

UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DE DONNÉES SOCIO-ÉCONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES POUR COMPRENDRE L'IMPACT DES DYNAMIQUES DE L'OCCUPATION DES SOLS A PACAJÁ (BRÉSIL)

Johan Oszwald^{1,3}, Xavier Arnauld de Sartre², Thibaud Decaëns³, Valéry Gond⁴, Michel Grimaldi⁵, Antoine Lefebvre¹, Rafael Luis De Araujo Fretas⁶, Simao Lindoso de Souza⁶, Raphaël Marichal⁷, Iran Veiga⁸, Elena Velasquez⁹ et Patrick Lavelle¹⁰

1 : Université Rennes 2, 5 place Henri Le Moal, 35000 Rennes, UMR LETG (UMR CNRS 5654), laboratoire COSTEL
johan.oszwald@uhb.fr ; antoine.lefebvre@uhb.fr

2 : Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), UMR 5603 SET
Université de Pau et des Pays de l'Adour, 64000 Pau
xavier.arnauld@univ-pau.fr

3 : Laboratoire d'Ecologie, ECODIV, UPRES-EA 1293, Université de Rouen, 76821 Mont Saint Aignan Cedex
thibaud.decaens@univ-rouen.fr

4 : CIRAD, TA C-105 / D, Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier cedex 5
valery.gond@cirad.fr

5 : Institut de recherche pour le développement (IRD), Unité mixte de recherche 137,
32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex
michel.grimaldi@ird.fr

6: Universidade Federal do Pará (UFPA), Laboratoire d'agro-écologie de la Transamazonienne (LAET)
Altamira, Pará, Brésil
slindoso@ufpa.br ; raraujo@ufpa.br

7 : Université Pierre et Marie Curie et IRD, UMR BIOEMCO 211, Centre IRD Ile de France
32 Av. Henri Varagnat, 93143 BONDY Cedex
raphael.marichal@ird.fr

8: Universidade Federal do Pará (UFPA), Centro agropecuário (CAP), Núcleo de estudos integrados sobre a agricultura familiar (NEAF), CxP 479, CEP 66075-110, Belém, Pará, Brésil
iveiga@ufpa.br

9: Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombie
elena.velasquez@ird.fr

10 : Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), UMR BIOEMCO 7618, Centre IRD Ile de France
32 rue Henri Varagnat, 93143 BONDY
Patrick.Lavelle@ird.fr

Résumé

Le Pará est aujourd'hui, dans le Bassin amazonien, l'une des régions où les taux de déboisements sont parmi les plus intenses. Le front de déforestation se développe notamment le long de la route dite « Transamazonienne » à partir de pistes secondaires perpendiculaires, phénomène identifié depuis plus de 20 ans sous le terme de « front de déforestation en arête de poisson ». Le site étudié est une zone de colonisation spontanée qui est située à 60 km environ de Pacajá, sur la *travessão* sud du kilomètre 338 de la Transamazonienne. Cette région connaît depuis les années 1970 des dynamiques de déboisements très importantes suite à l'arrivée de nombreux colons qui se destinent principalement à l'agriculture. Ces dynamiques se sont fortement accélérées dans les années 1990 et 2000.

Afin de quantifier et de suivre l'évolution des dynamiques agricoles dans la zone d'étude, nous avons utilisé des images TM de Landsat de 1990 à 2007. Les dynamiques paysagères documentées, nous nous sommes intéressés à 50 exploitations agricoles qui ont été visitées lors des campagnes de terrain (2006-2008). Afin de renseigner la dynamique de ce front de déforestation, nous avons cherché à caractériser les différents facteurs d'évolution communs à chacune des parcelles. Pour ce faire, nous avons utilisé différentes méthodes statistiques factorielles comme les ACP interclasses ou les STATIS. Ce travail a permis de faire ressortir des groupes d'exploitations agricoles qui connaissent les mêmes types d'évolutions temporelles de l'occupation des sols. Ces groupes sont alors confrontés avec les principales caractéristiques socio-économiques des exploitants agricoles afin de rechercher des facteurs associés aux dynamiques de l'occupation des sols. Ces différents facteurs identifiés, nous mettons en évidence l'impact des dynamiques paysagères sur les richesses spécifiques, que l'on peut définir comme une mesure de la biodiversité, à l'intérieur d'un échantillon de neuf exploitations. Plus généralement, ces différents facteurs vont également participer à l'évaluation de certains Services Ecosystémiques (SE).

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'agence nationale de la recherche, programmes Agriculture et développement durable – 2006 (projet intitulé : Services écosystémiques des paysages agrosylvopastoraux Amazoniens : Analyse des

déterminants socio-économiques et simulation de scénarios) et Biodiversité – 2006 (Biodiversité des paysages Amazoniens. Déterminants socio-économiques et production de biens et services écosystémiques). Ces projets, coordonnés par Patrick Lavelle ont permis le travail commun d'équipes brésiliennes et françaises.

Mots clés : Brésil, front pionnier, télédétection, biodiversité, facteurs socio-économiques, services écosystémiques.

Abstract

At this time, Pará is one of the Brazilian Amazonian State where the rate of deforestation is very high. The deforestation front is developing along the transamazonian road from perpendicular secondary runways, phenomenon identified for more than 20 years under the term of "fish-bone deforestation front". The study site is a colonization area located at 60 km from Pacajá (travessão 338 south). This region experiences since the 1970s an important deforestation dynamics upon the arrival of farmers. This dynamics strongly accelerated during the 1990s and 2000s.

To monitor the agricultural dynamics in the study site, Landsat TM images from 1990 till 2007 were used. 50 farms land cover were inventoried during the field campaigns (2006-2008). To characterize the deforestation dynamics, key factors of each farm were statistically analyzed using the STATIS method. The result identifies groups of farms developing similar land cover dynamic from 1990 to 2007. As a measure of biodiversity we estimate the land cover dynamics as a driver of biological richness. More generally, the land cover dynamics participates to the evaluation of Ecosystems Services.

Keywords : Brazil, deforestation front, remote sensing, biodiversity, socio-economics factors, ecosystem services.

Resumo

O Estado do Pará é, na Bacia amazônica, uma das regiões cuja taxa de desmatamento foi das mais expressiva nos últimos anos. A frente de desmatamento se localiza sobretudo na região que se desenvolveu ao longo da estrada BR 230 (chamada estrada Transamazônica). A ocupação dos solos se deu ao longo das estradas vicinais, ou transversais, dentro um raio cinco quilômetros da estrada principal. A Área de estudo situa-se a 60 quilômetros de Pacajá, no travessão 338 sul da BR 230. Essa região teve desde o início dos anos 1970 dinâmicas de desmatamento importante ligadas, em particular, a chegada de colonos que se dedicaram principalmente a atividades agrícolas. Essas dinâmicas se aceleraram nos anos 1990 e no início dos anos 2000.

