b)).

Facteur distance des pâturages : le comportement de la déforestation par rapport à la distance des pâturages présente aussi un changement de comportement. Dans la phase P2 le poids positif va jusqu'à des zones légèrement moins éloignées des pâturages existants par rapport à la phase P1. Cela peut indiquer que la déforestation plus récente est davantage liée à l'expansion latérale progressive des pâturages existants, tandis que la déforestation au milieu de la forêt diminue avec le temps (Figure 115 (a)).

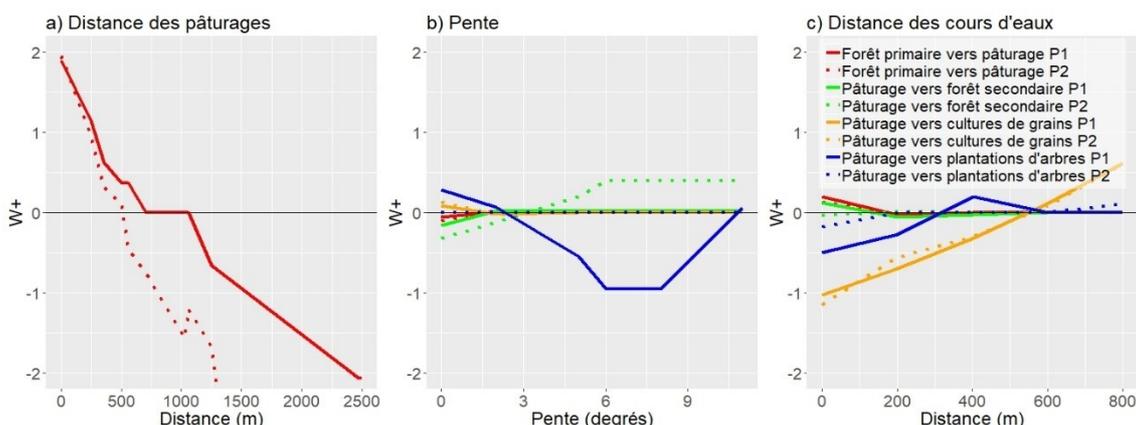


Figure 115. Valeurs de W^+ en fonction des variables distance aux pâturages, pente et distance aux rivières principales pour les principales transitions de l'occupation du sol dans les phases P1 (t0, 2004 ; t1, 2007) et P2 (t0, 2010 ; t1, 2013).

Facteur distance des cours d'eau : en ce qui concerne la distance par rapport aux cours d'eau principaux (pérennes), les transitions qui varient le plus sont celles des pâturages pour les cultures de grains et des pâturages pour les plantations d'arbres. Les deux transitions présentent des poids négatifs dans les zones les plus proches des

cours d'eau. En ce qui concerne l'agriculture, cette relation est proche de la topographie, puisque les plateaux où se trouvent la plupart de ces cultures sont relativement éloignés des cours d'eau. Pour les plantations d'arbres, les zones proches des cours d'eau peuvent comporter des contraintes telles que des sols saturés d'eau et difficiles à mécaniser, et les Aires de Préservation Permanente. La déforestation a un poids positif discret dans les zones proches des cours d'eau, ce qui peut être en partie lié à la déforestation des petits exploitants familiaux au fond des vallées. Il en va également pour la régénération des forêts secondaires (Figure 115 (c)).

2.2. Calibrage des fonctions *patcher* et *expand*

Après plusieurs essais de calibrage, les meilleures configurations spatiales ont révélé que la fonction *expand* était responsable de 70 % des transitions forêt primaire - pâturage, avec une superficie moyenne de 200 ha, et de 50 % de la transition pâturage - cultures de grains, avec une superficie moyenne de 50 ha (Table 33).

Table 33. Paramètres de calibrage final des fonctions *patcher* et *expand*.

Transitions	Transitions par expansion	Paramètres d'expansion des patches			Paramètres de génération de patches		
	%	MPS	PSV	PI	MPS	PSV	PI
Forêt primaire vers pâturage	70	200	1000	1.1	200	1000	1.1
Pâturage vers cultures de grains	50	50	100	1.5	50	100	1.5
Pâturage vers forêt secondaire	10	80	1000	1	80	1000	1
Pâturage vers plantation d'arbres	50	900	50	1.5	900	50	1.5

MPS, taille moyenne des patches (ha) ; PSV, variance de la taille des patches ; PI, Isométrie des patches.

2.3. Les résultats cartographiques de la modélisation et validation

Chaque résultat du modèle basé sur les phases de formation P1 et P2 (Figure 117) a été évaluée en les comparant aux cartes d'occupation du sol observées (Figure 118). Le modèle de la phase P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) a été utilisé pour simuler une carte de d'occupation du sol par année de 2004 jusqu'à 2010, et a été validé avec les cartes observées de 2007 et 2010. Il en a été de même pour le modèle basé sur la phase P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013), avec une simulation réalisée de 2010 jusqu'à 2015 et validée avec les cartes observées de 2013 et 2015 (Figure 116).

Carte LULC	Année	Phases	Entrainement	Intervalle de simulation	Dates de validation
MODIS	2004	P1	t0	P1	
	2005				
	2006				
MODIS	2007		t1		valid P1
	2008				
MODIS	2009	P2	t0		valid P1
	2010				
	2011				
MODIS	2012		t1	P2	valid P2
	2013				
MODIS	2014				
	2015				valid P2

Figure 116. Phases de la dynamique d'occupation du sol à Paragominas et dates utilisées pour l'entraînement, simulation et validation des modèles.

Les cartes simulées en 2007 et 2015 montrent les meilleures performances spatiales. La similitude de la simulation de 2015 est meilleure que dans le modèle nul de 2015, ce qui indique que les variables utilisées représentent un gain d'information par rapport à une distribution aléatoire.

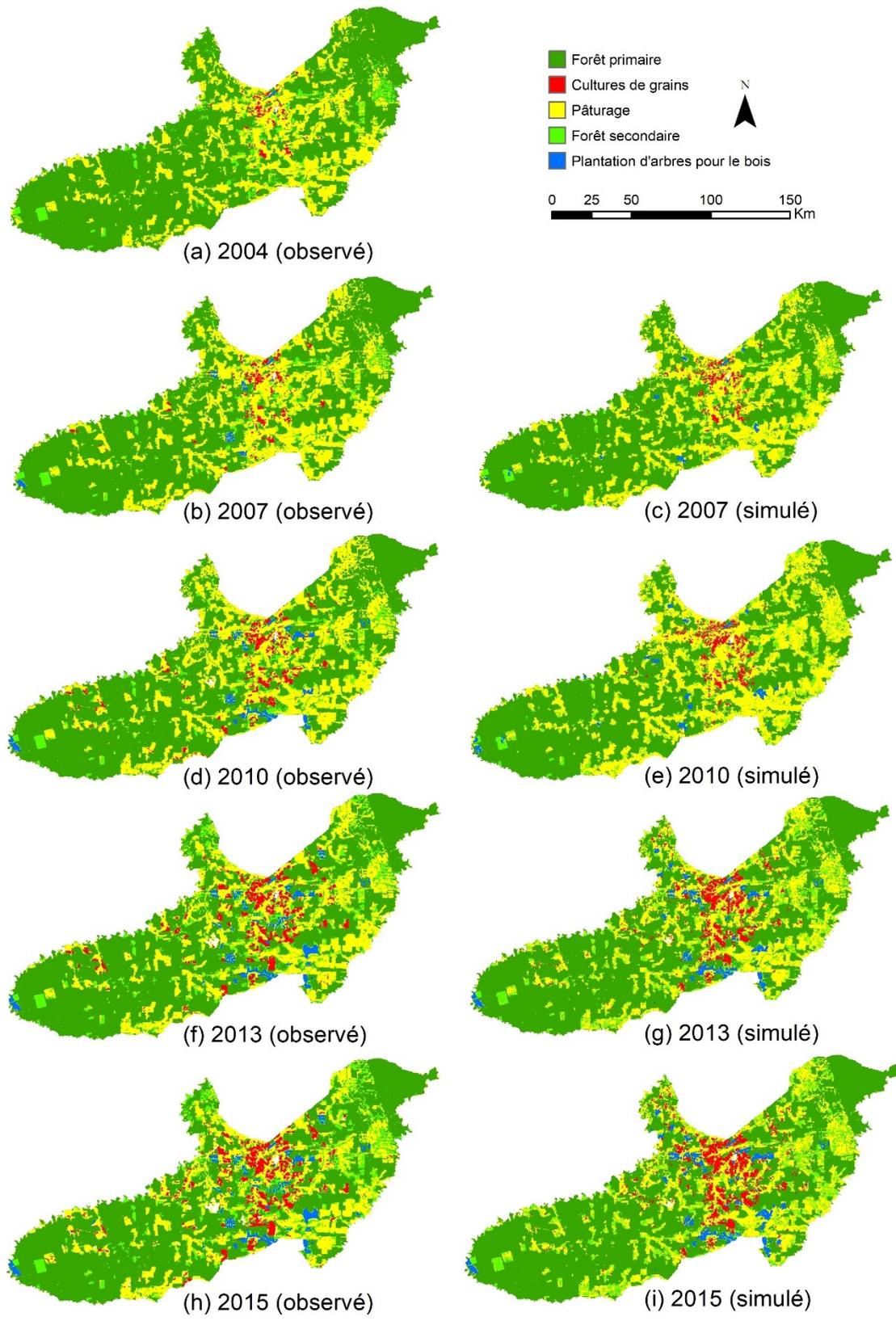


Figure 117. Prédications pour les années 2007, 2010 (calibrées avec la phase P1) et 2013, 2015 (calibrées avec la phase P2).

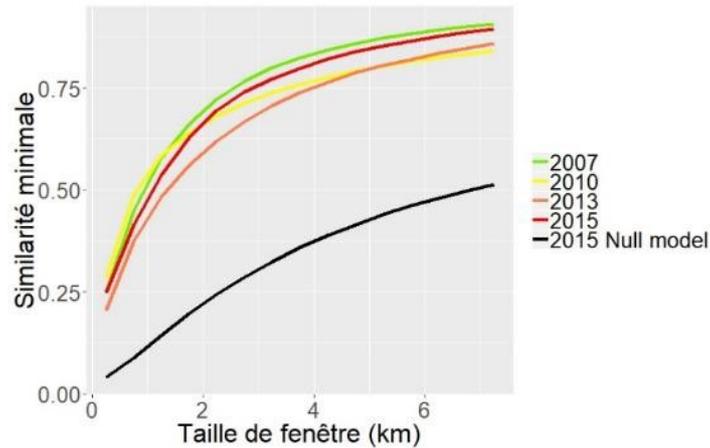


Figure 118. Valeurs minimales de similarité floue avec ajustement à résolutions multiples utilisant une fonction de décroissance constante. La phase P1 (2004-2007) est validée avec 2007 et 2010 et la phase P2 (2010-2013) avec 2013 et 2015.

2.4. Simulation de scénarios futurs

L'utilisation des taux de transition 2004-2007 (Table 27) dans le scénario *Ep* conduit à une réduction de 42,91 % du couvert de forêt primaire jusqu'en 2030 (-4.817 km²) par rapport à 2015 (Figure 119 (a)). Ce scénario se traduit par une déforestation considérablement plus importante que les autres scénarios (*Ea*, -10,41%, -1.168 km² ; *ZD* et *ZDi*, -4,09%, -459 km²). Alors que dans le scénario *Ep*, les pâturages augmentent de 62,98%, le contrôle de la déforestation dans les scénarios *ZD* et *ZDi* réduit les pâturages de 62,43% et 52,41%, respectivement. En revanche, dans le scénario *Ea*, les taux de transition 2010-2015 entraînent une réduction de 30,98% de l'étendue des pâturages jusqu'en 2030 (Figure 119 (b)). Dans le scénario *Ep*, la forêt secondaire augmente de 29,52 %, tandis que dans le scénario *Ea*, il y a une augmentation de 45,43 % à l'horizon 2030. Dans le scénario *ZD*, la simulation prévoit une augmentation marquée (108,71 %) de la forêt secondaire, alors que dans l'hypothèse d'une réduction de la régénération forestière dans le scénario *ZDi*, cette augmentation est un peu moins forte, égale à 74,58 % (Figure 119 (c)). En ce qui concerne l'expansion de cultures de grains, dans le scénario *Ep*, la simulation se traduit par une expansion de 963 km² (95,14%). Dans le scénario *Ea*, les cultures de grains affichent le taux d'expansion le plus élevé (1 049 km² ou 103,6 %). Dans les scénarios *ZD* et *ZDi*, l'augmentation atteint 56,73 % et 75,37 %, respectivement. La plantation d'arbres augmente de façon similaire dans tous les scénarios (*Ep*, 105,24% ; *Ea*, 140,49% ; *ZD*, 129,92% ; *ZDi*, 154,52%) (Figure 119 (e)).

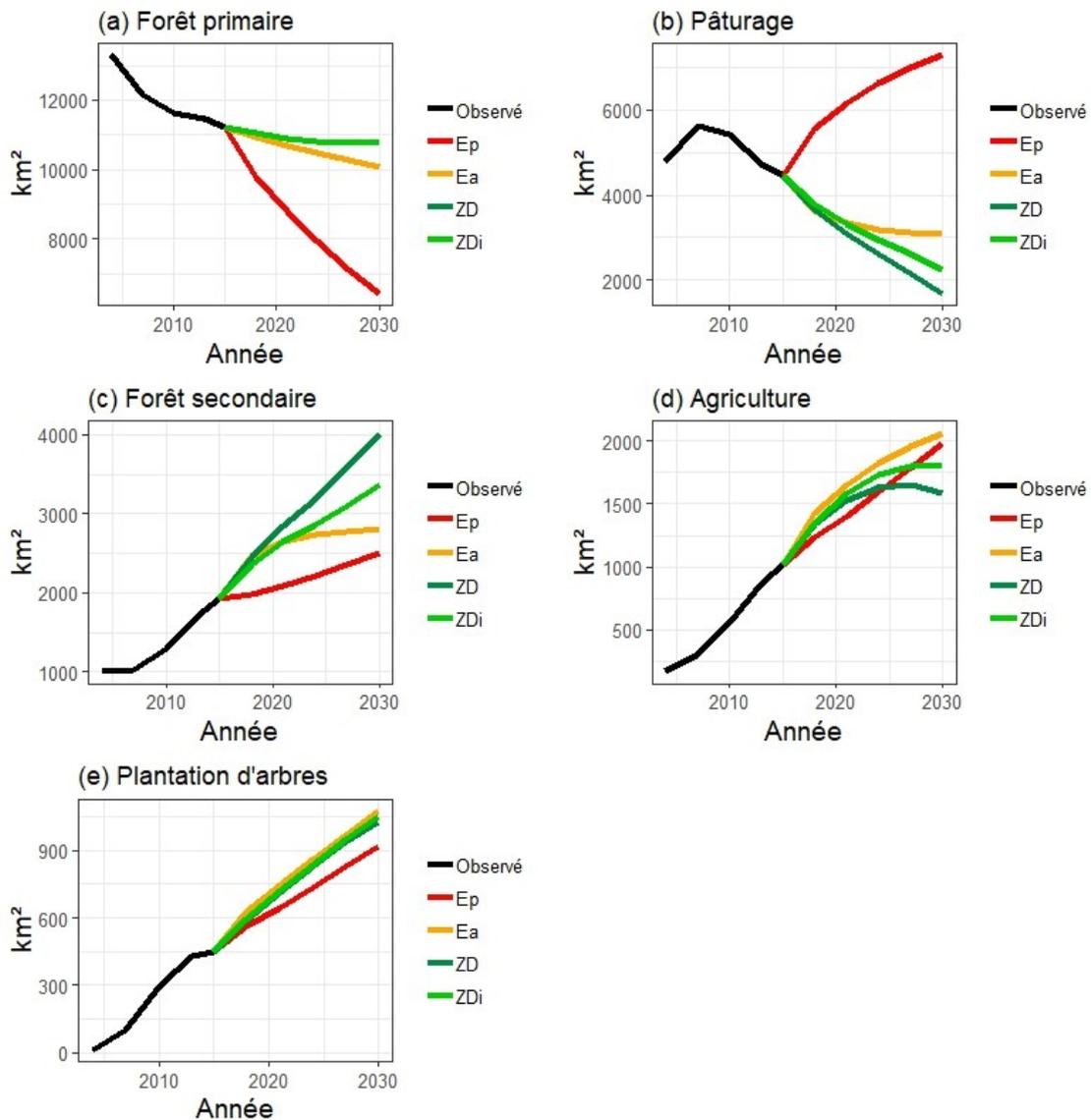


Figure 119. Valeurs simulées des superficies de classes de d'occupation du sol dans les scénarios exploratoires Ep et Ea, et dans les scénarios anticipatifs ZD et ZDi.

3. Discussion

Nos résultats ont révélé certains déterminants spatiaux liés aux changements d'occupation du sol dans la période d'étude à Paragominas et nous ont permis d'explorer des scénarios paysagers futurs. Tout d'abord, il est largement reconnu que la déforestation et le développement des réseaux routiers est un processus qui évolue en tandem (Arima, Walker, & Perz, 2015), mais à Paragominas, si l'importance de la proximité des routes secondaires (non asphaltées) reste à peu près la même pendant la transition agricole analysée, il y a une augmentation du poids dans les zones les plus éloignées des routes principales dans la phase P2. Cela pourrait s'expliquer par la

corrélation inverse entre la distance des routes principales et la taille des exploitations : les terres situées à proximité des routes asphaltées appartiennent généralement à de grandes exploitations qui, après 2007, commencent à réduire la déforestation. Un réseau bien établi de routes secondaires non asphaltées mais bien entretenues contribue également à ce que la distance par rapport aux routes principales ne soit plus un facteur déterminant pour la déforestation, comme l'ont déjà signalé Maeda et al. (2011).

En outre, la conversion des forêts primaires a augmenté dans les petites propriétés après 2007 dans la phase P2, conformément à la faible efficacité des politiques de réduction de la déforestation dans les projets de réforme agraire, également observée dans plusieurs autres endroits en Amazonie (Godar et al. 2014; Yanai et al. 2017). Au-delà du déboisement, la régénération des forêts est aussi un processus fréquent dans les petites exploitations, où prédominent l'agriculture sur brûlis et l'élevage. Les cultures de grains à large échelle (soja principalement), commencées vers 2000, se sont développées rapidement dans le centre de la municipalité, en particulier dans les zones situées jusqu'à 10 km des routes principales, et se sont progressivement étendues à des zones plus éloignées avec le temps (Figure 114). Les entretiens sur terrain (Chapitre 4) ont confirmé que les cultures de grains nécessitent la proximité de routes asphaltées ou non asphaltées mais en bon état pour permettre l'accès à des machines, notamment en saison des pluies qui est la période de culture, sinon le coût des opérations augmente.

Le Poids d'Évidence de la transition pâturage vers les cultures de grains montre que les exploitations moyennes prédominent sur les grandes dans la production grains, comme déjà observé dans d'autres régions du Brésil (Empinotti 2015; Zanon et al. 2010). Cela suggère que l'expansion de la culture du soja pourrait entraîner la division des très grandes exploitations, liée à une intensification où les coûts de production par surface sont plus élevés, à l'instar du processus de fragmentation observé dans les exploitations d'élevage en l'Amazonie (Pacheco et Pocard-Chapuis 2012). Toutefois, des données sur l'évolution foncière sont nécessaires pour confirmer cela. La location de terres, en particulier auprès d'exploitations appartenant à des éleveurs, est l'un des mécanismes qui ont permis l'expansion rapide du soja, caractérisé par des investissements à court terme par rapport à l'élevage et par la flexibilité du transport des machines. Un autre facteur crucial pour l'expansion des cultures grains est la pente et les conditions du sol. En 2015, environ 72 % des terres cultivées étaient situées sur les plateaux argileux, même si la disponibilité des zones déboisées

disponibles sur le plateau est beaucoup plus faible qu'au fond des vallées. Ces sols argileux du plateau (argile de Belterra) sont moins sujets au lessivage et ont une capacité d'échange cationique plus élevée que les sols sableux du fond des vallées (Rodrigues et al. 2003).

De plus, la topographie plane et la faible densité des cours d'eau sur les plateaux favorisent l'établissement de grandes parcelles mécanisables en continu, certaines pouvant atteindre plusieurs kilomètres, ce qui réduit les coûts de production. Dans une étude de la frontière agricole amazonienne au nord-est de l'État du Mato Grosso, menée à une échelle spatiale similaire, un lien a également été établi entre l'expansion des terres cultivées et la qualité du sol (Maeda et al. 2011), montrant que le potentiel agricole de la terre joue un rôle important dans la répartition spatiale des cultures de soja en Amazonie et sur d'autres fronts agricoles brésiliens, comme dans la région de la « Chapada dos Parecis » dans l'état du Mato Grosso et la région du MATOPIBA (frontière agricole entre le Maranhão, Tocantins, Piauí et Bahia) (Dubreuil, Bariou, Passos, Ferrand, & Nedelec, 2005; Rufo, 2013)

Cependant, l'expansion des cultures de grains sur les plateaux est maintenant limitée par des forêts primaires dans ce domaine topographique. En effet, jusqu'en 2000, la déforestation s'est principalement produite dans les vallées avec la mise en place de pâturages extensifs pour le bétail et la proximité des rivières pour abreuver les animaux (Piketty et al., 2015), comme cela a déjà été décrit dans le Chapitre 4. En 2004, environ 83% des pâturages de Paragominas étaient situés dans des vallées. Lorsque les cultures de grains ont commencé, la déforestation s'est intensifiée sur les plateaux argileux (Piketty et al., 2015). Mais à partir de 2008, avec le programme *Município Verde*, la déforestation a diminué dans la municipalité et la majeure partie de l'expansion des terres cultivées a été limitée aux zones déjà déboisées, ce qui a entraîné une concurrence intense entre l'élevage extensif du bétail et les cultures de grains, notamment dans les propriétés situées près des routes asphaltées. Il n'en va pas de même pour les plantations d'arbres qui, en raison de la moindre exigence de cette culture par rapport à la qualité du sol, peuvent occuper des surfaces moins intéressantes pour les cultures de grains. Enfin, les zones déboisées mais de moindre valeur pour les cultures de grains peuvent être dominées par la forêt secondaire. Certaines zones sont plus touchées que d'autres : les fortes pentes ne peuvent pas être mécanisées et sont souvent abandonnées, en particulier dans les fermes qui sont récemment passées de l'élevage extensif à la culture du soja.

Compte tenu les conditions antérieures à 2008 telles qu'elles sont présentées dans le

scénario exploratoire *Ep*, à savoir un taux élevé de déforestation, une faible conformité environnementale et une prédominance de l'activité d'élevage, le total des surfaces déboisées et transformées atteint environ 12.671 km², soit 66,4% de la surface totale de la municipalité en 2030, contre 41,10% en 2015. Parallèlement, la déforestation permise sur les plateaux fertiles favorise l'expansion des terres cultivées (Figure 120 (a)).

Dans le scénario exploratoire *Ea*, la déforestation projetée est inférieure à celle d'*Ep* (9.022 km² en 2030), mais en raison du taux d'expansion plus élevé des cultures de grains, le soja exploite toutes les zones d'expansion possibles près des routes asphaltées et sur les plateaux argileux (Figure 120 (b)), tandis que les plantations d'arbres s'étendent simultanément sur les sols pauvres.

Les données récentes de PRODES (INPE 2018b) montrent qu'à partir de 2015, la déforestation en Amazonie est à nouveau en augmentation. Comme vérifié à Paragominas et d'autres parties de l'Amazonie (Godar et al. 2014), une grande partie de la déforestation post-2007-08 se produit sur de petites exploitations. L'élection du nouveau président brésilien, qui est en faveur d'un moindre contrôle agricole et environnemental (Walker 2019), donne un signal d'affaiblissement de la politique de conservation de l'environnement en Amazonie, et une reprise de la déforestation par les grands producteurs ne peut être exclue. Ceci n'est cependant pas observé jusqu'à présent (2019) à Paragominas. Ce qui pourrait s'expliquer par l'engagement des producteurs dans le Programme Municipalité Verte.

Dans les scénarios de conservation forestière (*ZD* et *ZDi*), qui simulent une déforestation nulle (forêt primaire et secondaire inclus) à l'horizon 2030, la superficie déboisée se stabilise à environ 8.345 km², soit 43,7% de la superficie totale de la commune. En même temps, il y a une réduction marquée des pâturages et une expansion de la forêt secondaire. Dans le scénario *ZDi*, qui suppose un processus accru d'intensification agricole, 16,3 % de la superficie qui serait convertie en régénération forestière (selon les taux de 2010-2013) reste en pâturages, ou est convertie en terre agricole ou en plantations d'arbres à bois.

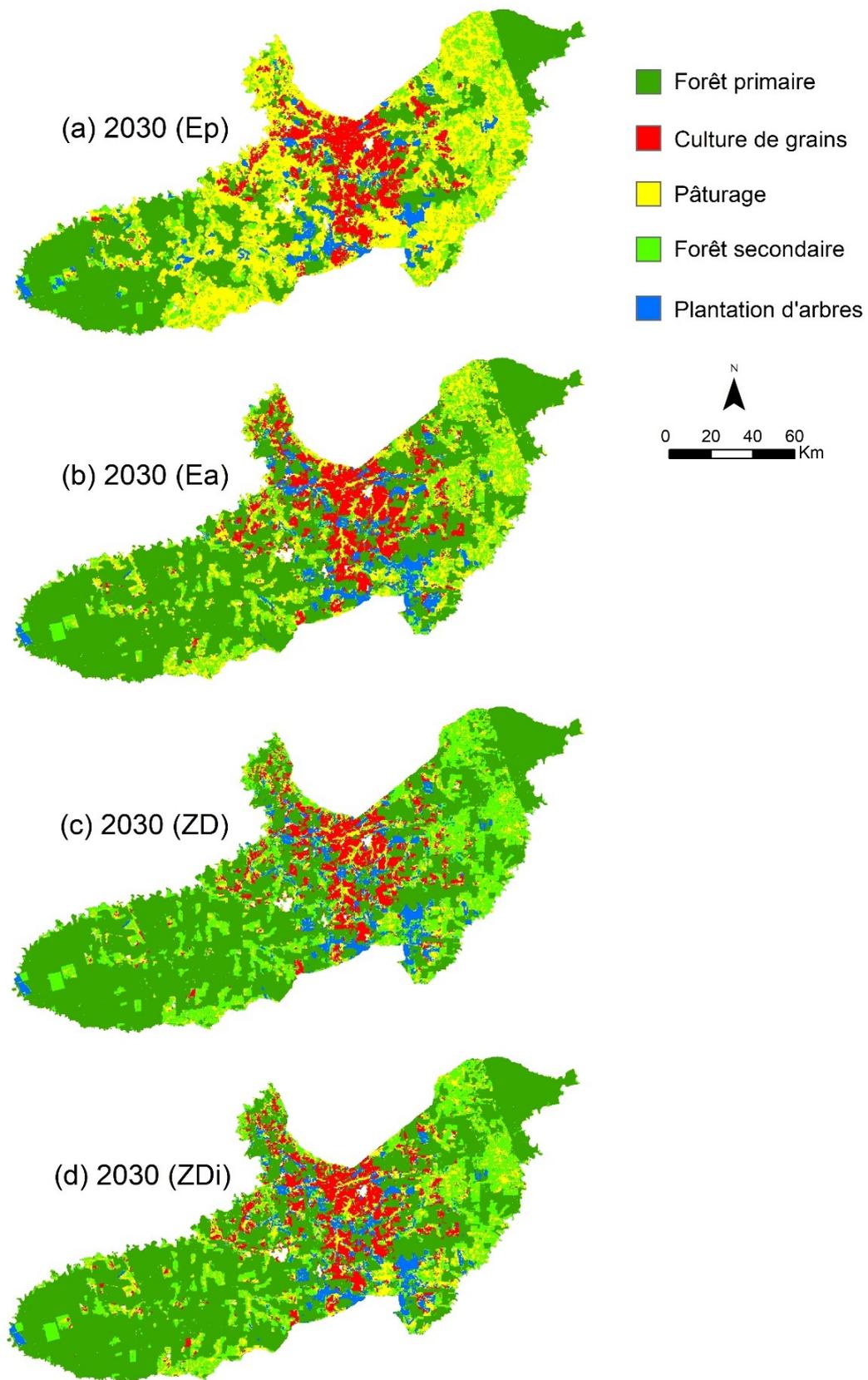


Figure 120. Simulations de scénarios à l'horizon 2030 dans la municipalité de Paragominas (cartes en plus grande taille dans l'appendice).

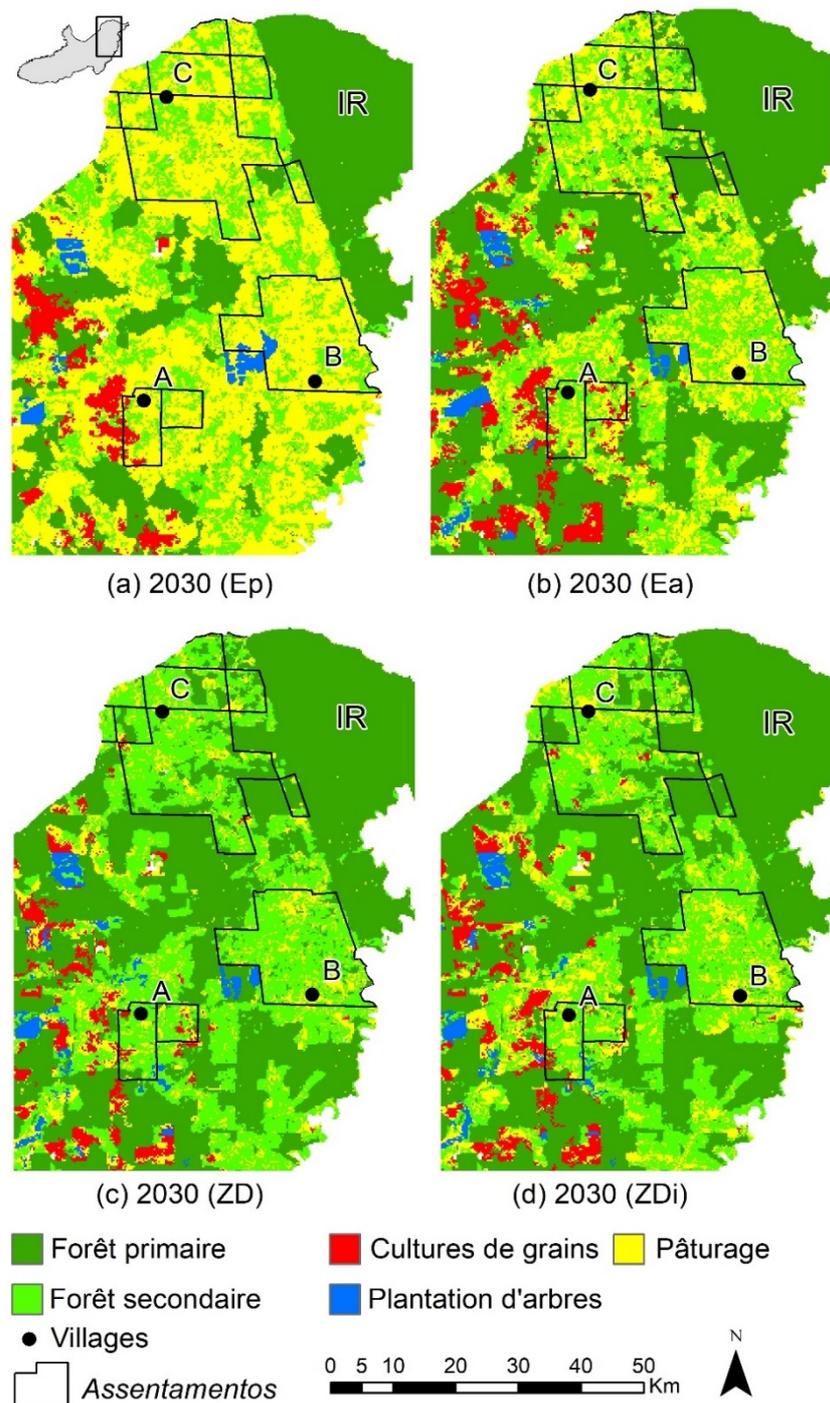


Figure 121. Simulation de scénarios à l'horizon 2030 dans la partie orientale de la municipalité de Paragominas. Villages ruraux A (Água Suja) ; B (CAIP) et C (Paragonorte). IR (réserve indigène).

Ainsi, dans ce cas, on peut supposer un paysage plus sectorisé, avec plus de zones boisées loin des routes asphaltées, et une utilisation intensive des terres dans des endroits plus proches des routes, avec des terres agricoles sur les plateaux et des plantations d'arbres et de l'élevage plus intensif dans les vallées. Parce que la culture des eucalyptus est moins exigeante en ce qui concerne le potentiel agricole de la terre, on s'attend à ce qu'elle puisse tirer parti des zones de pâturage disponibles dans les

vallées. Dans les scénarios de conservation *ZD* et *ZDj*, la limitation de la déforestation et des bonnes conditions du marché de commodities agricoles nous amène à considérer certains processus possibles qui ne sont pas inclus dans les simulations. Tout d'abord, la rareté des parcelles déboisées sur les plateaux fertiles peut conduire à l'expansion des terres cultivées vers certaines zones mécanisables en dehors des plateaux, comme cela a déjà été observé sur certaines exploitations situées à proximité de routes asphaltées (Chapitre 4).

Deuxièmement, en réponse à une politique de contrôle environnemental local forte, certains auteurs ont observé un processus de « transfert » de déforestation vers des zones où le contrôle est plus faible (Arima, Richards, Walker, & Caldas, 2011; Meyfroidt, Lambin, Erb, & Hertel, 2013 et Oliveira et al., 2007). Bien qu'aucune étude ne traite spécifiquement du transfert de la déforestation due au programme *Município Verde* à Paragominas, cette hypothèse ne peut être exclue.

Certains éléments indiquent que les agriculteurs qui possèdent des exploitations agricoles à Paragominas et dans les municipalités voisines ont cessé de déboiser à Paragominas après le programme *Município Verde* mais ont continué dans les autres municipalités (communication personnelle avec René Pocard-Chapuis). Une analyse rapide des courbes de déforestation dans les municipalités voisines⁷¹ de Paragominas n'a en tous cas pas donné de preuve de transfert de déforestation à la suite de ce programme. Paragominas dispose de divers avantages comparatifs (logistiques, de sécurité, d'accès à divers services etc.) qui ne poussent pas les producteurs de soja ou les éleveurs à aller ailleurs, au contraire.

En revanche, si un contexte de contrôle environnemental fort peut avoir de l'impact sur les grands producteurs qui se sont engagés à réduire la déforestation due au *Município Verde*, il n'en va pas forcément de même pour les petits exploitants agricoles. Il convient de mentionner que ni les politiques fédérales ni les politiques locales n'ont été efficaces pour réduire la déforestation par les petits exploitants (Piketty et al., 2015).

L'interdiction totale de la déforestation des forêts primaires et secondaires si elle était réellement mise en œuvre, en l'absence d'accompagnement vers de nouveaux systèmes plus durables, pourrait profondément affecter les systèmes d'agriculture sur brûlis qui sont principalement réalisées dans les forêts secondaires.

⁷¹ Analyse avec la plateforme MapBiomias (<http://mapbiomas.org/>).

L'expansion des cultures de grains peut également toucher les petits exploitants. Dans tous les scénarios, le soja s'étend jusqu'à ce qu'il atteigne des zones de petits exploitants comme Oriente, Nazaré et Água Suja (Figure 121 e Figure 122). Lapola et al. (2014) et Weinhold, Killick, & Reis (2013) ont déjà souligné le rôle de l'expansion du soja sur les groupes sociaux locaux et la structure foncière. Ce processus s'est déjà produit près des routes principales de Paragominas, où d'anciennes zones de petits exploitants ont été absorbées par la production agricole à grande échelle (e.g. Colônia Reunidas dans la Figure 122).

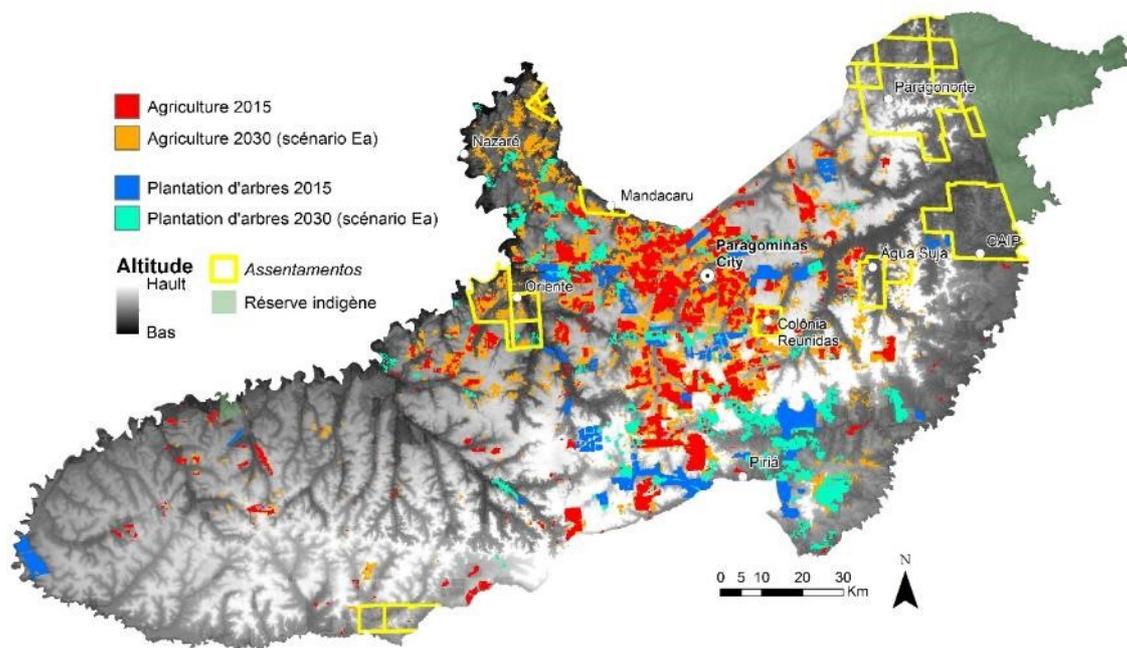


Figure 122. Comparaison entre la distribution des cultures de grains et des plantations d'arbres en 2015 et résultant du scénario exploratoire *Ea* en 2030.

Parmi les limites de cette approche, nous pouvons citer les paramètres supposés pour le scénario *ZDi*, dans lequel une compensation d'intensification équivalente a été considérée. Chaque unité de surface de déforestation évitée a été compensée par une unité de surface de régénération évitée. Cette condition a été supposée simplifier la situation, considérant que la demande de terres (en surface) sera la même, qu'il s'agisse d'espaces issus de la déforestation ou d'un arrêt de la régénération forestière.

Évidemment, les raisons de la déforestation peuvent impliquer non seulement la nécessité d'augmenter la production, mais aussi d'ajouter de la valeur à la terre, pour la spéculation, par exemple. En ce sens, une analyse plus approfondie du comportement des acteurs devrait être faite pour i) tester l'hypothèse de ce processus d'intensification et ii) définir une valeur appropriée pour ce processus dans la simulation. En observant les résultats des deux scénarios de déforestation zéro (*ZD* et

ZDi), nous pouvons observer une domination quasi complète des forêts secondaires dans les anciennes zones de pâturage de Paragominas en 2030⁷². Cette situation peut être peu probable s'il existe encore une économie de l'élevage stable dans la municipalité, ce qui suggère que les développements futurs des scénarios pourraient mieux calibrer la situation de la régénération forestière dans un contexte de déforestation zéro.

4. Conclusion

L'analyse de la dynamique récente d'occupation du sol à Paragominas a révélé que l'application de politiques environnementales locales visant à réduire la déforestation ralentit non seulement la perte des forêts, mais influence également la dynamique spatiale des activités agricoles le long du front pionnier. L'accessibilité continue de jouer un rôle décisif, mais l'organisation de la structure foncière prend de l'importance avec les actions des différents acteurs aux pratiques aussi différentes.

Ainsi, une nouvelle organisation du paysage est en cours. Le type de production, l'extensification, l'intensification ou la diversification peuvent avoir différentes manières de mettre en valeur le potentiel naturel du territoire. Dans un contexte biophysique hétérogène comme Paragominas, il peut en résulter une mosaïque contrastée de valorisation de parcelles : le soja sur les plateaux argileux, tandis que les plantations d'arbres occupent des terres moins fertiles.

Les zones à faible potentiel de mécanisation, ainsi que les zones à forte déclivité et les zones humides, perdent de la valeur et contribuent à l'expansion des forêts secondaires. L'application des taux de changement d'occupation du sol par rapport à la période antérieure au *Município Verde* montre que cela entraînerait la perte de près de la moitié du couvert forestier municipal actuel à l'horizon 2030. Dans un contexte de déforestation zéro, la simulation montre la disparition des pâturages dans le corridor central de la commune en fonction de l'expansion des cultures de grains sur les plateaux et des plantations d'arbres dans les vallées. Cela représente une sectorisation spatiale basée sur l'accès et sur le potentiel agricole des terres.

Ainsi, nos résultats mettent en évidence le rôle des facteurs naturels biophysiques

⁷² Dans le scénario ZDi, pour chaque hectare de déforestation évitée, il y aurait un hectare de régénération forestier évité. Comme le taux de régénération forestier est élevé et la déforestation relativement faible, même avec cette règle, la forêt secondaire continue à augmenter dans ce scénario.

dans la dynamique de l'occupation des sols, en particulier l'expansion du soja, suggérant que les futures politiques publiques de la région « Arc-de-Déforestation » en Amazonie devraient prendre en compte la répartition spatiale de ces déterminants qui jusqu'à présent n'ont pas été suffisamment discutés.