A fim de quantificar e seguir a evolução das dinâmicas agrícolas na área de estudo, foram utilizadas imagens TM do Landsat de 1990 a 2007. Após haver documentado as dinâmicas das paisagens, houve interesse em 50 estabelecimentos agrícolas que foram visitados durante trabalhos de campo em 2006 e 2008. Para descrever a dinâmica desta frente de desmatamento, se procurou caracterizar os diferentes fatores de evolução de cada parcela. A fim fazê-lo, utilizou-se diferentes métodos estatísticos multivariados como PCA inter-classes ou STATIS. Este trabalho permitiu constituir grupos de estabelecimentos agrícolas que tem os mesmos tipos de evolução temporal da ocupação dos solos. Esses grupos foram confrontados com as principais características sócio-econômicas dos agricultores a fim de identificar fatores associados as dinâmicas de ocupação dos solos. Após haver identificado esses diferentes fatores, foi analisado o impacto das dinâmicas das paisagens sobre a riqueza de espécies biológicas, que podem ser consideradas como uma medida da biodiversidade, numa amostra de nove estabelecimentos. Esses fatores participaram também da avaliação de serviços ecossistêmicos (SE). Esse trabalho foi realizado graças ao apoio da Agência nacional da pesquisa, programa Agricultura e desenvolvimento sustentável (projeto chamado Serviços ecossistêmicos nas paisagens agrosilvopastorais amazônicos: determinantes sócio-econômicos e simulação de cenários e programa de Biodiversidade (projeto chamado Serviços ecossistêmicos nas paisagens agrosilvopastorais amazônicos: determinantes sócio econômicos e produção de bens e serviços ecossistêmicos). Esses projetos, coordenados por Patrick Lavelle, reuniram equipes francesas e brasileiras.

Palavras-chave : Amazônia, frente pioneira, sensoriamento remoto, biodiversidade, fatores sócio econômicos, serviços Ecossistêmicos.

1. Introduction

L'Amazonie brésilienne est l'une des zones forestières mondiales où les activités de déforestation sont parmi les plus intenses. En effet, depuis la mise en place du Programme d'Intégration Nationale au début des années 1970, l'Amazonie brésilienne connaît des taux de déboisement annuels intenses (Léna, 1999 ; Fearnside, 2005). Les tentatives d'organismes gouvernementaux chargés de la protection des forêts et non gouvernementaux tentant de freiner les activités de déforestation en Amazonie n'ont pour l'instant réussi, au mieux, qu'à réduire les taux de déforestation – sans que l'on puisse affirmer si cette réduction est structurelle ou conjoncturelle. Pourtant, les enjeux environnementaux sont de taille : protection de la biodiversité, érosion des sols, perturbation du cycle de

l'eau... Ces enjeux prennent une dimension nouvelle dans les débats actuels avec l'émergence du concept de Service Ecosystémique (SE). Cependant, ces dynamiques varient fortement, selon l'importance des interventions fédérales, l'étendue des infrastructures et les modalités de l'occupation agricole (Léna, 1999 ; Laurance et al., 2001).

Le Pará est aujourd'hui, dans le bassin amazonien, l'État brésilien dont le taux de déboisement est le plus élevé. Le front de déforestation se développe particulièrement le long de la route dite « Transamazonienne » (route fédérale BR 230) à partir de pistes secondaires perpendiculaires, phénomène identifié depuis plus de vingt ans sous le terme de « front de déforestation en arête de poisson ». Le site étudié, le travessão 338 Sud, se situe sur l'une de ces

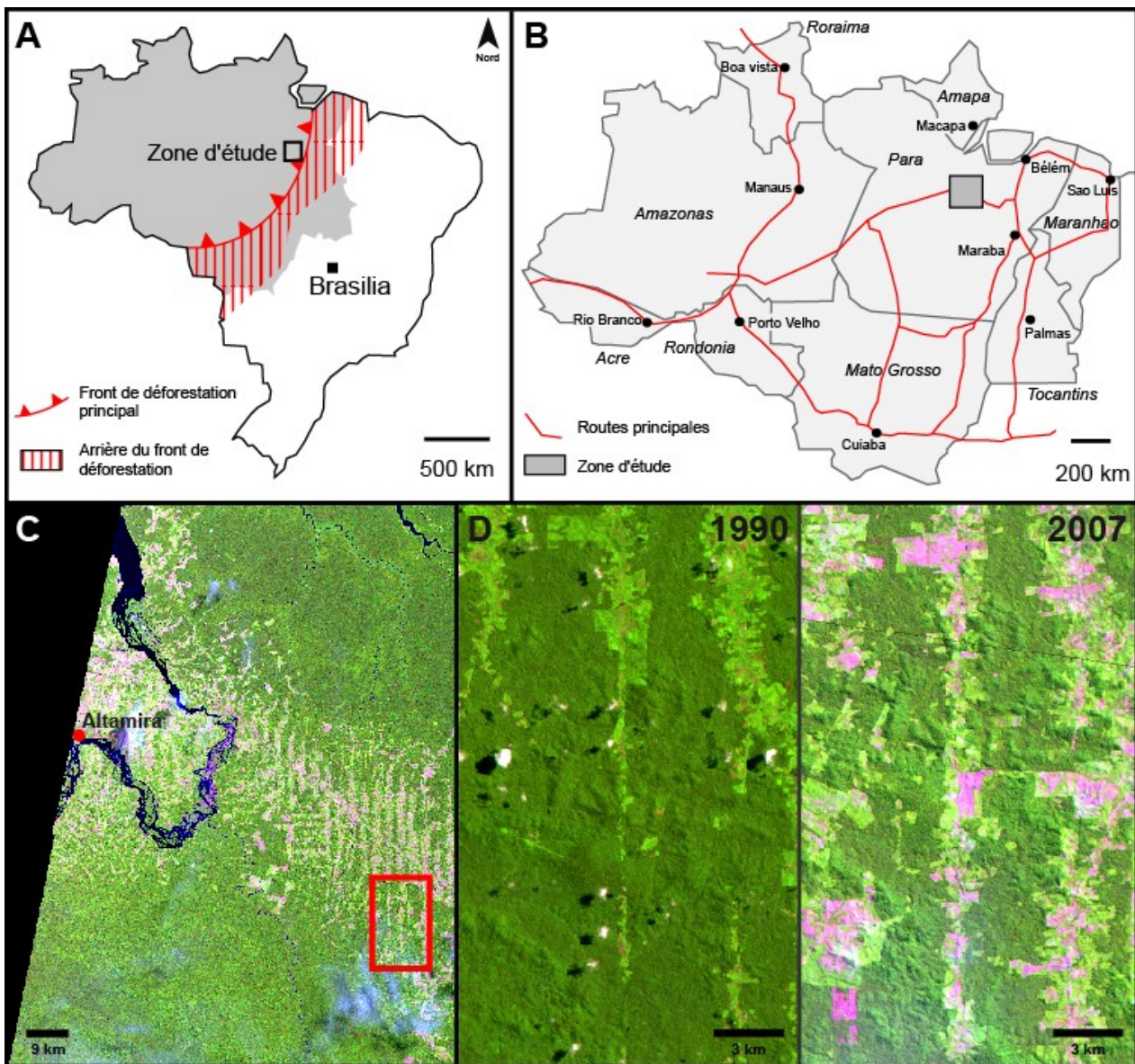


Figure 1 : **A.** Carte du Brésil – en gris apparaissent les régions amazoniennes. **B.** Carte de l'Amazonie brésilienne légale avec ses différents États – en gris plus sombre apparaît la région de Pacajá. **C.** Carte de la région Pacajá (image Landsat TM fausse couleur de 2007, rouge/PIR/MIR) et localisation de la région de Pacajá. **D.** Image Landsat TM de 1990 et de 2007 de la zone d'étude (rouge/PIR/MIR).

pistes en arête de poisson, au sein du *município* de Pacajá, à 60 km environ du centre urbain. Il s'agit d'une zone de colonisation spontanée (Figure 1) et qui n'était pas, au moment de l'enquête, reconnue par l'Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire (INCRA).

La région de colonisation située le long de la BR 230, sur trois cents kilomètres de part et d'autre de la ville d'Altamira, est le plus souvent qualifiée de région Transamazonienne. Elle connaît depuis les années 1970 des dynamiques de déforestation très importantes suite à l'arrivée de nombreux colons qui se destinent à l'agriculture (pour une synthèse, voir Arnauld de Sartre, 2006). En effet, les premières incursions agricoles ont débuté au début des années 1970 à partir de la BR 230. Ces dynamiques se sont ensuite fortement accélérées entre les décennies 1990 et 2000. Les conversions agricoles dans cette zone sont essentiellement destinées à l'élevage bovin. En effet,

les pâturages représentent l'utilisation dominante du sol dans ces zones récemment déboisées, ce qui explique en partie l'ampleur des surfaces forestières détruites dans des espaces aussi éloignés des principaux marchés. Une telle attitude favorise une utilisation extrêmement destructrice des ressources naturelles pour l'obtention d'un produit social assez modeste (Fearnside, 1991 ; Rodrigues et al., 2009). Comme cela a déjà été montré à de multiples reprises (Albaladejo et al., 1996 ; Coy, 1996), ces modes d'appropriation agricole fondés sur le brûlis à rotation rapide sont très consommateurs d'espace et favorisent les logiques « d'échappement territorial » (Thiele, 1991). Ces pratiques favorisent en particulier l'intensité spatio-temporelle des dynamiques de déforestation dans la zone de Pacajá. De ce fait, à partir du suivi des dynamiques paysagères par télédétection entre 1990 et 2007, nous allons chercher à comprendre les facteurs socio-économiques qui influencent les dynamiques de l'occupation des sols. Ces dynamiques paysagères très

intenses ont des conséquences environnementales diverses, notamment sur la biodiversité ou sur la qualité des sols. Afin de suivre l'impact des dynamiques paysagères sur la biodiversité, plusieurs taxons ont été choisis à partir de leur réactivité vis-à-vis des modifications environnementales et de leur importance fonctionnelle dans les écosystèmes. En ce qui concerne l'impact sur les sols, plusieurs paramètres structurels, des dynamiques récentes et de mesures de flux ont été relevés lors des campagnes de terrain, et synthétisés sous forme de services écosystémiques.

Les projets de recherche financés par l'Agence Nationale de la Recherche (Programme Agriculture et développement durable et programme Biodiversité) ont permis, par la mobilisation d'équipes françaises, brésiliennes et colombiennes, de collecter un vaste ensemble de données autour des mêmes espaces en deux phases. La première phase visait à réaliser les états de couverture végétale et de leurs évolutions (associées à de la télédétection) et des enquêtes socio-économiques sur 50 exploitations agricoles contiguës situées entre les kilomètres 12 et 36 du *travessão* 338 Sud. Dans une seconde phase, 9 fermes (choisies comme étant les plus représentatives des 50 fermes de la première phase) et 45 points d'analyses au sein de ces fermes ont fait l'objet de relevés de végétation, de l'occupation des sols, de mesures taxonomiques, de mesures des sols, des activités agricoles détaillées des familles installées... Ces jeux de données visent à mettre en place une analyse transdisciplinaire des impacts des dynamiques de l'occupation des sols sur des fronts de déforestation amazoniens.

À partir de ce jeu de données, nous allons chercher à répondre à trois problématiques concernant la relation entre les dynamiques paysagères entre 1990 et 2007 et les facteurs induisant ces processus (notamment socio-économiques) et leurs conséquences environnementales (biodiversité et SE) :

- Identification et caractérisation de la ou des dynamique(s) des éléments paysagers à l'échelle de la ferme et du point entre 1990 et 2007 (i.e. le ou les mode(s) d'appropriation spatio-temporelle des sols).
- Identification des facteurs socio-économiques qui influencent les dynamiques de l'occupation des sols.
- Impacts des différentes dynamiques paysagères sur la biodiversité (faune du sol) et/ou sur les SE.

2. Matériel et méthodes

L'analyse des dynamiques paysagères par télédétection

Les campagnes de terrain ont été réalisées en 2008. Elles visaient à fournir les données permettant la différenciation des composantes du paysage. De ce fait, elles s'inscrivent dans la perspective d'analyses d'images à plusieurs dates. Les objectifs prioritaires sont donc de réunir des données permettant l'identification spectrale des différents types de parcelles observées *in situ*. Les relevés GPS ont été effectués ponctuellement et le long de transect, visant essentiellement à localiser les successions des composantes paysagères (Oszwald et al., 2007). Au total, près de 275 points GPS ont été recueillis durant les campagnes de terrain. Les relevés ont ensuite été confrontés dans une matrice de confusion afin de distinguer les postes de nomenclature qui sont sans ambiguïtés de ceux qui présentent quelques équivoques. Cette matrice détermine donc le degré de probabilité d'identification des éléments paysagers (Oszwald et al., 2010). La typologie finale des éléments paysagers compte huit classes. Cette typologie correspond à des catégories assez générales visant à faciliter la mise en place de l'analyse rétrospective (Figure 2).

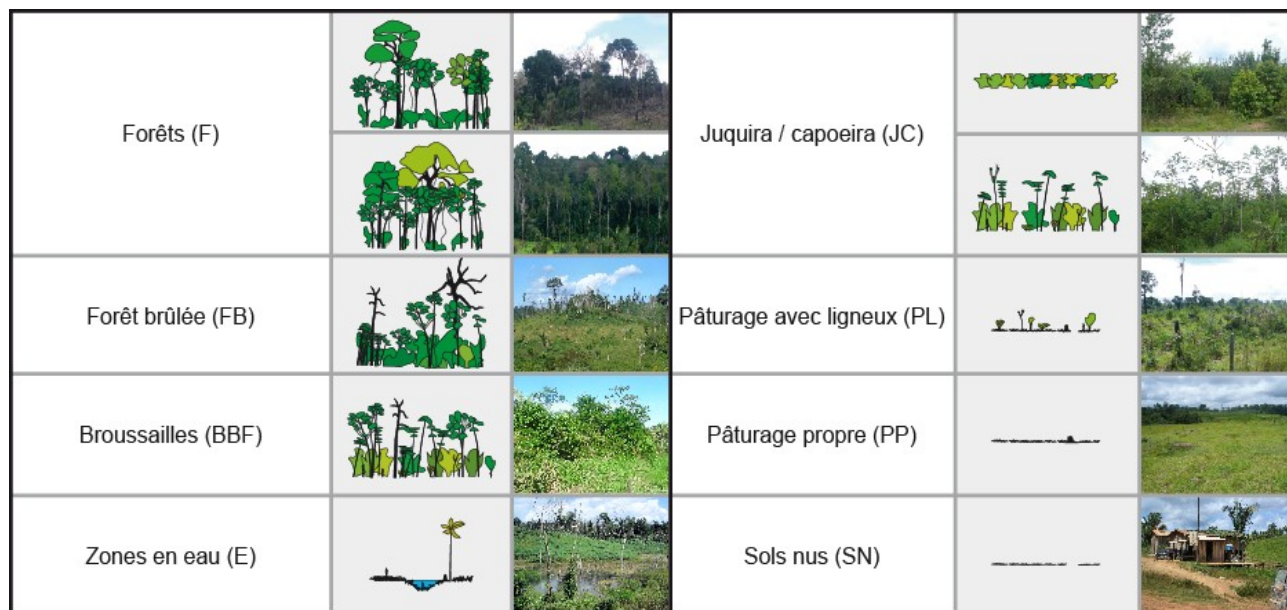


Figure 2 : Typologie des éléments paysagers caractérisée à partir de l'analyse des images satellites entre 1990 et 2007.