Chapitre 7. Modélisation et spatialisation d'unités de systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques à l'aide de techniques d'apprentissage automatique

Afin de mieux comprendre l'organisation des logiques d'occupation du sol dans l'espace à l'échelle territoriale, nous proposons de cartographier les entités présentant une certaine homogénéité entre facteurs naturels et systèmes agricoles. Malgré la complexité des interactions entre milieu naturel et systèmes agricoles, nous faisons l'hypothèse qu'elles ne sont pas distribuées de façon aléatoire mais qu'elles s'organisent dans l'espace, ce qui devrait permettre une meilleure lecture du territoire, de la distribution spatiale des logiques des producteurs et des problématiques de développement agricole et de conservation de l'environnement (Bellón et al. 2018). L'objet de ce chapitre est de discrétiser l'espace municipal en unités présentant des dynamiques d'occupation du sol similaires selon les logiques dominantes dans les propriétés. Nous nous fondons sur la cartographie des ressources naturelles et des logiques d'utilisation de ces ressources/contraintes par les producteurs en intégrant également d'autres facteurs identifiés dans les chapitres précédents.

L'analyse des données doit permettre de rendre la richesse des données géospatiales compatible avec la discontinuité des données de terrain, un défi qui peut être relevé dans le contexte des techniques d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique. En ce sens, cette section a deux objectifs :

- Évaluer le potentiel de prédiction de caractéristiques des exploitations de la municipalité de Paragominas à partir des données spatiales (occupation du sol, textures des sols, relief, ressources en eau, distances aux routes et villages).
- Regrouper des propriétés similaires en termes de stratégies de production, permettant ainsi de cartographier des ensembles de propriétés ayant des contextes et des défis similaires en matière d'aménagement du territoire (test d'hypothèse 2⁷³)

⁷³ Hypothèse 2 : « Différentes combinaisons de ressources et contraintes biophysiques et de systèmes de décision produisent une mosaïque d'occupations du sol qui peut être divisée en unités homogènes que s'organisent spatialement ».

1. Méthodes

Des techniques d'apprentissage automatique ont été testés pour spatialiser les données de 113 propriétés interrogées sur l'ensemble des 2.114 polygones de propriétés disponibles à Paragominas. A priori, il existe une relation entre les types et les logiques de production agricole, l'occupation du sol et le potentiel agricole des terres (Plassin et al. 2017). En ce sens, nous émettons l'hypothèse qu'il est possible de prédire, à partir des relations des variables spatiales, les logiques dominantes dans les propriétés agricoles en fonction de l'importance des facteurs identifiés précédemment comme déterminants. Compte tenu de la nature des données et des objectifs, une approche exploratoire des données commune au domaine du *data mining*⁷⁴ a été adoptée. L'approche utilisée est la suivante : i) pré-traitement des données, les données manquantes sont complétées ; ii) avec un algorithme de classification, les données des entretiens sont estimées pour toutes les propriétés de la municipalité ; iii) le modèle de données est obtenu avec des algorithmes de partitionnement de données (*clustering*) non supervisé ; iv) un indice est choisi pour évaluer la qualité des modèles ; et v) une analyse géographique des résultats obtenus est effectuée.

1.1. Données utilisées

Limites des exploitations : à Paragominas, plus de 90% de la superficie de la municipalité est enregistrée au CAR. Toutefois, certaines limites peuvent être soulignées, comme le fait que la plupart des petites propriétés n'ont pas été enregistrées et les erreurs topologiques dans les polygones sont nombreuses. Dans ce travail, le CAR a été utilisé à deux fins : a) la localisation des limites des propriétés de Paragominas, considérant que la propriété est l'unité de base, à laquelle toutes les autres variables sont associées ; et b) la définition de la superficie en hectares, une des variables utilisées dans l'analyse.

Occupations du sol : les données d'occupation du sol élaborées selon la méthodologie décrite au Chapitre 4 sont utilisées. Les classes sont : forêt primaire, forêt secondaire, pâturages et cultures de grains. La superficie totale de chaque classe et la proportion de chaque classe dans la propriété sont calculées.

⁷⁴ *Data mining* ou fouille de données a pour objet l'extraction d'un savoir ou d'une connaissance à partir de grandes quantités de données, par des méthodes automatiques ou semi-automatiques.

Unités pédomorphologiques: définis par Thales et Pocard-Chapuis (2015), à savoir : plateau argileux, pente abrupte, vallon sec, vallon humide, versant sableux et zone inondable. La superficie totale de la classe et la proportion dans la propriété sont également calculées.

Distances : utilisation des cartes de distances aux routes principales, aux villages ruraux et à la zone urbaine de Paragominas, décrites au Chapitre 4.

Données d'entretien : données décrites dans la section « Entretien – Méthodes » dans le Chapitre 4.

1.2. Traitement des données

Les jeux de données : les données sont constituées de lignes (ou d'objets) représentant chaque propriété, et de colonnes (attributs) représentant les variables. Les données ont été d'abord divisées en deux jeux de données : l'un qui possède tous les attributs (entretiens et données spatiales complètes de Paragominas), appelé « *train* », et l'autre qui possède seulement les données spatiales, appelé « *test* ». Le jeu de données *train* a le nombre de lignes égal au nombre d'entretiens en propriétés⁷⁵ (n = 131), et le *test* possède n = 2.114 lignes, le nombre de polygones d'exploitation disponibles à Paragominas. Les colonnes du jeu de données *test* est identique à celui du *train*, avec la différence qu'en *test* les colonnes relatives aux données des entretiens sont vides. Les données manquantes du jeu de données *train* ont été interpolées avec la moyenne des données présentes dans la même colonne.

Les jeux de données ont également été divisés, en ce qui concerne les attributs, en quatre jeux de données : jeu de données « complet » (57 attributs), jeu de données *Excl* (40 attributs), jeu de données *Excl2* (22 attributs) et jeu de données *Excl3* (13 attributs). Dans le jeu de données *Excl*, les attributs relatifs aux raisons d'occupation du sol selon l'unité pédomorphologique ont été exclus. Ces attributs présentent une grande variabilité. Ont été maintenus les attributs : surface de la propriété, les types et les caractéristiques de la production (intensification, location, mécanisation et main-d'œuvre), les distances aux routes et aux zones urbaines, la surface totale et la proportion des classes d'occupation du sol et des unités pédomorphologiques.

Le jeu de données *Excl2* est le même que le jeu de données *Excl*, mais les valeurs

⁷⁵ Il est à noter que certaines données manquent pour certaines propriétés, en raison d'une erreur lors des entretiens, d'une perte de données ou d'une faute de frappe.

relatives des classes d'occupation du sol et des unités pédomorphologiques ont été exclues. Des tests préliminaires ont montré que les valeurs relatives sont moins efficaces pour la définition des clusters par rapport aux valeurs totales. Dans le jeu de données *Exc13*, il ne reste que les attributs : superficie, types de production et les valeurs totales des classes d'occupation du sol et des unités pédomorphologiques, ce qui en fait le jeu de données le plus simple (la composition des ensembles de données est présentée dans les Annexe 5). Pour permettre le traitement avec le réseau neuronal, les données discrètes ont été binarisées. Cette transformation consiste à affecter à chaque valeur discrète une nouvelle colonne dans le jeu de données. Ainsi, par exemple, dans le jeu de données « complet », les 26 attributs discrets originaux ont été remplacés par 94 attributs binaires.

Prédiction des données avec RNA : tout d'abord, nous avons estimé les données d'entretiens à partir des données spatiales, en formant deux réseaux neuronaux avec le jeu de données *train*, un pour estimer les données discrètes et une pour les données continues. Ensuite, ce réseau neuronal a été utilisé pour estimer les données d'entretiens manquantes dans le jeu des données *test*. Le jeu de données *train* a été utilisé pour l'entraînement des RNA du type *perceptron* multicouches (PCM), avec l'algorithme Adam (Kingma et Ba 2015). Le PCM a été adopté parce que l'utilisation d'un estimateur robuste est nécessaire dans ces conditions où les phénomènes qui mènent des caractéristiques spatiales aux attributs des entretiens ne sont pas connus, on suppose seulement qu'ils sont non linéaires.

Reduction d'attributs : avant la procédure de *clustering*, il était nécessaire de réduire le nombre de d'attributs. La « malédiction de la dimensionnalité » est le nom donné aux conséquences de l'augmentation exponentielle du volume de l'espace avec l'augmentation du nombre de dimensions (Hastie, Tibshirani, et Friedman 2008). Outre que le nombre d'attributs, un autre problème se pose : la corrélation entre ces attributs. Dans ce cas, les algorithmes peuvent transformer l'espace d'attribut de telle sorte que les attributs résultants soient décorrélés. L'exemple classique en est l'analyse en composantes principales (ACP) (Costa et Cesar, Jr. 2009). Cependant, l'ACP est linéaire, ce qui peut ne pas saisir toutes les nuances des données. Ainsi, l'analyse en composantes principales kernel (ou KPCA) a été une option pour surmonter cette limitation et a été utilisée pour réduire le nombre d'attributs.

1.3. La procédure de partitionnement de données

Après le traitement initial pour compléter les données, nous avons procédé à l'étape de regroupement (*clustering*) des propriétés en groupes homogènes. Trois algorithmes ont été testés : GMM, Affinity propagation et Meanshift, tous capables de définir le nombre optimal de clusters, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire de définir un nombre de clusters *a priori*. Le GMM (*Gaussian Mixture Model*) est une méthode de *soft clustering*, ce qui signifie qu'un point donné peut être associé à plusieurs clusters en même temps, avec des mesures de probabilité respectives pour appartenir à ce cluster. En ce sens, il s'agit d'une méthode plus souple qui permet de mieux définir les nuances des groupements dans un ensemble de données⁷⁶. L'algorithme Affinity propagation identifie des exemples représentatifs dans un groupe en comparant les paires de manière itérative jusqu'à ce qu'il trouve les exemples les plus représentatifs pour la construction de clusters. Des tests ont montré que cette méthode permet de trouver des clusters avec des erreurs plus faibles par rapport à d'autres algorithmes dans certains cas (Frey et Dueck 2007). L'algorithme Meanshift, d'autre part, est capable d'identifier des formes complexes d'organisation de clusters dans un espace multimodal, ce que les méthodes les plus courantes ne sont pas capables de faire. Ceci présente de bonnes performances dans des situations parfois complexes de groupement comme dans la segmentation d'images (Comaniciu et Meer 2002).

1.4. Validation

Deux procédures de validation ont été adoptées : la validation des données d'entretiens estimées par la RNA et l'évaluation de la performance des algorithmes de *clustering*. En ce qui concerne la validation de la RNA, les valeurs discrètes ont été validées par le taux de concordance, tandis que les variables continues ont été évaluées par le R^2 . De plus, pour les deux, nous avons calculé les valeurs de l'erreur quadratique moyenne (MSE). Les clusters ne peuvent pas nécessairement être validés car il n'existe pas de classes *a priori* qui peuvent être utilisées pour évaluer la précision des clusters trouvés par un algorithme.

Entre les différentes méthodes de validation des clusters, il est possible de d'évaluer la « distance » d'un cluster par rapport à un autre parmi différents tests, et de

⁷⁶ <https://fr.mathworks.com>

sélectionner celui qui définit les groupes les plus éloignés ou les plus étanches. Le coefficient *silhouette* est une métrique qui mesure cette distance entre les clusters (Rousseeuw 1987), et qui varie de -1 à 1. Une valeur proche de 1 indique que l'échantillon est éloigné des clusters voisins. Une valeur 0 indique que l'échantillon est proche du seuil de décision entre les groupes, et une valeur négative indique que cet échantillon a été marqué dans le mauvais groupe. Ainsi, la valeur moyenne de *silhouette* de tous les groupes peut indiquer la qualité d'une procédure de clustering. Pour le calcul de ce coefficient, nous avons utilisé un package du Scikit Learn⁷⁷.

2. Résultats

2.1. Prédiction des données

Le RNA pour la prédiction de données discrètes présente 30 entrées et 94 sorties, avec le nombre suivant de neurones dans les couches cachées : 120, 2048, 1024 et 512. Le RNA est entièrement connecté et les poids ont été lancés avec des valeurs aléatoires uniformément réparties. Ce RNA a été formé jusqu'à ce que le MSE atteigne $1e-4$ ou que le nombre d'époques soit égal à cent mille. Le RNA pour la prédiction des données continues comporte 30 entrées (les données spatiales) et une sortie (les seules données continues dans les données). Les couches cachées ont 60, 500, 300 et 100 neurones, entièrement connectés. Les poids ont été initiés avec des valeurs aléatoires uniformément réparties. Ce RNA a été formé jusqu'à le nombre d'époques égal à un million.

Si les données sont significatives, nous pouvons affirmer que le RNA a fourni une approximation satisfaisante des données manquantes. Les RNA ont été formés jusqu'à l'obtention d'un MSE inférieur à 0,1, ce qui peut encore être considéré comme une valeur élevée, mais en raison de la capacité de calcul et du petit nombre d'objets (113) il n'a pas été possible d'obtenir de meilleurs résultats. Pour l'estimation des variables discrètes, le taux entre les réponses correctes était de 96 % et le coefficient R^2 0,84. Pour la variable continue, R^2 était de 0,70.

Avant l'application des algorithmes de partitionnement de données, le jeu de données a été soumis à une réduction d'attributs à l'aide de la KPCA. L'efficacité de la KPCA a été mesurée indirectement par la validation des clusters. Un nombre inférieur ou

⁷⁷ https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.silhouette_score.html

supérieur d'attributs ne signifie pas que la validation du cluster sera meilleure, cela dépend du type d'algorithme de clusterisation et de la façon dont il traite ce nombre d'attributs. Le nombre de dimensions était compris entre 2 et 12 pour les tests. Ce qui a montré que nous avons beaucoup d'attributs redondants.

2.2. Partitionnement de données

Dans les tests effectués, la valeur de *silhouette* se traduit par un score plus élevé dans les modèles avec moins de clusters, des modèles apparemment moins complexes. Sans tenir compte du Meanshift, qui n'identifiait que deux clusters dans la plupart de tests, GMM et Affinity présentaient les meilleures valeurs de *silhouette*. Le meilleur résultat était de 0,94 pour le GMM avec le jeu de données *Excl3*, qui est un jeu de données avec moins d'attributs. En dehors des résultats avec 2 et 514 clusters, ce qui ne correspond apparemment pas à la réalité des données, le nombre de clusters était compris entre 13 et 35 (Table 34).

Table 34. Résultats du coefficient *silhouette* et nombre de clusters par jeu de données.

Dataset	Nombre de clusters			<i>Silhouette</i>		
	Affinity	GMM	Meanshift	Affinity	GMM	Meanshift
<i>Complete</i>	17	28	2	0.327	0.366	0.545
<i>Excl</i>	13	22	2	0.389	0.426	0.536
<i>Excl2</i>	23	35	2	0.407	0.583	0.584
<i>Excl3</i>	514	18	4	0.505	0.941	0.698

Les résultats du jeu de données *Complete* ont montré les valeurs de silhouette les plus basses, ceci se produit du fait de la présence d'un grand nombre d'attributs, certains avec une plus grande variabilité. D'autre part, le jeu de données *Excl* a présenté les meilleurs résultats en général. Pour comparer visuellement les résultats, une propriété aux caractéristiques connues a été choisie comme référence. Dans ce cas, une ferme de production de soja avec environ 1.800 ha, une forte proportion de cultures de grains (50%) et de pâturages (46%), avec 36% de la surface en sols argileux favorables à l'agriculture.

Le cluster à laquelle appartient cette propriété était spatialisé dans chacun des résultats générés. Sur l'algorithme Meanshift, qui ne définit que deux groupes dans les jeux de données *Complete*, *Excl* et *Excl2*, le cluster de la propriété de référence couvre presque toutes les propriétés de Paragominas. Dans ces résultats, les données ont été

divisées grosso modo en grandes et petites exploitations. Le score moyen de silhouette pour cet algorithme était le plus élevé entre les ensembles de données. L'algorithme Meanshift a moins d'influence des changements dans le nombre d'attributs. Les clusters formés par les algorithmes Affinity et GMM sont plus contraints, mais capables de mieux définir les nuances des données. L'algorithme Affinity présente un plus petit nombre de propriétés dans le cluster de la propriété de référence, tandis que le GMM présente une situation intermédiaire. En ce sens, alors que les résultats de Meashift incluent de nombreuses propriétés qui n'ont pas d'agriculture mécanisée, les résultats d'Affinity délimitent des clusters très restreintes (Figure 123).

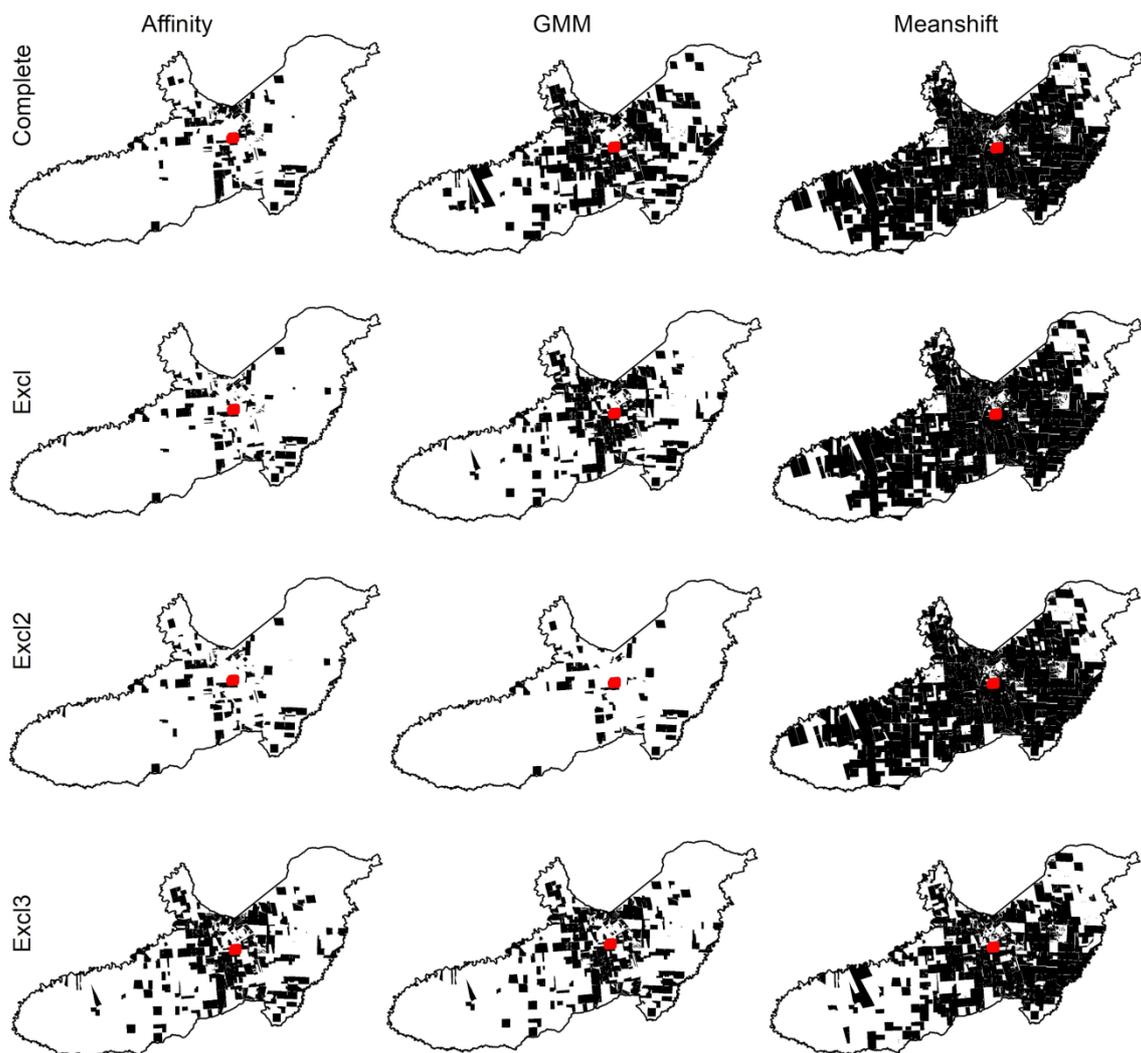


Figure 123. Comparaison des résultats de chaque algorithme de clustering pour chaque jeu de données. Sont affichés les clusters auxquels une propriété de référence choisie appartient (en rouge).

2.3. Analyse des unités de systèmes de décision d'usage des ressources et contraintes biophysiques

Dans cette section, nous avons analysé les caractéristiques du meilleur résultat de la méthode de clustering par rapport à la répartition des proportions d'occupation du sol et des secteurs pédomorphologiques dans les exploitations, ainsi que le comportement de l'occupation du sol au cours de la période observée entre 2004 et 2015. Le comportement de l'occupation du sol dans le scénario futur *Ea*⁷⁸ (réduction de la déforestation et expansion des cultures de grains correspondant à la dernière période observée) pour 2030 a également été évalué pour chaque cluster. Afin d'évaluer la dynamique d'occupation du sol par rapport au contexte biophysique, le comportement des classes d'occupation du sol a également été considéré spécifiquement dans le secteur pédomorphologique « plateaux argileux », secteur clé pour la production de grains.

Le résultat du clustering choisi pour représenter les unités de paysage à Paragominas était celui qui utilisait le jeu de données *Excl3* et l'algorithme GMM, ce qui présentait le meilleur résultat du coefficient *silhouette* (0,941), et l'analyse qualitative du résultat était la plus cohérente. Le jeu de données *Excl3* se compose des attributs : i) la superficie de l'exploitation, ii) six variables relatives à de types de production (soja, horticulture, élevage, poivre noir, fruiticulture et manioc), iii) quatre variables relatives à la superficie totale des classes d'occupations du sol en 2015 dans l'exploitation (forêt primaire, cultures de grains, pâturage et forêt secondaire) et iv) deux variables biophysiques (superficie totale de plateau argileux et de versant sableux).

Ce résultat présentait 18 clusters au total, et les six clusters ayant le plus grand nombre d'exploitations ont été sélectionnés pour l'analyse (nommées C0, C1, C2, C3, C4 et C5) (Figure 124), avec un total de 1.630 propriétés (12.760 km² soit 65,9% de la superficie de Paragominas).

⁷⁸ Scénario *Ea*, dont les taux étaient basés sur la période post-*Município Verde* (2010-2013) à Paragominas. Voir description au Chapitre 6.

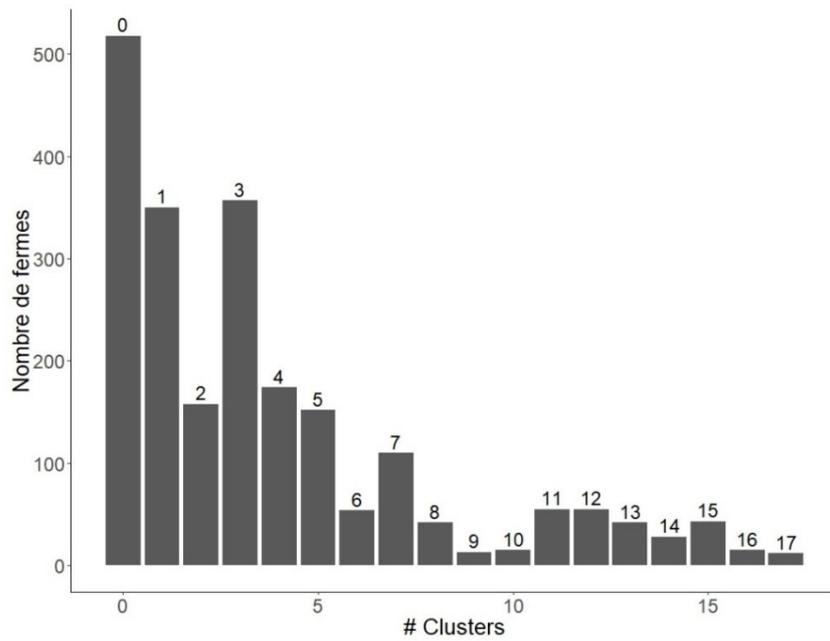


Figure 124. Nombre d'exploitations dans chaque cluster du résultat utilisant l'algorithme GMM avec le jeu de données *Exc/3*. Les six clusters ayant le plus grand nombre d'exploitations ont été sélectionnés pour l'analyse (clusters 0 à 5).

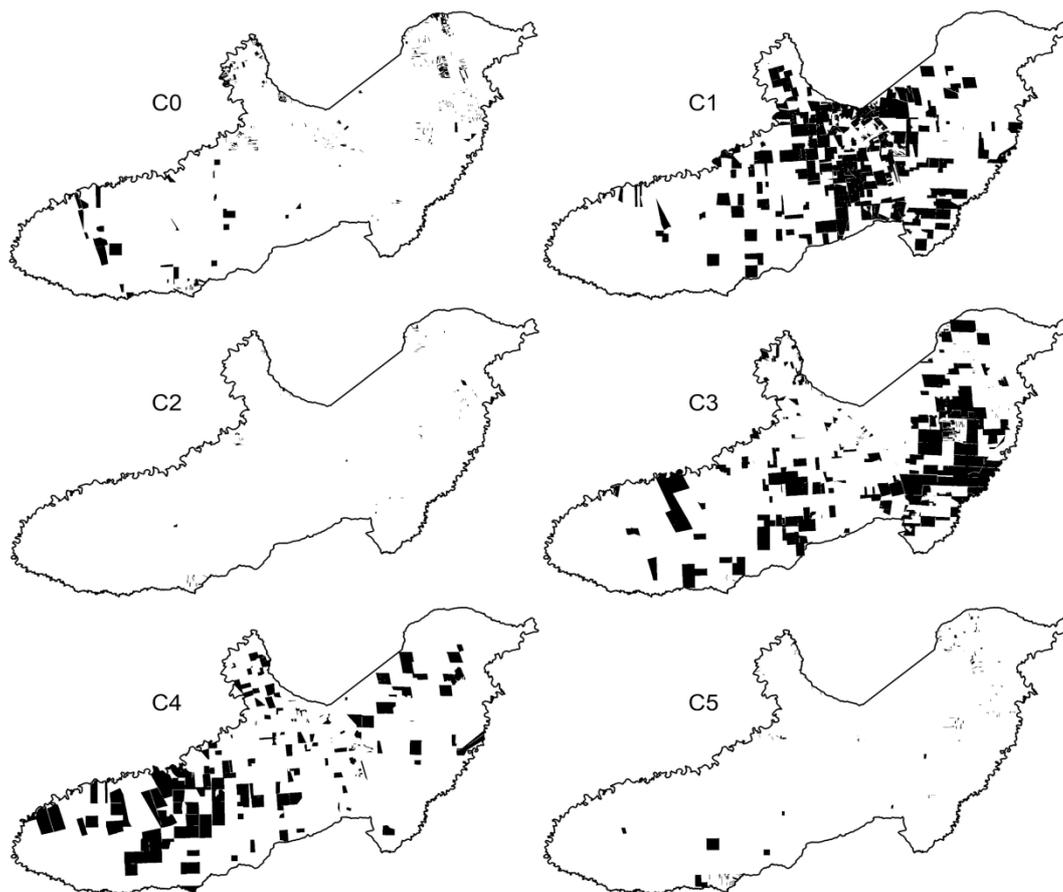


Figure 125. Exploitations de Paragominas avec les clusters issus de l'algorithme GMM avec le jeu de données *Exc/3* (n=1,630).

La Figure 125 montre la distribution spatiale des six clusters sélectionnés pour l'analyse. On constate d'abord que certains clusters ont une organisation spatiale bien définie, comme c'est le cas du cluster C1, concentré dans la zone centrale de la municipalité, le cluster C4, plus fréquent dans la région Ouest et C3 dans la région Est de Paragominas. Les trois clusters les plus importants par rapport à la superficie totale sont le C1 (4.482 km²), C3 (4.020 km²) et C4 (3.437 km²), qui représentent en général de grandes propriétés privées. Les clusters C0 (632 km²), C2 (45,8 km²) et C5 (171,3 km²), sont composés principalement des petites exploitations des *assentamentos*.

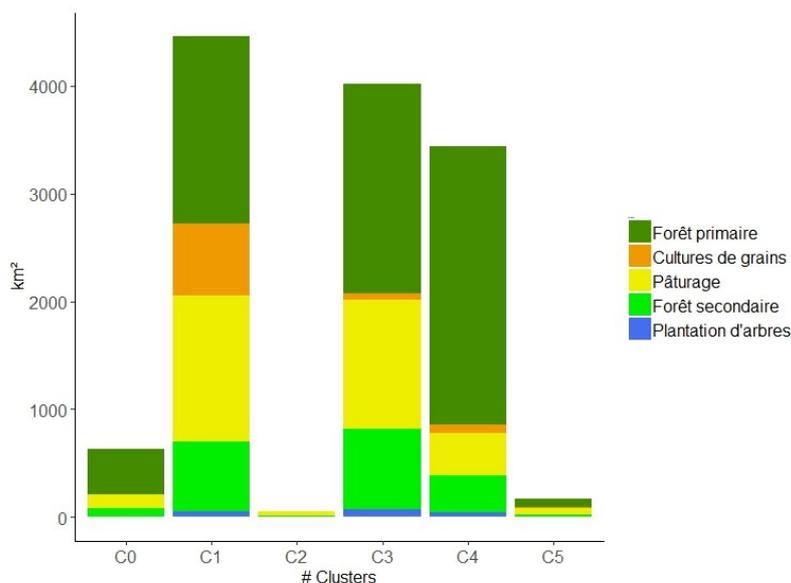


Figure 126. Superficie totale des clusters sélectionnés pour l'analyse et les classes d'occupation du sol.

Table 35. Nombre d'occurrences de types de production dans chaque cluster. GRAO, soja ; HORT, horticulture ; PECU, élevage ; PIME, poivre noir ; FRUT, fruiticulture ; MAND, manioc ; SILV, plantation d'arbres à bois ; ACAI, açai. En gras les valeurs les plus élevées entre les clusters.

Cluster	GRAO	HORT	PECU	PIME	FRUT	MAND	SILV	ACAI
C0	1	3	2	2	2	14	0	1
C1	10	0	12	0	0	0	0	0
C2	0	0	3	1	4	6	0	0
C3	2	0	19	1	2	4	1	0
C4	7	1	3	0	0	0	2	0
C5	0	1	5	1	0	5	0	0

Cluster C0 – Petites propriétés avec une grande quantité de forêt primaire : le cluster C0 regroupe 518 propriétés (totalisant environ 630 km², 240 km² sur les plateaux argileux), et se caractérise par de petites propriétés, en moyenne 122,7 ha, répartis principalement dans l'*assentamento* Luiz Inácio. L'occupation du sol dans ces propriétés présente une prédominance de forêts primaires et de pâturages, mais avec

une grande variabilité. Ces propriétés sont situées essentiellement sur des versants sableux dans le fond des vallées (Figure 128). La production de cette unité est principalement le manioc, mais il peut aussi y avoir de l'horticulture, de l'élevage, du poivre noir, de la fruticulture et de l'açaï (Table 35), suggérant des propriétés agricoles familiales basées sur une agriculture de subsistance diversifiée. Comparativement aux autres clusters avec des petites propriétés, c'est celle qui présente la plus grande quantité de forêt primaire, en moyenne 34,9 % de la superficie des exploitations, des forêts qui sont situées principalement sur les plateaux argileux (Figure 127).

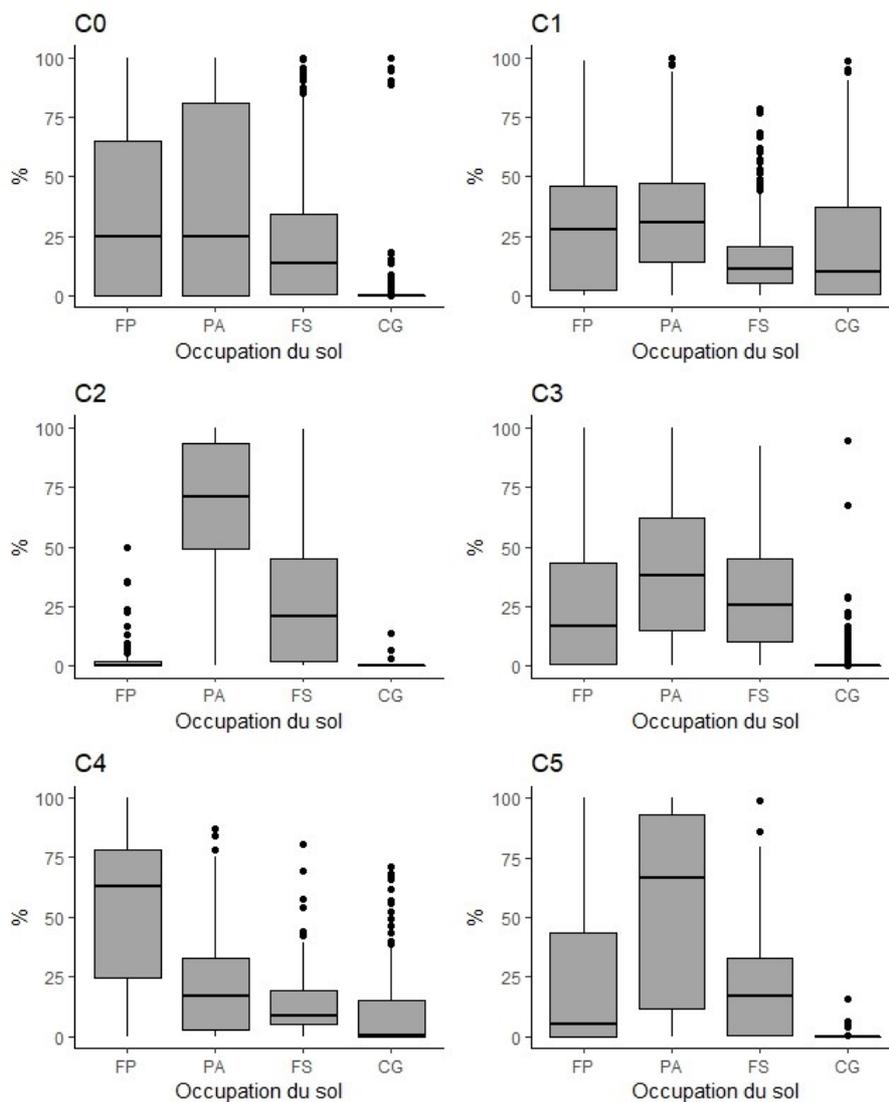


Figure 127. Répartition des proportions des classes d'occupation du sol par cluster. FP, forêt primaire ; PA, pâturages ; FS, forêt secondaire ; CG, cultures de grains.

Ce groupe de petites propriétés est caractérisé par une plus grande variété de contextes biophysiques, allant du fond de vallée au sommet du plateau. Cette situation peut favoriser une logique d'adaptation de la production et de la gestion en fonction des différentes conditions biophysiques, et peut être liée à la plus grande variété de

productions observée dans ce groupe. Selon Angelsen et Kaimowitz (2001), l'atténuation des risques, la capacité de travail, la répartition par genre, les étapes de production, l'autosuffisance, les coûts de transport et la diversité de sols sont des facteurs qui favorisent la diversification des activités des agriculteurs familiaux. Comme la plupart des fonds de vallées ont déjà été déboisés, la direction naturelle de la déforestation s'oriente vers les plateaux au fil du temps (Figure 129). La déforestation sur les plateaux peut être encouragée en partie en valorisant les sols argileux pour la plantation du poivre noir⁷⁹. D'autre part, l'élevage est une activité moins présente dans ces propriétés que dans les autres, ce qui peut expliquer la plus grande présence de forêts qui y existent encore.

Le comportement dans le scénario futur *Ea* jusqu'en 2030 est une continuation de la réduction des forêts primaires et de l'augmentation des forêts secondaires (Figure 129), c'est-à-dire une expansion de l'agriculture sur le brûlis, où la composante de la forêt secondaire est importante. Selon les entretiens du groupe nommé « agriculture familiale » au Chapitre 4, un tiers des acteurs ont un projet d'expansion de la production dans la région, et un autre tiers pour diversifier la production de l'exploitation, ce qui dans ce contexte implique souvent le démarrage de l'activité d'élevage.

En ce sens, ce cluster peut être une cible potentielle pour les mesures de surveillance et des actions de valorisation des ressources forestières. Cependant, la procédure de regroupement a révélé des problèmes avec l'inclusion de certaines grandes propriétés à l'ouest de la municipalité, ainsi que de petites propriétés situées près de la zone urbaine de la municipalité, qui comprend des zones de cultures de grains.

Cluster C1 – Grandes propriétés avec cultures de grains importante : le cluster C1, quant à lui, comprend 350 grandes propriétés, d'une superficie moyenne de 1.285 ha, situées principalement dans la région centrale de la municipalité, à proximité de la zone urbaine et des axes des routes principales ou en bon état toute l'année (Figure 125). Ces exploitations se distinguent par le fait qu'elles ont en moyenne les proportions les plus élevées de cultures de grains (21,1 %), ainsi que d'importantes quantités de forêt primaire. Elles sont prédominantes sur les plateaux argileux et, secondairement, sur les versants sableux (Figure 128). Ce sont des propriétés qui représentent l'expansion récente de la culture des *commodities* dans la municipalité,

⁷⁹ Ceci ne peut être vérifié qu'en identifiant les plantations de poivre noir et en évaluant leur importance en termes de surface.

dans les zones de plus grand potentiel agricole des plateaux argileux. Les activités associées aux propriétés de ce groupe sont le soja et l'élevage (Table 35).

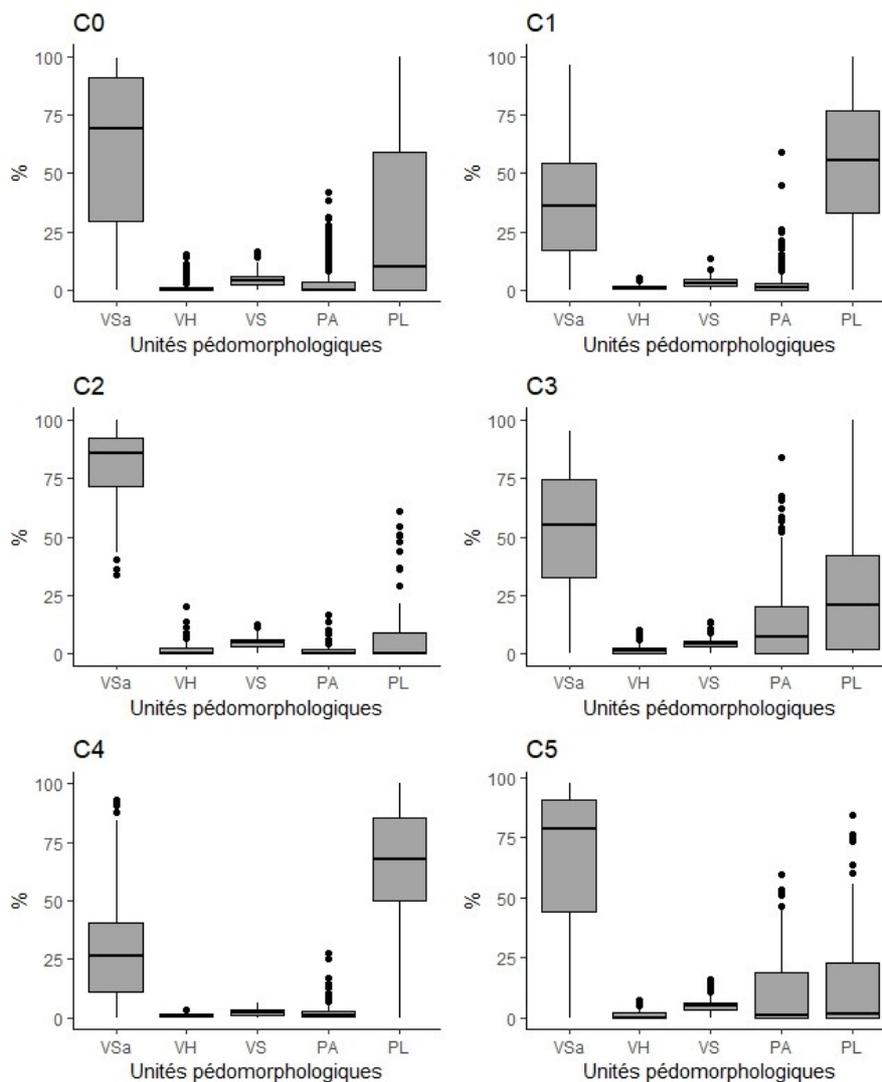


Figure 128. Répartition des proportions d'unités pédomorphologiques pour chaque exploitation dans les clusters. VSa, versants sableux ; VH, vallons humides ; VS, Vallons secs ; PA, pentes abruptes ; PL, plateaux argileux.

Les années 2004 à 2015 y sont marquées par une réduction des forêts et des pâturages, au profit des cultures de grains, de la foresterie et des forêts secondaires. La projection du scénario *Ea* indique que cette situation pourrait s'aggraver avec le temps (Figure 130). D'autre part, il faut noter que la dynamique est différente selon le contexte biophysique. Sur les plateaux argileux, les cultures de grains ont gagné de l'espace par rapport à toutes les autres occupations du sol (Figure 130), ce qui suggère que l'augmentation de la forêt secondaire et des plantations d'arbres à bois se produit exclusivement en dehors des plateaux argileux.