Afin de cartographier la zone d'étude de Pacajá, nous avons choisi de travailler avec des données satellitaires provenant de la plateforme Landsat-5 équipée du

capteur Thematic Mapper (TM). Le choix de ces images a été piloté par l'archive disponible remontant potentiellement jusqu'aux années 1990. De plus, la

résolution du pixel de 30 m sur 30 m permet de caractériser des surfaces de 900 m², ce qui est tout à fait adapté à notre site d'étude. La gamme spectrale des capteurs TM (bleu [0,45 µm – 0,52µm], vert [0,52µm – 0,60µm], rouge [0,63µm – 0,69µm], proche infrarouge [0,77µm – 0,90µm], moyen infrarouge [1,55µm – 1,75µm] et infrarouge lointain [2,09µm – 2,35µm]) sur les plateformes Landsat permet une bonne identification des éléments du paysage (Oszwald et al., 2007). Au sein de l'archive, nous avons privilégié des acquisitions durant la saison sèche afin d'obtenir le maximum de contraste entre les éléments du paysage (forêt, culture, jachère). De plus, cette période correspond au maximum de disponibilité de données acquises du fait de la faible nébulosité durant cette saison. Ainsi, les biais entraînés par les facteurs atmosphériques sont moindres, même s'il est indispensable d'avoir recours à un modèle de correction atmosphérique (Fortser, 1984 ; Markham et Chander, 2003). Dans notre cas nous avons effectué les corrections radiométriques et atmosphériques avec le modèle 5 S (Kergomard, 2000). Les acquisitions d'archives ont ainsi permis de disposer d'information pour l'ensemble des sites échantillonnés entre 1990 et 2007 : 05 juillet 1990, 10 juillet 1994, 02 août 1998, 05 juillet 2002 et 09 août 2007.

A partir de ces images satellites, les points d'entraînement ont été recalés et superposés. Une correction géométrique a donc été réalisée grâce à des points GPS remarquables identifiés au sol lors de la mission sur le terrain (ponts, croisements de chemin...). Toutes les images d'archives ont ainsi été recalées par rapport à l'image de 2007. A partir du jeu de données collecté sur le terrain, des zones d'entraînement ont été identifiées afin de classer les pixels pour les images Landsat TM de 2007.

Dans un premier temps, des classifications orientées-objets (en utilisant le logiciel E-Cognition) ont été réalisées sur les images satellites afin d'identifier des objets texturalement homogènes. Une fois des objets de textures homogènes identifiés, nous avons réalisé des classifications supervisées par maximum de vraisemblance (en utilisant le logiciel ENVI 4.7). Ces classifications ont été choisies pour leurs qualités de robustesse dans l'identification de classes spectralement assez proches. Ainsi, les classifications texturales ont pu être affinées afin de faire ressortir des classes paysagères plus difficiles à identifier, comme les différences entre des pâturages propres et des pâturages avec ligneux. Malgré cela, quelques classes identifiées au sol n'ont pu être correctement classifiées par l'algorithme (indice de kappa inférieur à 0,75) et ont donc été regroupées avec d'autres classes. Afin de reconstituer l'historique des paysages du site, nous avons également identifié la signature spectrale (en réflectance absolue) de chaque élément du paysage sur l'image satellite de 2007. Nous avons pu ainsi identifier, par correspondance spectrale, sur les images anciennes les éléments recherchés. Par comparaison il a alors été possible de reconstituer des classifications pour les périodes antérieures. Toutefois, les capteurs n'étant pas les mêmes ou ayant vieilli, certaines classes trop proches spectralement les unes des autres ont perdu de leur séparabilité (cas de jachères jeunes et des jachères de plus de trois ans). Ces erreurs n'étant pas préjudiciables à la suite de l'analyse elles nous sont parues acceptables (moins de 10% d'erreur).

A partir de ce travail, une base de données thématique et cartographique renseignant les éléments paysagers à plusieurs dates a été réalisée (Figure 3).

Ensuite, à partir de cette base de données, les dynamiques des éléments paysagers sur les 50 fermes échantillonnées ont été relevées. Des analyses factorielles ont été réalisées afin d'identifier des groupes de fermes ayant connu des dynamiques d'occupation des sols similaires entre 1990 et 2007 à l'aide du programme R (R-Development-Core-Team, 2009). Pour cela, des tableaux de mesure à trois indices ont été constitués. Le premier indice de notre tableau est constitué de x fermes, k variables d'occupation des sols structurent chacune de ces fermes (la typologie paysagère) sur t dates d'analyse (de 1990 à 2007). Cette méthode permet d'effectuer des AFC ou des ACP simultanées et coordonnées de plusieurs tableaux de mesures de la dynamique paysagère répétée dans le temps (Lavit, 1988 ; Lavit et al., 1994 ; Oszwald et al., 2011). Dans ce cas, le recours à la méthode ACT-STATIS permet de trouver une structure spatiale stationnelle commune à tous les tableaux (dates de relevés de l'occupation des sols) et d'en étudier la stabilité temporelle.

Ces méthodes appliquées à l'occupation des sols de chaque ferme entre 1990 et 2007 ne répondent qu'à une partie du problème posé. En effet, deux fermes peuvent avoir la même composition paysagère sans que la distribution de l'occupation des sols au sein des deux fermes ne soit la même. Il est donc indispensable de s'intéresser également à la structure du paysage au travers de plusieurs métriques paysagères (Riitters et al., 1995 ; Hargis et al., 1998 ; Lausch et Herzog, 2002), constituant trois groupes. Le premier groupe comprend des métriques de taille et de proportion, ce qui permet de suivre la fragmentation spatiale des « patchs » (unité spatiale homogène). Le deuxième groupe comprend les métriques de diversité qui permettent de quantifier la richesse paysagère d'une ferme, en termes de « patch », ou la dominance d'un « patch » particulier au sein d'une ferme. Enfin, le troisième groupe comprend les métriques de forme liées aux fractales. Ces métriques permettent de quantifier la complexité des « patchs » et des lisières de « patchs » constituant une ferme.

Neuf types de métriques paysagères ont ainsi été retenus :

- Métriques de taille et de proportion : Aire totale (ha, notée TA pour « Total Area ») ; densité de lisière, (m.ha⁻¹, ED pour « Edge Density ») ; densité moyenne des éléments paysagers, en m.ha⁻¹, MPD pour « Mean Patch Density »).
- Métriques de richesse : richesse paysagère en « patch » (notée PR pour Patch Richness) ; indice de diversité de Shannon (SD pour Shannon's Diversity) ; indice de régularité (SE Shannon's Evenness) ; indice de dominance (D pour Dominance index).
- Métriques de forme (ratio périmètre/aire (MPar) ; indice d'irrégularité (MSI pour Mean Shape Index). Ces métriques ont été calculées spécifiquement pour les forêts (MparF et MSIF), les jachères (MparJ et MSIJ) et les surfaces agricoles (MparA et MSIA).

Ces métriques calculées permettent de constituer des tableaux mesurant les structures du paysage au sein de chaque ferme.

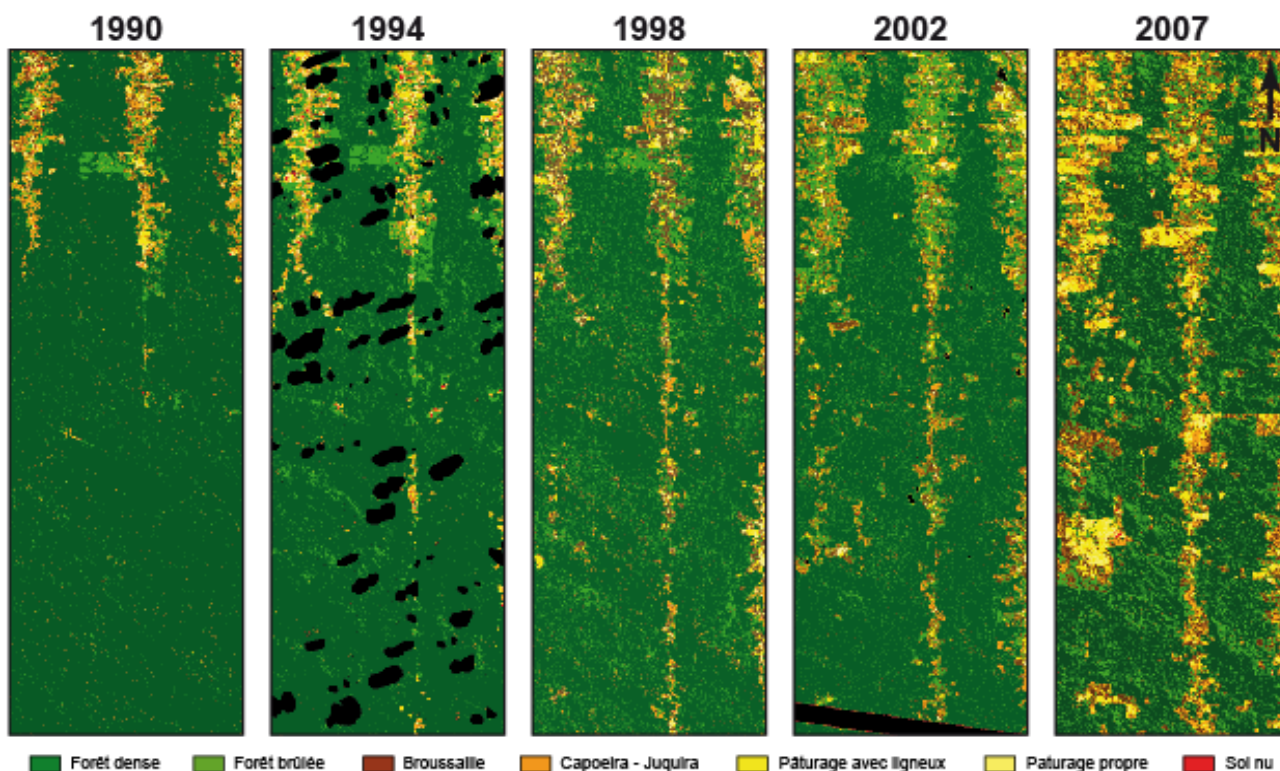


Figure 3 : Évolution de l'occupation des sols autour du *travessão* 338 Sud (commune de Pacajá) entre 1990 et 2007.

Les jeux de données connexes

Les relevés socio-économiques ont été effectués sur l'ensemble des 50 fermes du *travessão* 338 Sud. Ces enquêtes, appliquées auprès de ceux qui, lors de l'enquête, se sont présentés comme les chefs de famille (le plus souvent, l'homme) visent à renseigner tant les caractéristiques de l'exploitation agricole que celles de l'agriculteur(rice) et de sa famille. Outre les caractéristiques des exploitations agricoles (taille, date de mise en culture, usage du sol, grandes productions, capital investi), plusieurs variables sociographiques ont été renseignées, de celles le plus souvent reprises par la littérature sur l'agriculture familiale de front pionnier (structure et composition de la famille en particulier : pour une synthèse voir (Caldas et al., 2007)) à d'autres plus novatrices (histoire professionnelle et migratoire de la personne interviewée, réseaux sociaux personnels...). Ces variables sont de trois ordres. Le premier type de données est relatif au fonctionnement économique des exploitations agricoles : taille de l'exploitation, types de production exprimés en valeur absolue (richesse créée) et valeur relative (importance d'une production dans l'exploitation agricole), main-d'œuvre disponible et capital externe à la famille investi dans l'exploitation (principalement des crédits). Le second type de données renvoie à des variables sociographiques couramment utilisées pour décrire l'agriculture de front pionnier (voir pour une synthèse (Caldas et al., 2007)). Ce jeu de données est complété par l'histoire migratoire et professionnelle des personnes, là encore considérée comme essentielle en front pionnier amazonien (Carr, 2005 ; Arnauld de Sartre, 2006). Sont donc retenus la composition de la famille, l'histoire du chef d'exploitation (en termes migratoires et professionnels), l'histoire familiale, le niveau d'étude et l'importance d'un éventuel réseau familial au sein de la localité. En outre, nous avons

ajouté à ces variables une variable de localisation de l'exploitation agricole.

Chaque type de données a été regroupé au sein d'un tableau différent (Tableau 1). Les données de faune du sol et de qualité des sols ont été collectées selon un échantillonnage commun, permettant ainsi la recherche de modèle de co-variation à différents niveaux d'analyses. Les échantillonnages ont eu lieu entre 2008 et 2009. Pour chacune des fermes échantillonnées, un transect passant par la diagonale la plus importante de l'exploitation et/ou la diagonale la plus orientée Nord/Sud (dans le cas d'une ferme rectangulaire par exemple) a été défini. De plus, cinq points d'échantillonnages ont été régulièrement positionnés sur cette diagonale (Figure 4).

Sur chaque point d'échantillonnage, un carré de 50 à 60 mètres de côté a été défini au sein d'un élément paysager homogène pour les prises d'échantillon de la végétation et des différents taxons. La position respective des prises d'échantillon a été définie de façon à ce que les protocoles puissent être réalisés sans interférer mutuellement.

L'échantillonnage de la faune du sol a été réalisé selon la méthode *Tropical Soil Biology and Fertility* (Anderson et Ingram, 1993). La litière est prélevée sur une surface de 25x25 cm (monolithe). Sur cette surface, un bloc de 20 cm de profondeur est extrait par couches de 10 cm. La terre a ensuite été triée et la faune fixée immédiatement dans une solution de formaldéhyde (formol) à 4 %. Dans deux monolithes additionnels situés de part et d'autre du monolithe central (5 mètres à l'est et à l'ouest), on a échantillonné uniquement la litière et la couche 0-10 cm. La faune a ensuite été identifiée aux niveaux taxonomiques suivants : Formicidae, Isoptères, Isopodes, Dermaptères, Hemiptères, Homoptères, Coleoptères (adultes and

larves), Orthoptères, Lepidoptères (larves), Diptères (larves), Araignées, Opilions, Chilopodes, Diplopodes, Gastéropodes, Oligochètes. Au sein des Oligochètes,

l'espèce invasive *P. corethrurus*, originaire du plateau guyanais, a été séparée des espèces natives dans les analyses.