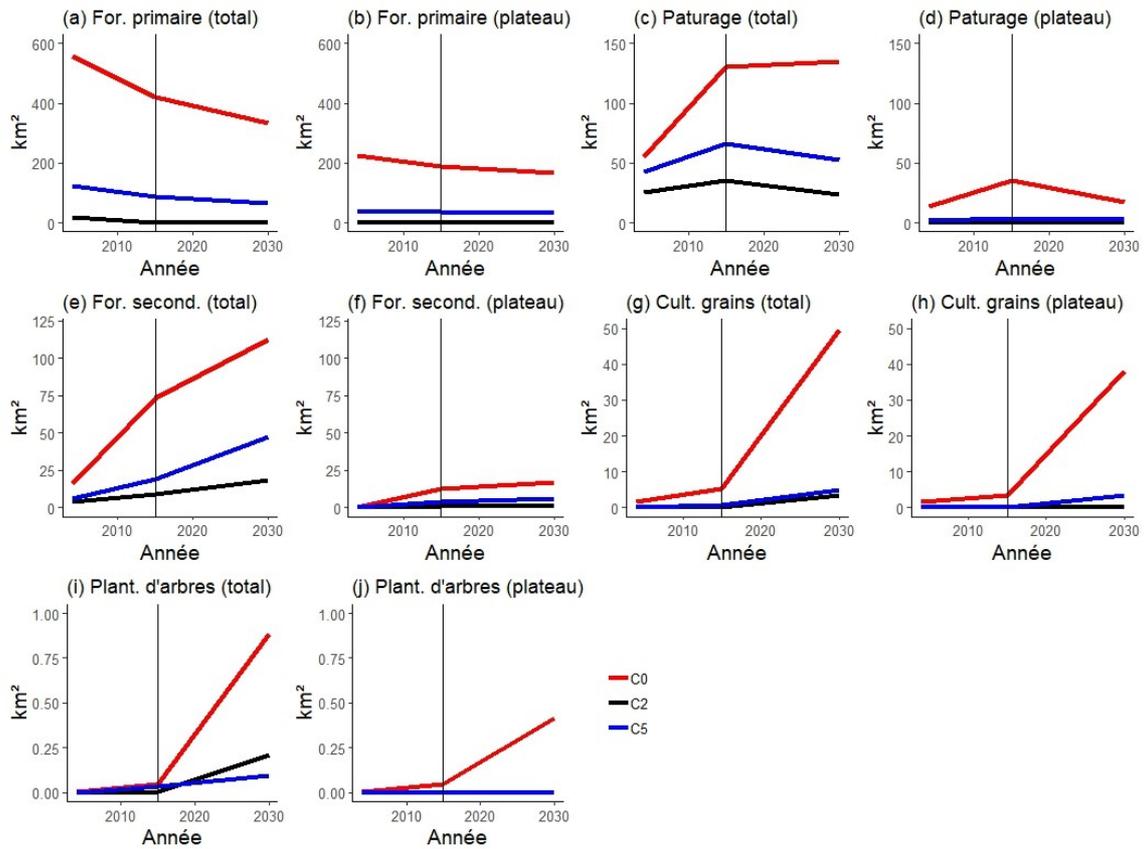


Figure 129. Evolution de l'occupation du sol (2004-2015) et scénarios prospectifs (2030) dans les clusters C0, C2 et C5 (petites exploitations), pour l'ensemble de la surface des clusters et pour la surface des plateaux argileux.

Cela concorde avec ce qui a été constaté plus tôt dans les entretiens et l'analyse des Poids d'Évidence, à savoir que les parcelles non mécanisables des exploitations avec expansion du soja peuvent être plus fréquemment abandonnées pour la régénération forestière, tandis que les zones mécanisables sont plus valorisées à la plantation d'arbres. Bien que ces exploitations aient les processus d'intensification les plus importants, avec le plus haut niveau de technicité et de valorisation des ressources biophysiques, les entretiens discutés au Chapitre 4 dans le groupe « Les cultures de grains » indiquent que les acteurs ont d'abord pour projet d'augmenter leur surface de production avant de les intensifier (32% ont répondu qu'ils veulent l'augmentation des surfaces, 25% maintenir le *statu quo* et 18% intensifier). Ce sont aussi possiblement les exploitations où les acteurs sont le plus intéressés par la suppression des forêts de plateau en compensation de la récupération des forêts sur les fortes pentes et vallons⁸⁰. Dans ce groupe, on observe le développement d'un paysage type *land sparing* (Goulart et al. 2016), où des zones d'usage intensif sont côte à côte avec des zones de conservation.

⁸⁰ Voir le projet Terracert dans le chapitre 4.

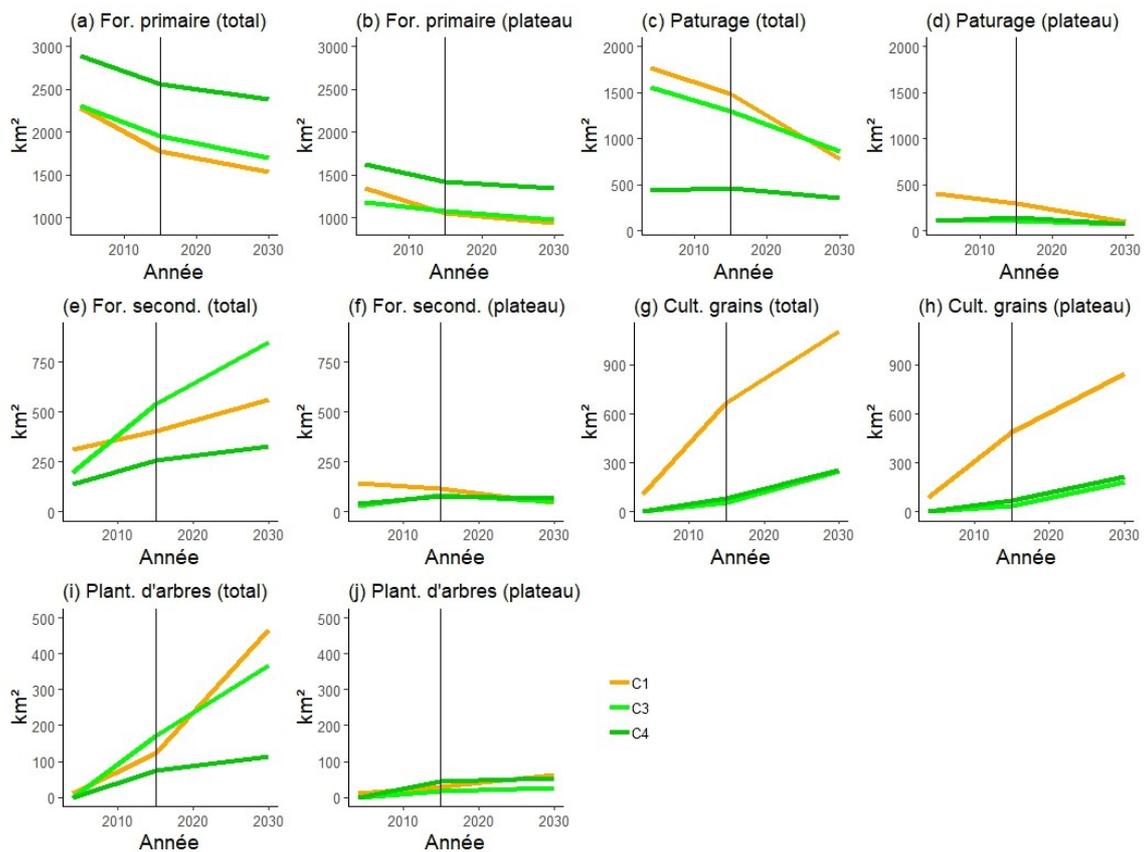


Figure 130. Evolution de l'occupation du sol (2004-2015) et scénarios prospectifs (2030) dans les clusters C1, C3 et C4 (grandes exploitations), pour l'ensemble de la surface des clusters et pour la surface des plateaux argileux.

Cluster C2 – Petites propriétés avec prédominance des pâturages et de la forêt secondaire : le cluster C2 comprend 158 petites exploitations d'une superficie moyenne de 62,6 ha réparties sur toutes les zones de colonisation et des *assentamentos*. Elles se caractérisent par la prédominance des pâturages (en moyenne plus de 60% de la superficie), avec forêts secondaires en deuxième position, et rarement la présence de forêts primaires (Figure 127). Ces propriétés sont situées presque exclusivement dans des zones de versants sableux (Figure 128), et avec des activités qui incluent l'élevage, le poivre noir, la fruiticulture et le manioc (Table 35). Ce sont des propriétés qui ont rapidement réduit leurs réserves forestières primaires entre 2004 et 2015, voire plus tôt, au détriment de l'avancée des pâturages et des forêts secondaires (Figure 129). Cette forte prédominance des pâturages suggère des systèmes productifs qui privilégient l'élevage, identifié comme « élevage à petite échelle » dans le Chapitre 4.

Le scénario futur *Ea* indique une tendance à la réduction de la déforestation et des pâturages au détriment de l'avancée des forêts secondaires sur ces exploitations à l'horizon 2030 (Figure 129), ce qui est évident en raison de la très faible proportion de

forêts existant actuellement sur ces propriétés. Toutefois, si on considère les entretiens issus des exploitations d'élevage à petite échelle (Chapitre 4), les projets futurs visent principalement à accroître la superficie productive (44%), puis à la maintenir telle quelle (26%). Il s'agit alors des exploitations sur lesquels on peut s'attendre à une plus grande sensibilité à la dégradation des pâturages par invasion d'espèces ligneuses, étant donné la prédominance de cette occupation du sol parmi les clusters avec prédominance de petites exploitations. En ce sens, il s'agit notamment de propriétés qui peuvent faire l'objet d'une plus grande attention dans le cadre des mesures d'intensification de l'élevage bovin et de la récupération des forêts.

Cluster C3 – Grandes propriétés avec prédominance de pâturages : le cluster C3 est représenté par 357 grandes propriétés d'une superficie moyenne de 1.148 ha (médiane de 176 ha), réparties principalement dans des zones intermédiaires entre la région centrale et les parties les plus éloignées et difficiles d'accès de la municipalité. Elle présente une certaine prédominance de pâturages sur les forêts primaires et secondaires, et se situe principalement sur les versants sableux (Figure 127 et Figure 128). L'activité dans ces propriétés est principalement l'élevage, avec des occurrences à plus petite échelle de plantation d'arbres à bois, de soja, de manioc et de poivre noir (Table 35). Ce groupe est très représentatif des vastes propriétés d'élevage qui constituent la matrice de tous les autres types de propriétés après la colonisation initiale des Paragominas. Une sorte de « vestige » de grandes propriétés avec de vastes pâturages au fond des vallées et des massifs forestiers dans les plateaux, qui n'ont pas encore été intégrés dans le système d'expansion du soja. Entre 2004 et 2015, il y a eu une déforestation importante, mais il n'y a pas eu d'expansion des pâturages durant cette période en raison de l'expansion concomitante des forêts secondaires. Le scénario projeté *Ea* met en continuité cette dynamique jusqu'en 2030 (Figure 130).

Les zones de plateaux ont maintenu une grande prédominance de forêts au cours de la période observée avec une légère réduction dans le temps. Ces propriétés, ainsi que le cluster 4, constituent des zones d'expansion potentielles pour le soja dans la municipalité, en particulier dans les pâturages et les forêts secondaires encore disponibles sur les plateaux. C'est exactement cela que le scénario *Ea* prévoit pour ce cluster d'ici 2030 (Figure 130). Il est à noter que les acteurs du groupe « élevage à grande échelle », dans lesquels ce cluster s'intègre bien, ont répondu qu'après le

projet d'expansion de la production⁸¹, leur principal projet d'avenir consiste principalement à louer la propriété pour la production du soja (18%) et à intensifier la production (18%). Ceci indique que ces propriétés sont des « portes ouvertes » pour les systèmes de production de soja. Le potentiel agricole de ces propriétés est en grande partie « inversé » par rapport au *boom* actuel du soja, c'est-à-dire que les plateaux argileux est couvert de forêts, tandis que les vallées aux sols de qualité inférieure sont ouvertes et disponibles. En ce sens, ces sont de propriétés prioritaires pour la restauration des forêts dans des zones essentielles aux services écosystémiques (comme les fortes pentes, les vallons et surfaces de drainage en amont) et l'intensification des zones à fort potentiel agricole comme les plateaux argileux.

Cluster C4 – Grandes propriétés sur les plateaux avec forêt : le cluster C4 comprend 174 grandes propriétés, avec une superficie moyenne de 1.996 ha, concentrées dans la partie ouest de la municipalité. Ce cluster se caractérise par la forte prédominance des forêts et par le fait que la plupart d'entre elles sont situées sur les plateaux argileux (Figure 127 et Figure 128). Parmi les activités mentionnées dans les entretiens, les plus importantes sont les cultures de grains, l'élevage et la plantation d'arbres à bois (Table 35). Dans ce cluster, des grandes extensions forestières sont demeurées relativement stables au fil du temps en comparaison aux autres clusters, ce qui fait de ces propriétés les dépositaires de la plupart des forêts restantes de la municipalité (Figure 130). En raison du potentiel naturel des sols sur lesquels ces exploitations sont situées, elles sont également des cibles potentielles de l'expansion du soja dans la municipalité. La projection du scénario *Ea* indique un développement possible des cultures de grains dans les zones déboisées dans ces exploitations (Figure 130). En raison de leur prédominance de forêts, ces propriétés peuvent faire l'objet d'incitations à la gestion durable des forêts.

Cluster C5 – Petites propriétés dans les versants sableux : le cluster C5 comprend 152 petites propriétés d'une superficie moyenne de 113 ha, réparties sur toutes les zones d'*assentamentos* de la municipalité. Il est similaire au cluster C2 en ce qui concerne la prédominance des pâturages, mais avec une variabilité plus forte, et aussi une proportion plus élevée de forêts primaires (Figure 127). En plus de cela, ils ont une proportion relativement élevée de zones de pente abrupte et de vallons secs par rapport aux autres clusters (Figure 128). Les activités observées dans les exploitations

⁸¹ L'expansion de la surface de production est pratiquement une constante dans la logique de la plupart des systèmes de production évalués.

de ce cluster sont principalement l'élevage et le manioc (Table 35). Il s'agit de propriétés qui, en moyenne, ont perdu une grande partie de leur couvert forestier entre 2004 et 2015, laissant place aux pâturages et aux forêts secondaires (Figure 129). Comme la plupart de ces propriétés ont des zones avec des pentes raides et des vallons humides ou secs, ce sont des unités productives qui peuvent être la cible d'actions et de mesures favorisant des productions agricoles, l'élevage, des activités extractives et de la foresterie durable dans des conditions biophysiques défavorables.

Chapitre 8. Les facteurs biophysiques et le front pionnier

Le front pionnier se manifeste par un système complexe composé d'un réseau d'acteurs et d'institutions qui opèrent à différentes échelles spatiales et d'investissement et en fonction de l'activité pratiquée. Ces acteurs localisent leur production en fonction des relations sociales, spatiales et économiques de ce réseau et du contexte modifié ou naturel de la zone d'intérêt.

C'est dans ce sens que le front pionnier peut être compris comme la matérialisation du système complexe d'échanges d'information et d'énergie dans la relation entre la société et la nature. Si l'on considère la définition d'un front pionnier « lorsqu'une société humaine a) conquiert le territoire d'une autre société ; b) détruit cette dernière, ou supprime le pouvoir de décision dans la nouvelle organisation du territoire ; c) modifie profondément l'utilisation de l'espace, comme la déforestation, la chasse intensive, le pastoralisme, l'agriculture ou autre exploitation des ressources naturelles, sans se fonder sur les structures antérieures ; d) intègre cette zone périphérique et se développe progressivement selon les espaces centraux de son territoire » (René Pocard-Chapuis 2004), ce que l'on appelle « société humaine » peut être défini comme un ensemble de sous-systèmes avec différents niveaux d'intégration et de hiérarchie. Chacun de ces sous-systèmes peut fonctionner selon ses propres logiques et générer des comportements d'auto-organisation.

Le comportement interne peut émerger spontanément, conduit par des variations du propre système, résultant de l'action de multiples agents qui obéissent à un ensemble de règles, qui, en interagissant, génèrent un comportement considéré comme complexe. Ces décisions peuvent être le résultat de logiques différentes qui peuvent varier ou être combinées de différentes manières, générant des mosaïques de paysages. La logique peut être, par exemple, d'atteindre un certain niveau de consommation avec le moins de travail possible, comme dans certains systèmes d'agriculture familiale (modèle du « ventre plein ») (Kaimowitz et Angelsen 1998), de maximiser ou d'optimiser les revenus de la production, à la recherche du profit (Irwin et Geoghegan 2001), et diverses situations intermédiaires. Ces logiques peuvent être considérées en fonction des productions agricoles réalisées par les acteurs qui, dans le cas de fronts pionniers en Amazonie, peuvent inclure l'agriculture familiale avec des cultures sur brûlis, l'élevage et les cultures de grains de large échelle. Il faut donc espérer que chaque logique ait aussi sa propre relation avec les ressources

biophysiques (appelées dans la présente étude de « systèmes de décision d'utilisation des ressources biophysiques »). Toutefois, comme le fait remarquer Meyfroidt (2016), dans les systèmes sociaux et complexes, les causes d'un phénomène donné ne sont ni nécessaires ni suffisantes, mais « combinatoires » ou « contributives »⁸². En d'autres termes, un facteur biophysique ne peut pas être une cause directe d'un phénomène de changement d'occupation du sol, mais une composante qui peut y contribuer ou le favoriser. Mais contrairement à d'autres facteurs, les aspects biophysiques peuvent se démarquer parce qu'ils sont toujours présents.

Et c'est exactement le support biophysique sur lequel le front pionnier se développe et s'adapte. De nombreux modèles du front pionnier considèrent les ressources naturelles comme une variable homogène, c'est-à-dire un système à la racine de relations sociales agissant sur un vaste territoire homogène couvert par une végétation naturelle continue. Cependant, lorsque les processus d'expansion du front sont imposés, ils entrent en contact avec un contexte biophysique qui, au contraire de ces modèles, peut être extrêmement diversifié. Un processus d'adaptation à ce contexte peut alors se produire. L'adaptation se fait toujours en relation avec le contexte spatial en question, et le contexte implique les ressources biophysiques disponibles. Même s'ils sont moins importants dans des situations telles que la spéculation foncière ou la planification gouvernementale, les premiers arrivés dans la région sont toujours confrontés à un contexte dans lequel ils doivent décider s'il y aura une activité productive, quelle activité, sur quelle surface (échelle de production), et où au sein de l'exploitation la production se ferait.

Dans une région de front pionnier, qui n'a jamais été déboisée, les parcelles n'ont pas d'histoire connue de production. Ainsi, une autre caractéristique importante est que les processus qui agissent sur l'espace où se trouvent des ressources territoriales et biophysiques hétérogènes, créent des caractéristiques avec des configurations endogènes ou contingents (Messina et Walsh, 2001), c'est-à-dire des combinaisons parfois uniques à une échelle spatiale donnée. En ce qui concerne cette première adaptation, nous pouvons souligner le rôle des ressources en eau. Si l'on considère deux logiques courantes dans l'occupation du front pionnier, l'agriculture familiale et l'élevage extensif, toutes les deux sont dépendantes des ressources en eau. En ce sens, l'occupation du sol, les cultures et les pâturages peuvent « s'auto-organiser » en gravitant autour du système de drainage. Il s'agit là d'une caractéristique très évidente

⁸² Il s'agit des soi-disant causes « INUS »: *“insufficient but necessary part of a combination of causes, which is itself unnecessary but sufficient for the outcome”* (Mahoney, 2008).

de l'occupation initiale de Paragominas, comme le confirment Plassin et al. (2017) et Piketty et al. (2015). Dans le cas de l'élevage, l'abreuvement animal est un facteur majeur, tandis que pour l'agriculture familiale, les ressources en eau sont nécessaires pour les besoins de l'habitation, pour les élevages et l'irrigation. C'est-à-dire, dans ces cas, la configuration du réseau de drainage et les exigences de la production peuvent contribuer à l'emplacement des habitations et à l'intensification des activités dans l'exploitation. Les caractéristiques du système productif de l'agriculture familiale, dont la production est limitée par la main d'œuvre disponible, peuvent alors conduire à destiner des zones plus éloignées à une production moins intensive et à la régénération forestière (voir Chapitre 4).

Avec l'évolution du front pionnier, la réduction des forêts, une plus grande interconnexion avec le marché et l'intensification des activités, les acteurs tiennent de plus en plus compte du potentiel biophysique du territoire et peuvent prendre des décisions en fonction de ce potentiel. Les études des fronts pionniers montrent qu'au début de la mise en place des cultures, la diversité biophysique, notamment la qualité des sols, n'est généralement pas prise en compte. Cependant, cette diversité est progressivement découverte par les agriculteurs familiaux (Arnauld de Sartre et al. 2005). C'est le cas, par exemple, à Paragominas, où la déforestation dans le contexte de l'agriculture familiale se produit souvent du fond de la vallée vers le plateau, mettant en évidence à chaque étape les différents types de sols et les restrictions et potentiels agricoles que les acteurs peuvent utiliser pour la prise de décisions.

(Summers 2008) souligne qu'aux premiers stades de l'activité agricole familiale, les changements d'occupation du sol sont étroitement liés à la dynamique du cycle de vie de la famille. Cependant, à mesure que le front évolue, les forces contextuelles (marché, politiques et situation biophysique) peuvent augmenter l'impact sur les stratégies (Figure 131 (a)). Cela est évident dans le contexte des plans de colonisation du gouvernement, où les tracés de polygones de lots réguliers ne tenaient aucun compte des ressources locales en eau et en sols, qui ont été découvertes après l'installation et ont créé de grandes inégalités en termes de potentiel agricole (Ferreira 2015; Wolstein et al. 1998).

Avec le développement des réseaux sociaux et productifs sur le territoire, les systèmes de décision peuvent varier selon l'hétérogénéité biophysique des propriétés. Comme discuté au Chapitre 4, il est possible que des cultures plus intensives et pérennes, moins dépendantes de la fertilité provenant du système de culture sur brûlis, puissent valoriser des sols à plus fort potentiel, comme le cas poivre noir, qui a une meilleure

productivité dans les sols du plateau argileux. Mais comme nous l'avons déjà souligné, le potentiel biophysique contribue à une décision, mais il n'est pas nécessairement déterminant. Ainsi, le poivre noir n'est pas exclusivement produit sur les plateaux argileux, car de nombreux facteurs interviennent dans l'agriculture familiale. Les choix du producteur ne peuvent pas être toujours considérés comme « rationnels » d'un point de vue économique ou agronomique, mais s'inscrivent dans un contexte systémique plus large dans lequel plusieurs facteurs ont leur poids relatif. Pour paraphraser Michell Sebilotte, « les agriculteurs ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font » (Meynard e Cerf, 2006).

Selon Arnauld de Sartre et al. (2005), tous les acteurs qui ont migré vers le front pionnier amazonien ne l'ont pas forcément fait pour des raisons économiques. Certains d'entre eux n'ont même pas de tradition paysanne dans la famille, ce qui génère une diversité de logiques. Mais à partir de cette diversité de logiques et d'interactions entre les acteurs peuvent « émerger » des schémas spatiaux reconnaissables, tels que les occupations le long des rivières précitées. De plus, l'application du Code Forestier basée sur les caractéristiques hydrographiques et topographiques incitent à de nouvelles logiques qui tiennent compte des ressources naturelles dans l'exploitation.

Cette émergence de logiques est le résultat de l'interaction entre les acteurs et de ce que l'on peut appeler le « mimétisme » entre les individus pendant le développement sur le front pionnier. Après le déboisement et la mise en œuvre des premières activités, l'acteur adapte ce qu'il reconnaît comme plus approprié à son contexte, par l'observation d'autres producteurs à des stades plus avancés de la frontière et qui sont déjà le résultat d'une série de tests réalisés par d'autres propriétaires qui se sont avérés viables dans le temps. Ce processus a été vérifié sur le terrain en ce qui concerne la culture du poivre noir par exemple, où un agriculteur interrogé a mentionné avoir été encouragée par ses voisins à faire cette production et, avec elle, l'adoption de toute une logique. En d'autres termes, il y a une diffusion de la logique, un effet de mimétisme qui rapproche dans l'espace les schémas d'occupation du sol, comme le montre en partie l'analyse de clusters au Chapitre 7. Parmi des informations échangées entre producteurs, on pourrait citer l'exemple de l'utilisation d'une nouvelle graminée fourragère, dans le cas des éleveurs. De nouvelles adaptations peuvent alors apparaître pour contourner les restrictions internes ou externes au système. En ce sens, comme l'ont souligné Schmink et Wood (1992), la dynamique du front pionnier n'est pas linéaire, mais elle est soumise au contrôle d'une diversité de situations et d'acteurs qui se disputent des ressources variées.

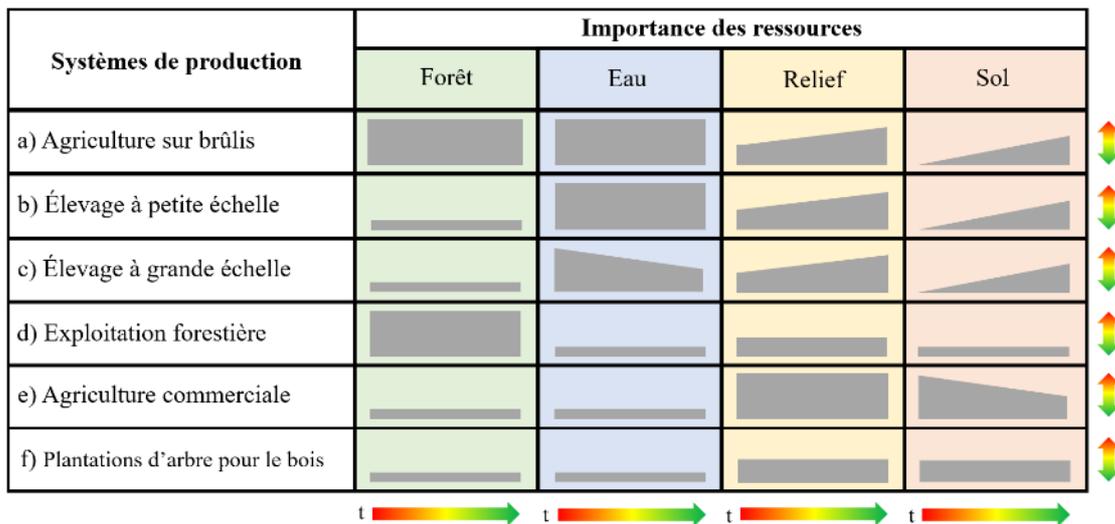


Figure 131. Exemples de certains de logiques liées à systèmes de production en rapport aux ressources forestières et biophysiques du front pionnier à Paragominas. L'axe des abscisses représente le temps écoulé et l'axe des ordonnées représente la variation de l'importance de la ressource.

Parfois, avec l'évolution du front pionnier, le système d'agriculture sur brûlis peut céder la place à un système d'élevage à petite échelle, mais avec des caractéristiques extensives, c'est-à-dire que la production dépend principalement de la superficie des pâturages disponibles. Dans ces cas, la restriction de la superficie des propriétés peut faire en sorte que même des secteurs considérés comme difficiles à utiliser, tels que les pentes et les vallons à forte pente, soient gérés et utilisés comme pâturages (voir Chapitre 4). Cela contribue à la discussion de l'hypothèse 1⁸³, que dans les petites propriétés, les ressources biophysiques sont utilisées de façons différentes par rapport aux plus grandes propriétés. Cependant, les pâturages les mieux gérés et le plus susceptibles d'intensification sont généralement ceux situés sur des terrains en pente plus douce et à proximité voies d'accès. En ce sens, la topographie et la qualité du sol peuvent gagner en importance dans les décisions à mesure que la production s'intensifie ou se technicise (Figure 131 (b)).

Parmi les logiques du front pionnier figure celui lié à l'élevage à grande échelle, qui peut représenter à la fois le « fer de lance » du front pionnier (cas Paragominas), ou le résultat d'une transition progressive débutée par des petits producteurs. Les phases initiales, caractérisées par l'occupation du sol en pâturages et élevage extensif, dépendent des ressources en eau, comme vu antérieurement. Cependant, avec le temps, la mécanisation et l'intensification peuvent relativiser l'importance des

⁸³ « Les systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques varient en fonction de la taille et de l'emplacement de la propriété, ainsi que de la répartition des ressources biophysiques dans l'exploitation ».

ressources en eau et valoriser des terres plus mécanisables et peut-être avec des sols plus fertiles (Figure 131 (c)).

Quelques exemples d'intensification ont été promus, par exemple, par le programme « *Pecuária Verde* », qui vise avant tout à accroître la productivité par surface par l'adoption de systèmes de rotation, l'irrigation et la fertilisation des pâturages et l'abreuvement du bétail par des réservoirs, ce qui permet une production moins dépendante des ressources en eau. D'autre part, tant l'élevage extensif actuel que les formes plus intensives font appel à la mécanisation, ce qui a un coût. En ce sens, l'environnement biophysique prend de l'importance dans la logique spatiale avec la dévaluation des zones de mécanisation difficile, comme les vallons et les pentes abruptes. Contrairement aux petites propriétés, qui ont des superficies limitées pour les pâturages extensifs, les grandes propriétés permettent la sélection de zones plus propices à la mécanisation, et d'autres à la régénération des forêts. Un autre facteur qui contribue à la dévaluation de ces zones est l'exigence du code forestier concernant la réserve légale, qui exige des zones où il n'y a pas de production.

A Paragominas, l'exploitation illégale du bois a culminé dans les années 1980 - 1990. Comme il s'agit d'une activité essentiellement extractive, la relation avec les facteurs biophysiques n'est pas très évidente, ce sont les grands fragments forestiers ayant des essences de bois noble avec un volume appréciable qui sont les plus ciblées (Figure 131 (d)). La vente de bois était une source importante de capitaux réinvestis dans l'élevage, contribuant à l'expansion et à l'entretien des pâturages dans la municipalité. Le bois entrainait ainsi dans un système associé à l'élevage. Puis, cette activité a décliné par renforcement des contrôles et par épuisement du gisement.

La production de soja peut également être comprise comme un système composé de comportements d'acteurs individuels, mais qui, ensemble, conduisent à l'émergence d'une nouvelle organisation du paysage. Ce nouveau système a connu une période d'adaptation et d'apprentissage dans le contexte territorial de Paragominas. Inspiré par le fort développement de l'agriculture de *commodities* dans le Centre-Ouest brésilien, il est arrivé dans la municipalité principalement comme méthode de récupération des pâturages (Burlamaqui et al. 2013). Dans les années 2000, les agriculteurs ont compris que les plateaux argileux présentent des caractéristiques favorables à la production de grains : mécanisables, meilleure fertilité des sols et « altitude » (bien que non explicitée par les acteurs, mais la productivité est également favorisée par la bonne perméabilité des sols et la faible densité de drainage de ce domaine topographique).

On observe donc un entrelacement entre le système de production du soja et le système d'élevage extensif, ce qui impose de nouvelles règles spatiales ancrées dans des facteurs biophysiques. Ceci est d'autant plus évident que la logique de l'élevage extensif a créé le paysage de pâturages qui suivaient les axes des vallées, et que les plateaux conservent encore la plupart des massifs forestiers de la municipalité. La valorisation du plateau a alors commencé à éliminer la plupart des pâturages extensifs et à exercer une pression sur les forêts du plateau argileux, ce qui n'était pas le cas auparavant. Cependant, avec le durcissement de la législation environnementale et la « fermeture » du front pionnier qui s'en est suivie, l'expansion du soja sur les plateaux s'est relativement limitée. En ce sens, en raison de la saturation de l'espace, il est possible qu'une partie de la production de soja commence à se déplacer vers des zones en dehors du plateau (voir Chapitre 5). On peut comprendre alors que le potentiel biophysique s'inscrive dans une logique de production donnée, mais l'utilisation et la saturation de ce support biophysique force le système à s'adapter à une nouvelle condition, à un autre état de fonctionnement après qu'un certain seuil soit dépassé.

Avec l'évolution du front pionnier, non seulement le soja et d'autres grains se sont répandus, mais plusieurs autres activités qui caractérisent une certaine diversification à travers des intégrations telles que l'agriculture-élevage, et l'expansion de la plantation d'arbres à bois. Dans ce dernier cas, les coûts de mécanisation sont de fortes contraintes (fortes pentes, sols inondables), mais ils sont moins exigeants en ce qui concerne la qualité du sol et la continuité des parcelles, ce qui favorise l'expansion de cette culture dans les zones mécanisables en dehors des plateaux argileux. En ce sens, la pertinence des ressources biophysiques dans l'évolution du front pionnier amazonien s'impose comme un support sur lequel les systèmes productifs sont favorisés ou limités. Au début du front pionnier, les ressources biophysiques sont connues de façon limitée, et la production est limitée, par conséquent, le rôle des ressources biophysiques peut être peu importants dans de nombreux cas. Cependant, avec le développement de la frontière, il y a une appréciation des ressources biophysiques du territoire, puisqu'il y a une meilleure connaissance du potentiel et des restrictions topographiques, pédologiques et hydrologiques, une plus grande intensification (qui augmente le coût de production par surface, réduit la superficie productive et peut valoriser le potentiel agricole), une plus grande diversification (qui apporte des productions avec des exigences diverses en matière de ressources biophysiques) et des exigences accrues de la législation environnementale basées sur les ressources biophysiques.

Synthèse de la Partie III

Compte tenu de l'analyse avec les Poids d'Évidence, les principaux changements dans les règles spatiales observés au cours de la période d'étude entre 2004 et 2015 sont présentés. Dans le contexte des plateaux argileux, le processus d'expansion des cultures de grains sur les pâturages domine dans les propriétés moyennes à grandes situées près des routes principales. En revanche, dans les petites propriétés, les difficultés de gestion de cette unité pédomorphologique (loin de l'eau et de l'habitation, par exemple) favorisent la régénération forestière.

Les zones de forte pente des bords des plateaux argileux et vallons sec et humides ont également présenté un processus important de régénération forestière, en particulier dans les exploitations avec cultures de grains. Les secteurs topographiques mécanisables entre les plateaux argileux et les vallées (surtout dans les zones d'argile tachetée et de cuirasse ferrugineuse) ont été le théâtre de l'expansion des plantations d'arbres à bois dans les grandes fermes d'élevage situées à proximité des routes principales.

Les vallées aux versants sableux, ont connu quant à elles, une intensification du processus de déforestation sur de petites propriétés éloignées des routes principales avec le temps. En revanche, les grandes propriétés dans ce contexte de versants sableux n'ont pas connu de changements notables au cours de la période à l'étude.

L'analyse de la variation des Poids d'Evidence, compte tenu des principaux événements politiques et sociaux de la période, a permis de définir deux phases de dynamique d'occupation du sol : phase P1 (2004 à 2007) et phase P2 (2013 à 2015).

Ainsi, compte tenu des données disponibles sur l'occupation du sol, deux modèles spatialement explicites ont été calibrés pour chacune des phases, tous les deux validés avec des données non utilisées pour la calibration. La validation a donné des résultats satisfaisants, avec des performances supérieures au modèle nul. Le scénario de forte déforestation reproduit sur l'avenir engendrerait une perte de près de la moitié des forêts de la municipalité en 2030, tandis que les scénarios de déforestation zéro montrent une possible intensification de la concurrence entre les pâturages et l'agriculture mécanisée sur les plateaux argileux. La procédure de clustering a permis de définir une série de unités d'exploitations en fonction des caractéristiques spatiales (occupation du sol et unités pédomorphologiques) et des données d'entretiens.

La caractérisation des exploitations et la comparaison avec des scénarios futurs pour chaque unité homogène s'est avérée être un outil potentiel pour la planification territoriale du front pionnier. Les résultats indiquent qu'au début du front pionnier, le rôle des ressources biophysiques peut être très variable. Elles peuvent prendre de l'importance au fil du temps à mesure que les ressources sont découvertes, que les terres sont valorisées, intensifiées, diversifiées et intégrées dans le système de la législation environnementale.

Conclusion générale

L'objet de cette thèse a été de caractériser le rôle des ressources et des contraintes biophysiques dans la dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol sur un front pionnier d'Amazonie brésilienne.

En première hypothèse, nous avons considéré que « les systèmes de décision d'usage des ressources et contraintes biophysiques varient en fonction de la taille et de l'emplacement de la propriété, ainsi que de la répartition des facteurs biophysiques dans l'exploitation ». Les résultats montrent que la combinaison de ces trois ensembles de facteurs est pertinente sur le développement du front pionnier de Paragominas.

L'élevage extensif est réalisé dans des exploitations de dizaines à des milliers d'hectares, couvrant toute la diversité des secteurs pédomorphologiques. Du fait de l'importance des ressources en eau pour l'abreuvement direct du bétail, l'hétérogénéité de la répartition du réseau hydrographique dans les exploitations a fait que, depuis le début de la colonisation, les principales zones de pâturage de la municipalité ont été établies suivant les axes des vallées. Toutefois, selon l'emplacement de ces fermes, l'utilisation des ressources biophysiques a pu varier. Par exemple, la proximité des routes asphaltées a rendu économiquement viable la déforestation et l'établissement de pâturages sur le plateau argileux, même si les ressources en eau sont rares dans ce domaine topographique.

La vague de l'agriculture mécanisée de grains, dominée par le soja constitue un nouveau système qui à la fois transforme et s'adapte au paysage traditionnel de l'élevage extensif en grandes exploitations à Paragominas. Les grains sont en pleine expansion en réponse à la demande du marché externe, et bénéficient à Paragominas de terres bon marché, d'un accès aux ports d'exportation et de la présence de différentes infrastructures. A l'échelle de la municipalité, il est évident que la culture des grains est fortement conditionnée par la distance des routes principales, qui conditionne l'accessibilité, car le coût du transport est important dans cette activité hautement mécanisée. L'expansion du soja se fait davantage par la location de terres que par l'adoption de cette activité par les éleveurs de bovins. Cette expansion s'effectue principalement sur des exploitations de taille moyenne à grande, situées à proximité des routes, et il est possible que même de petites propriétés soient louées si elles sont situées à proximité des routes. La répartition spatiale des cultures de soja

est également conditionnée par le potentiel agricole des terres : les plateaux sont les plus favorables car ils combinent une bonne fertilité, des sols naturellement bien drainés, une topographie plane et une faible densité du réseau de drainage, permettant l'établissement de parcelles continues d'ordre kilométrique. Ces éléments confirment donc notre première hypothèse.

Bien que le soja soit la production phare actuellement à Paragominas, il s'est accompagné d'autres activités, comme la plantation d'arbres. Dans ce cas, la logique des larges plantations d'eucalyptus repose principalement sur l'accessibilité (la plupart des plantations sont proches des routes asphaltées ou en bon état toute l'année) et la disponibilité de grandes fermes avec des parcelles de pâturage sur des terres mécanisables. L'eucalyptus n'est pas exigeant par rapport à la fertilité du sol et a fini par occuper les vastes pâturages des vallées avec des sols sableux.

Par rapport à l'agriculture familiale, la taille de la propriété, la distance d'accès et les ressources biophysiques influencent également la logique d'occupation des terres et le rapport avec les ressources/contraintes biophysiques. En raison de la petite taille des propriétés, elles peuvent couvrir différents contextes, de celui où une seule unité pédomorphologique est présente à celui qui couvrant un large panel d'unités. Dans les propriétés éloignées du centre urbain et des routes principales, la logique de production est fortement contrainte par l'enclavement et les agriculteurs s'orientent vers le manioc, un produit alimentaire de base qui se conserve bien une fois transformé en farine.

La distance des ressources en eau est fondamentale dans les propriétés familiales, guidant les logiques de localisation de la résidence et des cultures. Ainsi, la plupart des activités se déroulent dans la vallée, à proximité de la résidence et des ressources en eau, tandis que les parties supérieures du relief, les pentes fortes et les plateaux argileux restent généralement en forêt. Cependant, dans la partie des propriétés qui couvre les plateaux argileux, de nombreux petits agriculteurs ont investi dans la plantation du poivre noir. Cependant, la distance du centre urbain et des routes asphaltées sont des facteurs qui peuvent transformer complètement la logique d'occupation du sol des exploitations familiales : des activités à forte intensité en capital et/ou en main-d'œuvre qui nécessitent un accès facile au marché peuvent être développées dans les secteurs proches des routes ou des zones urbaines, comme l'horticulture et l'élevage laitier. Dans les secteurs accessibles, lorsqu'une partie ou la totalité des petites propriétés est située sur le plateau argileux, elles peuvent être louées ou achetées par les sojéculteurs.

On observe donc que les systèmes de décision d'usage des ressources et contraintes biophysiques varient en fonction de la taille et de l'emplacement des exploitations et des caractéristiques des ressources biophysiques dans celle-ci. Ce sont ces éléments qui influencent quelle production agricole peut être faite, et vice-versa, la demande de terres pour une production agricole donnée s'oriente en fonction des ressources/contraintes naturelles, de l'accessibilité et de la taille des propriétés.

Ces relations conduisent alors à vérifier la deuxième hypothèse, qui énonce que « différentes combinaisons de ressources et contraintes biophysiques et de systèmes de décision produisent une mosaïque d'occupations du sol qui peut être divisée en unités homogènes que s'organisent spatialement ». Cette hypothèse a été travaillée avec la définition de groupes d'exploitations ayant des caractéristiques similaires d'occupation du sol, de potentiel agricole et de type de production, par des techniques de clustering. Les résultats montrent que bien que la répartition spatiale de nombreux groupes soit apparemment aléatoire, nous pouvons noter que certaines tendances spatiales se manifestent, comme : la concentration d'exploitations qui produisent du soja le long des routes asphaltées ; de grandes exploitations avec prédominance de forêts primaires sur les plateaux argileux dans la région Ouest de la municipalité ; de petites exploitations avec forte proportion de pâturages et de forêts secondaires situées principalement au fond des vallées. Cela tend à montrer un processus de « maturation » des différents secteurs du paysage, dans lequel les logiques d'utilisation du sol s'adaptent aux caractéristiques du territoire.

La troisième hypothèse supposait que l'importance des ressources biophysiques varie dans le temps selon des phases de logiques d'occupation du sol en fonction des ressources et contraintes biophysiques. Si la définition des types de propriétés n'est pas forcément évidente, en partie pour des raisons méthodologiques, la variation temporelle des systèmes de décision est claire, surtout si nous les considérons du point de vue de l'exploitation, où différentes productions peuvent se succéder dans le temps. Un exemple évident de ces changements est la valorisation du plateau argileux comme support de la culture de grains. Avant cette activité, ce domaine pédomorphologique était secondaire dans la dynamique du front. Ainsi, la combinaison d'une activité à forte intensité en capital, de grandes exploitations au potentiel agricole hétérogène et de terres relativement bon marché (ce qui permet de choisir des parcelles à plus fort potentiel) a entraîné l'intensification de certaines zones et l'abandon d'autres moins favorables, comme les pentes abruptes et vallons humides, précédemment utilisés pour les pâturages. En ce sens, la dimension temporelle est

fondamentale lorsque l'on met en relation le front pionnier et les ressources biophysiques. Comme constaté à Paragominas et dans d'autres études, l'évolution du front pionnier a montré que les ressources/contraintes biophysiques sont de plus en plus présentes dans le processus décisionnel des acteurs ruraux. Bien que tous les fronts pionniers ne fonctionnent pas de la même manière, la réduction progressive de la végétation naturelle, l'intensification et la diversification des activités, les politiques environnementales et une plus grande connexion avec les marchés, conduisent les acteurs des territoires à mieux valoriser leurs ressources naturelles.

A Paragominas, les facteurs biophysiques sont déterminants dans le paysage et ont conditionné spatialement la dynamique de la production et, par conséquent, la structure de l'occupation du sol. Ces facteurs doivent donc être pris en compte lorsqu'il s'agit de politiques liées à l'environnement rural. Si l'on considère les plateaux argileux, par exemple, en même temps qu'ils sont valorisés pour la production agricole, ils présentent encore de grands fragments de forêt. Cette situation nécessite des politiques qui permettent un équilibre entre les demandes des agriculteurs et la protection de l'environnement. Les projets de restauration forestière (comme les réserves légales) pourraient être définis dans des zones qui sont plus efficaces du point de vue des services environnementaux et qui ont moins de potentiel agricole (comme le suggère le projet Terracert). Les secteurs pédomorphologiques des pentes fortes, les vallons secs et humides et les zones inondables sont des zones clés pour restaurer de façon plus efficace les services environnementaux.

Il devient encore plus évident dans le cas des propriétés des agriculteurs familiales, qu'en raison de leur petite taille, elles peuvent seulement contenir un ou deux types de secteurs pédomorphologiques, ce qui génèrent ainsi des potentiels différents entre les propriétés. Certaines productions plus ou moins spécialisées peuvent être observées, comme c'est le cas de l'élevage laitier sur les versants sableux à l'*assentamento* Camapuã et du poivre noir sur les plateaux argileux dans l'*assentamento* Luiz Inácio, ce qui suggère l'implantation des politiques d'appui à des productions en lien avec les caractéristiques du paysage.

Une meilleure prise en compte des facteurs biophysiques dans la modélisation d'occupation du sol est fondamentale pour comprendre l'évolution du front pionnier notamment dans ses phases de maturation et pour explorer des scénarios futurs afin de mieux orienter les politiques d'aménagement du territoire. L'analyse de l'évolution du front pionnier a mis en évidence des facteurs jusqu'alors peu pris en compte dans les modèles, pourtant très importants dans le cas d'espaces fortement hétérogènes du

point de vue biophysique, avec des implications directes sur la dynamique de l'occupation du sol. Ces différences biophysiques influencent non seulement la dynamique d'occupation du sol du point de vue de la production agricole et de la conservation de la forêt, mais peuvent également être des éléments pertinents pour d'autres enjeux qui ont fait l'objet de modélisation et d'exploration de scénarios futurs. C'est le cas, par exemple, des modèles concernant l'impact de l'occupation du sol sur le changement climatique, les stocks de carbone, la biodiversité, la dégradation et régénération des forêts, la dégradation des pâturages, les incendies de forêt, les zones de protection environnementale et les unités de conservation, ainsi que les impacts sur les ressources en eau et l'érosion des sols.

On observe que soit du fait de changements de production, soit de changements de gestion d'une production (intensification par exemple), la configuration de l'occupation du sol par rapport aux facteurs biophysiques peut changer complètement. Cela constitue un défi pour la modélisation des fronts pionniers car une grande partie de la modélisation des changements d'occupation du sol se fait actuellement de façon binaire forêt / non-forêt. Si l'on considère les changements entre les différentes utilisations du sol et, à l'intérieur des utilisations, les différents types de gestion, il est possible de mieux définir les relations entre les processus spatiaux et les déterminants spatiaux tels que les facteurs biophysiques, ce qui peut permettre des simulations plus précises.

La modélisation effectuée ici, à l'aide de méthodes déjà reconnues, a permis d'évaluer le comportement de l'occupation du sol par rapport aux facteurs biophysiques en interaction avec d'autres facteurs spatiaux. Plusieurs autres modèles incluent également des facteurs biophysiques comme déterminants spatiaux, mais ceux-ci sont toujours considérés comme secondaires. Il est possible désormais qu'avec le développement de modèles qui prennent en compte les différents types d'utilisation/gestion du sol et des données spatiales à une échelle fine, les interactions entre les processus sociaux et le contexte biophysique sur le front pionnier puissent être mieux révélées.

Le présent travail comportait des données spatiales à moyenne résolution qui, dans un environnement d'une grande hétérogénéité biophysique, mettent en évidence les relations entre l'occupation du sol et des facteurs tels que la topographie et le sol. La même procédure pourrait être appliquée aux régions d'expansion récente du soja en Amazonie, telles que les municipalités voisines de Paragominas et de la région de Santarém, et aussi dans le biome du *cerrado*, comme la région MATOPIBA. Toutes

ces régions présentent des caractéristiques topographiques similaires, telles que la présence de vastes plateaux à faible densité de drainage, séparés par des vallées à faible valeur pour les cultures de grains.

Pour d'autres régions, il est possible que la résolution et la qualité des données spatiales soient fondamentales pour la bonne définition des relations avec les facteurs biophysiques. D'une part, les modèles pour l'ensemble de l'Amazonie brésilienne qui utilisent des données de résolution kilométrique masquent toute une dynamique spatiale plus fine. D'autre part, même les modèles au niveau des régions, des Etats, des municipalités ou des bassins hydrographiques manquent de données biophysiques à échelle fine. Par exemple, les modèles qui considèrent le réseau de drainage à une échelle fine sont rares, principalement en raison de l'absence de telles données ce qui pose des problèmes notamment pour l'analyse des aires de protection permanentes ou de la vulnérabilité des cours d'eau aux pollutions. La définition automatique du réseau de drainage par des MNT est rendue incertaine par les erreurs que la canopée forestière provoque dans ces calculs. Il en va de même pour la définition des unités de relief ou de pente. Les données sur les types de sols à une échelle satisfaisante sont également rares en Amazonie : les cartographies existantes sont soit très grossières, soit correspondent à des classifications qui ne sont pas toujours appropriées d'un point de vue agronomique.

Si la présente étude s'appuie sur des variables biophysiques à résolution spatiale relativement bonne (unités pédomorphologiques, par exemple), elle a été limitée à certains moments en raison de la résolution moyenne de la classification de l'occupation du sol utilisée. Ceci est particulièrement évident dans le cas de l'agriculture familiale, où il n'a pas été possible de distinguer les parcelles de cultures agricoles, comme le manioc et le poivre noir, des forêts secondaires, étant donné la finesse de la mosaïque d'occupation du sol.

La définition d'une série temporelle d'occupation du sol plus longue et avec une meilleure résolution spatiale est fondamentale. La définition plus précise des classes de forêts secondaires et des petites parcelles de culture, ainsi que l'identification des différents niveaux de qualité des pâturages, la plantation d'arbres à différentes échelles et l'identification des parcelles qui effectuent des intégrations telles que les cultures-élevage est importante pour une analyse plus détaillée de la dynamique du paysage à Paragominas.

La disponibilité des limites des exploitations, considérées comme des unités de base

de la dynamique d'occupation du sol gérée par un acteur, ouvre des possibilités pour d'autres types de modèles, comme c'est le cas pour les modèles basés sur des agents. La modélisation de l'occupation du sol à l'échelle de la propriété peut également bénéficier par la définition d'une typologie de propriétés ayant des caractéristiques similaires. La méthode de partitionnement de données testée dans la présente étude a montré le potentiel de cette approche.

Il convient également de noter que la procédure de modélisation ne tient compte explicitement que de facteurs internes au territoire, les interactions avec d'autres territoires et les marchés extérieurs ont été pris en compte très indirectement par l'accessibilité aux routes. Le réalisme de nos résultats doit tenir compte de cet aspect, notamment pour l'exploration de scénarios futurs, car une grande partie de la dynamique d'un territoire et de l'occupation du sol qui le compose dépend de facteurs externes, tels que les prix des produits, l'ouverture de ports d'exportation ou le développement de métropoles régionales.

Bibliographie

- Ab'Saber, A. 2003. *Os Domínios de Natureza No Brasil: Potencialidades Paisagísticas*. Ateliê Editorial, São Paulo, Brésil.
- Aguiar, A P D et al. 2016. "Land Use Change Emission Scenarios : Anticipating a Forest Transition Process in the Brazilian Amazon." *Global Change Biology* 22 p. 1821–40.
- Aguiar, A P D, G Câmara, et M Escada. 2007. "Spatial Statistical Analysis of Land-Use Determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring Intra-Regional Heterogeneity." *Ecological Modelling* 209 (2–4) p. 169–88.
- Aguiar, A P D. 2006. "Modeling Land Use Change in the Brazilian Amazon: Exploring Intra-Regional Heterogeneity." Thèse, INPE, Brésil.
- Alcamo, J. 2001. *Scenarios as Tools for International Environmental Assessments - Environmental Issue Report n° 24*. European Environment Agency, Copenhagen.
- Almeida, A W B. 1990. "The State and Land Conflicts in Amazonia, 1964-88." In *The Future of Amazonia*, eds. Goodman et al., David Goodman and Anthony Hall, p. 226–27.
- Almeida, C A. 2016. "Paysage Des Systèmes de Production Agropastoraux de l'État Du Rondônia-Azonie Brésilienne." Thèse, Université Montpellier, France.
- Amin, S. 1977. "Imperialism and Unequal Development." Montly Review Press, New York, USA.
- An, L et al. 2005. "Human-Environment Exploring Complexity an Agent-Based Model for System : Spatial and Multiscale Integration Multidisciplinary and Multiscale Integration." *Annals of the Association of American Geographers* 95(1) p. 54–79.
- Andersen, L, et E Reis. 1997. *Deforestation, Development, and Government Policy in the Brazilian Amazon: An Econometric Analysis*. IPEA Discussion Paper n. 69, Brésil.
- Andrade, R P. 2015. The Poor Soil of the Barn of the World: Forestry Development and Fight against Hunger in the Brazilian Amazon." *Estudos Historicos* 28(56) p. 285–304.
- Angelsen, A., et D Kaimowitz. 2001. *Agricultural Technologies and Tropical Deforestation*. CIFOR - CABI Publishing.
http://www.cifor.org/publications/pdf_files/books/bangelsen0101e0.pdf%5Cnhttp://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=cUbtncZAh8C&pgis=1.
- Arima, E, P Richards, R Walker, et M Caldas. 2011. "Statistical Confirmation of Indirect Land Use Change in the Brazilian Amazon." *Environmental Research Letters* 6(2).
- Arima, E Y, R T Walker, S G Perz, et M Caldas. 2005. "Loggers and Forest Fragmentation: Behavioral Models of Road Buildings in the Amazon Basin." *Annals of the Association of American Geographers* 95(3) p. 525–41.
- Arima, E, R T Walker, et S Perz. 2015. "Explaining the Fragmentation in the Brazilian Amazonian Forest." *Journal of Land Use Science* (May) p. 37–41.
- 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, Université Rennes, France.
- . 2018. "Monitoring Thirty Years of Small Water Reservoirs Proliferation in the Southern Brazilian Amazon with Landsat Time Series." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (145) p. 225–37.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.015>.
- Asner, G P. et al. 2009. "A Contemporary Assessment of Change in Humid Tropical Forests." *Conservation Biology* 23(6) p. 1386–1395.

- Assis, T O, L S Soler et A P D Aguiar. 2011. "Assessing risk maps of deforestation to the Brazilian Amazon using LuccME framework". *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de Abril a 05 de Maio de 2011*. INPE p. 6042–6049.
- Ballon, N et al. 2016. "Les Capoierras au Prisme des Trajectoires des Exploitations Agricoles. Cas de Paragominas, État du Para, Amazonie Brésilienne." In *10e Journées de Recherches En Sciences Sociales*, Paris, France. p. 1–20.
- Barber, C P, M A Cochrane, C M Souza, et W F Laurance. 2014. "Roads, Deforestation, and the Mitigating Effect of Protected Areas in the Amazon." *Biological Conservation* 177 p. 203–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>.
- Barni, P E, P M Fearnside, et P M L A Graça. 2014. "Simulating Deforestation and Carbon Loss in Amazonia: Impacts in Brazil's Roraima State from Reconstructing Highway BR-319 (Manaus-Porto Velho)." *Environmental Management* 55(2) p. 259–78.
- Barona, E, N Ramankutty, et G Hyman. 2010. "The Role of Pasture and Soybean in Deforestation of the Brazilian Amazon." *Environmental Research Letters* 5.
- Barreto, P, et M Mesquita. 2009. *Como Prevenir e Punir Infrações Ambientais em Áreas Protegidas na Amazônia?* IMAZON, Belém, Brésil.
- Batistella, M, E S Brondizio, et E F Moran. 2000. "Comparative Analysis of Landscape Fragmentation in Rondônia, Brazilian Amazon." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII* p. 148–55.
- Becker, B K. 2001. "Modelos e Cenários Para a Amazônia: O Papel da Ciência. Revisão das Políticas de Ocupação da Amazônia: É Possível Identificar Modelos Para Projetar Cenários?" *Parcerias Estratégicas* 12(12) p. 135–59. <http://www.scielo.br/pdf/se/v22n3/08.pdf>.
- Bellón, B et al. 2018. "Improved Regional-Scale Brazilian Cropping Systems' Mapping Based on a Semi Automatic Object-Based Clustering Approach." *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 68: 127–38. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.019>.
- Bispo, C J C. 2007. "Balanço de Água em Área de Cultivo de Soja No Leste da Amazônia." *Mémoire de recherche*, UFPA, Brésil.
- Bolliger, J, J C Sprott, et D J Mladenoff. 2003. "Self-Organization and Complexity in Historical Landscape Patterns." *OIKOS* 100 p. 541–53.
- Bonham-Carter, G. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. 1st ed. Oxford: Pergamon.
- Bousquet, F, et D Gautier. 1999. "Comparaison de Deux Approches de Modélisation des Dynamiques Spatiales Par Simulation Multi-Agents : Les Approches 'Spatiale' et 'Acteurs.'" *Cybergeo : European Journal of Geography* (89).
- Braga, P I S. 1979. "Subdivisão Fitogeográfica, Tipos de Vegetação, Conservação e Inventário Florístico da Floresta Amazônica." *Supl. Acta Amazonica* 9 p. 53–80.
- Bunker, S G. 1985. *Underdeveloping the Amazon: Extraction, Unequal Exchange, and the Failure of the Modern State*. University of Chicago, Chicago, USA.
- Burlamaqui, A B et al. 2013. "Paragominas ou la Succession de Modèles Controverses Pour l'Amazonie." In *Colloque international CANAL2013 - Circulations et appropriations des normes et des modèles de l'action locale 20-23 mars 2013 - Agropolis, Montpellier, France*, p. 1–12.
- Campos, P B R, C M Almeida, et A P Queiroz. 2018. "Educational Infrastructure and Its Impact on Urban Land Use Change in a Peri-Urban Area: A Cellular-Automata Based Approach." *Land Use Policy* 79(August) p. 774–88. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.036>.
- Caswell, H. 1988. "Theory and Models in Ecology: A Different Perspective." *Ecological Modelling* 43(1–2) p. 33–44.

- Caviglia-Harris, J, E Sills, et K Mullan. 2012. "Migration and Mobility on the Amazon Frontier." *Popul Environ.* 25 (Mars).
- Cerri, C et al. 2018. "Reducing Amazon Deforestation through Agricultural Intensification in the Cerrado for Advancing Food Security and Mitigating Climate Change." *Sustainability* 10(989) p. 1–18.
- Cialdella, N et al. 2015. "Do Political Changes Aimed at Reducing Amazonian Deforestation Contribute to Ecological Intensification?" *Cahiers Agricultures* 24(4) p. 246–54.
- Clarke, K, S H, et L Gaydos. 1997. "A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area." *Environment and Planning B: Planning and Design* 24 p. 247–61.
- Comaniciu, D, et P Meer. 2002. "Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24(5) p. 603–19.
- Costanza, R. 1989. "Model Goodness of Fit: A Multiple Resolution Procedure." *Ecological Modelling* 47(0304) p. 199–215.
- Costanza, R, et M Ruth. 1998. "Using Dynamic Modeling to Scope Environmental Problems and Build Consensus." *Environmental Management* 22(2) p. 183–95.
- Cook, K, et E Vizy. 2008. "Effects of Twenty-First-Century Climate Change on the Amazon Rain Forest." *Journal of Climate* 21 p. 542–560.
- Coquillard, P, et D R C Hill. 1997. *Modélisation et Simulation d'écosystèmes : des Modèles Déterministes aux Simulations à Événements Discrets*. Masson.
- Costa, L F, et R M Cesar. 2009. *Shape Classification and Analysis*. Taylor & Francis Group.
- Couclelis, H. 2001. "Why I No Longer Work with Agents." In *Agent Based Models of Land Use and Land Cover Change*, eds. D.C. Parker, T. Berger, et S.M. Manson. Indiana: Indiana University, p. 2–3.
- Dalla-Nora, E, A P D Aguiar, D Lapola, et G Woltjer. 2014. "Why Have Land Use Change Models for the Amazon Failed to Capture the Amount of Deforestation over the Last Decade?" *Land Use Policy* 39 (December 2017) p. 403–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.02.004>.
- Deffontaines, P. 1957. "L'introduction du Bétail en Amérique Latine." *Cahiers d'outre-mer* (37) p. 5–22.
- Defries, R S, J A Foley, et G P Asner. 2004. "Land-Use Choices: Balancing Human Needs and Ecosystem Function In a Nutshell :." *Front Ecol Environ.*, 2(5) p. 249–257.
- Defries, R S, T Rudel, M Uriarte, et M Hansen. 2010. "Deforestation Driven by Urban Population Growth and Agricultural Trade in the Twenty-First Century." *Nature Geoscience* 3(3) p. 178–81. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo756>.
- Degenne, P et al. 2010. "Modelling the Environment Using Graphs with Behaviour : Do You Speak Ocelet ?" In *IEMSS 2010 Ottawa, Canada*. p. 8.
- Díaz, S, J Settele, et E Brondizio. 2019. "Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services - ADVANCE UNEDITED VERSION – Assessment Key Messages". *IPBES United Nations Environment Program* 6 May 2019.
- Dosso, M et al. 2005. "Agriculture ou Élevage ? Rôle des Couvertures Pédologiques dans la Différenciation et la Transformation de Systèmes Agraires Pionniers au Brésil." *Cahiers Agricultures* 14(1) p. 76–84. [http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/agr/e-docs/00/04/0D/70/article.phtml\(28/09/09\)%5Chttp://www.cahiersagricultures.fr/archives/sommaire.phtml?cle_parution=1019](http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/agr/e-docs/00/04/0D/70/article.phtml(28/09/09)%5Chttp://www.cahiersagricultures.fr/archives/sommaire.phtml?cle_parution=1019).
- Dubreuil, V et al. 2005. "Evolução da Fronteira Agrícola no Centro-Oeste de Mato Grosso: Municípios de Tangará da Serra, Campo Novo do Parecis e Diamantino." *Cadernos de Ciência & Tecnologia* 22(2) p. 463–78.
- . 2008. "Paysages et Fronts Pionniers Amazoniens Sous le Regard des Satellites: L'exemple du Mato Grosso." *Espace Géographique* 37(1) p. 57–74.

- Eastman, J R 2001. "Guide to GIS and Image Processing." *Clark University* (May) p. 17–34.
- Edmonds, B et al. 2019. "Different Modelling Purposes." *JASS* 22 (3)6. Doi: 10.18564/jasss.3993
- Eklundh, L, et P Jonsson. 2017. "TIMESAT 3.3 Software Manual." p. 1–92. <http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/>.
- Empinotti, V. 2015. "Beyond the Dualities: a Nuanced Understanding of Brazilian Soybean Producers." *Food Security* 7 p. 1165–1174. <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-015-0504-3>.
- De Faria, B et al. 2017. "Current and Future Patterns of Fire-Induced Forest Degradation in Amazonia." *Environ. Res. Lett* (at press). DOI: 10.1088/1748-9326/aa69ce
- Farmer, J D, et D Foley. 2009. "The Economy Needs Agent-Based Modelling." *Nature* 460(7256) p. 685–86.
- Fearnside, P M. 1987. "Deforestation and International Economic Development Projects in Brazilian Amazonia." *Conservation Biology* 1(3) p. 214–21.
- Fearnside, P M. 2007. "Brazil's Cuiaba- Santarém (BR-163) Highway: The Environmental Cost of Paving a Soybean Corridor through the Amazon." *Environmental Management* 39(5) p. 601–14.
- Fearnside, P M. 2001. "Soybean Cultivation as a Threat to the Environment in Brazil." *Environmental Conservation* 28(1) p. 23–38.
- Fearnside, P M. 1987. "Causes of Deforestation in the Brazilian Amazon." 37-61 In *Geophisiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions*, ed. R F Dickinson. John Wiley & Sons, New York. 526 p.
- Ferreira, D C. 2015. "Tecnologias Sociais, Conhecimentos e Práticas Associadas ao Uso Da Água em Assentamento Rural na Amazônia Central." *Mémoire de recherche*, UFAM - FIOCRUZ.
- Figueiredo, R. 2007. "Efeitos do Uso da Terra Sobre Processos Hidrológicos e Hidrogeoquímicos em Pequenas Bacias Na Amazônia." In *VIII Congresso de Ecologia Do Brasil*, Caxambu-MG, Brésil. p. 1–2.
- Fontes, F, et C Palmer. 2017. "Was von Thünen Right? Cattle Intensification and Deforestation in Brazil." *Grantham Research Institute on Climate Change and Environment*. <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2017/01/Working-paper-261-Fontes-Palmer-1.pdf>.
- Foweraker, J. 1981. "The Struggle for Land". Cambridge, Cambridge University Press.
- Freitas, M. 2010. "Desafios das Novas Fronteiras Florestais do Brasil." In *1o Congresso Florestal do Tocantins*, Palmas-TO, , Brésil. p. 1–25.
- Frey, B J, et D Dueck. 2007. "Clustering by Passing Messages Between Data Points." *Science* 315.
- FUNAI. 2017. "Índios no Brasil." *Governo Federal do Brasil*, Brésil. <http://www.funai.gov.br/index.php/indios-no-brasil/terras-indigenas> (Juin 5).
- Gaia, C et al. 2017. "Ocorrência de Veranicos em Paragominas–PA, Brasil." In *IV INOVAGRI International Meeting*, Brésil.
- Geist, H J, et E F Lambin. 2002. "Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation." *BioScience* 143 52(2) p. 143–50.
- Gibbs, H K et al. 2015. "Brazil's Soy Moratorium." *Science* 347(6220) p. 377–78. <http://www.sciencemag.org/content/347/6220/377.summary>.
- Gibbs, H K et al. 2010. "Tropical Forests Were the Primary Sources of New Agricultural Land in the 1980s and 1990s." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(38) p. 16732–1637. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0910275107>.
- Godar, J T, A Gardner, E J Tizado, et P Pacheco. 2014. "Actor-Specific Contributions to the Deforestation Slowdown in the Brazilian Amazon." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(43) p.15591–15596. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1322825111>.

- Gollnow, F et al. 2018. "Scenarios of Land-Use Change in a Deforestation Corridor in the Brazilian Amazon : Combining Two Scales of Analysis." *Reg Environ Change* 18 p. 143–59.
- Gomes, J M. 2013. "Comportamento Silvicultural de Espécies Arbóreas Plantadas em Clareiras Criadas Pela Exploração Florestal de Impacto Reduzido na Amazônia Oriental." *Mémoire de recherche*, Universidade Federal da Amazonia, Brésil.
- Granado, L M A. 2016. "A Expansão do Reflorestamento de Eucaliptos na Região de Imperatriz–MA." *Mémoire de recherche*, UnB, Brésil.
- Greenpeace. 2006. *Eating up the Amazon*. <http://www.greenpeace.org/usa/wp-content/uploads/legacy/Global/usa/planet3/PDFs/eating-up-the-amazon-executiv.pdf>.
- . 2009. *A Farra do Boi na Amazonia*. <http://greenpeace.org.br/gado/farradoboinaamazonia.pdf>.
- Greissing, A. 2011. "A Região do Jarí, do Extrativismo ao Agronegócio: as Contradições do Desenvolvimento Econômico na Amazônia Florestal no Exemplo do Projeto Jarí." *Revista de Estudos Universitários da Universidade de Sorocaba*. 36 (3) p. 20-37.
- Grimaldi, C, P Curmi, M Dosso, et A Simões. 2002. "Sustainability of Agrarian Systems in Relation to Soils on Amazonian Forest Pioneer Fronts (Maraba, Brazil). In *17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand*.
- Hagen, A. 2003. "Fuzzy Set Approach to Assessing Similarity of Categorical Maps." *International Journal of Geographical Information Science* 17(3) p. 235–49.
- Hasan, A F. 2019. "Evaluation de la Dégradation des Forêts Primaires par Télédétection dans un Espace de Front Pionnier Consolide d'Amazonie Orientale (Paragominas)." *Thèse*, Le Mans Université, France.
- Hastie, T, R Tibshirani, et J Friedman. 2008. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd Springer.
- Hecht, S B. 1993. "The Logic of Livestock and Deforestation in Amazonia." *BioScience* 43(10) p. 687–95.
- Hervé, T, et N A Melo. 2008. *Atlas do Brasil: Disparidades e Dinâmicas do Território*. 2nd EDUSP, São Paulo, Brésil.
- Homma, A K O. 2005. "A Expansão da Soja na Amazônia: a Repetição do Modelo da Pecuária ?" In ed. *E B Andrade. A Geopolítica da Soja na Amazônia. Belém: Embrapa Amazônia Oriental; Museu Paraense Emílio Goeldi, 2005. 280 p.* ISBN 85-87690-45-01. p.77-105.
- Hostiou, N, J F Tourrand, J Huguenin, et P Lecomte. 2006. "La Diversité de Gestion des Systèmes Herbagers en Amazonie. Cas des Élevages Bovins Brésiliens." *Fourrages* 187 p. 377–92.
- Houet, T, et L Hubert-Moy. 2006. "Modeling and Projecting Land-Use and Land-Cover Changes with Cellular Automaton in Considering Landscape Trajectories." In *EARSeL eProceedings* 5(1) p. 63–76. [http://hal.univ-brest.fr/docs/00/19/58/47/PDF/05_1_houet1.pdf%5Cnfiles/609/Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton.pdf](http://hal.univ-brest.fr/docs/00/19/58/47/PDF/05_1_houet1.pdf%5Cnfiles/609/Modeling%20and%20projecting%20land-use%20and%20land-cover%20changes%20with%20Cellular%20Automaton.pdf).
- INPE. 2018a. *PRODES - Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. Brésil. <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>.
- . 2018b. "Taxas Anuais de Desmatamento na Amazônia Legal Brasileira." Brésil. <http://www.obt.inpe.br/prodes/dashboard/prodes-%0Arates.html> (January 20, 2018).
- Irwin, E G., et J Geoghegan. 2001. "Theory, Data, Methods: Developing Spatially Explicit Economic Models of Land Use Change." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85(1–3) p. 7–24. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880901002006>.
- Kaimowitz, D, et A Angelsen. 1998. *Economic Models of Tropical Deforestation: A Review*. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Kamusoko, C et al. 2011. "Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR." *Forests* 2(3) p. 707–29.

- Kearns, K C. 1969. "Amazonia: The Emergence of Brazil's Northern Frontier." *Journal of Geography* 1341(June).
- Kearns, M, Y Mansour, et A Ng. 1998. "An Information-Theoretic Analysis of Hard and Soft Assignment Methods for Clustering." In *Learning in Graphical Models, NATO Science Series. Kluwer*, p. 495–520.
- Kellner, D. 2001. *Pimenta do Reino*. Coleção Plantar, 2 ed. EMBRAPA, Brasília-DF, Brésil.
- Kemp, L D, G F Bonham-Carter, et G L Raines. 1999. "Arc-WofE: Arcview Extension for Weights of Evidence Mapping." <http://www.ige.unicamp.br/wofe> (January 20, 2018).
- Khoi, D D, et Y Murayama. 2010. "Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam." *Remote Sensing* 2(5) p. 1249–72.
- Kingma, D P, et J Ba. 2015. "Adam: A Method for Stochastic Optimization." In *ICLR 2015*, p. 1–15. <http://arxiv.org/abs/1412.6980>.
- Kirby, K R et al. 2006. "The Future of Deforestation in the Brazilian Amazon." *Futures* 38 p. 432–53.
- Koh, L P, et D S Wilcove. 2007. "Cashing in Palm Oil for Conservation." *Nature* 448 (August).
- Kotschoubey, B et al. 2005. "Carcterização e Gênese dos Depósitos de Bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Noroeste da Bacia do Grajú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão." In *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*, eds. O J Marini, E T Queiroz, et B W Ramos. Brasília: DNPM - CT-Mineral/FINEP - ADIMB, p. 687–782.
- Lahboub, Y, E M Bachaoui, A E Harti, et A E Ghmari. 2018. "Multi-Level Cellular Automata-Based Housing Allocation Model for Small Cities in Developing Countries: A Case Study of Kasba-Tadla City, in Morocco." *International Journal of Urban Sustainable Development* 10(2) p. 186–202. <https://doi.org/10.1080/19463138.2018.1461628>.
- Lambin, E. F. 1994. "Modelling Deforestation Processes: A Review." *Trees Series B Report Luxembourg: European Commission*. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431169608949066>.
- . 1997. "Modelling and Monitoring Land-Cover Change Processes in Tropical Regions." *Progress in Physical Geography* 21 p. 375–93.
- Landis, J R, et G G Koch. 1977. "The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data Published by : International Biometric Society." *Biometrics* 33(1) p. 159–74. <http://www.jstor.org/stable/2529310>
- Lapola, D M et al. 2011. "Impacts of Climate Change and the end of Deforestation on Land Use in the Brazilian Legal Amazon." *Earth Interactions* 15(16).
- Lapola, D M et al. 2014. "Pervasive Transition of the Brazilian Land-Use System." *Nature Climate Change* 4(1) p. 27–35. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2056>.
- Laurance, W F et al. 2002. "Predictors of Deforestation in the Brazilian Amazon." *Journal of Biogeography* 29(5) p. 737–48. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2699.2002.00721.x/epdf>.
- Laurent, F, D Arvor, et al. 2017. "Le Tournant Environnemental en Amazonie : Ampleur et Limites du Découplage entre Production et Déforestation." *EchoGéo* 41(September) p. 0–27.
- Laurent, F, R Pocard-Chapuis, S Plassin, et G Pimentel. 2017. "Soil Texture Derived from Topography in North-Eastern Amazonia." *Journal of Maps* 13 (2).
- Leal, G L R. 2000. *Paragominas - A Realidade Do Pioneirismo*. Editora Alves, Brésil.
- Lentini, M, D Pereira, D Caletano, et R Pereira. 2005. *Fatos Florestais da Amazônia*. Imazon, Belém, Brésil.
- Liaw, A, et M Wiener. 2018. "Package 'RandomForest.'" <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/NeedsCompilation>.
- Lippe, M et al. 2019. "Using Agent-Based Modelling to Simulate Social-Ecological Systems across Scales." *Geoinformatica* 23(2) p. 269–98.

- Macedo, M N et al. 2011. "Decoupling of Deforestation and Soy Production in the Southern Amazon during the Late 2000s." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(4) p. 1341–46. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1111374109>.
- Machado, L, et R Pasquis. 2004. "Deforestation in Amazônia: The Actual Situation is Difficult to Pinpoint." p. 27-39. In ed. D Babin. *Beyond Tropical Deforestation: From Tropical Deforestation to Forest Cover Dynamics and Forest Development*. UNESCO/CIRAD, Paris.
- Maeda, E et al. 2011. "Dynamic Modeling of Forest Conversion: Simulation of Past and Future Scenarios of Rural Activities Expansion in the Fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(3) p. 435–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2010.09.008>.
- Maestriperi, N et al. 2017. "Monitoring of Chronological Stages of Deforestation – Afforestation: The Case of Southern Chile" *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, Editions Eska.
- Maithani, S, A Begum, P Kumar, et A S Kumar. 2018. "Simulation of Peri-Urban Growth Dynamics Using Weights of Evidence Approach." *Geocarto International* 33 (9) p. 957–76. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2017.1319425>.
- Malek, Z, et L Boerboom. 2015. "Participatory Scenario Development to Address Potential Impacts of Land Use Change: An Example from the Italian Alps." *Mountain Research and Development* 35(2) p. 126–38.
- Malhi, Y et al. 2009. "Exploring the Likelihood and Mechanism of a Climate-Change-Induced Dieback of the Amazon forest." *PNAS* 106(49).
- Manson, S M. 2001. "Simplifying Complexity: A Review of Complexity Theory." *Geoforum* 32.
- Marengo, J A et al. 2012. "Development of Regional Future Climate Change Scenarios in South America Using the Eta CPTec/HadCM3 Climate Change Projections: Climatology and Regional Analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins." *Clim Dyn* p. 1829–48.
- Margulis, S. 2003. *Causas do Desmatamento da Amazônia Brasileira*. Banco Mundial, Brasília. <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1185895645304/4044168-1185895685298/010CausasDesmatamentoAmazoniaBrasileira.pdf>.
- Martinello, A, et S Schneider. 2010. "Paralelos entre Antônio Cândido e Alexandre Chayanov: Economia Fechada, Equilíbrio Mínimo e Rusticidade." *Revista Territórios e Fronteiras* p. 138–58.
- Mas, J F, B Soares-Filho, et H Rodrigues. 2015. "Calibrating Cellular Automata of Land Use/Cover Change Models Using a Genetic Algorithm." In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W3*: 67–70. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W3/67/2015/>.
- Mas, J F et al. 2011. "Éclairer le Choix des Outils de Simulation des Changements des Modes d'occupation et d'usages des Sols. Une Approche Comparative." *Revue internationale de géomatique* 21(3) p. 405–30.
- Mas, J F et al. 2014a. "Inductive Pattern-Based Land Use/Cover Change Models: A Comparison of Four Software Packages." *Environmental Modelling and Software* 51 p. 94–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>.
- Mattos, M., et C. Uhl. 1994. "Economic and Ecological Perspectives on Ranching in the Eastern Amazon." *World Development* 22(2) p. 145–58. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305750X94900663>.
- Mattos, P L P, A R N Farias, et J R Ferreira Filho. 2006. *Mandioca - 500 Perguntas 500 Respostas*. EMBRAPA, Brasília, Brésil.
- McGarigal, K. 2015. *Fragstats Help*. <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>.
- Mendoza-Ponce, A et al. 2018. "Identifying Effects of Land Use Cover Changes and Climate Change on Terrestrial Ecosystems and Carbon Stocks in Mexico." *Global Environmental Change* 53(August): p. 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>.
- Mertens, B, et E F Lambin. 1997. "Spatial Modelling of Deforestation in Southern Cameroon." *Applied Geography*

- 17(2) p. 143–62. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622897000325>.
- Messina, J P, et S J Walsh. 2001. "Simulating Land Use and Land Cover Dynamics in the Ecuadorian Amazon through Cellular Automata Approaches and an Integrated GIS." *Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community in Rio de Janeiro* p. 1–13.
- Meyfroidt, P. 2016. "Approaches and Terminology for Causal Analysis in Land Systems Science." *Journal of Land Use Science*. DOI: 10.1080/1747423X.2015.1117530
- Meyfroidt, P, E F Lambin, K Erb, et T W Hertel. 2013. "Globalization of Land Use: Distant Drivers of Land Change and Geographic Displacement of Land Use." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5(5) p. 438–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.04.003>.
- MMA. 2015. *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada*. Itamaraty, Brésil. http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf.
- . 2016. "Plano Operativo 2016-2020 PPCDAm." Brésil. p. 1–60. [https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80120/Anexo II - PLANO OPERATIVO DO PPCDAm - GPTI _p site.pdf](https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80120/Anexo%20II%20-%20PLANO%20OPERATIVO%20DO%20PPCDAm%20-%20GPTI%20_p%20site.pdf).
- Monteiro Junior, J J, E A Silva, A L A Reis, et J P M S Santos. 2019. "Dynamical Spatial Modeling to Simulate the Forest Scenario in Brazilian Dry Forest Landscapes." *Geology, Ecology, and Landscapes* 3(1) p. 46–52. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1481658>.
- Moran, E F, E Brondizio, P Mausel, et Y Wu. 1994. "Integrating Amazonian Vegetation, Land-Use, and Satellite Data." *BioScience* 44(5) p. 329–38.
- Moreira, E et al. 2009. "Dynamical Coupling of Multiscale Land Change Models." *Landscape Ecology* 24(9): p. 1183–1194.
- Morton, D C et al. 2006. "Cropland Expansion Changes Deforestation Dynamics in the Southern Brazilian Amazon." *PNAS* 103(39).
- Mustard, J F., R S Defries, T Ficher, et E F Moran. 2012. "Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts." In ed. G. Gutman. *Land Change Science. Remote Sensing and Digital Image Processing*, p. 107–11.
- Nelson, B W, B S Soares-Filho, et A L K M Albernaz. 2009. "Present and Future Loss of Climate Niches in the Forested Brazilian Amazon." *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brésil, (June 2016)* p. 5337–5342.
- Nepstad, D et al. 2002. "Frontier Governance in Amazonia." *Science* 295.
- . 2014. "Slowing Amazon Deforestation through Public Policy and Interventions in Beef and Soy Supply Chains." *Science* 344 (6188) p. 1118–23. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24904156>.
- Nepstad, D C., C M Stickler, et O T Almeida. 2006. "Globalization of the Amazon Soy and Beef Industries: Opportunities for Conservation." *Conservation Biology* 20(6) p. 1595–1603.
- OIMT. 2016. *Reseña Biental y Evaluación de La Situación Mundial de Las Maderas 2015-2016*. https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=5194&no=1&_lang=es.
- Oliveira, A B. 2019. "Indústria de Celulose e o Avanço da Silvicultura do Eucalipto na Fronteira Agrícola da Amazônia Maranhense." *Geosul* 34(71) p. 301–27.
- Oliveira, A B, J M Pereira, et A A Nascimento. 2018. "Cadeia Produtiva de Papel e Celulose e Transformações Recentes no Sudoeste Maranhense." *InterEspaço* 4(12) p. 135–154.
- Oliveira, F. 1972. *A Economia Brasileira: Crítica à Razão Dualista*. Estudos Cebrap, Brésil.
- Oliveira, L J C, M H Costa, B S Soares-Filho, et M T M Coe. 2013. "Large-Scale Expansion of Agriculture in Amazonia May Be a No-Win Scenario." *Environmental Research Letters* 8(2) 024021. <http://stacks.iop.org/1748-9326/8/i=2/a=024021>.