| Tableau | Variables | Description et unité |
|----------------------------|---|---|
| Agro-économique | HA | Taille de l'exploitation (en Ha) |
| | UTE | Unité de travail familiale (exprimé en équivalent temps plein) ⁽¹⁾ |
| | N_sal_prop | Nombre de jours de travail d'un salarié agricole dans l'exploitation |
| | Crb | Crédit remboursable |
| | Cnrb | Aide directe non remboursable |
| | Pbt | Produit brut agricole total |
| | RNA | Part des revenus non agricoles par rapport aux revenus agricoles |
| | PBV | Part du produit brut bovin viande sur le produit brut total |
| | PBL | Part du produit brut bovin lait sur le produit brut total |
| | PBOC | Part du produit brut autre élevage sur le produit brut total |
| | PBAN | Part du produit brut de cultures annuelles sur le produit brut total |
| | PBPER | Part du produit brut de cultures pérennes sur le produit brut total |
| | PBABERT | Produit brut par hectare cultivé |
| | PBUTE | Produit brut par travailleur familial |
| UGG | Unité de grand bétail ⁽²⁾ | |
| Sociographique quantitatif | ENF1 | Âge à la naissance du premier enfant ⁽³⁾ |
| | ENF 30 | Nombre d'enfants à 30 ans ⁽³⁾ |
| | Fecado | Fécondité adolescente ⁽³⁾ |
| | Nbunion | Nombre d'unions vécu au cours de la vie de l'informant |
| | Union 22 | Nombre d'unions à 22 ans ⁽³⁾ |
| | IDA | Âge |
| | NFI | Nombre d'enfants |
| | EST | Nombre d'années d'études |
| | Nmigterre | Nombre de migrations à la recherche d'une terre |
| | NF Prop | Nombre de familles (outre celle de l'informant) vivant dans la propriété |
| | NbPerFam | Nombre total de personnes vivant sur l'exploitation |
| | E_0-11 | Nombre d'enfants de 0 à 11 ans vivant sur l'exploitation |
| | F_12-18 | Nombre de filles de 12 à 18 ans vivant sur l'exploitation |
| | G_12-18 | Nombre de garçons de 12 à 18 ans vivant sur l'exploitation |
| | Ho_19-49 | Nombre d'hommes de 19 à 49 ans vivant sur l'exploitation |
| | Fe_19-49 | Nombre de femmes de 19 à 49 ans vivant sur l'exploitation |
| | V_+49 | Nombre de personnes de plus de 49 ans vivant sur l'exploitation |
| | Distville | Distance à la ville |
| | Distpiste | Distance à la route Transamazonienne |
| | NPF | Nombre de professions |
| | NMI | Nombre de migrations |
| | PCC | Pourcentage de temps passé en ville |
| | PCR | Pourcentage de temps passé dans la région |
| PCA | Pourcentage de temps passé dans l'agriculture | |
| PCP | Pourcentage de temps passé comme propriétaire | |
| NFL | Nombre de familiaux dans la localité ⁽⁴⁾ | |

⁽¹⁾ Un coefficient a été appliqué selon l'âge et le sexe de la personne. Un homme de 19 à 59 ans a été compté pour 1 UTE, et 0,8 UTE de 14 à 18 ans et plus de 60 ans. Pour les femmes, ce taux est de 0,8 de 19 à 59 ans, et 0,6 de 14 à 18 ans et 60 ans et plus (Chayanov, 1966).

⁽²⁾ Équivalent de 400 kilos.

⁽³⁾ L'expression par les âges permet de comparer les calendriers de personnes d'âge aujourd'hui différent.

⁽⁴⁾ Ce réseau étant défini par des personnes apparentées à une génération : père / mère, frères / sœurs ou enfants vivant dans le même *travessão* mais dans une exploitation agricole autonome.

Tableau 1 : Codes et description des variables du tableau de services écosystémiques.

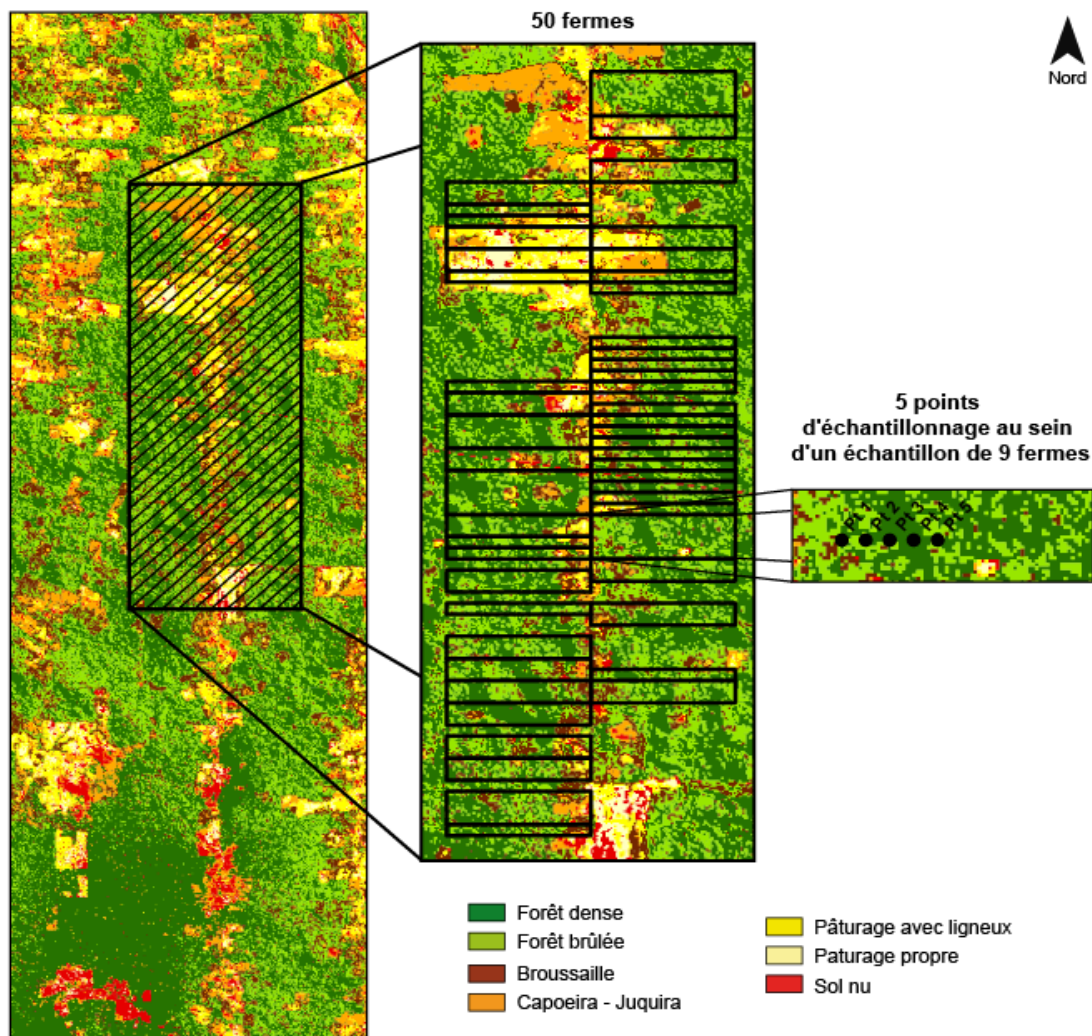


Figure 4 : Localisation des 50 fermes dans le *travessão 338 Sud* (commune de Pacajá, les fermes sont rectangulaires) et positionnement théorique des points d'échantillonnage au sein des neuf fermes tests (données issues du cadastre).

Une quarantaine de variables (physiques, chimiques et agrégation du sol, biomasse) ont été mesurées en tous points du dispositif d'échantillonnage, afin de caractériser l'un au moins des services. Les données acquises ont permis de calculer (tableau 2) : (1) le stock du carbone dans le sol et la biomasse végétale épigée (arbustive et arborée) ; (2) la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau dans le sol ; (3) la qualité du sol par l'intermédiaire de quatre sous-indicateurs (physique, chimique, morphologique et de la matière organique) et d'un indicateur global (GISQ) (Velasquez et al., 2007). Les différents indicateurs de SE peuvent être calculés au niveau de l'exploitation agricole, par exemple par calcul de valeurs moyennes des cinq points s'y rattachant. En raison du faible nombre (9) d'exploitations étudiées sur le site de Pacajá, ce niveau d'intégration n'est pas considéré ici. L'analyse des résultats se limitera au niveau du point, à savoir aux variations en fonction, d'une part des usages et types de sol reconnus sur le terrain au moment des mesures, et d'autre part de la dynamique de composition du paysage autour du point déterminée par l'analyse d'une série d'images satellites (analyse des dynamiques de l'occupation des sols entre 1990 et 2007).

Les liens entre ces variables connexes et les évolutions paysagères ont été testés statistiquement à partir de méthodes factorielles (Analyse en Composante Principale – ACP) et d'analyses *between* (Dolédec et Chessel, 1987). De plus, pour l'analyse des relations entre le paysage et la faune du sol, nous avons utilisé le test de Shapiro et Wilk (Royston, 1982) et le test de Kruskal-Wallis (Hollander et Wolfe, 1973). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le programme libre *R* et les bibliothèques *Vegan* et *Ade4* (Oksanen et al., 2008).

3. Résultats

Synthèse des dynamiques paysagères à l'échelle de la ferme : causes et conséquences

La mise en place de méthodes factorielles tridimensionnelles à partir des tableaux d'évolution de l'occupation des sols et des métriques paysagères à l'échelle des fermes a permis de simplifier un phénomène évolutif complexe en quelques classes synthétiques d'évolution des éléments paysagers entre 1990 et 2007 (Figure 5).

| Variabes | Description et unité |
|-------------|---|
| Csol.010 | Stock de carbone du sol de 0 à 10 cm (Mg.ha ⁻¹) |
| Csol.1030 | Stock de carbone du sol de 10 à 30 cm (Mg.ha ⁻¹) |
| Cbiom | Stock de carbone dans la biomasse végétale épigée (Mg.ha ⁻¹) ⁽¹⁾ |
| INFIL | Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (mm.h ⁻¹) |
| H2Omax.010 | Stock d'eau maximal du sol de 0 à 10 cm (cm) ⁽²⁾ |
| H2Omax.1050 | Stock d'eau maximal du sol de 10 à 50 cm (cm) |
| H2Odis.010 | Stock d'eau disponible du sol de 0 à 10 cm (cm) ⁽³⁾ |
| H2Odis.1050 | Stock d'eau disponible du sol de 10 à 50 cm (cm) |
| Indphys | Sous-indicateur physique de la qualité du sol (0,1 à 1) |
| Indchim | Sous-indicateur chimique de la qualité du sol (0,1 à 1) |
| Indmorp | Sous-indicateur morphologique de la qualité du sol (0,1 à 1) |
| Indorga | Sous-indicateur organique de la qualité du sol (0,1 à 1) |
| GISQ | Indicateur Global de Qualité du Sol (0,1 à 1) |

⁽¹⁾ Faute d'analyses de carbone sur les échantillons de végétaux, le facteur multiplicatif 0,5 a été retenu pour estimer la masse de carbone à partir de la biomasse sèche (Markewitz et al., 2004).

⁽²⁾ Réservoir d'eau (hauteur) défini par la différence entre le volume d'eau à saturation et le volume d'eau indisponible retenu à un potentiel matriciel de -16 bar (pF4,2).

⁽³⁾ Réservoir d'eau (hauteur) défini par le volume d'eau drainé entre -0,3 bar (pF2,5) et -16 bar (pF4,2).

Tableau 2 : Codes et description des variables du tableau de services écosystémiques.

La classe A représente une structure homogène et forestière, marquée par une très faible dynamique culturelle entre 1990 et 2007. Les quelques évolutions agricoles sont fortement polarisées par la proximité au réseau de pistes et au siège d'exploitation. La classe B correspond à des dynamiques similaires, mais sensiblement plus prononcées. La classe C présente une rupture par rapport aux deux classes précédentes. En effet, l'emprise agricole sur la ferme est plus précoce et les dynamiques agricoles sont beaucoup plus intenses à partir des années 2000. La classe D correspond à des fermes exploitées antérieurement aux années 1990 avec une forte emprise agricole le long du réseau de pistes. À partir de cette date, la structuration de la ferme devient très hétérogène avec une forte diversification des patchs agricoles et/ou liés à des dégradations forestières. Enfin, la classe E correspond à une dynamique agricole d'élevage extensif. En effet, entre 1990 et 2007, nous assistons à une valorisation pastorale de l'ensemble de la ferme.

Nous avons cherché à mettre en évidence le lien qui pouvait exister entre ces typologies des dynamiques d'occupation du sol et différentes variables socio-économiques servant à qualifier les agriculteurs vivant sur les exploitations agricoles. Les tableaux de données socio-économiques ont donc été mis en correspondance avec la typologie des évolutions paysagères sous forme d'analyse *between*. Les tests de Monte-carlo donnent des résultats significatifs pour les deux tableaux (significativité à 4,8 % pour le premier tableau et 4 % pour le second - Figures 6 et 7). La significativité du tableau agro-économique est cohérente : l'hypothèse selon laquelle en situation de front pionnier les paysages sont le fruit de l'activité agricole est intuitive. Ce sont les décalages entre ce que l'on pouvait attendre et les résultats qui sont à signaler. Le décalage principal concerne l'axe 1 (cf. Figure 6).

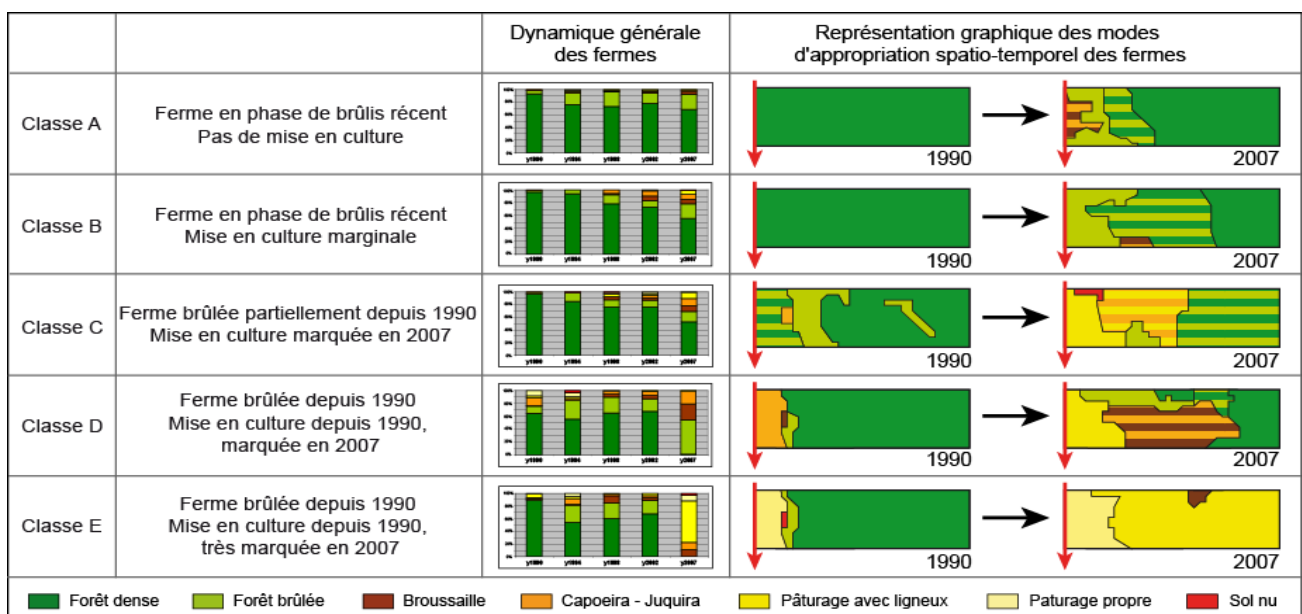


Figure 5 : Présentation des cinq classes de dynamique des structures et d'occupation des sols observées à l'échelle des fermes dans le *travessão* 338 Sud de la commune de Pacajá entre 1990 et 2007. Synthèse des dynamiques générales de l'occupation des sols par classes sous forme graphique. Représentation simplifiée des cinq classes de fermes en 1990 et en 2007.