- Oliveira, P J C et al. 2007. "Land-Use Allocation Protects the Peruvian Amazon Author(S):" *Science* 317(5842) p. 1233–1236.
- Olmedo, M T C, M Paegelow, et Pilar García Martínez. 2007. "Modélisation Géomatique Rétrospective des Paysages par Évaluation Multicritères et Multiobjectifs." *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, UMR 8504 Géographie-cités, 24 p.
- Pacheco, P et al. 2011. "Landscape Transformation in Tropical Latin America: Assessing Trends and Policy Implications for REDD+." *Forests* 2(1) p. 1–29.
- Pacheco, P, et R Pocard-Chapuis. 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(6) p. 37–41.
- Paegelow, M, M T C Olmedo, et J M Toribio. 2004. "Modelización Prospectiva del Paisaje Mediante Sistemas de Información Geográfica." *Geofocus* 3 p. 22–24.
- Paegelow, M et al. 2004. "Modélisations Prospectives de l'occupation du Sol. Le Cas d'une Montagne Méditerranéenne." *CyberGeo* 295 p. 1–21.
- Paegelow, M, M T C Olmedo, J F Mas, et T Houet. 2015. "Benchmarking of LUCC Modelling Tools by Various Validation Techniques and Error Analysis." *Cybergeo : European Journal of Geography [Online], Systems, Modelling, Geostatistics, document 701, Online since 22 December 2014, connection on 02 July 2019.* <http://journals.openedition.org/cybergeo/26610> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26610 9.
- Paegelow, M, N Maestriperi, N S Villalobos, et D T Balbontín. 2012. "Détection des Plantations Forestières par Imagerie Satellite MODIS dans le Sud du Chili." *Mappemonde* 106(2) p. 1–22.
- Panday, Prajjwal K et al. 2015. "Deforestation Offsets Water Balance Changes Due to Climate Variability in the Xingu River in Eastern Amazonia." *Journal of Hydrology* 523 p. 822–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.018>.
- Pará. 2015. "Instrução Normativa 08 de 28/10/2015." Brésil. <https://www.semas.pa.gov.br/2015/11/03/instrucao-normativa-no-08-de-28-de-outubro-de-2015>.
- Paragominas. 2011. "Lei N° 765/2011 (Código Ambiental Municipal de Paragominas)" Brésil. <https://camaraparagominas.pa.gov.br/lei-no-765-2011-de-26-de-julho-de-2011/>
- Pebayle, R. 1981. "Dynamique Pionnière et Organisation de l'espace Au Brésil." 247-256. In *Les Phénomènes de Frontière Dans Les Pays Tropicaux*, Éditions de l'IHEAL.
- Penteado, J. 2018. "Perguntas e Respostas - Transferência e Tecnologia Florestal." EMBRAPA, Brésil. 34 p.
- Perrier, F. 2014. "Caractérisation et Cartographie de l'éco-Efficience Des Pâturages Amazoniens à l'aide d'images MODIS." *Mémoire de recherche*, Université du Maine, France.
- Perz, S et al. 2009. "Cenários Futuros de Paisagens Amazônicas: Modelos Económétricos e de Simulação de Dinâmica." pp. 83-100. In eds. *M Keller, M Bustamante, J Gash et P S Dias. Amazonia and Global Change* 186. *American Geophysical Union*.
- Pfaff, A S P. 1999. "What Drives Deforestation in the Brazilian Amazon?" *Journal of Environmental Economics and Management* 37 p. 26–43.
- Pijanowskia, B C, D G Brown, B A Shellito, et G A Manik. 2002. "Using Neural Networks and GIS to Forecast Land Use Changes: A Land Transformation Model." *Computers, Environment and Urban Systems* 26.
- Piketty, M-G et al. 2005. "Les Déterminants de l'Expansion de l'Élevage Bovin en Amazonie Orientale : Conséquences Pour les Politiques Publiques." *Cahiers Agricultures* 14(1), janvier-février.
- Piketty, M-G et al. 2015. "Multi-Level Governance of Land Use Changes in the Brazilian Amazon: Lessons from Paragominas, State of Pará." *Forests* 6(5) p. 1516–36. <http://www.mdpi.com/1999-4907/6/5/1516/>.
- Piketty, M-G, T Morello, J-P Bouillet, et J-P Laclau. 2011. "Charbon de Bois et Sidérurgie En Amazonie Brésilienne : Quelles Pistes d'améliorations Environnementales ? L'exemple Du Pôle de Carajas." AFD

- Pinho, B C P. 2014. "Desmatamento e Uso e Cobertura da Terra: Um Estudo de Caso no Assentamento de Reforma Agrária Paragonorte, Pará." *Mémoire de recherche*, UFPA, Brésil.
- Pinto, A et al. 2009. "Diagnóstico Socioeconômico e Florestal do Município de Paragominas." *Relatório Técnico. Belém/PA*. Imazon, Brésil. 65 p.
- Plassin, S et al. 2017. "Paysage et Intensification de l'Élevage en Amazonie Brésilienne : de Nouvelles Dynamiques Spatio-Temporelles à l'Échelle des Exploitations Agricoles." *Confins* 33 p. 1–29.
- Plassin, S. 2018. "Élever des Bovins dans des Paysages Éco-Efficients. Comprendre et Modéliser le Processus d'intensification dans les Fermes d'Élevage d'Amazonie Orientale Brésilienne." *Thèse*. Cirad, France.
- Plassin, S, R Pocard-Chapuis, et J-F Tourrand. 2015. "Linking Landscape Patterns and Farm Trajectories : A Prerequisite to Design Eco-Efficient Landscapes in Agricultural Frontiers of Brazilian Eastern Amazon." In 5th International Symposium for Farming Systems Design, p. 7-10 September 2015, Montpellier, France.
- Pocard-Chapuis, R. et al. 2019. "Landscape Restoration in the Amazon." In *4th Open Science Meeting 2019 of de The Global Land Program*, Bern, Switzerland.
- Pocard-Chapuis, R. 2004. "Les Réseaux de la Conquête. Filières Bovines et Structuration de l'espace sur les Fronts Pionniers d'Amazonie Orientale Brésilienne." *Thèse*, Université de Paris X - Nanterre, France.
- Pocard, R, A Bendahan, et S Carvalho. 2015. "Amazonie, la Forêt qui Cache la Prairie." *Techniques & Culture* 63(1) p. 150–67.
- Polge, E, R Pocard-Chapuis, et M Piraux. 2016. "Territoires Émergents d'Amazonie : Analyse Comparée des Dynamiques Territoriales dans le Baixo Amazonas et le Nordeste Paraense." *Confins* 24.
- Pontius, R G, J D Cornell, et C A S Hall. 2001. "Modeling the Spatial Pattern of Land-Use Change with GEOMOD2: Application and Validation for Costa Rica." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85(1–3) p. 191–203.
- Pontius, R G, et N Neeti. 2010. "Uncertainty in the Difference between Maps of Future Land Change Scenarios." *Sustainability Science* 5(1) p. 39–50.
- Pontius, R G, et J S. 2005. "Uncertainty in Extrapolations of Predictive Land-Change Models." *Environment and Planning B: Planning and Design* 32(2) p. 211–30.
- Raines, G L, G F Bonham-Carter, et L Kemp. 2000. "Predictive Probabilistic Modeling Using ArcView GIS." <https://www.esri.com/news/arcuser/0400/files/wofe.pdf>
- Ramos, C J P, P M L A Graça, et P M Fearnside. 2018. "Deforestation Dynamics on an Amazonian Peri-Urban Frontier: Simulating the Influence of the Rio Negro Bridge in Manaus, Brazil." *Environmental Management* 62(6) p. 1134–49. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-018-1097-3>.
- Rego, R L. 2016. "Comunidades Planejadas Na Amazônia : O Urbanismo Rural e a Utopia de Uma Nova Civilização." In *XIV Coloquio Internacional de Geocritica, Universidad de Barcelona 2-7 de mayo de 2016 Barcelona, Espagne*. p. 2–7.
- Reis, E, et R Guzman. 1992. "An Econometric Model of Amazon Deforestation." *Rapport IPEA* 34, Brésil.
- Rennó, C D et al. 2008. "HAND, a New Terrain Descriptor Using SRTM-DEM: Mapping Terra-Firme Rainforest Environments in Amazonia." *Remote Sensing of Environment* 112(9) p. 3469–81.
- Richards, D G. 2010. "Contradictions of the 'New Green Revolution': A View from South America's Southern Cone." *Globalizations* 7(4) p. 563–76.
- Rodrigues, A S L et al. 2009. "Boom-and-Bust Development Patterns Across the Amazon Deforestation Frontier." *Science* 1435 (June).
- Rodrigues, H O, B S Soares-Filho, et W Costa. 2007. "Dinamica EGO, uma Plataforma para Modelagem de Sistemas Ambientais." In *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brésil.

21-26 Avril p. 3089–3096.

- Rodrigues, T et al. 2003. *Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Paragominas, Estado do Pará*. EMBRAPA, Belém, Brésil.
- Rokach, L, et O Maimon. 2005. *The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Springer.
- Rosa, I M D, D Purves, M B Carreiras, et R M Ewers. 2015. "Modelling Land Cover Change in the Brazilian Amazon: Temporal Changes in Drivers and Calibration Issues." *Reg Environ Change* p. 123–37.
- Rousseeuw, P J. 1987. "Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20(97).
- Rudel, T K, R Defries, G P Asner, et W F Laurance. 2009. "Changing Drivers of Deforestation and New Opportunities for Conservation." *Conservation Biology* 23(6) p. 1396–1405.
- Rudorff, B F T et al. 2011. "The Soy Moratorium in the Amazon Biome Monitored by Remote Sensing Images." *Remote Sensing* 3(1) p. 185–202.
- Rufo, T F. 2013. *Modernização Agrícola No Sudoeste Piauiense: Impactos Na Rede Urbana Regional , No Meio Ambiente e Nas Comunidades. Mêmorie de recherche*, UnB, Brésil.
- Rykiel, E. 1996. "Testing Ecological Models: The Meaning of Validation." *Ecological Modelling* 90 p. 229–244.
- Sabogal, C, E Almeida, D Marmillod, et J O P Carvalho. 2006. *Silvicultura Na Amazônia Brasileira: Avaliação de Experiências e Recomendações para Implementação e Melhoria dos Sistemas*. CIFOR/EMPRABA, Belém, Brésil.
- Salhins, M. 1972. *Age de Pierre, Âge d'abondance*. Gallimard, Paris France.
- Arnauld de Sartre, X. 2003. "Territorialités Contradictories des Jeunes Ruraux Amazoniens: Mobilités Paysannes ou Sédentarités Professionnelles?" *Thèse*, Université de Toulouse le Mirai, France/UJPA, Brésil.
- Arnauld de Sartre, X et al. 2005. "Identificação e Avaliação da Diversidade dos Tipos de Exploração do Ambiente na Amazônia Oriental." *Cadernos de Ciência e Tecnologia* 22(1) p. 207–20.
- Schaldach, R et al. 2011. "An Integrated Approach to Modelling Land-Use Change on Continental and Global Scales." *Environmental Modelling and Software* 26(8) p. 1041–51.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.013>.
- . 2018. "A Model-Based Assessment of the Environmental Impact of Land-Use Change across Scales in Southern Amazonia." *Reg Environ Change* p. 161–73.
- Scheffler, R, C Neill, A V Krusche, et H Elsenbeer. 2011. "Agriculture , Ecosystems and Environment Soil Hydraulic Response to Land-Use Change Associated with the Recent Soybean Expansion at the Amazon Agricultural Frontier." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144(1) 281–89.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.016>.
- Schielein, J, et J Börner. 2018. "Recent Transformations of Land-Use and Land-Cover Dynamics across Different Deforestation Frontiers in the Brazilian Amazon." *Land Use Policy* 76(January) p. 81–94.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.052>.
- Schmink, M, et C H Wood. 1992. *Contested Frontiers in Amazonia*. Columbia University Press.
- SEMAS. 2016. *Base de Dados de Imóveis Rurais (Cadastro Ambiental Rural Do Pará - CAR)*. Governo do Pará, Brésil. <https://www.car.semas.pa.gov.br/#/consulta/mapa> (August 1, 2016).
- SFB/Imazon. 2010. *A Atividade Madeireira Na Amazônia Brasileira: Produção, Receita e Mercados*. IMAZON. Belém, Brésil. https://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/miolo_resexec_polo_03_95_1.pdf.
- Shan, J, S Alkheder, et J Wang. 2008. "Genetic Algorithms for the Calibration of Cellular Automata Urban Growth Modeling." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74(10) p. 1267–77.
- Silva, D S, et P Barreto. 2014. "O Aumento da Produtividade e Lucratividade da Pecuária Bovina na Amazônia: o

- Caso do Projeto Pecuária Verde em Paragominas." IMAZON, Belém, Brésil.
- Silva, R G C. 2015. "Amazônia Globalizada: da Fronteira Agrícola ao Território do Agronegócio – o Exemplo de Rondônia." *Confins* 23.
- Soares-Filho, B et al. 2007. "Coupling Socioeconomic and Demographic Dimensions to a Spatial Simulation Model of Deforestation for the Brazilian Amazon." In *11th LBA-ECO Science Team Meeting*.
- . 2010. "Role of Brazilian Amazon Protected Areas in Climate Change Mitigation." *PNAS* 107(24).
- Soares-Filho, B, G C Cerqueira, W L Araujo, et E Voll. 2012. "Modelagem de Dinâmica de Paisagem: Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação Baseados em Automato Celular." http://www.conservacao.org/publicacoes/files_mega3/9modelagemdedinamica.pdf.
- Soares-Filho, B, H Rodrigues, et W Costa. 2009. "Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Guidebook." <http://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:start>.
- Soares-Filho, B et al. 2006. "Modelling Conservation in the Amazon Basin." *Nature* 440 (7083) p. 520–23. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16554817>.
- Soares-Filho, B, L C Filho, G C Cerqueira, et W L Araujo. 2003. "Simulating the Spatial Patterns of Change through the Use of the Dinamica Model." In *Anais XI SBSR*, Brésil. p. 721–28.
- Soares-Filho, B, G C Cerqueira, et C L Pennachin. 2002. "DINAMICA - A Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier." *Ecological Modelling* 154(3) p. 217–35.
- Soares-filho, B, G Coutinho, et C P Lopes. 2002. "DINAMICA - a New Model to Simulate and Study Landscape Dynamics." *Forests* (texte soumis à publication) p. 1–39.
- Sorj, B. 1980. "Agrarian Structure and Politics in Present Day Brazil." *Latin American Perspectives*. p. 23–34.
- Stape, L, P C Sentelhas, C A Alvares, et L M Gonc. 2014. "Koppen's Climate Classification Map for Brazil." *Meteorologische Zeitschrift* 22(6) p. 711–28.
- Summers, P M. 2008. "The Post-Frontier: Land Use and Social Change in the Brazilian Amazon (1992–2002)." Thèse, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Tayyebi, A. 2013. "Simulating Land Use Land Cover Change Using Data Mining and Machine Learning Algorithms." Thèse, Purdue University, USA.
- Thales, M, et R Pocard-Chapuis. 2015. "Mapa Pedomorfológico de Paragominas." Non publié.
- Thalês, M, et R Pocard-Chapuis. 2014. "Dinâmica Espaço-Temporal das Frentes Pioneiras no Estado do Pará." *Confins* 22(22): 17. <http://confins.revues.org/9860>.
- Théry, H. 1976. "Rondônia, Mutations d'un Territoire Fédéral En Amazonie Brésilienne." Thèse, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, France.
- Thompson, J R. et al. 2017. "Forest Loss in New England: A Projection of Recent Trends." *PLoS ONE* 12(12): 1–17.
- Torres, S M, E F Moran, R F B Silva. 2017. "Property Rights and the Soybean Revolution : Shaping How China and Brazil are Telecoupled Property Rights and the Soybean Revolution :." *Sustainability*, 9(954).
- Tourneau, F-M, et M Bursztyn. 2010. "Política Agrária e a Política Ambiental Assentamentos Rurais na Amazônia : Contradições Entre a Política Agrária e a Política Ambiental." *Ambiente e Sociedade* 13.
- Tourrand, J-F et al. 2006. "L'Amazonie Pâturée." *Renc. Rech. Ruminants* 13(1) p. 345–48.
- Tritsch, I, et D Arvor. 2016. "Transition in Environmental Governance in the Brazilian Amazon: Emergence of a New Pattern of Socio-Economic Development and Deforestation." *Land Use Policy* 59 p. 446–455. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.018>.

- Uhl, C, et O T Almeida. 1996. "O Desafio Da Exploração Sustentada Na Amazônia." In *Evolução da Fronteira Amazônica: Oportunidades Para um Desenvolvimento Sustentável*. ed. O T Almeida. Imazon, Belém, Brasil.
- Valeriano, M M, et D F Rossetti. 2012. "Topodata: Brazilian Full Coverage Refinement of SRTM Data." *Applied Geography* 32(2): 300–309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>.
- Vasquez, M L, C S Sousa, et J M A Carvalho. 2008. *Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, Escala 1:1.000.000*. Belém, Brasil.
- Vaz, V. 2013. "A Formação dos Latifúndios no Sul do Estado do Pará: Terra, Pecuária e Desflorestamento." Thèse, UnB, Brasil.
- Veiga, J B et al. 2010. "L'Amazonie, le Nouvel Eldorado des Éleveurs Brésiliens." In *L'Amazonie. Un Demi-Siècle Après La Colonisation*, ed. J-F Tourrand. Varsailles: Editions Quæ, p. 76–99.
- Veldkamp, A, et L Fresco. 1996. "CLUE : A Conceptual Model to Study the Conversion of Land Use and Its Effects." *Ecological Modelling* 85, p. 253–270.
- Veloso, H, A Rangel Filho, et J Lima. 1991. *Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal*. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Vera-Diaz, M C, R K Kaufmann, D C Nepstad, et P Schlesinger. 2008. "An Interdisciplinary Model of Soybean Yield in the Amazon Basin: The Climatic, Edaphic, and Economic Determinants." *Ecological Economics* 65(2) p. 420–31.
- Verburg, P H, P P Schot, M J Dijst, et A Veldkamp. 2004. "Land Use Change Modelling: Practice and Research Priorities." *GeoJournal* 61(4) p. 309–24.
- Verburg, P, K Kok, R Pontius Jr., et A Veldkamp. 2006. "Modeling Land-Use and Land-Cover Change." p. 118-135. In *Global Change – The IGBP Series*.
- Verburg, R et al. 2014. "The Impact of Commodity Price and Conservation Policy Scenarios on Deforestation and Agricultural Land Use in a Frontier Area within the Amazon." *Land Use Policy* 37: 14–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.10.003>.
- Veríssimo, A et al. 1992. "Logging Impacts and Prospects for Sustainable Forest Management in an Old Amazonian Frontier: The Case of Paragominas." *Forest Ecology and Management* 55(1–4) p. 169–99.
- Verissimo, A, et D Pereira. 2014. "Produção na Amazônia Florestal: Características, Desafios e Oportunidades." *Parceirias Estratégicas*, 19(38) p. 13–44.
- Vitel, C S M N et al. 2013. "Land-Use Change Modeling in a Brazilian Indigenous Reserve: Construction of a Reference Scenario for the Surui REDD Project." *Human Ecology* 41(6) p. 807–26.
- van Vliet, J et al. 2016. "A Review of Current Calibration and Validation Practices in Land-Change Modeling." *Environmental Modelling and Software* 82 p.174–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.017>.
- Vosti, S, J Witcover, et C Carpentier. 2002. *Agricultural Intensification by Smallholders: From Deforestation to Sustainable Land Use*. International Food Policy Research Institute, Research Report 130, Washington DC, USA.
- Vuolo, F, K Richter, et C Atzberger. 2011. "Evaluation of Time-Series and Phenological Indicators for Land Cover Classification Based on MODIS Data." In *Proceedings Vol. 8174 Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*, 6 October 2011 DOI:10.1117/12.898389
- Walker, R et al. 2013. "Modeling Spatial Decisions with Graph Theory: Logging Roads and Forest Fragmentation in the Brazilian Amazon." *Ecological applications* 23(1) p. 239–54.
- Walker, R T., et A K O Homma. 1996. "Land Use and Land Cover Dynamics in the Brazilian Amazon: An Overview." *Ecological Economics* 18(1) p. 67–80.
- Walker, R T. 2019. *Amazon Deforestation, Already Rising, May Spike under Bolsonaro*. The Conversation. 5 p. <http://theconversation.com/amazon-deforestation-already-rising-may-spike-under-bolsonaro-109940>.

- Walsh, S J et al. 2008. "Complexity Theory, Spatial Simulation Models, and Land Use Dynamics in the Northern Ecuadorian Amazon." *Geoforum* 39(2) p. 867–78.
- Weinhold, D, E Killick, et E Reis. 2013. "Soybeans, Poverty and Inequality in the Brazilian Amazon." *World Development* 52 p. 132–43.
- Wolfram, S. 1984. "Computer Software in Science and Mathematics." *Scientific American* 251(3).
- Wolstein, A R P et al. 1998. *Metodologia para o Planejamento, Implantação e Monitoramento de Projetos de Assentamentos Sustentáveis na Amazônia*. Documentos n° 32, EMBRAPA, Brésil.
<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/7652>.
- Wu, F, et C J Webster. 1998. "Simulation of Land Development through the Integration of Cellular Automata and Multicriteria Evaluation." *Environment and Planning B: Planning and Design* 25(1).
- Yanai, A, E Nogueira, P Graca, et P Fearnside. 2017. "Deforestation and Carbon Stock Loss in Brazils Amazonian Settlements." *Environmental Management* 59 p. 393–409. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-016-0783-2>.
- Yared, J A G, et S Brienza Junior. 1990. "A Atividade Florestal e o Desenvolvimento da Amazonia." EMBRAPA, Brésil.
- Zanon, R S, M S M Saes, L J Corrar, et M Á Macedo. 2010. "Produção de Soja no Brasil: Principais Determinantes do Tamanho das Propriedades." In *48 Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, Campo Grande, Brésil. p. 1–20.

Table des figures

Figure 1. Schéma d'organisation des hypothèses et objectifs proposés.	9
Figure 2. Représentation schématique des transitions dans les usages du sol. Source : (Defries, Foley, et Asner 2004).	21
Figure 3. Total du cheptel bovin et croissance entre 1995-2006. Source: Pacheco et al (2011).	28
Figure 4. Principaux itinéraires de migration interne au Brésil entre 1970 et 1990. Source : IBGE (2007).	31
Figure 5. Densité de familles installées et la capacité des assentamentos dans les années 1990. Source: (Hervé et Melo 2008).	33
Figure 6. Population totale, rurale et urbaine dans l'Amazonie Légale. Source: (Machado et Pasquis 2004).	33
Figure 7. Evolution des parcelles et création annuelle des assentamentos en Amazonie Légale. Source: (Tourneau et Bursztyrn 2010).	34
Figure 8. Schéma montrant les zones de coupe, les dépôts temporaires et l'accès aux zones de coupe sélective. Source : (Veríssimo et al. 1992).	36
Figure 9. Frontières et pôles d'exploitation forestière en Amazonie Légale en 2004. Source : (Lentini et al. 2005).	37
Figure 10. Production de soja dans l'Amazonie Légale en 2014. Source: (R. G. da C. Silva 2015).	42
Figure 11. Déconnexion entre la déforestation et de la production de soja et de bétail en Amazonie. Source: (Macedo et al. 2011).	43
Figure 12. Quelques schémas spatiaux d'occupation du sol en Amazonie. a) Arrête de poisson ; b) Dendritique ; c) Radiale et ; d) Géométrique.	47
Figure 13. Proportion de forêt dans le paysage et phases de front pionnières définies par (Thalès et Pocard-Chapuis 2014) pour l'état du Pará.	49
Figure 14. Processus et facteurs en relation avec les phases du front pionnier en Amazonie. Basé sur (Grimaldi et al. 2002; Lapola et al. 2014; Margulis 2003; Piketty et al. 2015; Pocard-Chapuis 2004; Rodrigues et al. 2009; Summers 2008; Thalès et Pocard-Chapuis 2014; Tritsch et Arvor 2016).	50
Figure 15. Développement du front pionnier de l'Amazonie en matière de revenus familiaux et de déforestation en 2000 et 2010. Source: (Tritsch et Arvor 2016).	52
Figure 16. Scénarios simulés de déforestation pour l'Amazonie, basés sur différents modèles. Source : (Dalla-Nora et al. 2014).	71
Figure 17. La municipalité de Paragominas par rapport au Brésil et les principales urbanisations de la région. Source : IBGE (2018) ; TerraClass (2014).	84
Figure 18 : Photo aérienne montrant les principales unités de relief à Paragominas. Photo prise par drone: (R. Pocard-Chapuis et al. 2019).	86
Figure 19. Carte géologique de la municipalité de Paragominas et ses environs. Source : (Vasquez, Sousa, et Carvalho 2008).	87
Figure 20. MNT TOPODATA pour la région de Paragominas et ses environs. Source : (Valeriano et Rossetti 2012).	88
Figure 21. a) Photographie de la zone d'étude illustrant les unités pédomorphologiques de la région. b) Vallée peu profonde avec des bords abrupts située sur la surface intermédiaire du Pléistocène - Néogène. Photos : Osis, R. (2016).	88

Figure 22. Profil de sol montrant la séquence d'argile tacheté (<i>mottled clay</i>) provenant de formations sédimentaires (formation Ipixuna ou série Itapecurú), recouvertes par la cuirasse ferrugineuse (<i>duricrust</i>) puis par l'argile de Belterra. Source : (Laurent, Pocard-Chapuis, et al. 2017).	89
Figure 23. Classification climatique Köppen-Geiger appliquée au Brésil. Région de Paragominas indiquée par un cercle rouge. Source : (Stape et al. 2014).	91
Figure 24. Précipitations mensuelles moyennes (mm) pour la ville de Paragominas, sur la base des données TRMM entre 2004 et 2014. Source : Laurent et al. (Non publié).	92
Figure 25. Les zones grisées indiquent des précipitations annuelles insuffisantes pour soutenir la végétation forestière, soit (a) l'état actuel et (b) le résultat de la simulation couplée pour la période 2080-2100. Source : (Cook et Vizy 2008).	92
Figure 26. Principales phyto-physionomies dans la région de Paragominas. Source : IBGE (1992).	93
Figure 27. a) Aspect de la forêt primaire à Paragominas. b) Formations secondaires ou forêts dégradées avec de grandes quantités de <i>babaçu</i> (<i>Attalea speciosa</i>). Photos : Osis, R. (2017).	94
Figure 28. a) Drainage fluvial typique dans la région de Paragominas. Photo : Osis, R. (2017). b) Tracé de drainage sinueux/anastomosé sur une plaine alluviale d'un affluent de la rivière Gurupi. Source : composition <i>truecolor</i> Digital Globe/Google de 11/7/2008.	96
Figure 29. Image Landsat TM (1992) de la zone Água Suja à l'est de la municipalité : zones déboisées et forêts à forte activité d'exploitation de bois (exploitation sélective) aux alentours de la zone de colonisation qui se développe au fond de la vallée avec des lots rectangulaires. Source : (Veríssimo et al. 1992).	99
Figure 30. Images par télédétection de l' <i>assentamento</i> de Paragonorte. a) ferme d'origine en 1985 avec l'élevage extensif et ; b) en 2015, des fermes familiales, avec des pâturages et une végétation secondaire. Le côté de la ferme d'origine est d'environ 20 km de long. Source : images Landsat TM/Google Earth (2018).	100
Figure 31. Barrages et passages sur des ruisseaux dans les fermes d'élevage extensif de Paragominas. a) (3°17'16,25"/47°18'07,01"). Source : Digital Globe de 14/7/2008. b) (3°01'12,94"/47°10'31,82"). Source : CNES/Airbus (2018).	105
Figure 32. Four artisanal pour la production de charbon de bois (désactivé). Photos : R. Osis (2017).	106
Figure 33. a) Image Landsat (1996) de la zone où se trouve actuellement l'invasion Oriente, montrant les zones d'accès et de dépôt dans des exploitations forestières. Source : Google Earth (2017) b) Image Landsat (1999) de la ferme Cikel. Source : Google Earth (2019).	107
Figure 34. a) Aspect de la formation de rigoles d'érosion dans les cultures annuelles. b) Aspect d'un chenal fluvial avec dépôt de sédiments, en aval de la même zone de la figure (a) (3°01'08.62" S 47°23'58.46" O). Source : Image Digital Globe, <i>truecolor</i> , de 06/05/2019.	112
Figure 35. Certaines des paramètres phénologiques générées par TIMESAT : a) début de saison, b) fin de saison, c) durée de la saison, d) valeur de base, e) milieu de saison, f) valeur maximale, g) amplitude, h) petite intégrale, h + i) grande intégrale. Source : (Eklundh et Jonsson 2017).	120
Figure 36. Paramètres phénologiques a) amplitude et b) base. Secteur à l'est de Paragominas, la partie la plus sombre est la réserve indigène.	121
Figure 37. Composition colorée de Paragominas avec des valeurs EVI pour les dates Rouge (28/03/2015) ; Vert (25/04/2015) et Bleu (25/09/2014).	122
Figure 38. Caractéristiques des ROI de classes d'occupation du sol collectées. Dans les graphiques, l'axe des ordonnées représente les valeurs d'EVI, et celui des abscisses représente les dates, quatre dates par mois, du 05/07/2014 au 30/01/2016.	123
Figure 39. Pente dans la municipalité de Paragominas.	127
Figure 40. Distance euclidienne du réseau de drainage.	128
Figure 41. Texture du sol dans la municipalité de Paragominas.	129

Figure 42. Unités pédomorphologiques de Paragominas.....	129
Figure 43. Détail des unités pédomorphologiques de Paragominas.....	130
Figure 44. Distance euclidienne des routes principales.....	131
Figure 45. Distance euclidienne de toutes les routes.....	131
Figure 46. Distance des villages ruraux.....	132
Figure 47. Limites foncières et classes de taille des exploitations à Paragominas.....	133
Figure 48. Reserve Indienne (Alto Rio Guamá). Source : FUNAI (2018).	134
Figure 49. Emplacement des exploitations interviewées.....	141
Figure 50. a) Bovins <i>nelore</i> (<i>Bos indicus</i>), largement utilisés pour l'élevage extensif à Paragominas (Photo : R. Osis, 2017).	142
Figure 51. Répartition en surface des propriétés du groupe 'élevage à grande échelle' (n=37).....	142
Figure 52. a) et b) Grandes propriétés d'élevage extensif dans la région de Paragominas, situées en fond de la vallée. Les fourrages sont desséchés en raison de la saison sèche (Photo : R. Osis, 2017).	143
Figure 53. Répartition des classes d'occupation du sol sur les propriétés d'élevage à grande échelle (n=37)....	143
Figure 54. a) et b) Pâturages dégradés, avec la présence de plantes invasives telles que la <i>vassoura-de-botão</i> (<i>Borreria verticillata</i>) (Photo : F. Laurent, 2015).	144
Figure 55. a) et b) Coupe des adventices ligneuses dans un pâturage (Photo : R. Osis, 2017).	146
Figure 56. a) Aspect de la réforme des pâturages, avec des « <i>leiras</i> » de matières végétales ramassées à l'aide d'un tracteur. b) La même procédure, mais avec une vue plus large du secteur sur des versants sableux (Photo : R. Osis, 2017).	146
Figure 57. a) Vue de deux parcelles de pâturages en système rotatif avec l'abreuvement du bétail avec des réservoirs. Photo : Osis, R. (2016). b) Irrigation de pâturages dans un système rotatif et plantes fourragères à haute productivité (<i>mombaça</i>) (Photo : R. Osis, 2017).	147
Figure 58. a) e b) Pâturages envahis de plantes adventices (<i>mauva</i> , selon la personne interrogée), avec presque pas de graminées fourragères, à cause d'une sécheresse intense à 2015 (Photo : R. Osis, 2016).	150
Figure 59. a) Réservoir pour l'abreuvement du bétail, à faible niveau. b) Réservoir sec. (Photo : R. Osis, 2017).	150
Figure 60. Processus érosifs superficiels occasionnés par le piétinement bovin intensif dans les terrains en forte pente (Photo : R. Osis, 2017).	152
Figure 61. Proportion des unités pédomorphologiques dans les propriétés d'élevage à grande échelle.	153
Figure 62. Aperçu des exploitations d'élevage à petite échelle dans a) <i>Assentamento</i> Águia et b) Invasão Oriente (Photo : R. Osis, 2017).	155
Figure 63. Répartition de la taille des exploitations au sein du groupe 'élevage de petite échelle' (n=25).	156
Figure 64. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations (n=25) d'élevage de petite échelle en 2015.	156
Figure 65. Proportion d'unités pédomorphologiques dans les exploitations (n=25) d'élevage de petite échelle.	162
Figure 66. a) Plantation de soja en phase de développement en saison des pluies à Paragominas (Photo : F. Araújo, 2012). b) Plantation de sorgho comme deuxième culture de fin de saison des pluies après le soja. (Photo : R. Osis, 2017).	164

Figure 67. Répartition des superficies des propriétés du groupe 'cultures de grains' (n=29).	164
Figure 68. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations de cultures de grains en 2015 (n=29).	166
Figure 69. a) e b) Des parcelles de soja, en période post-récolte, sur une ferme près de la route asphaltée BR-010 à Paragominas. Il est à noter que la zone a des auges et des clôtures, ce qui indique que la zone est également (ou a été) utilisée pour l'élevage. Photo : Osis, R. (2016).	167
Figure 70. a) Route non asphaltée conservée par un groupe de producteurs de soja. b) Panneau de signalisation non officielle placée par les producteurs de soja. Photos : Osis, R. (2016).	168
Figure 71. Calcaire agricole avant d'être épandu sur les parcelles. a) Sur une parcelle du plateau argileux et ; b) sur une parcelle des versants sableux. Photos : Osis, R. (2016).	169
Figure 72. a) Hersage du sol avant la plantation principale de soja. b) Récolte du maïs en <i>safrinha</i> avec moissonneuse-batteuse. Photos : Osis, R. (2016).	169
Figure 73. a) Parcelle dans laquelle s'effectue l'intégration agriculture-élevage. On observe la croissance de l'herbe fourragère sur la paille sèche de la dernière récolte de maïs. b) L'ensilage pour l'alimentation animale, réalisé avec la production agricole de l'exploitation elle-même.	171
Figure 74. a) Silos de stockage de grains. Photo : R. Osis (2016). b) Machines de grande capacité de travail. Photo : Juparanã (2017).	172
Figure 75. Proportion d'unités pédomorphologiques dans les exploitations avec cultures de grains (n=29).	175
Figure 76. a) Apparence des agrégats de l'argile de Belterra peu après l'hersage. b) Fissures de contraction dans l'argile de Belterra, qui dénoncent une structure verticale dans le profil pédologique. Photos : Osis, R. (2017). 176	176
Figure 77. a) et b) Exemples de parcelles de cultures agricoles d'échelle spatiale kilométrique. Photos : Osis, R. (2017).	177
Figure 78. Parcelles agricoles avec des <i>murunduns</i> à Paragominas. a) <i>Murunduns</i> avec des sommets visibles. b) <i>Murunduns</i> peu après avoir été aplatis avec des machines. La distance entre les <i>murunduns</i> varie autour de 50 m. Source : Google Earth (2019).	178
Figure 79. Fermes qui cultivent du soja dans les vallées. a) Fazenda São Lucas. b) Fazenda Pagrisa. Source : Google Earth (2019).	179
Figure 80. Distribution de taille des exploitations d'agriculture familiale (n=53).	181
Figure 81. Proportion de classes d'occupation du sol dans les exploitations d'agriculture familiale en 2015 (n=53).	182
Figure 82. a) Succession forestière initiale au premier plan et forêt primaire dégradée à l'arrière-plan, dans l'assentamento Camapuã. b) Suppression de la forêt dégradée avec un bulldozer sur chenilles, près de l'invasion Oriente. Photos : R. Osis (2017).	183
Figure 83. Plantation de manioc dans le village de Nazaré. b) Plantation de poivre noir dans l'assentamento Mandacaru. Photos : R. Osis (2017).	183
Figure 84. Plantation de bananiers près de Colônia Uraim. b) Palmiers d'Açaí se développant le long d'un cours d'eau. Photos : R. Osis (2017).	184
Figure 85. Répartition des proportions d'unités pédomorphologiques dans les exploitations (n=53) du groupe agriculture familiale	187
Figure 86. a) Vue d'ensemble d'une exploitation familiale dans l'assentamento Luiz Inácio : vergers, plantation de poivre noir et un réservoir d'eau sur la gauche de l'habitation. b) Verger à proximité d'une résidence, dans l'invasion Oriente. Photos : R. Osis (2017).	189
Figure 87. a) Puits creusé à la main dans une exploitation dans l'invasion Oriente. b) Forage d'eau et réservoir réalisé par l'INCRA, dans la localité de Perac, assentamento Camapuã. Photos : Osis, R. (2016).	190

Figure 88. a) Culture du riz dans le système d'agriculture sur le brûlis, dans l'invasion Oriente. b) Détail de la même plantation, également appelée « <i>plantio no toco</i> », du fait qu'elle se fait au milieu des troncs résiduels. Photos : Osis, R. (2016).	191
Figure 89. a) Culture de poivre noir sur un sol sableux au fond de la vallée, <i>assentamento</i> Mandacaru. b) Culture de poivre noir sur un sol argileux sur le plateau, dans l' <i>assentamento</i> Camapuã, localité de Perac. Il convient de noter le système d'irrigation, ce qui est alimenté par un forage d'eau. Photos : Osis, R. (2016).	193
Figure 90. a) Aspect d'une plantation d'eucalyptus à grande échelle. b) Identification de la parcelle. Photos : Osis, R. (2016).	195
Figure 91. a) Aspect de la plantation de <i>paricá</i> dans le plateau argileux. En premier plan, parcelle préparée pour la plantation de grains. b) Plantation d'acajou d'Afrique (<i>Khaya Ivorensis</i>). Photos : Osis, R. (2016).	196
Figure 92. Variables utilisées pour l'analyse temporelle des règles spatiales.	209
Figure 93. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition forêt primaire vers pâturage.	210
Figure 94. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition forêt primaire vers pâturage.	211
Figure 95. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition forêt primaire vers pâturage.	212
Figure 96. a) Déforestation (en rouge) entre 2010 et 2015 dans la région à l'ouest de la route BR-010 (ligne noire). b) Déforestation entre 2010 et 2015 dans la région du <i>assentamento</i> Camapuã (polygones de lignes noires). En vert, les plateaux argileux.	212
Figure 97. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes asphaltés lors de la transition pâturage vers forêt secondaire.	213
Figure 98. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers la forêt secondaire.	214
Figure 99. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition pâturage vers forêt secondaire.	214
Figure 100. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition du pâturage vers les cultures de grains (la classe 45-50 km n'apparaît pas sur le graphique car elle est inférieure à -1).	215
Figure 101. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers les cultures de grains.	216
Figure 102. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition du pâturage vers les cultures de grains.	217
Figure 103. Evolution de la part des cultures de grains sur les plateaux argileux et croissance annuelle des espaces de culture de grains à partir de 2004. Source : classification basée sur les données MODIS.	218
Figure 104. Poids d'Évidence de la distance par rapport aux routes principales lors de la transition du pâturage vers les plantations d'arbres à bois.	218
Figure 105. Poids d'Évidence de la taille des exploitations lors de la transition du pâturage vers les plantations d'arbre à bois. La classe de taille 39-84 ha est inférieure à -2 et n'apparaît pas sur le graphique.	219
Figure 106. Poids d'Évidence de la texture du sol pour la transition du pâturage vers plantations d'arbre.	220
Figure 107. L'évolution des principales classes d'occupation du sol à Paragominas. Basé sur les données du capteur MODIS, classification décrite dans la partie II.	222
Figure 108. Évolution des surfaces cultivées en soja et des effectifs bovins à Paragominas entre 2004 et 2018. Source : IBGE (2019).	222
Figure 109. Cours du soja sur le marché global (déterminée par le plus grand marché importateur). Source : Primary Commodity System (2019) (https://data.imf.org:443).	223

Figure 110. Schéma conceptuel du modèle DINAMICA.....	226
Figure 111. (a) Collection de cellules P_{ij} avant et après la convolution de l'opérateur Expander. (b) Sélection de cellules autour d'une cellule centrale affectée par la fonction Patcher (Source : Soares-Filho, Cerqueira, et Pennachin 2002).	228
Figure 112. Schéma de la méthode d'ajustement à résolution multiple. Basée sur (Soares-Filho, Rodrigues, et Costa 2009).	234
Figure 113. Représentation du transfert en superficie équivalente en fonction de la réduction forcée de la déforestation pour l'expansion des cultures de grains et la régénération forestière sur les pâturages (scenario ZDi).....	237
Figure 114. Valeurs de W^+ en fonction des variables distance par rapport aux routes principales et secondaires et aux villages ruraux pour les principales transitions d'occupation du sol dans les phases P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013).	238
Figure 115. Valeurs de W^+ en fonction des variables distance aux pâturages, pente et distance aux rivières principales pour les principales transitions de l'occupation du sol dans les phases P1 (t_0 , 2004 ; t_1 , 2007) et P2 (t_0 , 2010 ; t_1 , 2013).	240
Figure 116. Phases de la dynamique d'occupation du sol à Paragominas et dates utilisées pour l'entraînement, simulation et validation des modèles.	242
Figure 117. Prédiction pour les années 2007, 2010 (calibrées avec la phase P1) et 2013, 2015 (calibrées avec la phase P2).	243
Figure 118. Valeurs minimales de similarité floue avec ajustement à résolutions multiples utilisant une fonction de décroissance constante. La phase P1 (2004-2007) est validée avec 2007 et 2010 et la phase P2 (2010-2013) avec 2013 et 2015.	244
Figure 119. Valeurs simulées des superficies de classes de d'occupation du sol dans les scénarios exploratoires E_p et E_a , et dans les scénarios anticipatifs ZD et ZDi	245
Figure 120. Simulations de scénarios à l'horizon 2030 dans la municipalité de Paragominas (cartes en plus grande taille dans l'appendice).	249
Figure 121. Simulation de scénarios à l'horizon 2030 dans la partie orientale de la municipalité de Paragominas. Villages ruraux A (Água Suja) ; B (CAIP) et C (Paragonorte). IR (réserve indigène).....	250
Figure 122. Comparaison entre la distribution des cultures de grains et des plantations d'arbres en 2015 et résultant du scénario exploratoire E_a en 2030.	252
Figure 123. Comparaison des résultats de chaque algorithme de clustering pour chaque jeu de données. Sont affichés les clusters auxquels une propriété de référence choisie appartient (en rouge).	262
Figure 124. Nombre d'exploitations dans chaque cluster du résultat utilisant l'algorithme GMM avec le jeu de données $Exc3$. Les six clusters ayant le plus grand nombre d'exploitations ont été sélectionnés pour l'analyse (clusters 0 à 5).....	264
Figure 125. Exploitations de Paragominas avec les clusters issus de l'algorithme GMM avec le jeu de données $Exc3$ ($n=1,630$).	264
Figure 126. Superficie totale des clusters sélectionnés pour l'analyse et les classes d'occupation du sol.	265
Figure 127. Répartition des proportions des classes d'occupation du sol par cluster. FP, forêt primaire ; PA, pâturages ; FS, forêt secondaire ; CG, cultures de grains.	266
Figure 128. Répartition des proportions d'unités pédomorphologiques pour chaque exploitation dans les clusters. VSa, versants sableux ; VH, vallons humides ; VS, Vallons secs ; PA, pentes abruptes ; PL, plateaux argileux. 268	
Figure 129. Evolution de l'occupation du sol (2004-2015) et scénarios prospectifs (2030) dans les clusters C0, C2 et C5 (petites exploitations), pour l'ensemble de la surface des clusters et pour la surface des plateaux argileux.	269

Figure 130. Evolution de l'occupation du sol (2004-2015) et scénarios prospectifs (2030) dans les clusters C1, C3 et C4 (grandes exploitations), pour l'ensemble de la surface des clusters et pour la surface des plateaux argileux. 270

Figure 131. Exemples de certains de logiques liées à systèmes de production en rapport aux ressources forestières et biophysiques du front pionnier à Paragominas. L'axe des abscisses représente le temps écoulé et l'axe des ordonnées représente la variation de l'importance de la ressource. 279

Table des tableaux

Table 1. Principaux événements socio-politiques qui peuvent être liés à la dynamique de l'occupation du sol à Paragominas entre 2000 et 2017.	116
Table 2. Comparaison des capteurs MODIS et Landsat selon les exigences de l'étude. Une étoile : moins favorable. Trois étoiles : plus favorable.	118
Table 3. Pixels de forêt secondaire supprimés (suites de 4 pixels alignés ou plus).	125
Table 4. Nombre de points identifiés par classe d'occupation du sol et par année.	126
Table 5. Précision et valeurs Kappa des classes d'occupation du sol pour chaque année de la série temporelle.	126
Table 6. Discretisation des valeurs de densité main-d'œuvre.	138
Table 7. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de location dans les propriétés avec élevage à grande échelle (n=37), et en comparaison avec les autres groupes.	144
Table 8. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'élevage à grande échelle (n=37) et en comparaison avec les autres groupes.	145
Table 9. Proportions d'exploitations que sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'élevage à grande échelle (n=37) et en comparaison avec les autres groupes.	145
Table 10. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'élevage de grande échelle (n=37) et comparaison avec les autres groupes.	149
Table 11. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'élevage à grande échelle. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.	154
Table 12. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de location dans les propriétés avec élevage de petite échelle (n=25), et en comparaison avec les autres groupes.	157
Table 13. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de culture dans les fermes d'élevage de petite échelle (n=25) et en comparaison avec les autres groupes.	158
Table 14. Proportions de fermes qui sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'élevage de petite échelle (n=25) et en comparaison avec les autres groupes.	159
Table 15. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'élevage de petite échelle (n=25) et comparaison avec d'autres groupes.	160
Table 16. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'élevage à petite échelle. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.	162
Table 17. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de la location dans les propriétés avec élevage d'agriculture commerciale (n=29), et en comparaison avec les autres groupes.	166
Table 18. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'agriculture commerciale (n=29) et en comparaison avec les autres groupes.	170
Table 19. Proportions de fermes que sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes de cultures de grains (n=29) en comparaison avec les autres groupes.	170
Table 20. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés avec cultures de grains (n=29) et comparaison avec les autres groupes.	173

Table 21. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés avec cultures de grains. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.	175
Table 22. Proportions de type foncier, classes de main d'œuvre par unité de surface et occurrence de la location dans les propriétés avec élevage d'agriculture familiale (n=53), et en comparaison avec les autres groupes. ...	184
Table 23. Proportions de classes de nombre de cultures et classes de cultures dans les fermes d'agriculture familiale (n=53) et en comparaison avec les autres groupes.....	185
Table 24. Proportions de fermes qui sont mécanisées, où l'accès est important, qui ont des processus d'intensification et types d'intensification dans les fermes d'agriculture familiale (n=53) et en comparaison avec les autres groupes.....	185
Table 25. Facteurs de changement et projets futurs dans les propriétés d'agriculture familiale (n=53) et comparaison avec les autres groupes.	186
Table 26. Raisons d'occupation du sol dans les unités pédomorphologiques sur les propriétés d'agriculture familiale. Entre parenthèses, le nombre d'occurrences des réponses.	188
Table 27. Taux globaux annuels de transition de classes de d'occupation du sol pour les phases P1 (t ₀ , 2004 ; t ₁ , 2007) et P2 (t ₀ , 2010 ; t ₁ , 2013).	229
Table 28. Valeurs plus élevées de Cramer (<i>V</i>) et de <i>Joint Information Uncertainty (U)</i> entre les variables utilisées dans l'étude pour les principales transitions de l'étude.	232
Table 29. Taux de transition avec des valeurs décroissantes pour les transitions relatives à la déforestation (en gras), utilisés dans le scénario <i>ZD</i>	236
Table 30. Taux de transition avec des valeurs décroissantes pour les transitions relatives à la déforestation et compensation sur la régénération forestière et sur l'expansion des cultures de grains (en gras), utilisés dans le scénario <i>ZDi</i>	236
Table 31. Poids d'Évidence (<i>W</i> ⁺) pour la taille des exploitations agricoles dans la municipalité de Paragominas pendant les phases P1 (2004-2007) et P2 (2010-2013).	239
Table 32. Poids d'Évidence (<i>W</i> ⁺) pour la texture du sol dans la municipalité de Paragominas pendant les phases P1 (2004-2007) et P2 (2010-2013).	239
Table 33. Paramètres de calibrage final des fonctions <i>patcher</i> et <i>expand</i>	241
Table 34. Résultats du coefficient <i>silhouette</i> et nombre de clusters par jeu de données.	261
Table 35. Nombre d'occurrences de types de production dans chaque cluster. GRAO, soja ; HORT, horticulture ; PECU, élevage ; PIME, poivre noir ; FRUT, fruiticulture ; MAND, manioc ; SILV, plantation d'arbres à bois ; ACAI, açaí. En gras les valeurs les plus élevées entre les clusters.	265

Table des matières

Introduction générale	1
Problématique et hypothèses	6
Objectifs	8
<hr/>	
PARTIE I - La dynamique d'occupation des sols dans un front pionnier : théories et modèles	11
Introduction de la partie I	13
Chapitre 1 – La dynamique des fronts pionniers	15
1. Principaux modèles explicatifs	15
1.1. Modèles et théories politico-économiques	16
1.2. Modèles démographiques et de cycles de vie	19
1.3. Modèles d'interprétation par phases	21
1.4. Approche par la théorie des systèmes complexes	22
2. La frontière agricole amazonienne : de l'enfer vert au grenier du monde ?	23
2.1. Élevage : le démarreur du front pionnier	24
2.2. L'agriculture familiale	30
2.3. L'exploitation forestière : le pouvoir des « madeireiros »	35
2.4. L'arrivée des cultures de grains	38
2.5. La plantation d'arbres pour le bois : la monoculture forestière arrive en Amazonie	43
3. Les études sur la dynamique du front pionnier amazonien	45
3.1. Approche par la dimension spatiale	45
3.2. Approches par la dimension temporelle	48
Chapitre 2 – La modélisation de l'occupation du sol	55
1. Principales approches de la modélisation spatialement explicite	55
1.1. La régression	56
1.2. Les automates cellulaires	57
1.3. Les modèles basés sur agents et les graphes d'interaction	59
1.4. Les cartes pondérées et l'évaluation multicritères	60
1.5. L'apprentissage automatique	61
	317

2. L'échelle, la calibration et la validation des modèles de simulation de changement d'occupation du sol	63
3. Simulation des scénarios futurs	65
4. La modélisation de la dynamique d'occupation du sol en Amazonie	67
4.1. Facteurs qui conditionnent les changements d'occupation du sol	67
4.2. La simulation des scénarios d'occupation du sol en Amazonie	70
Synthèse de la partie I	77

PARTIE II - Ressources et contraintes biophysiques dans la dynamique d'occupation du sol des différents acteurs agricoles à Paragominas	79
Introduction de la partie II	81
Chapitre 3 – Paragominas : un territoire aux multiples fronts pionniers	83
1. Localisation	83
2. Caractérisation biophysique	85
2.1. Cadre géologique et géomorphologique	85
2.2. Climat	90
2.3. Phyto-physionomies	93
2.4. Dynamique hydro-géomorphologique actuelle	95
3. Le développement du territoire de Paragominas	96
3.1. Aspects socio-économiques	96
3.2. Agriculture familiale	98
3.3. Élevage bovin de moyenne et grande échelle	103
3.4. Exploitation du bois de forêts primaires	105
3.5. Le soja et autres cultures de grains	108
3.6. Plantations d'arbre à bois	112
4. Principaux événements de la période étudiée	114
Chapitre 4 – Systèmes de décision d'utilisation des ressources biophysiques à Paragominas	117
1. Données et méthodes pour la cartographie de Paragominas	117
1.1. Série temporelle d'occupation du sol	117
1.2. Variables spatiales biophysiques	127
1.3. Variables de l'organisation du territoire	130
2. Entretiens - méthodes	135
	318

2.1.	Délimitation des acteurs	135
2.2.	Questionnaire	135
2.3.	Elaboration de la base de données	136
3.	Analyse des systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques par type de production	140
3.1.	L'élevage à grande échelle	141
3.2.	Élevage à petite échelle	155
3.3.	Les cultures de grains	163
3.4.	Agriculture familiale	181
3.5.	Plantation d'arbres à bois	194
	Synthèse de la partie II	199

	PARTIE III - Modélisation de la dynamique d'occupation du sol à Paragominas : interactions entre facteurs biophysiques et autres dans le temps et dans l'espace	203
--	---	-----

	Introduction de la Partie III	205
--	-------------------------------	-----

	Chapitre 5 - La dynamique temporelle des déterminants spatiaux d'occupation du sol à Paragominas	207
--	--	-----

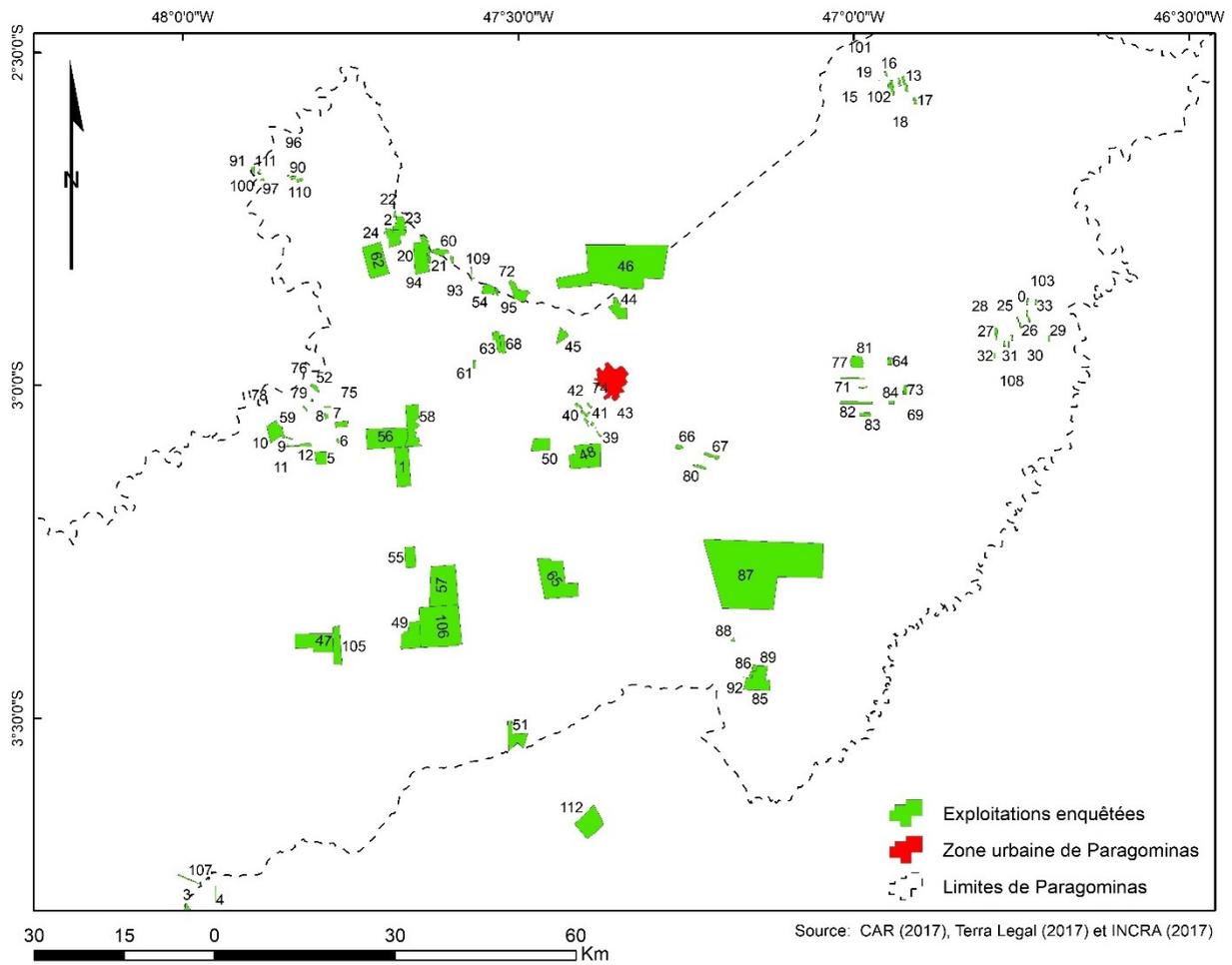
1.	La méthode des Poids d'Évidence	207
2.	La dynamique temporelle des règles spatiales	209
2.1.	De la forêt primaire vers le pâturage	210
2.2.	Du pâturage vers la forêt secondaire	213
2.3.	Du pâturage vers les cultures de grains	215
2.4.	Du pâturage vers la plantation d'arbres à bois	218
3.	Phases de la dynamique de l'occupation du sol à Paragominas	220

	Chapitre 6 - Déterminants spatiaux et scénarios d'occupation future du sol de la municipalité de Paragominas, une ancienne frontière agricole en Amazonie	225
--	---	-----

1.	La procédure de modélisation	225
1.1.	Le modèle dynamique de changement d'occupation du sol	225
1.2.	Sélection et traitement de données	229
1.3.	Performance spatiale du modèle	232
1.4.	Scénarios exploratoires et d'anticipation	235
2.	Résultats	237

2.1.	Déterminants spatiaux des changements d'occupation du sol à Paragominas	237
2.2.	Calibrage des fonctions patcher et expande	241
2.3.	Les résultats cartographiques de la modélisation et validation	241
2.4.	Simulation de scénarios futurs	244
3.	Discussion	245
4.	Conclusion	253
Chapitre 7. Modélisation et spatialisation d'unités de systèmes de décision d'usage des ressources biophysiques à l'aide de techniques d'apprentissage automatique		255
1.	Méthodes	256
1.1.	Données utilisées	256
1.2.	Traitement des données	257
1.3.	La procédure de partitionnement de données	259
1.4.	Validation	259
2.	Résultats	260
2.1.	Prédiction des données	260
2.2.	Partitionnement de données	261
2.3.	Analyse des unités de systèmes de décision d'usage des ressources et contraintes biophysiques	263
Chapitre 8. Les facteurs biophysiques et le front pionnier		275
Synthèse de la Partie III		283
<hr/>		
Conclusion générale		285
Bibliographie		293
Tables des figures		307
Table des tableaux		315
Table des matières		317
Annexe 1 : Données des entretiens sur le terrain		321
Annexe 2 : Images d'occupation du sol		335
Annexe 3 : Cartes de probabilité de transition		339
Annexe 4 : Cartes des scénarios simulés		343
Annexe 5 : Attributs utilisés dans les tests de partitionnement de données		345

Annexe 1 : Données des entretiens sur le terrain



Emplacement des propriétés interviewées. Les valeurs correspondent à la colonne « ID » des tableaux suivants.

Liste des propriétés interrogées. ID : identification dans la base de données ; X, Y : coordonnées UTM zone 23 M ; NOME : nom de la personne interrogée ; AREA : superficie de la propriété (ha).

ID	X	Y	NOME	AREA
0	306400	9682000	FRANCISCO_CAIP	25,84
1	202400	9654000	SEBASTIAO	1502,02
2	201500	9692000	PAULO	473,34
3	167344	9581419	JOAO_BATISTA	61,54
4	172200	9584000	MIGUEL	40,12
5	189775	9655999	SEM_NOME_2	393,64
6	192145	9658831	LUIZ	29,21
7	192888	9661456	MARCIO	193,40
8	190119	9663000	ANTONIO	48,58
9	184600	9659000	ERIVALDO	26,86
10	183847	9658274	JOSE	1,02
11	183990	9657937	RAIMUNDO	49,36
12	186100	9658000	CARLOS	90,53
13	285100	9719000	ALEXANDRE	50,08
14	281856	9718924	ANTONIO	1,10
15	281800	9719000	DURVAL	1,15
16	285801	9719343	FIRMINO	49,09
17	286324	9717985	SEM_NOME_3	48,52
18	287800	9716000	MARIA_ROSALIA	48,13
19	283608	9718035	MARCIO	48,80
20	206000	9690000	CANDIRU	1302,41
21	207229	9690013	ENILDO	42,56
22	201624	9696430	CAETANO	34,47
23	202400	9695810	SEM_NOME	362,38
24	202736	9693319	COSME	205,59
25	306400	9680000	CRISPIM	24,32
26	304886	9678987	AZMIAS	26,71
27	301259	9677063	LUIZ	48,57
28	301245	9676457	IDALIA	24,31
29	310000	9676000	JOAQUIM	24,69
30	303300	9675000	ABEL	24,69
31	302600	9675000	JOSE_MARIA	24,72
32	301041	9673224	JOSE_ROBERTO	25,30
33	306760	9679350	NILTON	24,66
34	234400	9661874	WANDERSON	24,34
35	234949	9661076	JOSE_PATRICK	2,24
36	233720	9661436	DAVI	2,01
37	233663	9661348	WATSON	1,24
38	233563	9661615	MONICA	0,81
39	233600	9662000	MARIA_URAIM	37,31
40	232388	9664461	TÉRESO	53,78
41	232743	9663785	ODACLEUMA	45,41
42	233700	9665000	ARLINDO	31,68
43	235400	9660000	IVAIR	26,85
44	239200	9680000	WERNER	596,00
45	228800	9676000	AGRIC_NORTE	257,76
46	229906	9685379	AGUA_PARADA	9491,34
47	187800	9625000	MARIANO	1723,62
48	232151	9657140	ARMANDO	1861,67
49	204800	9626000	DONEDA	1192,30
50	227100	9659000	BATISTA	596,84
51	223400	9610000	BONITA	783,08
52	188900	9667000	DEDE	89,38
53	218396	9683424	FLAVIA	31,92
54	216660	9683586	FLAVIO	283,90
55	204900	9638000	IRACI	582,83
56	202500	9659000	IRMAO	2189,91

ID	X	Y	NOME	AREA
57	209535	9635024	JUDELIO	2950,32
58	204000	9660000	LUCIANO	1290,89
59	183000	9660000	MARCOS	641,84
60	209682	9690138	OZNI	217,09
61	214700	9671000	RAIMUNDO	52,97
62	198365	9686483	SEBASTIAO_2	1744,71
63	218770	9674359	ZE_MARIA	290,78
64	283635	9672152	LUCILANE	81,86
65	226200	9637000	MARIA	2997,16
66	248400	9658000	SERGIO	74,35
67	253460	9656695	OZIEL	119,17
68	219598	9674068	ANTONIO	222,67
69	286000	9667000	ADILSON	44,40
70	214600	9686000	CHIQUINHO	9,73
71	278141	9669337	EDILANE	85,63
72	218500	9684000	EDSON	32,59
73	286335	9667219	IVONETE	49,34
74	233700	9663368	JOAO_LEANDERSON	23,15
75	190272	9664389	JONAS	32,07
76	187883	9665460	JUVENAL	10,51
77	279370	9667866	PEDRO	31,51
78	180587	9664948	RAIMUNDA	0,07
79	186704	9664242	ZEQUINHA	23,44
80	251836	9654696	WILSON	82,54
81	277948	9671983	SERGIO_2	368,32
82	279576	9665302	EDALBERTO	200,00
83	279912	9663336	JOSE	107,87
84	284036	9665320	ZE_CARDOSO	45,07
85	259468	9619693	SITIO_ZE_MARIA	0,09
86	261035	9619053	PALMITOS	1244,66
87	256800	9633000	GRANDE	16344,89
88	257834	9625867	WAGNER	24,52
89	261100	9621000	CARIMBO	75,29
90	184526	9702449	ROBSON	45,89
91	179304	9703143	MARIA	2,20
92	260848	9620044	JOANA	47,55
93	214300	9686000	JOSE_MANDACARU	31,20
94	206970	9690013	JOAO_DO_CANTO	41,67
95	222500	9683000	FAZ_MARCIO	549,91
96	183892	9702878	JOAO_BATISTA	8,24
97	179670	9702215	ISAIAS	20,49
98	178767	9703329	MARIA_NAZARE	0,90
99	178812	9703206	SIMEAO	1,03
100	179012	9703148	CIPRIANO	18,63
101	282988	9720005	JOSE_LUIZ_INACIO	24,87
102	283853	9718743	GENILSON	97,24
103	307900	9682000	VALDIR	23,45
104	305257	9678070	MICHEL	25,68
105	191700	9624000	MAZINHO	786,56
106	209200	9628000	CATEDRAL	4501,51
107	169335	9585173	MARIA	63,31
108	303851	9676095	EDIMAS	25,00
109	211121	9688682	LAZER	49,88
110	186079	9702079	FRANCISCO_BORGES	49,61
111	178110	9703476	RAIMUNDO_NAZARE	46,85
112	234100	9594000	SAO_LUCAS	1406,15

Secteurs pédomorphologiques et les raisons de l'occupation du sol effectuée. **Première** parcelle dans l'exploitation. **TPM1** : secteur pédomorphologique (PL - Plateau argileux, EN - Pente abrupte, GR - Vallon sèche/humide, VR - Versants sableux, AI - Zone inondable) ; **USO1** : occupation du sol (FS - Forêt secondaire, FL - Forêt primaire, PA – Pâturage, AG - Agriculture, AF - Agriculture familiale, HO – Maraîchage ; SI - Plantation d'arbres à bois, IN - Intégration : LP, LPF, PF etc.) ; **M1_1 et M1_2** : raisons d'une occupation du sol (DC - Gestion difficile à cause de la déclivité, SV – Gestion favorisée par la topographie, FR –, Fertilité du sol plus importante, RH - Proximité des ressources en eau, LH – Loin des ressources en eau, PR – Proximité avec accès ou habitation, CF – Restriction par le Code Forestier, DV – Diversification des activités, DA – Distance de l'accès ou habitation, SE – Surface limitée de l'exploitation, RT – Restriction de capital).

ID	TPM1	USO1	M1_1	M1_2
0	VR	AF	SE	
1	PL	AG	SV	FR
2	EN	PA	RH	
3	VR	PA	SE	
4	VR	AF	PR	
5	PL	PA	SV	
6	PL	AF	SE	
7	PL	PA	SV	
8	VR	AF	PR	
9	VR	AF	PR	
10	VR	AF	SE	
11	VR	AF	PR	
12	VR	PA	RH	
13	VR	AF	SE	
14	VR	AF	SE	
15	VR	AF	SE	
16	VR	AF	SE	
17	VR	AF	SE	
18	VR	PA		
19	VR	PA	SV	
20	PL	PA	SV	
21	EN	AF		
22	VR	PA	SV	
23	VR	PA	SV	
24	PL	AG	SV	
25	VR	AF	SE	
26	VR	AF		
27	VR	PA	SE	
28	VR	PA		
29	VR	PA	SE	
30	VR	PA	SE	
31	VR	PA		
32	VR	AF	SV	SE
33	VR	AF	SE	
34	PL	AG	SV	SE
35	PL	HO	SE	
36	PL	HO	SE	
37	PL	HO	SE	
38	PL	HO	SE	
39	PL	AG	SV	SE
40	VR	PA		
41	PL	AG	SV	SE
42	PL	PA	SE	
43	PL	IN	SE	SV
44	PL	IN	SV	FR
45	PL	PA		
46	PL	AG	LH	SV
47	PL	AG	SV	
48	PL	IN	SV	
49	PL	AG	SV	
50	GR	FS	DC	
51	VR	PA	SV	
52	VR	PA	SV	
53	VR	PA	RH	
54	PL	IN	SV	FR
55	VR	IN	SV	
56	GR	FS	DC	

ID	TPM1	USO1	M1_1	M1_2
57	PL	FL	CF	
58	VR	PA	RH	
59	PL	AG	SV	FR
60	PL	IN	SV	FR
61	PL	AG	SV	FR
62	PL	AG	SV	FR
63	PL	AG	SV	FR
64	EN	FS	DC	
65	PL	AG	SV	FR
66	PL	IN	SV	FR
67	PL	AG	SV	FR
68	VR	PA	RH	
69	EN	FS	DC	DA
70	VR	AF	PR	RH
71	PL	PA		
72	VR	PA	SE	
73	PL	AF	SE	
74	PL	FS	LH	
75	VR	AF	SE	
76	PL	AF	SV	PR
77	VR	AF	SV	PR
78	VR	AF	SV	PR
79	VR	AF	SV	PR
80	VR	PA	SV	RH
81	VR	PA	SV	
82	VR	PA	RH	PR
83	VR	PA	SE	
84	EN	FS	SR	DA
85	VR	AF	SE	
86	VR	PA	SV	RH
87	VR	SI	SV	
88	VR	AF	SV	
89	VR	PA	SE	
90	PL	PA	SE	
91	VR	AF	SE	
92	VR	AF	SE	
93	VR	FS	SR	
94	VR	AF	SV	
95	VR	PA	SV	RH
96	PL	AF	SE	
97	VR	AF	SE	
98	VR	AF	PR	
99	VR	PA		
100	VR	AF	PR	
101	VR	AF	SE	
102	VR	AF	SE	
103	VR	AF	SR	SE
104	VR	AF	SE	
105	PL	FL		
106	PL	SI	SV	
107	VR	HO	SE	PR
108	VR	PA	SE	
109	EN	PA	SE	
110	EN	FS	SR	
111	VR	AF	PR	
112	EN	FS	DC	

Secteurs pédomorphologiques et les raisons d'occupation du sol effectuée. **Deuxième** parcelle dans l'exploitation. **TPM2** : secteur pédomorphologique (*PL - Plateau argileux, EN - Pente abrupte, GR - Vallon sèche/humide, VR - Versants sableux, AI - Zone inondable*) ; **USO2** : occupation du sol (*FS - Forêt secondaire, FL - Forêt primaire, PA - Pâturage, AG - Agriculture, AF - Agriculture familiale, HO - Maraîchage ; SI - Plantation d'arbres à bois, IN - Intégration : LP, LPF, PF etc.*) ; **M2_1 et M2_2** : raisons d'occupation du sol (*DC - Gestion difficile à cause de la déclivité, SV - Gestion favorisée par la topographie, FR -, Fertilité du sol plus importante, RH - Proximité des ressources en eau, LH - Loin des ressources en eau, PR - Proximité avec accès ou habitation, CF - Restriction par le Code Forestier, DV - Diversification des activités, DA - Distance de l'accès ou habitation, SE - Surface limitée de l'exploitation, RT - Restriction de capital*).

ID	TPM2	USO2	M2_1	M2_2
0	VR	FS	SR	
1	PL	PA		
2	PL	PA	SV	
3				
4	GR	FS	CF	
5	PL	FL	CF	
6	GR	FS	DC	
7	GR	FS	CF	DC
8	GR	FS	CF	
9	GR	FS	CF	
10				
11	PL	FS	SR	
12	EN	AF	PR	
13	PL	FS	SR	
14				
15				
16				
17	VR	FS	SR	
18	GR	FS	DC	
19	GR	FS		
20	VR	PA	SV	
21	EN	FS	CF	
22	GR	FS	CF	
23	GR	FS	DC	CF
24	VR	AG	SV	
25	VR	FS	SR	
26	AI	FS	CF	
27	GR	FS	SR	
28	VR	FS	SR	
29				
30	VR	FS	SR	
31	VR	FS	SR	
32	VR	FS	SR	
33	VR	FS	SR	
34	EN	SI		
35	GR	FS	DC	
36				
37				
38				
39				
40	PL	PA		
41				
42				
43				
44	VR	PA		
45	GR	FS	DC	
46	VR	PA	RH	
47	PL	FL	CF	
48	VR	IN	SV	
49	PL	FL	CF	
50	PL	AG	SV	FR
51	EN	FS	DC	
52	VR	AF	SV	PR
53				
54	VR	PA	RH	
55	GR	FS	DC	
56	VR	PA	RH	

ID	TPM2	USO2	M2_1	M2_2
57	VR	PA	RH	
58	PL	AG	SV	FR
59	GR	FS	DC	
60	EN	FS	DC	
61				
62	VR	IN		
63	GR	FS	DC	
64	PL	PA	SV	FR
65	VR	PA	DC	
66				
67	VR	AG	SV	
68	PL	AG	SV	FR
69	PL	PA	SV	PR
70	EN	PA	DC	
71	EN	FS	DC	
72				
73	PL	FL	SR	
74	VR	HO	RH	PR
75	VR	FS	SR	
76	GR	FS	DC	
77				
78				
79	EN	FS	DC	CF
80	GR	FS	CF	
81	EN	FS	DC	CF
82	EN	FS	DC	
83	EN	PA	SE	
84	VR	PA	PR	
85				
86				
87	PL	FL	CF	
88	GR	FS	DC	
89				
90				
91				
92	VR	FS	SR	
93	GR	FS	SR	
94	GR	FS	SR	
95	PL	AG	SV	FR
96				
97	EN	AF	PR	
98	VR	FS	SR	
99				
100	GR	FS	DC	SR
101	VR	FS	SR	CF
102	VR	FS	SR	
103	VR	FS	SR	
104	VR	FS	SR	
105	VR	PA	RH	
106	EN	FL	DC	CF
107	GR	FS	SR	
108	VR	FS	SR	
109				
110	PL	FS	SR	
111				
112	VR	IN	SV	

Secteurs pédomorphologiques et les raisons d'occupation du sol effectuée. **Troisième** parcelle dans l'exploitation. **TPM3** : secteur pédomorphologique (*PL - Plateau argileux, EN - Pente abrupte, GR - Vallon sèche/humide, VR - Versants sableux, AI - Zone inondable*) ; **USO3** : occupation du sol (*FS - Forêt secondaire, FL - Forêt primaire, PA - Pâturage, AG - Agriculture, AF - Agriculture familiale, HO - Maraîchage ; SI - Plantation d'arbres à bois, IN - Intégration : LP, LPF, PF etc.*) ; **M3_1 et M3_2** : raisons d'occupation du sol (*DC - Gestion difficile à cause de la déclivité, SV - Gestion favorisée par la topographie, FR -, Fertilité du sol plus importante, RH - Proximité des ressources en eau, LH - Loin des ressources en eau, PR - Proximité avec accès ou habitation, CF - Restriction par le Code Forestier, DV - Diversification des activités, DA - Distance de l'accès ou habitation, SE - Surface limitée de l'exploitation, RT - Restriction de capital*).

ID	TPM3	USO3	M3_1	M3_2
0				
1	PL	FL	CF	
2				
3				
4	VR	FS	SR	
5				
6	PL	FL	CF	
7				
8	VR	FS	SR	
9	VR	FS	SR	
10				
11	GR	FS	SR	
12	PL	FS	SR	DA
13				
14				
15				
16				
17				
18	VR	FS	SR	
19	AI	FS	CF	
20	GR	FS	CF	DC
21	AI	FS	CF	
22	VR	FS	SR	
23				
24	GR	FS	DC	CF
25				
26	VR	FS	SR	
27	VR	FS	SR	
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				
43				
44	GR	FS	CF	DC
45				
46	GR	FS	CF	DC
47				
48	GR	FS		
49				
50	PL	FL	CF	
51	PL	AG	SV	FR
52	GR	FS	DC	CF
53				
54				
55				
56	PL	AG	SV	FR

ID	TPM3	USO3	M3_1	M3_2
57	VR	FS		
58				
59				
60	VR	PA	RH	
61				
62	PL	FL	CF	
63	PL	FL	CF	
64				
65	PL	FL	CF	
66				
67				
68	PL	FL	CF	
69	PL	FL	SR	
70				
71	VR	PA	RH	
72				
73				
74	VR	FS		
75	PL	FS	SR	
76	PL	FL	SR	
77				
78				
79	PL	FL	SR	CF
80				
81				
82	PL	FS	SR	LH
83	PL	PA	SE	
84	VR	FS	SR	
85				
86	GR	FS	DC	
87	EN	FS	DC	
88	VR	FS	SR	
89				
90				
91				
92				
93	PL	FS	SR	
94	VR	FS	SR	
95	GR	FS	DC	CF
96				
97	VR	FS	SR	
98				
99				
100	VR	FS	SR	
101				
102				
103				
104				
105	GR	FS	DC	
106	PL	FL	CF	
107	VR	FS	SR	
108				
109				
110				
111				
112	PL	IN	SV	FR

Présence de productions agricoles. GRAO : agriculture mécanisée à grande échelle ; HORT : maraîchage ; PECU : élevage ; PIME : poivre noir. NAO : non ; SIM : oui.

ID	GRAO	HORT	PECU	PIME
0	NAO	NAO	NAO	NAO
1	SIM	NAO	SIM	NAO
2	NAO	NAO	SIM	NAO
3	NAO	NAO	SIM	SIM
4	NAO	NAO	NAO	NAO
5	NAO	NAO	SIM	NAO
6	NAO	NAO	NAO	SIM
7	NAO	NAO	SIM	NAO
8	NAO	NAO	NAO	NAO
9	NAO	NAO	SIM	NAO
10	NAO	NAO	NAO	NAO
11	NAO	NAO	NAO	NAO
12	NAO	NAO	NAO	SIM
13	NAO	NAO	NAO	SIM
14	NAO	NAO	NAO	SIM
15	NAO	NAO	NAO	NAO
16	NAO	NAO	NAO	NAO
17	NAO	NAO	NAO	SIM
18	NAO	NAO	SIM	SIM
19	NAO	NAO	SIM	SIM
20	NAO	NAO	SIM	NAO
21	NAO	NAO	SIM	NAO
22	NAO	NAO	SIM	NAO
23	NAO	NAO	SIM	NAO
24	SIM	NAO	SIM	NAO
25	NAO	NAO	NAO	NAO
26	NAO	NAO	SIM	NAO
27	NAO	NAO	SIM	NAO
28	NAO	NAO	SIM	NAO
29	NAO	NAO	SIM	SIM
30	NAO	NAO	SIM	SIM
31	NAO	NAO	SIM	SIM
32	NAO	NAO	NAO	NAO
33	NAO	NAO	NAO	NAO
34	SIM	SIM	NAO	NAO
35	NAO	SIM	SIM	SIM
36	NAO	SIM	NAO	NAO
37	NAO	NAO	NAO	NAO
38	NAO	SIM	NAO	NAO
39	SIM	NAO	NAO	NAO
40	SIM	NAO	SIM	NAO
41	SIM	NAO	NAO	NAO
42	NAO	NAO	SIM	NAO
43	SIM	NAO	SIM	NAO
44	SIM	NAO	SIM	NAO
45	SIM	NAO	SIM	NAO
46	SIM	NAO	SIM	NAO
47	SIM	NAO	NAO	NAO
48	SIM	NAO	SIM	NAO
49	SIM	NAO	NAO	NAO
50	SIM	NAO	NAO	NAO
51	SIM	NAO	SIM	NAO
52	NAO	NAO	SIM	SIM
53	NAO	NAO	SIM	NAO
54	SIM	NAO	SIM	NAO
55	NAO	NAO	SIM	NAO
56	SIM	NAO	NAO	NAO

ID	GRAO	HORT	PECU	PIME
57	NAO	NAO	SIM	NAO
58	SIM	NAO	SIM	NAO
59	SIM	NAO	NAO	NAO
60	SIM	NAO	SIM	NAO
61	SIM	NAO	NAO	NAO
62	SIM	NAO	SIM	NAO
63	SIM	NAO	SIM	NAO
64	NAO	NAO	SIM	NAO
65	SIM	NAO	SIM	NAO
66	SIM	NAO	SIM	NAO
67	SIM	NAO	NAO	NAO
68	SIM	NAO	SIM	NAO
69	NAO	NAO	NAO	NAO
70	NAO	NAO	NAO	SIM
71	NAO	NAO	SIM	NAO
72	NAO	NAO	SIM	NAO
73	NAO	NAO	NAO	SIM
74	NAO	SIM	NAO	NAO
75	NAO	NAO	NAO	NAO
76	NAO	NAO	NAO	NAO
77	NAO	NAO	SIM	NAO
78	NAO	NAO	NAO	NAO
79	NAO	NAO	NAO	SIM
80	NAO	NAO	SIM	NAO
81	NAO	NAO	SIM	NAO
82	NAO	NAO	SIM	NAO
83	NAO	NAO	SIM	NAO
84	NAO	NAO	SIM	NAO
85	NAO	NAO	NAO	NAO
86	NAO	NAO	SIM	NAO
87	NAO	NAO	SIM	NAO
88	NAO	NAO	SIM	NAO
89	NAO	NAO	SIM	NAO
90	NAO	NAO	SIM	NAO
91	NAO	NAO	NAO	NAO
92	NAO	NAO	SIM	NAO
93	NAO	NAO	NAO	NAO
94	NAO	NAO	NAO	NAO
95	SIM	NAO	SIM	NAO
96	NAO	NAO	SIM	NAO
97	NAO	NAO	NAO	NAO
98	NAO	NAO	NAO	NAO
99	NAO	NAO	NAO	NAO
100	NAO	NAO	NAO	NAO
101	NAO	NAO	NAO	SIM
102	NAO	NAO	SIM	SIM
103	NAO	NAO	NAO	NAO
104	NAO	NAO	NAO	NAO
105	NAO	NAO	SIM	NAO
106	NAO	NAO	NAO	NAO
107	NAO	SIM	NAO	NAO
108	NAO	NAO	SIM	NAO
109	NAO	NAO	SIM	NAO
110	NAO	NAO	NAO	NAO
111	NAO	NAO	NAO	NAO
112	SIM	NAO	SIM	NAO

Présence de productions agricoles. FRUT : vergers ou systèmes agroforestiers ; MAND : manioc ; SILV : plantations d'arbres à bois ; ACAI : plantation ou l'extractivisme d'açaí. NAO : non ; SIM : oui.

ID	FRUT	MAND	SILV	ACAI
0	NAO	SIM	NAO	NAO
1	NAO	NAO	NAO	NAO
2	NAO	NAO	NAO	NAO
3	SIM	SIM	NAO	NAO
4	SIM	SIM	NAO	NAO
5	NAO	NAO	NAO	NAO
6	SIM	SIM	NAO	NAO
7	NAO	NAO	NAO	NAO
8	SIM	SIM	NAO	NAO
9	SIM	SIM	NAO	NAO
10	NAO	SIM	NAO	NAO
11	NAO	SIM	NAO	NAO
12	SIM	SIM	NAO	NAO
13	NAO	SIM	NAO	NAO
14	NAO	SIM	NAO	NAO
15	NAO	SIM	NAO	NAO
16	NAO	SIM	NAO	NAO
17	NAO	SIM	NAO	NAO
18	NAO	SIM	NAO	NAO
19	SIM	SIM	NAO	NAO
20	NAO	NAO	NAO	NAO
21	NAO	SIM	NAO	NAO
22	NAO	NAO	NAO	NAO
23	NAO	NAO	NAO	NAO
24	NAO	NAO	NAO	NAO
25	NAO	SIM	NAO	NAO
26	SIM	NAO	NAO	NAO
27	NAO	NAO	NAO	NAO
28	NAO	SIM	NAO	NAO
29	NAO	SIM	NAO	NAO
30	SIM	SIM	NAO	NAO
31	NAO	SIM	NAO	NAO
32	SIM	SIM	NAO	NAO
33	NAO	SIM	NAO	SIM
34	NAO	NAO	SIM	NAO
35	NAO	SIM	NAO	NAO
36	NAO	SIM	NAO	NAO
37	SIM	NAO	NAO	NAO
38	NAO	SIM	NAO	NAO
39	SIM	NAO	NAO	NAO
40	SIM	NAO	NAO	NAO
41	NAO	SIM	NAO	NAO
42	NAO	NAO	NAO	NAO
43	SIM	NAO	NAO	NAO
44	NAO	NAO	NAO	NAO
45	NAO	NAO	NAO	NAO
46	NAO	NAO	NAO	NAO
47	NAO	NAO	NAO	NAO
48	NAO	NAO	NAO	NAO
49	NAO	NAO	NAO	NAO
50	NAO	NAO	NAO	NAO
51	NAO	NAO	NAO	NAO
52	NAO	NAO	NAO	NAO
53	NAO	NAO	NAO	NAO
54	NAO	NAO	NAO	NAO
55	NAO	NAO	NAO	NAO
56	NAO	NAO	NAO	NAO

ID	FRUT	MAND	SILV	ACAI
57	NAO	NAO	NAO	NAO
58	NAO	NAO	NAO	NAO
59	NAO	NAO	NAO	NAO
60	NAO	NAO	NAO	NAO
61	NAO	NAO	NAO	NAO
62	NAO	NAO	NAO	NAO
63	NAO	NAO	NAO	NAO
64	NAO	NAO	NAO	NAO
65	NAO	NAO	NAO	NAO
66	NAO	NAO	NAO	NAO
67	NAO	NAO	NAO	NAO
68	NAO	NAO	NAO	NAO
69	NAO	SIM	NAO	NAO
70	SIM	SIM	NAO	NAO
71	NAO	NAO	NAO	NAO
72	NAO	NAO	NAO	NAO
73	NAO	SIM	NAO	NAO
74	NAO	NAO	NAO	NAO
75	NAO	SIM	NAO	NAO
76	NAO	SIM	NAO	NAO
77	NAO	SIM	NAO	NAO
78	NAO	SIM	NAO	NAO
79	NAO	SIM	NAO	NAO
80	NAO	NAO	NAO	NAO
81	NAO	NAO	NAO	NAO
82	NAO	NAO	NAO	NAO
83	NAO	NAO	NAO	NAO
84	NAO	NAO	NAO	NAO
85	NAO	SIM	NAO	NAO
86	NAO	NAO	NAO	NAO
87	NAO	NAO	SIM	NAO
88	SIM	SIM	NAO	NAO
89	NAO	NAO	NAO	NAO
90	NAO	NAO	NAO	NAO
91	NAO	SIM	NAO	NAO
92	NAO	SIM	NAO	NAO
93	SIM	NAO	NAO	NAO
94	NAO	SIM	NAO	NAO
95	NAO	NAO	NAO	NAO
96	NAO	SIM	NAO	NAO
97	SIM	SIM	NAO	NAO
98	NAO	SIM	NAO	NAO
99	NAO	SIM	NAO	NAO
100	NAO	SIM	NAO	NAO
101	NAO	SIM	NAO	NAO
102	NAO	SIM	NAO	NAO
103	NAO	SIM	NAO	NAO
104	SIM	SIM	NAO	NAO
105	NAO	NAO	NAO	NAO
106	NAO	NAO	SIM	NAO
107	SIM	NAO	NAO	NAO
108	SIM	SIM	NAO	NAO
109	NAO	NAO	NAO	NAO
110	NAO	SIM	NAO	SIM
111	NAO	SIM	NAO	NAO
112	NAO	NAO	NAO	NAO

NPRO : nombre de productions ; NPRD : nombre de productions valeurs catégoriques ; INTE : existence de l'intensification ; INTI : types d'intensification (ILP - intégration agriculture-élevage ; ILPF - intégration agriculture-élevage-foresterie ; IRP - irrigation des pâturages ; ADP - fertilisation des pâturages ; IRF - l'irrigation des cultures ; IRG - irrigation des grains ; ROT - rotation des pâturages, confinement partiel). NAO : non ; SIM : oui.

ID	NPRO	NPRD	INTE	INTI
0	1	UM	NAO	NAO
1	2	DOIS	NAO	NAO
2	1	UM	SIM	ADP
3	4	TROM	NAO	NAO
4	2	DOIS	NAO	NAO
5	1	UM	NAO	NAO
6	3	TROM	NAO	NAO
7	1	UM	NAO	NAO
8	2	DOIS	NAO	NAO
9	3	TROM	NAO	NAO
10	1	UM	NAO	NAO
11	1	UM	NAO	NAO
12	3	TROM	NAO	NAO
13	2	DOIS	NAO	NAO
14	2	DOIS	NAO	NAO
15	1	UM	NAO	NAO
16	1	UM	NAO	NAO
17	2	DOIS	NAO	NAO
18	3	TROM	NAO	NAO
19	4	TROM	NAO	NAO
20	1	UM	SIM	ROT
21	2	DOIS	NAO	NAO
22	1	UM	NAO	NAO
23	1	UM	NAO	NAO
24	2	DOIS	NAO	NAO
25	1	UM	NAO	NAO
26	2	DOIS	NAO	NAO
27	1	UM	NAO	NAO
28	2	DOIS	NAO	NAO
29	3	TROM	NAO	NAO
30	4	TROM	NAO	NAO
31	3	TROM	NAO	NAO
32	2	DOIS	NAO	NAO
33	2	DOIS	NAO	NAO
34	3	TROM	SIM	IRF
35	4	TROM	SIM	IRF
36	2	DOIS	SIM	IRF
37	1	UM	SIM	IRF
38	2	DOIS	NAO	NAO
39	2	DOIS	SIM	IRF
40	3	TROM	SIM	IRP
41	2	DOIS	NAO	NAO
42	1	UM	NAO	NAO
43	3	TROM	SIM	IRF
44	2	DOIS	SIM	ILP
45	2	DOIS	SIM	IPL
46	2	DOIS	SIM	ROT
47	1	UM	NAO	NAO
48	2	DOIS	SIM	ILP
49	1	UM	NAO	NAO
50	1	UM	NAO	NAO
51	2	DOIS	SIM	ROT
52	2	DOIS	SIM	ADB
53	1	UM	SIM	IRP
54	2	DOIS	SIM	ILP
55	1	DOIS	NAO	NAO
56	1	UM	NAO	NAO

ID	NPRO	NPRD	INTE	INTI
57	1	UM	NAO	NAO
58	2	DOIS	NAO	NAO
59	1	UM	NAO	NAO
60	2	DOIS	SIM	ILP
61	1	UM	NAO	NAO
62	2	DOIS	SIM	ILP
63	2	DOIS	NAO	NAO
64	1	UM	NAO	NAO
65	2	DOIS	NAO	NAO
66	2	DOIS	SIM	ILPF
67	1	UM	NAO	NAO
68	2	DOIS	NAO	NAO
69	1	UM	NAO	NAO
70	3	TROM	NAO	NAO
71	1	UM	NAO	NAO
72	1	UM	SIM	IRP
73	2	DOIS	NAO	NAO
74	1	UM	SIM	IRF
75	1	UM	NAO	NAO
76	1	UM	NAO	NAO
77	2	DOIS	NAO	NAO
78	1	UM	NAO	NAO
79	2	DOIS	NAO	NAO
80	1	UM	NAO	NAO
81	1	UM	NAO	NAO
82	1	UM	NAO	NAO
83	1	UM	NAO	NAO
84	1	UM	NAO	NAO
85	1	UM	NAO	NAO
86	1	UM	SIM	ADP
87	2	DOIS	NAO	NAO
88	3	TROM	NAO	NAO
89	1	UM	NAO	NAO
90	1	UM	NAO	NAO
91	1	UM	NAO	NAO
92	2	DOIS	NAO	NAO
93	1	UM	NAO	NAO
94	1	UM	NAO	NAO
95	2	DOIS	NAO	NAO
96	2	DOIS	NAO	NAO
97	2	DOIS	NAO	NAO
98	1	UM	NAO	NAO
99	1	UM	NAO	NAO
100	1	UM	NAO	NAO
101	2	DOIS	NAO	NAO
102	3	TROM	NAO	NAO
103	1	UM	NAO	NAO
104	2	DOIS	NAO	NAO
105	1	UM	NAO	NAO
106	1	UM	NAO	NAO
107	2	DOIS	NAO	NAO
108	3	TROM	NAO	NAO
109	1	UM	NAO	NAO
110	2	DOIS	NAO	NAO
111	1	UM	NAO	NAO
112	2	DOIS	SIM	IRG

FUND : situation foncière (PART - propriétés « privées » ; ASSE - lot de assentamento ; INVA – invasion ; ANTI - occupation riveraine ancienne ; SUBL - parcelles plus petites que le module rural ; AGRE - propriétés issues de l'union de deux ou plusieurs parcelles de projets de colonisation. NAO : non ; SIM : oui.

ID	FUND	FUNS	ARRE	MECA
0	ASSE	CAMP	NAO	NAO
1	PART	PATR	SIM	SIM
2	PART	PATR	NAO	SIM
3	ASSE	CAMP	NAO	NAO
4	ASSE	CAMP	NAO	NAO
5	PART	PATR	NAO	SIM
6	INVA	CAMP	NAO	EVEN
7	INVA	CAMP	NAO	SIM
8	INVA	CAMP	NAO	NAO
9	INVA	CAMP	NAO	NAO
10	INVA	CAMP	NAO	NAO
11	INVA	CAMP	NAO	NAO
12	INVA	CAMP	NAO	NAO
13	ASSE	CAMP	NAO	NAO
14	ASSE	CAMP	NAO	NAO
15	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
16	ASSE	CAMP	NAO	NAO
17	ASSE	CAMP	NAO	NAO
18	ASSE	CAMP	NAO	NAO
19	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
20	PART	PATR	NAO	SIM
21	ASSE	CAMP	NAO	NAO
22	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
23	PART	PATR	NAO	SIM
24	PART	PATR	NAO	SIM
25	ASSE	CAMP	NAO	NAO
26	ASSE	CAMP	NAO	SIM
27	ASSE	CAMP	NAO	NAO
28	ASSE	CAMP	NAO	NAO
29	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
30	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
31	ASSE	CAMP	NAO	NAO
32	ASSE	CAMP	NAO	NAO
33	ASSE	CAMP	NAO	NAO
34	ASSE	CAMP	SIM	SIM
35	SUBL	CAMP	SIM	NAO
36	SUBL	CAMP	SIM	EVEN
37	SUBL	CAMP	NAO	EVEN
38	SUBL	CAMP	NAO	EVEN
39	ASSE	CAMP	SIM	SIM
40	ASSE	CAMP	NAO	SIM
41	ASSE	CAMP	SIM	SIM
42	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
43	AGRE	PATR	SIM	SIM
44	PART	PATR	NAO	SIM
45	PART	PATR	NAO	SIM
46	PART	PATR	SIM	SIM
47	PART	PATR	NAO	SIM
48	PART	PATR	SIM	SIM
49	PART	PATR	NAO	SIM
50	PART	PATR	SIM	SIM
51	PART	PATR	SIM	SIM
52	AGRE	PATR	NAO	SIM
53	PART	PATR	NAO	SIM
54	PART	PATR	SIM	SIM
55	PART	PATR	NAO	SIM
56	PART	PATR	SIM	SIM

ID	FUND	FUNS	ARRE	MECA
57	PART	PATR	NAO	SIM
58	PART	PATR	SIM	SIM
59	PART	PATR	SIM	SIM
60	PART	PATR	NAO	SIM
61	PART	PATR	SIM	SIM
62	PART	PATR	NAO	SIM
63	PART	PATR	SIM	SIM
64	AGRE	PATR	NAO	SIM
65	PART	PATR	SIM	SIM
66	PART	PATR	SIM	SIM
67	PART	PATR	SIM	SIM
68	PART	PATR	SIM	SIM
69	ASSE	CAMP	NAO	NAO
70	ASSE	CAMP	SIM	NAO
71	AGRE	PATR	NAO	SIM
72	PART	PATR	NAO	SIM
73	ASSE	CAMP	NAO	NAO
74	ASSE	CAMP	NAO	NAO
75	INVA	CAMP	NAO	NAO
76	INVA	CAMP	NAO	NAO
77	ASSE	CAMP	NAO	NAO
78	INVA	CAMP	NAO	NAO
79	INVA	CAMP	NAO	NAO
80	PART	PATR	NAO	NAO
81	AGRE	PATR	NAO	SIM
82	AGRE	PATR	NAO	SIM
83	AGRE	PATR	NAO	NAO
84	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
85	INVA	CAMP	NAO	NAO
86	PART	PATR	NAO	SIM
87	PART	PATR	NAO	SIM
88	PART	PATR	NAO	EVEN
89				EVEN
90	INVA	CAMP	NAO	SIM
91	ANTI	CAMP	NAO	NAO
92			NAO	NAO
93	ASSE	CAMP	NAO	NAO
94	ASSE	CAMP	NAO	NAO
95	PART	PATR		SIM
96	ANTI	CAMP	NAO	EVEN
97	ANTI	CAMP	NAO	NAO
98	ANTI	CAMP	NAO	NAO
99	ANTI	CAMP	NAO	NAO
100	ANTI	CAMP	NAO	NAO
101	ASSE	CAMP	NAO	NAO
102	AGRE	PATR	NAO	NAO
103	ASSE	CAMP	NAO	NAO
104	ASSE	CAMP	NAO	NAO
105	PART	PATR	NAO	SIM
106	PART	PATR	NAO	SIM
107	ASSE	CAMP	NAO	EVEN
108	ASSE	CAMP	NAO	NAO
109	PART	PATR	NAO	SIM
110	INVA	CAMP	NAO	EVEN
111	ANTI	CAMP	NAO	NAO
112	PART	PATR	NAO	SIM

RIO : drainage de surface pérenne ; POCO : eau souterraine (ARTE - forage d'eau, COMU - forage d'eau communautaire, MANU – puits) ; MAOB – nombre de personnes actives par exploitation ; MAOR - relation entre le nombre de personnes actives et la surface de l'exploitation. NAO : non ; SIM : oui.

ID	RIO	POCO	MAOB	MAOR
0	NAO		1	0,039
1	SIM	ARTE	2	0,001
2	SIM			
3	SIM	MANU	2	0,032
4	SIM		1	0,025
5	NAO	MANU	2	0,005
6	NAO	COMU	3	0,103
7	SIM		2	0,010
8	SIM		1	0,021
9	SIM		2	0,074
10	NAO	COMU	1	0,979
11	SIM		1	0,020
12	SIM		3	0,033
13	SIM	MANU		
14	SIM	MANU	2	1,812
15	NAO	MANU	3	2,601
16	SIM	MANU	2	0,041
17	NAO	ARTE	3	0,062
18	SIM			
19	NAO	MANU	2	0,041
20	SIM	MANU	2	0,002
21	SIM		6	0,141
22	SIM	MANU	1	0,029
23	SIM		3	0,008
24	SIM		3	0,015
25	SIM	MANU	3	0,123
26	SIM	MANU	3	0,112
27	SIM		3	0,062
28	SIM	MANU	3	0,123
29	SIM	ARTE	3	0,122
30	SIM		1	0,040
31	SIM		4	0,162
32	SIM		3	0,119
33	SIM		4	0,162
34	SIM	ARTE	7	0,288
35	NAO		3	1,341
36	NAO	ARTE	2	0,997
37	NAO	ARTE	2	1,611
38	NAO	ARTE	2	2,466
39	NAO	ARTE	1	0,027
40	SIM	ARTE	3	0,056
41	SIM	MANU	3	0,066
42	SIM		1	0,032
43	NAO	ARTE	10	0,372
44	SIM		5	0,008
45	NAO	ARTE		
46	SIM		30	0,003
47	SIM		6	0,003
48	SIM		5	0,003
49	SIM	ARTE	4	0,003
50	SIM	NAO	1	0,002
51	SIM		7	0,009
52	NAO	ARTE	3	0,034
53	SIM	NAO	3	0,094
54	SIM		1	0,004
55	SIM	NAO	3	0,005
56	SIM	NAO	1	0,000

ID	RIO	POCO	MAOB	MAOR
57	SIM	NAO	3	0,001
58	SIM		2	0,002
59	SIM	NAO	4	0,006
60	SIM	NAO	3	0,014
61	NAO		1	0,019
62	SIM	NAO		
63	SIM	NAO	2	0,007
64	NAO	ARTE	1	0,012
65	NAO	ARTE	10	0,003
66	NAO	ARTE	4	0,054
67	SIM	NAO	1	0,008
68	SIM	NAO	2	0,009
69	SIM	COMU	3	0,068
70	SIM	NAO	2	0,206
71	SIM	NAO	2	0,023
72	SIM	NAO	3	0,092
73	NAO	COMU	2	0,041
74	SIM	NAO	3	0,130
75	SIM	NAO	2	0,062
76	NAO	NAO	1	0,095
77	SIM	NAO	2	0,063
78	SIM	NAO	2	28,633
79	SIM	NAO	3	0,128
80	SIM	NAO	1	0,012
81	SIM	NAO	2	0,005
82	SIM	NAO	2	0,010
83	SIM	NAO	2	0,019
84	SIM	NAO	2	0,044
85	NAO	NAO	1	11,651
86	SIM		10	0,008
87	SIM	NAO	10	0,001
88	SIM	NAO	1	0,041
89	SIM	NAO	1	0,013
90	NAO	COMU	1	0,022
91	NAO	NAO	2	0,908
92	SIM	NAO	3	0,063
93	SIM	NAO	2	0,064
94	SIM	NAO	2	0,048
95	SIM	NAO	4	0,007
96	NAO	COMU	1	0,121
97	SIM	MANU	1	0,049
98			1	1,116
99			2	1,933
100	SIM		1	0,054
101	SIM	MANU	2	0,080
102	SIM		3	0,031
103	SIM		1	0,043
104	SIM		2	0,078
105	SIM		1	0,001
106	SIM		32	0,007
107	SIM	MANU	2	0,032
108	SIM		2	0,080
109	SIM	NAO	1	0,020
110	SIM	NAO	2	0,040
111	SIM		2	0,043
112	SIM		10	0,007

MAOD - relation entre le nombre de personnes actives et la surface de l'exploitation valeurs catégoriques ; INIC – date du début du déboisement ; INICD - date du début du déboisement valeurs catégoriques ; INAG - date de début des activités agricoles (soja).

ID	MAOD	INIC	INICD	INAG
0	ALTA	<1984	QUAR	
1	BAIX	2005	VINT	2011
2	BAIX	1992	TRIN	
3	ALTA	1992	TRIN	
4	ALTA	1992	TRIN	
5	MEDI	2006	DEZ	
6	ALTA	2005	VINT	
7	MEDI	<1984	QUAR	
8	ALTA	<1984	QUAR	
9	ALTA	2004	VINT	
10	ALTA	2004	VINT	
11	ALTA	2005	VINT	
12	ALTA	2005	VINT	
13	BAIX	1999	VINT	
14	ALTA	1999	VINT	
15	ALTA	1999	VINT	
16	ALTA	1997	VINT	
17	ALTA	2004	VINT	
18	BAIX	1999	VINT	
19	ALTA	1999	VINT	
20	BAIX	1990	TRIN	
21	ALTA	2000	VINT	
22	ALTA	2000	VINT	
23	MEDI	1991	TRIN	
24	MEDI	1997	VINT	
25	ALTA	<1984	QUAR	
26	ALTA	<1984	QUAR	
27	ALTA	<1984	QUAR	
28	ALTA	<1984	QUAR	
29	ALTA	<1984	QUAR	
30	ALTA	<1984	QUAR	
31	ALTA	<1984	QUAR	
32	ALTA	<1984	QUAR	
33	ALTA	<1984	QUAR	
34	ALTA	<1984	QUAR	2013
35	ALTA	1985	QUAR	
36	ALTA	<1984	QUAR	
37	ALTA	<1984	QUAR	
38	ALTA	<1984	QUAR	
39	ALTA	<1984	QUAR	2008
40	ALTA	<1984	QUAR	
41	ALTA	<1984	QUAR	2014
42	ALTA	<1984	QUAR	
43	ALTA	<1984	QUAR	2004
44	MEDI	1986	TRIN	2004
45	BAIX	<1984	QUAR	2013
46	BAIX	<1984	QUAR	2007
47	BAIX	2004	VINT	2004
48	BAIX	<1984	QUAR	2010
49	BAIX	<1984	QUAR	2011
50	BAIX	<1984	QUAR	2014
51	MEDI	<1984	QUAR	2013
52	ALTA	<1984	QUAR	
53	ALTA	<1984	QUAR	
54	BAIX	<1984	QUAR	
55	MEDI	<1984	QUAR	
56	BAIX	<1984	QUAR	2013

ID	MAOD	INIC	INICD	INAG
57	BAIX	<1984	QUAR	
58	BAIX	<1984	QUAR	2014
59	MEDI	2007	DEZ	2013
60	MEDI	1996	VINT	2015
61	ALTA	1993	TRIN	2006
62	BAIX	<1984	QUAR	
63	MEDI	<1984	QUAR	2008
64	MEDI	2010	DEZ	
65	BAIX	<1984	QUAR	2002
66	ALTA	1987	TRIN	2004
67	MEDI	1992	TRIN	2012
68	MEDI	<1984	QUAR	2015
69	ALTA	2004	VINT	
70	ALTA	1998	VINT	
71	ALTA	1988	TRIN	
72	ALTA	<1984	QUAR	
73	ALTA	2000	VINT	
74	ALTA	<1984	QUAR	
75	ALTA	2008	DEZ	
76	ALTA	2005	VINT	
77	ALTA	<1984	QUAR	
78	ALTA	2005	VINT	
79	ALTA	2005	VINT	
80	MEDI	<1984	QUAR	
81	MEDI	<1984	QUAR	
82	MEDI	1986	TRIN	
83	ALTA	1986	TRIN	
84	ALTA	1997	VINT	
85	ALTA	<1984	QUAR	
86	MEDI	<1984	QUAR	
87	BAIX	<1984	QUAR	
88	ALTA	<1984	QUAR	
89	MEDI	<1984	QUAR	
90	ALTA	1991	TRIN	
91	ALTA	<1984	QUAR	
92	ALTA	<1984	QUAR	
93	ALTA	1998	VINT	
94	ALTA	2000	VINT	
95	MEDI	<1984	QUAR	
96	ALTA	1990	TRIN	
97	ALTA	1986	TRIN	
98	ALTA	<1984	QUAR	
99	ALTA	<1984	QUAR	
100	ALTA	<1984	QUAR	
101	ALTA	1997	VINT	
102	ALTA	1999	VINT	
103	ALTA	<1984	QUAR	
104	ALTA	<1984	QUAR	
105	BAIX	<1984	QUAR	
106	MEDI	<1984	QUAR	2004
107	ALTA	1992	TRIN	
108	ALTA	<1984	QUAR	
109	ALTA	1998	VINT	
110	ALTA	1991	TRIN	
111	ALTA	<1984	QUAR	
112	MEDI	<1984	QUAR	2000

ANO : année du début des activités du propriétaire actuel ; ANOD : année du début des activités du propriétaire actuel valeurs discrètes ; DIST : l'importance de l'emplacement ou de l'accès par rapport au marché ; NPCF : surfaces non productives due au Code Forestier. NAO : non ; SIM : oui.

ID	ANO	ANOD	DIST	NPCF
0	2000	VIN	SIM	NAO
1	2008	DEZ		SIM
2	2016	DEZ	NAO	NAO
3	1997	VIN	SIM	NAO
4	1994	TRI	SIM	SIM
5	2015	DEZ	SIM	NAO
6	2000	VIN	NAO	SIM
7	2014	DEZ	NAO	NAO
8	2014	DEZ	NAO	NAO
9	2015	DEZ	NAO	NAO
10	2008	DEZ	SIM	NAO
11	2002	VIN	SIM	NAO
12	2017	DEZ	NAO	NAO
13	1997	VIN	NAO	NAO
14	2003	VIN	SIM	NAO
15	2004	VIN	NAO	NAO
16	2000	VIN	SIM	NAO
17	2001	VIN	SIM	NAO
18	2015	DEZ		NAO
19	2013	DEZ	SIM	NAO
20			NAO	NAO
21	2005	DEZ	NAO	NAO
22	2002	VIN	NAO	SIM
23	2002	VIN	NAO	SIM
24	1997	VIN	SIM	NAO
25	2014	DEZ	SIM	NAO
26	2002	VIN	SIM	NAO
27	1997	VIN	SIM	NAO
28	2002	VIN	SIM	NAO
29	2000	VIN	SIM	NAO
30	1997	VIN	NAO	NAO
31	2004	VIN	SIM	NAO
32	2007	DEZ	SIM	NAO
33	2012	DEZ	NAO	NAO
34	2007	DEZ	SIM	NAO
35	2016	DEZ	SIM	NAO
36	2011	DEZ	SIM	NAO
37	2016	DEZ	SIM	NAO
38	2013	DEZ	SIM	NAO
39	2012	DEZ	SIM	NAO
40	1997	VIN	SIM	NAO
41	1997	VIN	SIM	SIM
42	1992	TRI	SIM	NAO
43	2005	DEZ	SIM	NAO
44	2004	VIN	SIM	NAO
45	1992	TRI	SIM	NAO
46	1982	QUR	SIM	SIM
47	2010	DEZ	SIM	SIM
48	1992	TRI	SIM	SIM
49			SIM	SIM
50	2008	DEZ	SIM	SIM
51	1986	TRI	SIM	SIM
52	2003	VIN	SIM	SIM
53				SIM
54	2006	DEZ		SIM
55	1977	QUR	NAO	NAO
56	1986	TRI	SIM	SIM

ID	ANO	ANOD	DIST	NPCF
57	1986	TRI	NAO	SIM
58	2000	VIN		SIM
59	2010	DEZ		SIM
60	2015	DEZ	SIM	SIM
61	2005	DEZ		NAO
62				SIM
63	1981	QUR	SIM	SIM
64	2015	DEZ	SIM	NAO
65	2004	VIN	SIM	SIM
66	1999	VIN	SIM	NAO
67	2013	DEZ	SIM	SIM
68	1981	QUR	SIM	SIM
69	1996	VIN		NAO
70				NAO
71	2004	VIN		NAO
72		QUR	SIM	SIM
73	2003		SIM	NAO
74	1993	TRI	SIM	NAO
75	2009	DEZ		NAO
76	2013	DEZ		SIM
77	1999	VIN		NAO
78	2006	DEZ		NAO
79	2004	VIN		SIM
80	1996	VIN	SIM	SIM
81	2013	DEZ	NAO	NAO
82	2016	DEZ	NAO	NAO
83	1992	TRI	NAO	NAO
84	1991	TRI	NAO	SIM
85	1966	QUR	NAO	NAO
86	2006	DEZ	NAO	NAO
87	2006	DEZ	NAO	NAO
88	2013	DEZ	SIM	SIM
89	1970	QUR	NAO	NAO
90	2014	DEZ		NAO
91	2001	VIN	NAO	NAO
92	1996	VIN	NAO	SIM
93	1999	VIN	SIM	NAO
94	2000	VIN		NAO
95	2001	VIN	SIM	SIM
96	1991	TRI	SIM	NAO
97	2001	VIN	NAO	SIM
98				NAO
99		QUR		NAO
100	1991		SIM	NAO
101	2008	DEZ	SIM	SIM
102	2001	VIN	SIM	NAO
103	2006	DEZ		NAO
104	2000	VIN		NAO
105	2000	VIN	NAO	SIM
106	2004	VIN	SIM	SIM
107	1992	TRI	NAO	NAO
108	1998	VIN	SIM	NAO
109	2014	DEZ	NAO	NAO
110			SIM	NAO
111	2001	VIN	SIM	NAO
112	1998	VIN	SIM	SIM

NPME : surfaces non productives due à la mécanisation ; NPSR : surfaces non productives due les restrictions de capital ; PRF : projets futurs (EX – expansion, IN - intensifier la production, MD - modifier la production ou louer la ferme, DV – diversifier, SQ - *statu quo*, MC – mécaniser). NAO : non ; SIM : oui.

ID	NPME	NPSR	PRF1	PRF2
0	NAO	SIM	SQ	
1	NAO	NAO	SQ	
2	NAO	NAO	DV	
3	NAO	NAO	EX	DV
4	NAO	NAO	MD	
5	NAO	NAO	MD	
6	SIM	NAO	EX	
7	SIM	NAO		
8	NAO	SIM	DV	
9	NAO	NAO		
10	NAO	NAO	DV	
11	NAO	SIM	DV	
12	NAO	SIM	DV	
13	NAO	SIM	EX	
14	NAO	NAO	EX	
15	NAO	NAO	DV	MD
16	NAO	SIM	DV	
17	NAO	SIM	SQ	
18	NAO	SIM	EX	
19	SIM	NAO	DV	EX
20	SIM	NAO	IN	
21	SIM	NAO	DV	MC
22	NAO	NAO	SQ	
23	SIM	NAO	IN	
24	SIM	NAO	MD	
25	NAO	SIM	SQ	
26	NAO	NAO	EX	
27	NAO	NAO	EX	
28	NAO	SIM	EX	DV
29	NAO	SIM	EX	
30	NAO	SIM	SQ	
31	NAO	SIM	EX	DV
32	NAO	SIM	EX	DV
33	NAO	SIM	MD	EX
34	SIM	NAO	SQ	
35	SIM	NAO	SQ	
36	NAO	NAO	DV	
37	NAO	NAO	DV	
38	NAO	NAO	DV	
39	NAO	NAO		
40	NAO	NAO	EX	
41	NAO	NAO		
42	NAO	NAO	MD	
43	SIM	NAO	SQ	
44	SIM	NAO	IN	
45	SIM	NAO	IN	
46	SIM	NAO		
47	SIM	NAO	SQ	
48	NAO	NAO		
49	NAO	NAO	IN	
50	SIM	NAO	SQ	
51	SIM	NAO	DV	MD
52	NAO	NAO	EX	
53	NAO	NAO	SQ	
54	NAO	NAO	EX	DV
55	SIM	NAO	IN	
56	SIM	NAO	EX	

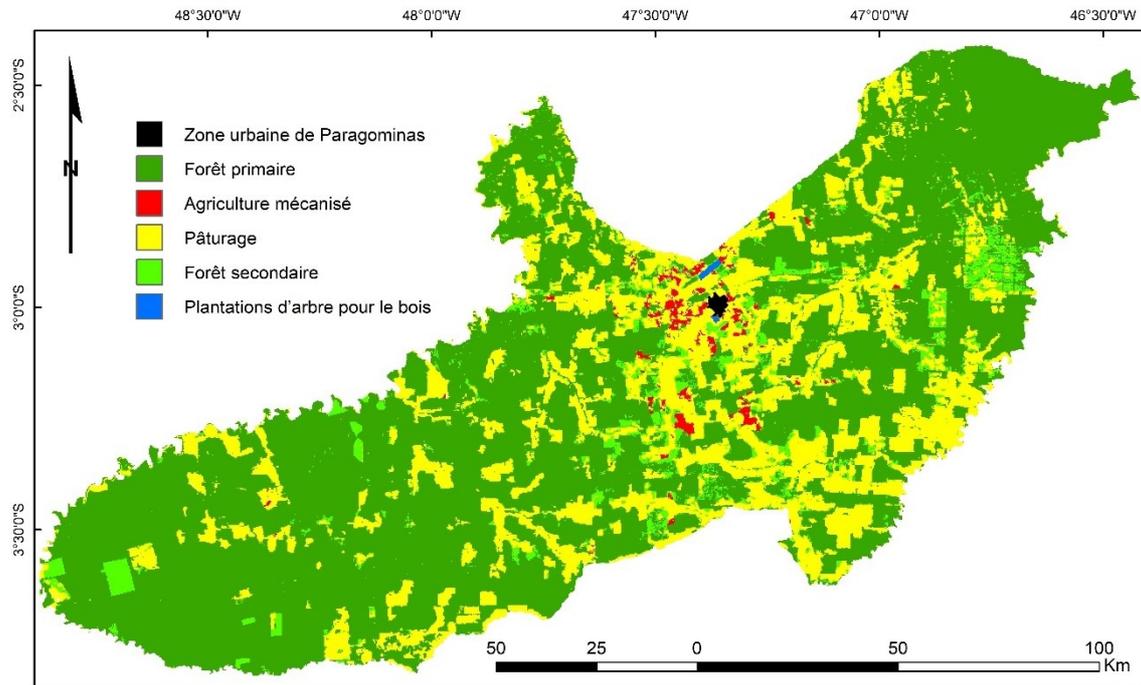
ID	NPME	NPSR	PRF1	PRF2
57	SIM	NAO	EX	
58	SIM	NAO	SQ	
59	SIM	NAO	EX	IN
60	SIM	NAO	IN	
61	NAO	NAO	MD	
62	SIM	NAO	EX	
63	SIM	NAO	MD	
64	SIM	NAO	MD	
65	NAO	NAO	EX	
66	NAO	NAO	EX	
67	SIM	NAO	EX	
68	SIM	NAO	MD	
69	NAO	SIM	MD	
70	NAO	NAO	EX	
71	SIM	SIM	EX	
72	NAO	NAO	SQ	
73	NAO	SIM	EX	
74	NAO	SIM	EX	
75	NAO	SIM	EX	
76	NAO	SIM	SQ	
77	SIM	NAO	DV	
78	NAO	NAO	MD	
79	SIM	NAO	EX	
80	SIM	NAO	IN	
81	SIM	NAO	EX	
82	SIM	SIM	EX	DV
83	SIM	NAO	SQ	
84	NAO	SIM	EX	
85	NAO	SIM	SQ	
86	SIM	NAO	SQ	
87	SIM	NAO	EX	
88	SIM	NAO	EX	
89	NAO	SIM	MC	MD
90	NAO	SIM	EX	
91	NAO	SIM	MC	
92	NAO	SIM	SQ	
93	NAO	SIM	SQ	
94	NAO	SIM	SQ	
95	SIM	NAO	SQ	
96	NAO	SIM	MD	
97	NAO	SIM	MC	
98	NAO	SIM	MC	
99	NAO	SIM		
100	NAO	SIM	DV	
101	NAO	SIM	EX	
102	NAO	SIM	SQ	
103	NAO	SIM	DV	SQ
104	NAO	SIM	EX	DV
105	SIM	NAO		
106	SIM	NAO	EX	
107	NAO	SIM	DV	
108	NAO	SIM	EX	
109	SIM	NAO		
110	NAO	SIM	SQ	
111	NAO	SIM	DV	EX
112	SIM	NAO	EX	

FMU : Facteurs critiques de changement (MC - coûts de production et de vente, GV - rôle des politiques publiques, SE - changement climatique, LG - légalisation foncière, MO - main-d'œuvre) ; DIST_ESTR : distance euclidienne entre l'exploitation et les routes asphaltées (m).

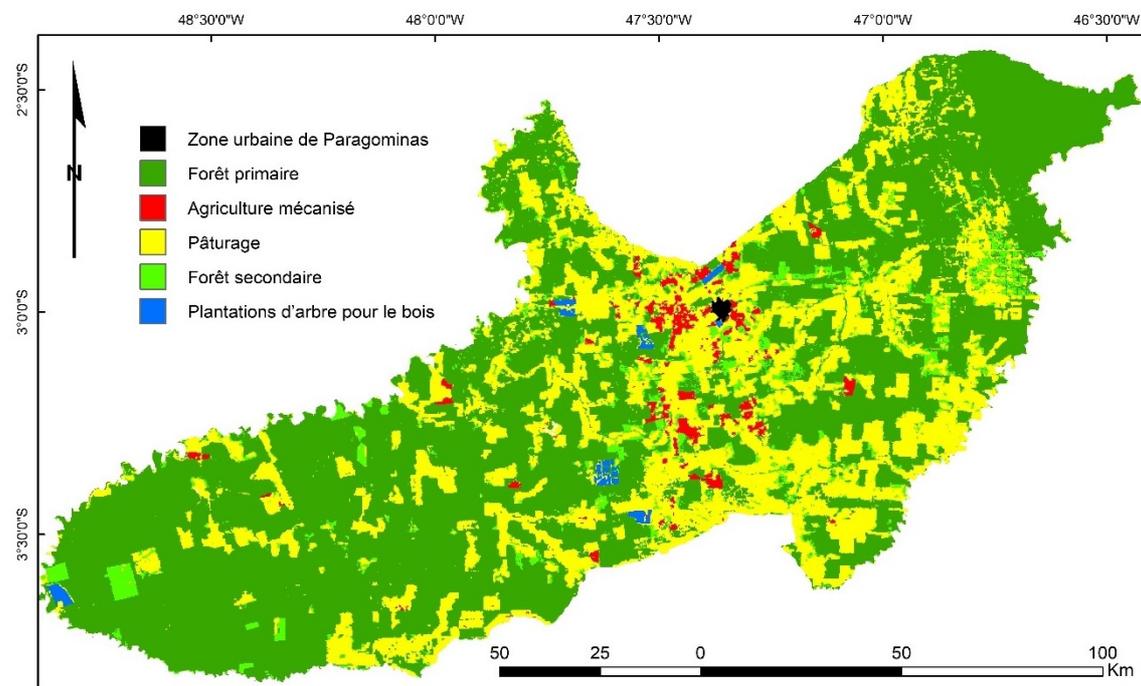
ID	FMU1	FMU2	DIST_ESTR
0	GV		70000
1	MC		20000
2	GV		25000
3	GV	LG	60000
4	GV	MO	60000
5	GV		20000
6	GV		15000
7	GV		15000
8	GV		10000
9			15000
10	MC		20000
11	GV		20000
12	LG		20000
13	GV		70000
14	LG		65000
15	GV		70000
16	GV	LG	70000
17	GV		70000
18	GV		70000
19	GV		70000
20			20000
21	GV		20000
22	GV		25000
23			25000
24	GV		25000
25	GV		70000
26			65000
27	GV		65000
28	GV		65000
29	MC		70000
30	GV		65000
31	GV		65000
32	GV		60000
33	GV		70000
34	GV		10000
35	GV		10000
36	MC		10000
37	GV		10000
38	GV		10000
39			10000
40	GV		5000
41	GV		10000
42	MC		5000
43	MC		10000
44	MC		10000
45	MC		5000
46	MC		5000
47	GV		40000
48			10000
49	CF		25000
50			5000
51	MC		5000
52	MC	GV	10000
53			15000
54			15000
55			25000
56			15000

ID	FMU1	FMU2	DIST_ESTR
57			20000
58	SE		15000
59	MC		15000
60	CF		20000
61			5000
62	SE		15000
63	SE		5000
64	LG	MC	45000
65	CF		5000
66	CF		10000
67			15000
68	SE		5000
69			45000
70	GV		20000
71			40000
72			15000
73	GV		45000
74			10000
75	LG		10000
76	CF	LG	10000
77			40000
78	CF		15000
79			10000
80	MC		10000
81	MC		40000
82	MC	LG	40000
83	GV		40000
84	GV		45000
85			15000
86			15000
87			10000
88	GV		10000
89	GV		15000
90			30000
91	GV		30000
92	GV		15000
93	GV		20000
94	GV		20000
95			10000
96	GV		30000
97	GV		30000
98	GV		30000
99			30000
100	GV	MO	30000
101			70000
102	GV		70000
103	GV		70000
104			65000
105			35000
106			20000
107	LG		60000
108	GV		65000
109			20000
110	MC	GV	30000
111	GV		30000
112			10000

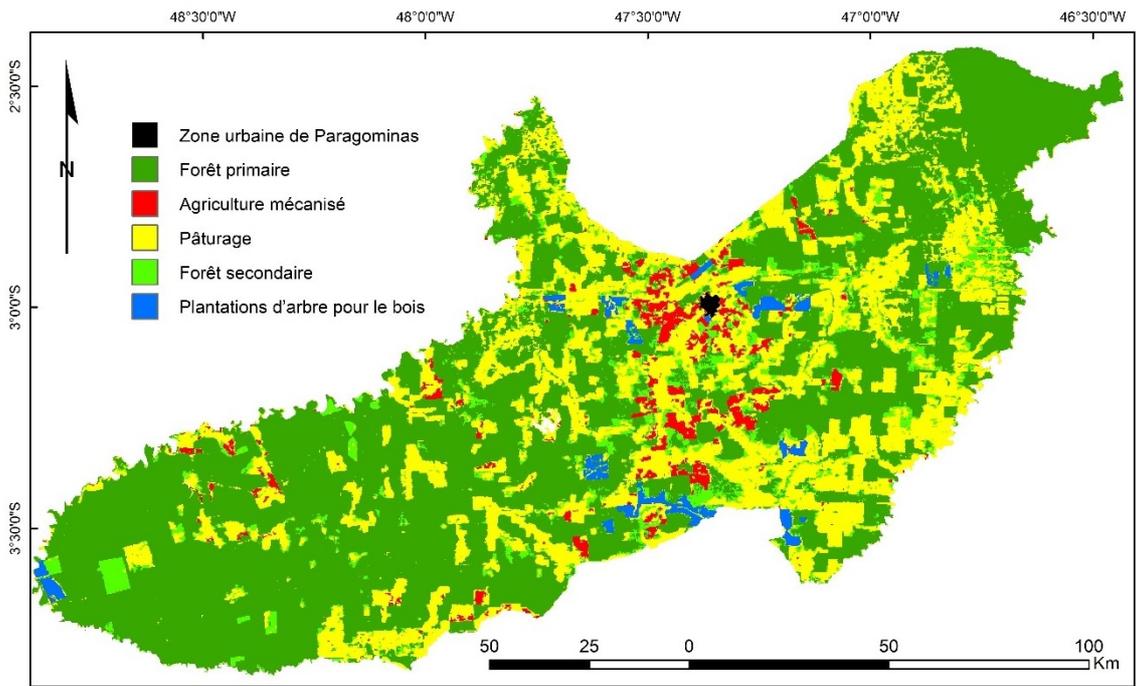
Annexe 2 : Images d'occupation du sol



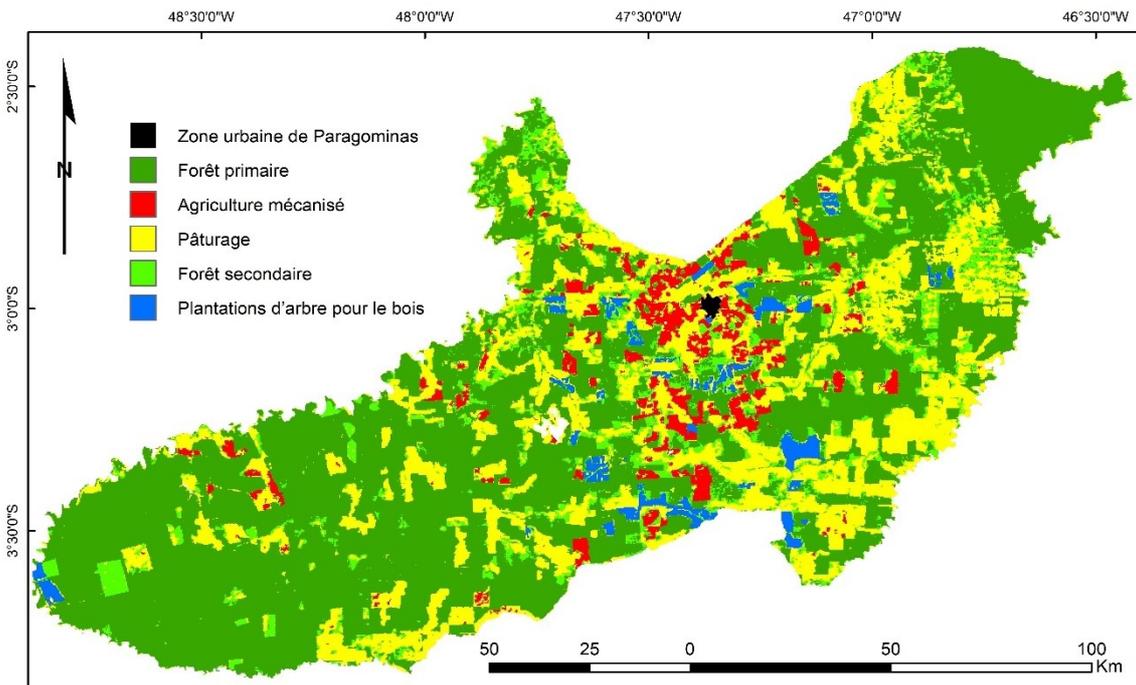
Occupation du sol en 2004. Résultats des procédures de classification décrites dans la Partie II de la thèse.



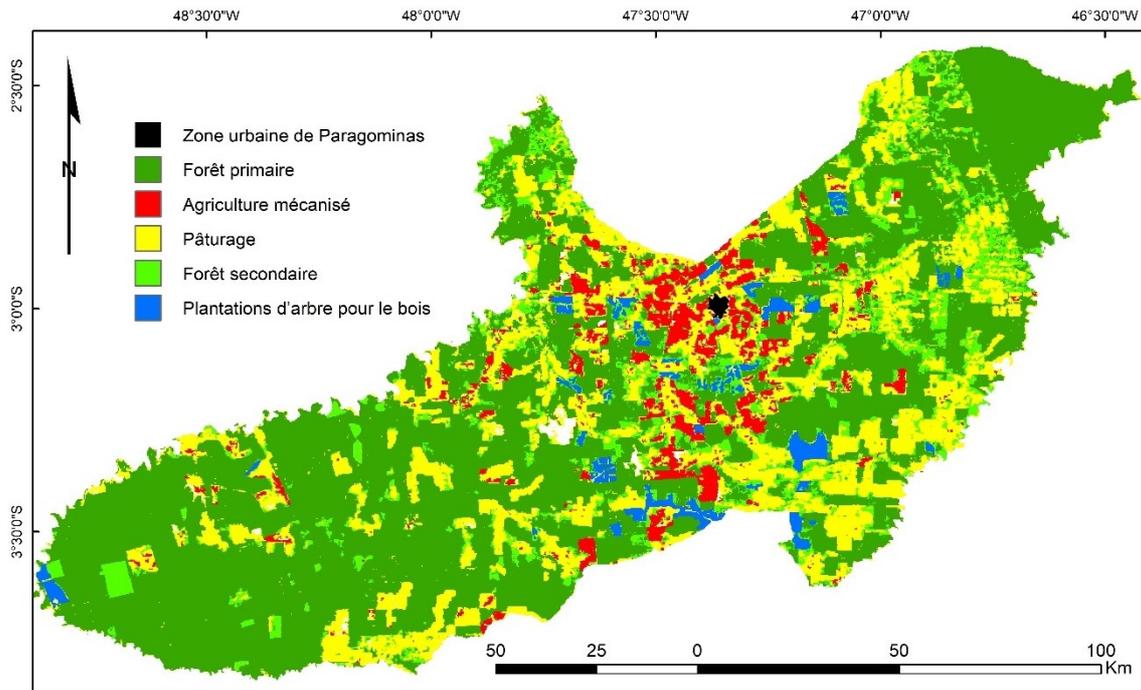
Occupation du sol en 2007. Résultats des procédures de classification décrites dans la Partie II de la thèse.



Occupation du sol en 2010. Résultats des procédures de classification décrites dans la Partie II de la thèse.

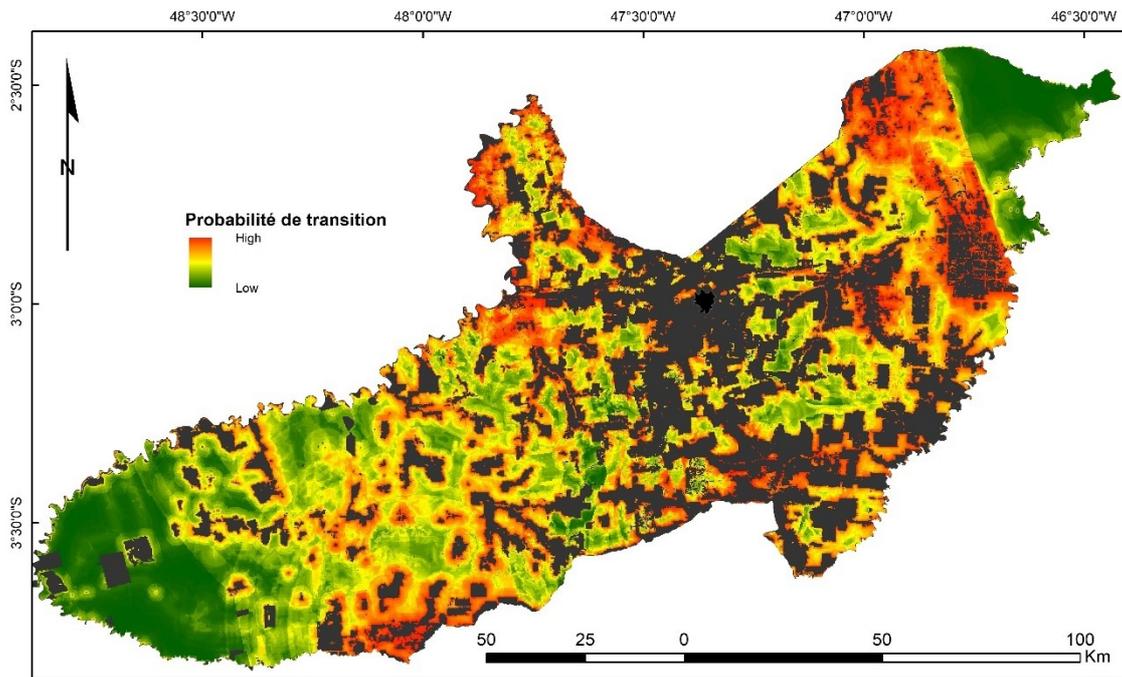


Occupation du sol en 2013. Résultats des procédures de classification décrites dans la Partie II de la thèse.

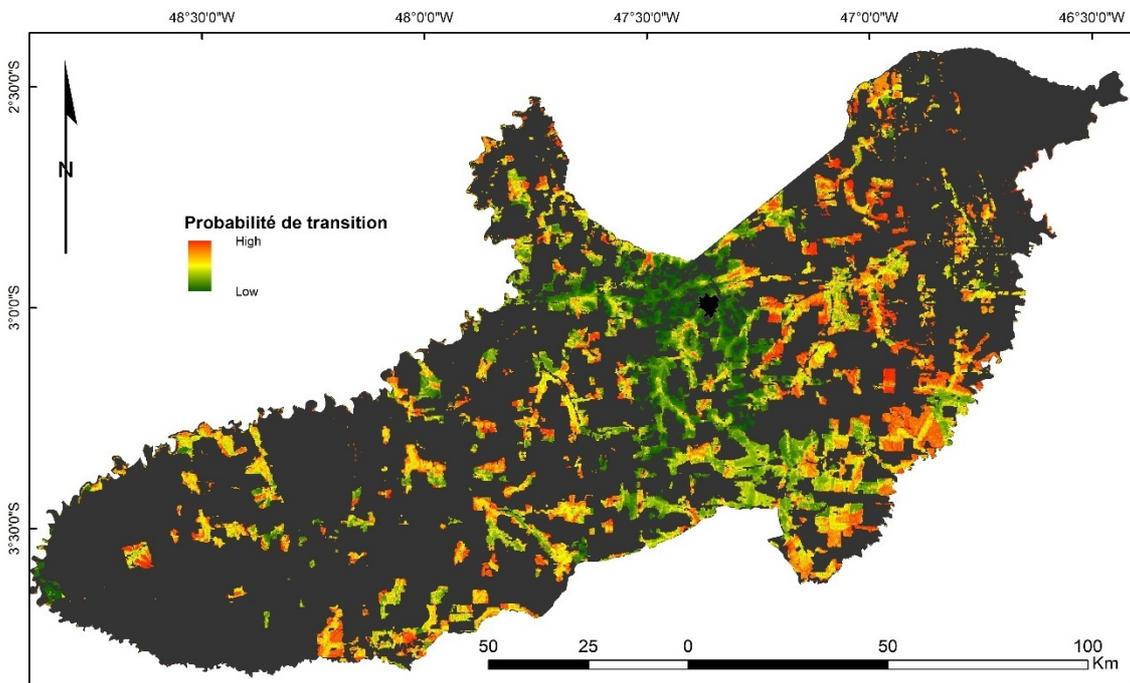


Occupation du sol en 2015. Résultats des procédures de classification décrites dans la Partie II de la thèse.

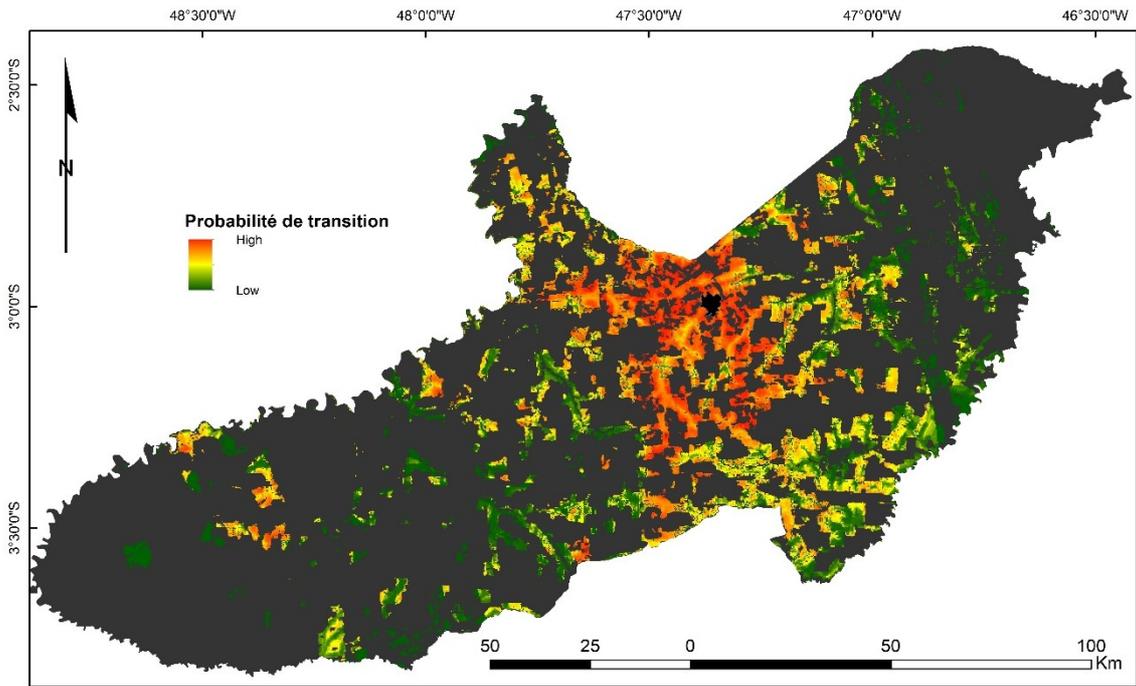
Annexe 3 : Cartes de probabilité de transition



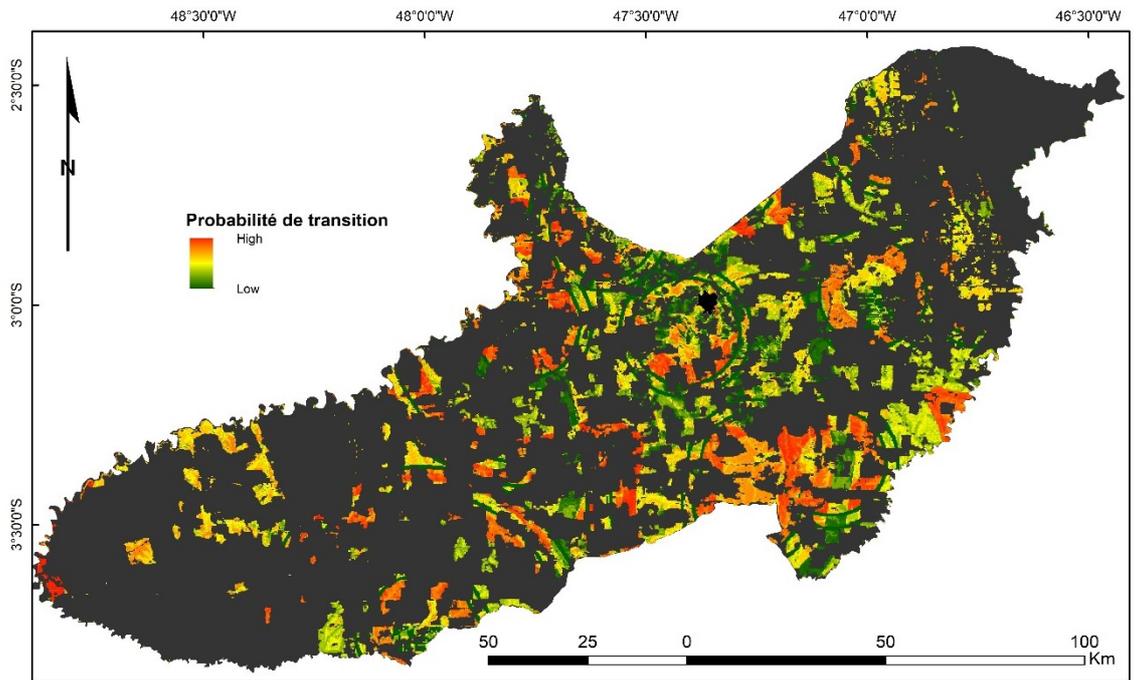
Carte de probabilité de transition de forêt primaire vers pâturage de 2004, utilisé dans le modèle 2004-2007.



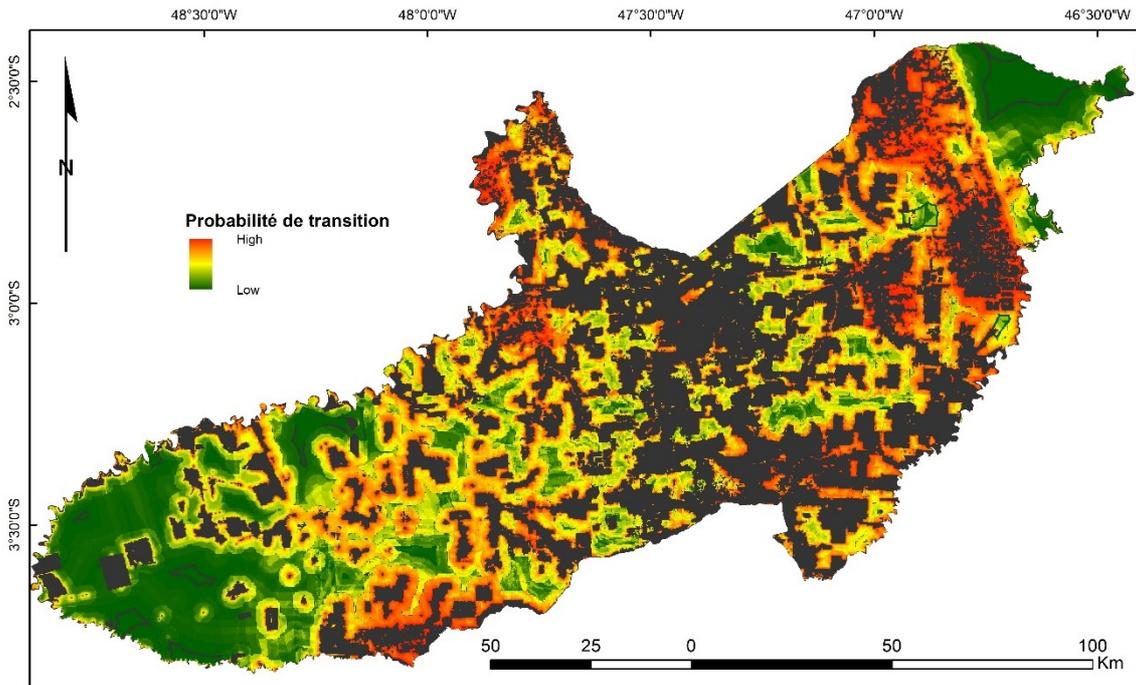
Carte de probabilité de transition de pâturage vers forêt secondaire de 2004, utilisé dans le modèle 2004-2007.



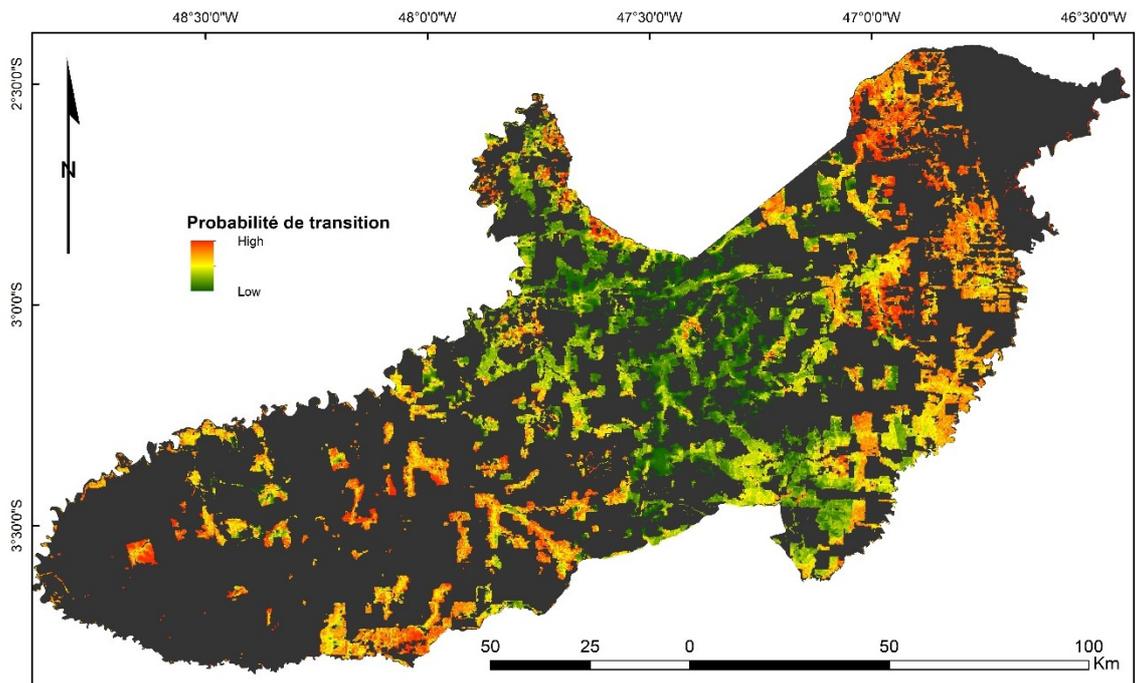
Carte de probabilité de transition de pâturage vers agriculture mécanisé de 2004, utilisé dans le modèle 2004-2007.



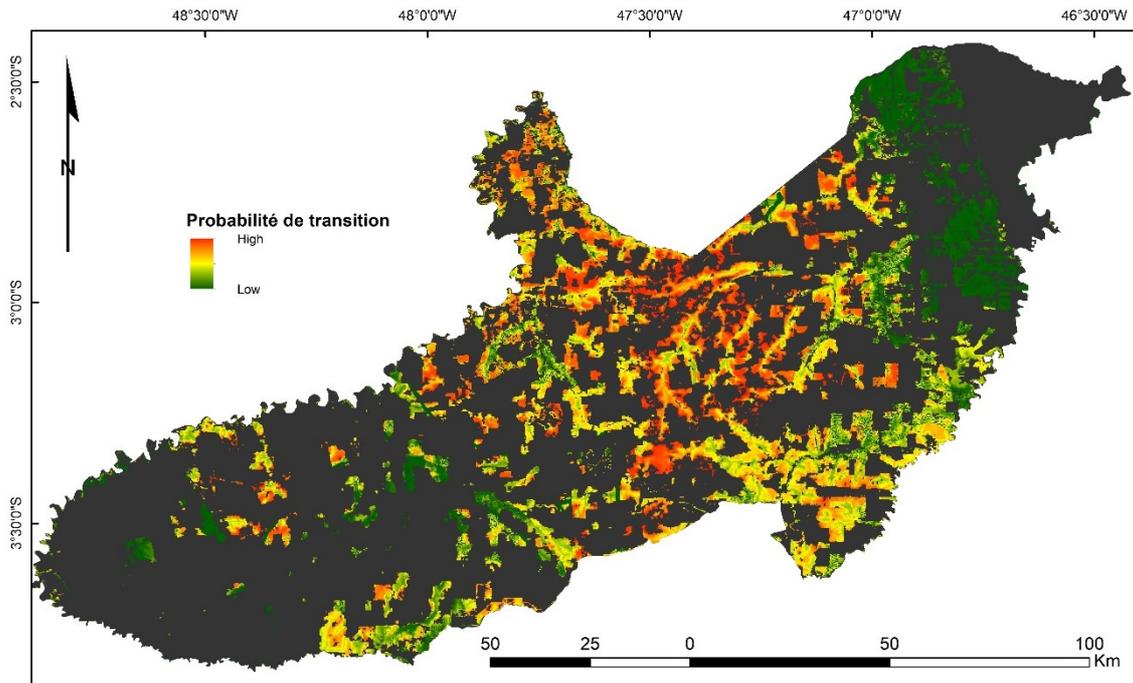
Carte de probabilité de transition de pâturage vers plantation d'arbres pour le bois de 2004, utilisé dans le modèle 2004-2007.



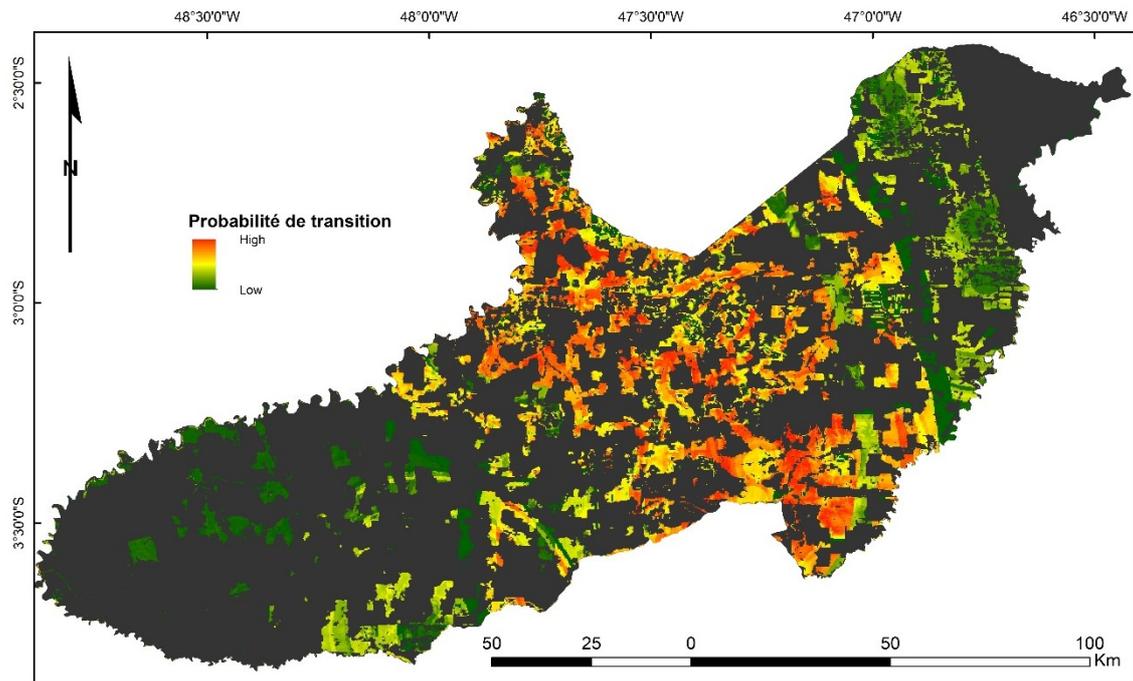
Carte de probabilité de transition de forêt primaire vers pâturage de 2010, utilisé dans le modèle 2010-2013.



Carte de probabilité de transition de pâturage vers forêt secondaire de 2010, utilisé dans le modèle 2010-2013.

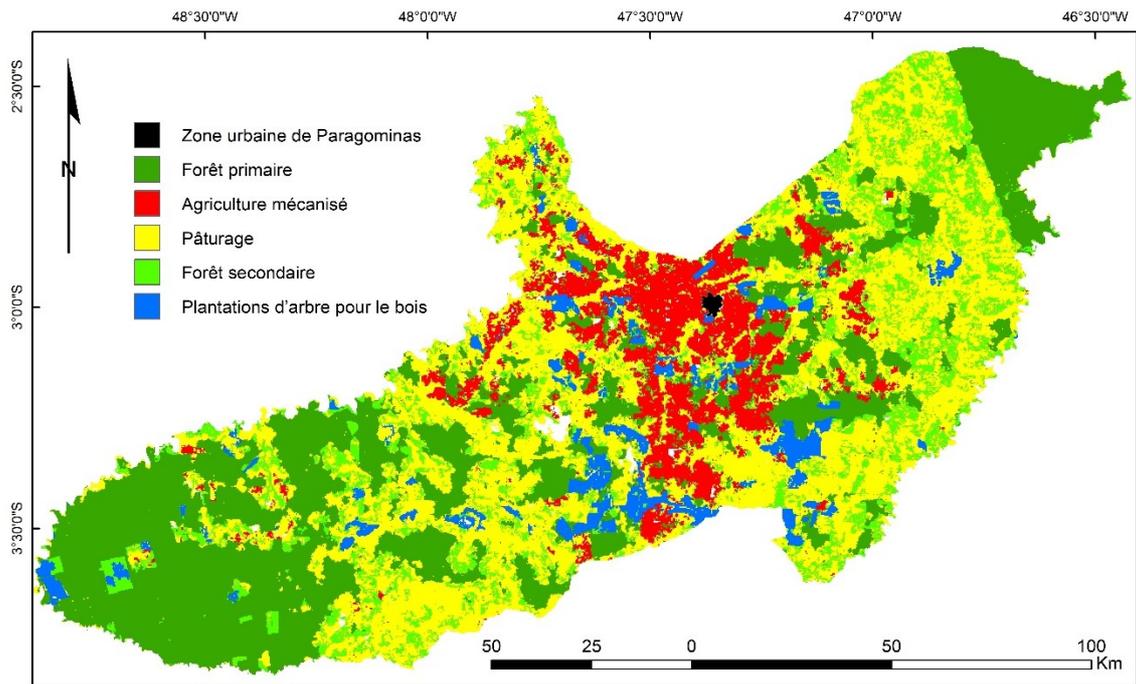


Carte de probabilité de transition de pâturage vers agriculture mécanisé de 2010, utilisé dans le modèle 2010-2013.

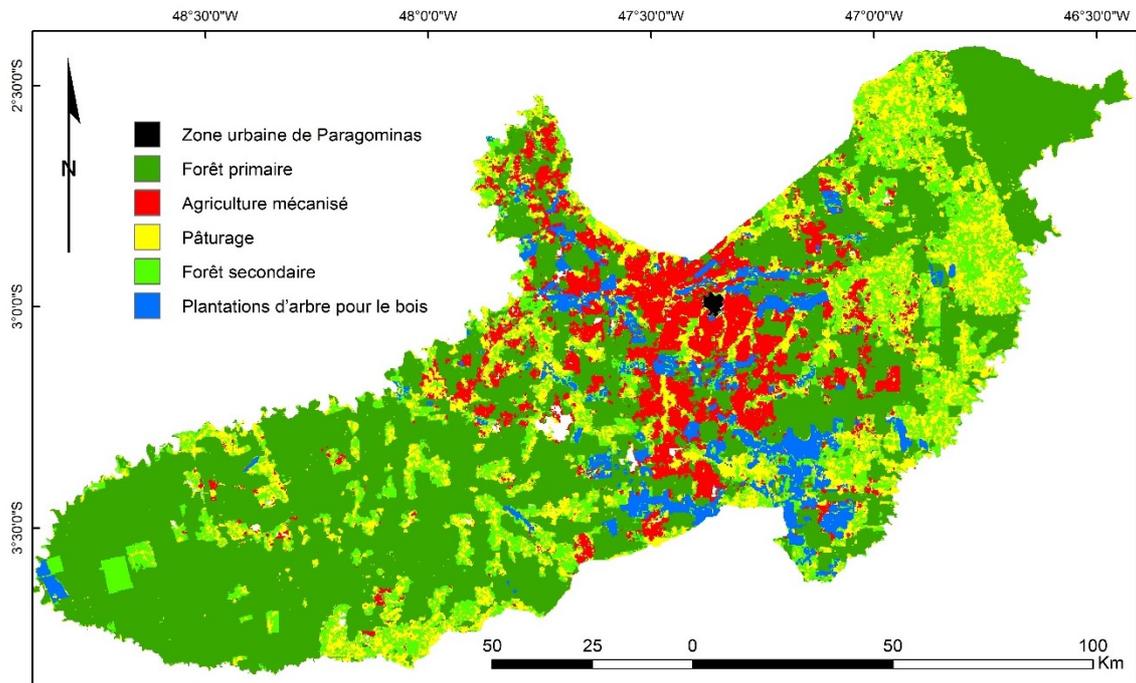


Carte de probabilité de transition de pâturage vers plantation d'arbres pour le bois de 2010, utilisé dans le modèle 2010-2013.

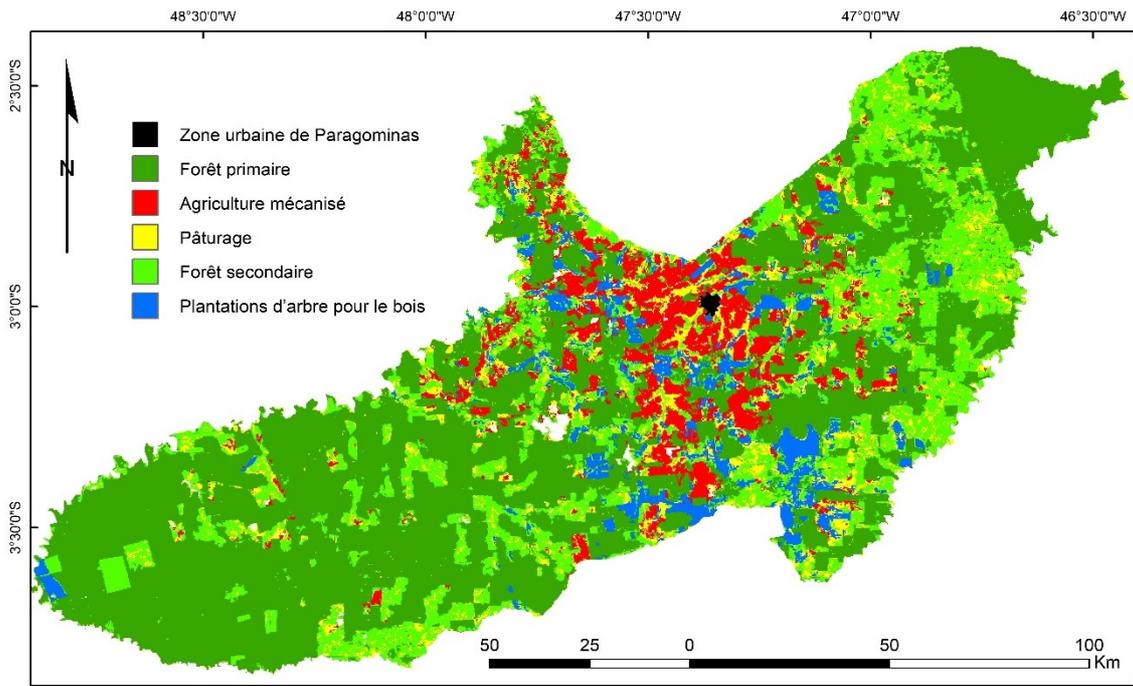
Annexe 4 : Cartes des scenarios simulés



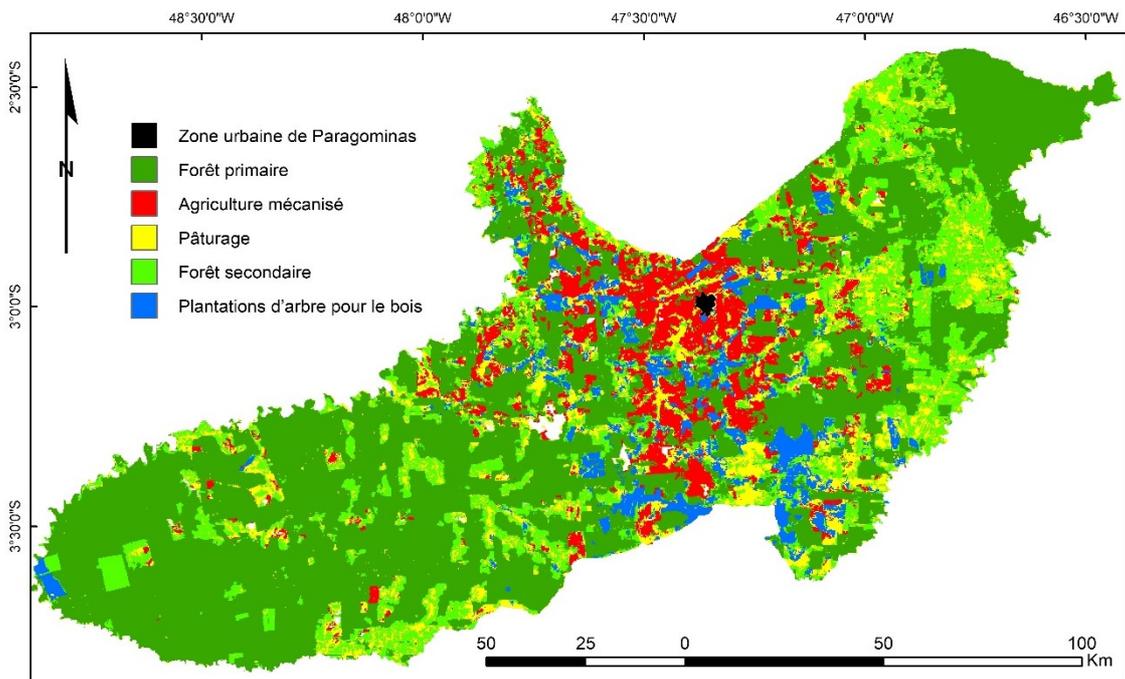
Scénario Ep simulé pour l'année 2030.



Scénario Ea simulé pour l'année 2030.



Scénario ZD simulé pour l'année 2030.



Scénario ZDi simulé pour l'année 2030.

Annexe 5 : Attributs utilisés dans les tests de partitionnement de données

Complet	Excl	Excl2	Excl3
@attribute AREA numeric @attribute TPM1 {PLEN,GR,VR,AI} @attribute USO1 {FS,FL,PA,AG,AF,HO,SI,IN} @attribute M1 {DC,SV,FR,RH,LH,PR,CF,DV,DA,SE,SR} @attribute TPM2 {PLEN,GR,VR,AI} @attribute USO2 {FS,FL,PA,AG,AF,HO,SI,IN} @attribute M2 {DC,SV,FR,RH,LH,PR,CF,DV,DA,SE,SR} @attribute GRAO {SIM,NAO} @attribute HORT {SIM,NAO} @attribute PECU {SIM,NAO} @attribute PIME {SIM,NAO} @attribute FRUT {SIM,NAO} @attribute MAND {SIM,NAO} @attribute SILV {SIM,NAO} @attribute ACAI {SIM,NAO} @attribute NPRO numeric @attribute FUNS {PATR,CAMP} @attribute INTE {SIM,NAO} @attribute ARRE {SIM,NAO} @attribute MECA {SIM,NAO,EVEN} @attribute MAOD {BAIX,MEDI,ALTA} @attribute DIST_ESTR numeric @attribute DIST_LOC numeric @attribute DIST_PGM numeric @attribute For2004 numeric @attribute Agri2004 numeric @attribute Past2004 numeric @attribute Sec2004 numeric @attribute For2015 numeric @attribute Agri2015 numeric @attribute Past2015 numeric @attribute Sec2015 numeric @attribute For2004R numeric @attribute Agri2004R numeric @attribute Past2004R numeric @attribute Sec2004R numeric @attribute For2015R numeric @attribute Agri2015R numeric @attribute Past2015R numeric @attribute Sec2015R numeric @attribute ENCOS numeric @attribute GR_SEC numeric @attribute GR_UM numeric @attribute PLAT numeric @attribute VERT numeric @attribute ENCOS_R numeric @attribute GR_SEC_R numeric @attribute GR_UM_R numeric @attribute PLAT_R numeric @attribute VERT_R numeric	@attribute AREA numeric @attribute GRAO {SIM,NAO} @attribute HORT {SIM,NAO} @attribute PECU {SIM,NAO} @attribute PIME {SIM,NAO} @attribute FRUT {SIM,NAO} @attribute MAND {SIM,NAO} @attribute SILV {SIM,NAO} @attribute NPRO numeric @attribute INTE {SIM,NAO} @attribute ARRE {SIM,NAO} @attribute MECA {SIM,NAO,EVEN} @attribute MAOD {BAIX,MEDI,ALTA} @attribute DIST_ESTR numeric @attribute DIST_LOC numeric @attribute DIST_PGM numeric @attribute For2004 numeric @attribute Agri2004 numeric @attribute Past2004 numeric @attribute Sec2004 numeric @attribute For2015 numeric @attribute Agri2015 numeric @attribute Past2015 numeric @attribute Sec2015 numeric @attribute For2004R numeric @attribute Agri2004R numeric @attribute Past2004R numeric @attribute Sec2004R numeric @attribute For2015R numeric @attribute Agri2015R numeric @attribute Past2015R numeric @attribute Sec2015R numeric @attribute ENCOS numeric @attribute GR_SEC numeric @attribute GR_UM numeric @attribute PLAT numeric @attribute VERT numeric @attribute ENCOS_R numeric @attribute GR_SEC_R numeric @attribute GR_UM_R numeric @attribute PLAT_R numeric @attribute VERT_R numeric	@attribute AREA numeric @attribute GRAO {SIM,NAO} @attribute HORT {SIM,NAO} @attribute PECU {SIM,NAO} @attribute PIME {SIM,NAO} @attribute FRUT {SIM,NAO} @attribute MAND {SIM,NAO} @attribute SILV {SIM,NAO} @attribute NPRO numeric @attribute INTE {SIM,NAO} @attribute ARRE {SIM,NAO} @attribute MECA {SIM,NAO,EVEN} @attribute MAOD {BAIX,MEDI,ALTA} @attribute DIST_ESTR numeric @attribute DIST_LOC numeric @attribute DIST_PGM numeric @attribute For2015 numeric @attribute Agri2015 numeric @attribute Past2015 numeric @attribute Sec2015 numeric @attribute PLAT numeric @attribute VERT numeric	@attribute AREA numeric @attribute GRAO {SIM,NAO} @attribute HORT {SIM,NAO} @attribute PECU {SIM,NAO} @attribute PIME {SIM,NAO} @attribute FRUT {SIM,NAO} @attribute MAND {SIM,NAO} @attribute For2015 numeric @attribute Agri2015 numeric @attribute Past2015 numeric @attribute Sec2015 numeric @attribute PLAT numeric @attribute VERT numeric

Titre : Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale

Mots clés : occupation du sol ; front pionnier ; Amazonie ; sol ; eau ; modélisation ; soja ; élevage.

Résumé : L'Amazonie est soumise depuis plusieurs décennies à un changement rapide d'occupation du sol du fait de la déforestation, l'installation de systèmes de production agricole, notamment l'élevage bovin et plus récemment le soja. L'un des défis majeurs est de mieux comprendre la dynamique spatiale de ces processus et ses déterminants. Avec la réduction de la déforestation et l'évolution agraire sur les fronts pionniers, les ressources et contraintes naturelles semblent gagner en importance dans les choix opérés par les agriculteurs. L'objectif de la présente recherche est d'évaluer le rôle des facteurs biophysiques dans la dynamique de l'occupation du sol depuis 2000 et d'anticiper sur des futurs possibles dans un territoire amazonien d'ancien front pionnier, aujourd'hui consolidé, la municipalité de Paragominas. Nous avons mis en œuvre un modèle spatialement explicite, afin d'identifier la distribution spatiale des processus de changement en relation avec différents facteurs.

Des entretiens réalisés avec des producteurs explicitent les logiques sous-jacentes. Les résultats montrent qu'il y a différentes logiques d'usage des ressources biophysiques, qui varient selon les types de production, la taille des exploitations, la distance aux routes et villages, et la distribution spatiale des ressources biophysiques dans l'exploitation. Elles évoluent au fil du temps, en fonction des productions et des avancées technologiques, et sont organisées dans l'espace. La mise en évidence de ces relations spatiales constitue une avancée significative pour représenter et simuler l'évolution de l'usage des sols, et les services écosystémiques qui y sont associés. Cette meilleure prise en compte de l'importance des ressources biophysiques dans l'évolution des fronts pionniers grâce à ce type de méthode, pourrait constituer un appui dans la définition de politiques de développement territorial.

Title: Spatial relationships between biophysical resources and pioneer front dynamics in the Eastern Amazon

Keywords: land use land cover; pioneer front; Amazonia; soil; water; modelling, soybeans; livestock.

Abstract: The Amazon has been subject to a rapid change in land use due to deforestation for several decades and more recently to the expansion of annual crops like soybeans. One of the major challenges is to understand better the spatial dynamics of these processes and its determinants. With the reduction of deforestation and the consolidation of pioneer fronts, natural resources and constraints seem to be gaining in importance in farmers' choices. The objective of this research was to assess the role of biophysical factors in land use dynamics since 2000 and to anticipate possible futures in a consolidated Amazonian pioneer frontier, the municipality of Paragominas. We implemented a spatially explicit model to identify the spatial distribution of change processes in relation to different factors.

Interviews with farmers explain the underlying strategy. The results show different strategies for the use of biophysical resources according to the types of production, the size of the farms, the distance to roads and villages and the spatial distribution of biophysical resources in the farm. The strategies evolve over time, in relation to production and technological advances, and are organized in space. A better understanding of the importance of biophysical resources on the evolution of pioneer fronts through this type of method could provide support for land-use policies.