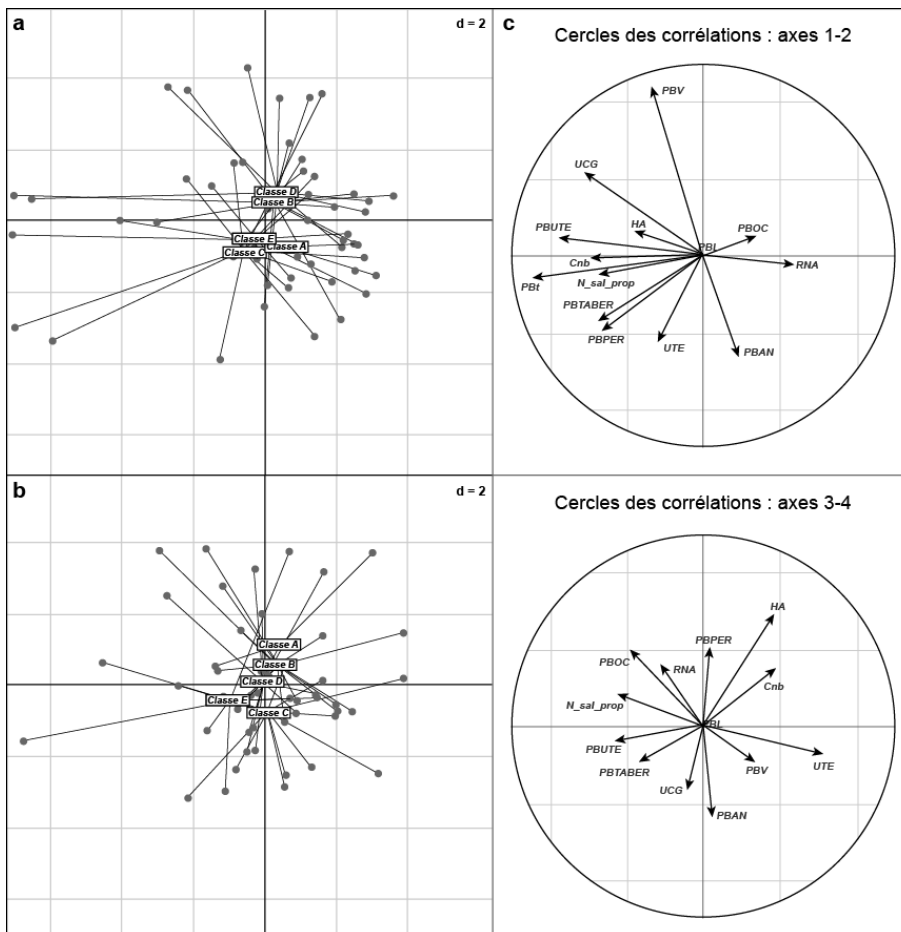


Figure 6 : Plan 1-2 de l'ACP normée du tableau de données agro-économiques au niveau de la ferme : position des points rattachés aux typologies des dynamiques de l'occupation des sols. (a) Axes factoriels 1 et 2. (b) Axes factoriels 3 et 4). (c) Cercle des corrélations.

Cet axe est le plus discriminant des variables agro-économiques, opposant les exploitants à temps plein de ceux qui reçoivent une partie de leurs revenus d'activités non réalisées sur l'exploitation agricole. Or, de ce point de vue, les cinq types d'évolution de l'usage du sol ne dépendent pas d'une telle variable : que la personne travaille à plein temps sur son exploitation ou non, cela n'impacte pas la mise en valeur de l'exploitation agricole. Ces types sont par contre discriminés sur les axes 2, 3 et 4, qui sont pourtant moins explicatifs de la diversité des exploitations agricoles. En effet, l'axe 2 oppose les producteurs de cultures annuelles aux éleveurs, laquelle opposition se retrouve entre les types B et D (éleveurs) et les types A, C et E. Pourtant, ces types ne se trouvent pas corrélés aux types d'usage du sol observés : le type A étant par exemple marqué par quelques pâturages et ne se trouve pourtant pas corrélé aux exploitations agricoles tirant leurs revenus principalement de l'élevage. L'explication vient de l'axe 4. Cet axe oppose les producteurs de cacao aux producteurs de cultures annuelles. À ce niveau, on distingue nettement les exploitations de type A et B des exploitations de type C. Cela s'explique par le fait que les exploitations créées récemment (A et B) l'ont été sur des sols de très bonne qualité qui permettent une culture du cacao, à une période où celle-ci faisait l'objet d'un soutien des politiques publiques. Enfin, une faible corrélation est observée entre la pression agricole aujourd'hui observée et l'évolution de l'usage du sol, comme si celle-ci suivait une dynamique qui, pour une grande partie, est indépendante des formes d'exploitation actuelle du milieu. Cela a déjà été remarqué par

ailleurs et s'explique par le fait que la colonisation de terres pionnières se fait aussi, et parfois surtout, dans le but de réaliser une rente foncière pour laquelle le bénéfice tiré de l'élevage est primordial (Albaladejo et al., 1996 ; Coy, 1996 ; Léna, 1999 ; Fearnside, 2005).

Pour ce qui concerne le tableau sociographique quantitatif, les résultats montrent que les deux types principalement discriminés sont le type B (rapproché, sur l'axe 2, du type A) et le type D (rapproché, sur l'axe 1, des types A, C et E et, sur l'axe 2 et de manière limitée, du type E – Figure 7).

Les types A et B renvoient à des dynamiques de colonisation récente, alors que les types D et E à des dynamiques anciennes. Ces facteurs renvoient à une correspondance avec la distance à la route Transamazonienne, les exploitations occupées le plus tardivement étant aussi celles qui sont le plus éloignées de la route Transamazonienne. D'ailleurs, un test de χ^2 entre la typologie en cinq types et l'âge de la colonisation (regroupée en trois périodes) donne des résultats très significatifs. Comme pour les données agro-économiques, nous constatons une tendance lourde d'évolution des localités pionnières, de manière assez indépendante d'autres facteurs.

Cependant, ces dynamiques historiques sont aussi liées à d'autres variables. En effet, le type B, qui correspond aux agriculteurs ayant mis récemment en culture leur exploitation et qui sont le plus éloignés de la route Transamazonienne, est corrélé à des profils de producteurs particuliers. Les variables biographiques telles que le temps passé en ville et dans l'agriculture

renvoient le plus souvent au type B : ces agriculteurs ont connu plus que les autres le statut de salariés agricoles résidant en ville. De même, ils ont réalisé un nombre de migrations, en particulier à la recherche d'une terre, plus élevé que les autres agriculteurs du *travessão*, en même temps qu'ils ont changé plus souvent de profession. Ces deux dernières variables sont d'ailleurs aussi partagées par les agriculteurs du type A, qui renvoient aussi à une mise en culture récente des exploitations. En outre, ils sont caractérisés par des indicateurs relevant de modèles familiaux moins stables, visibles en particulier par le

nombre d'unions (de séparation) et d'union à l'âge de 22 ans plus nombreux que les autres agriculteurs. Typiquement, le fait de vivre dans une zone de colonisation récente renvoie à des histoires assez mouvementées, c'est-à-dire marquées par un nombre d'événements mesurables plus élevé que dans les autres types. Cette tendance est confirmée par le fait que les agriculteurs de type D sont aussi ceux qui renvoient aux modèles familiaux les plus stabilisés : la composition du groupe familial résidant sur place ainsi que le réseau familial local sont plus importants chez les agriculteurs de ce groupe.

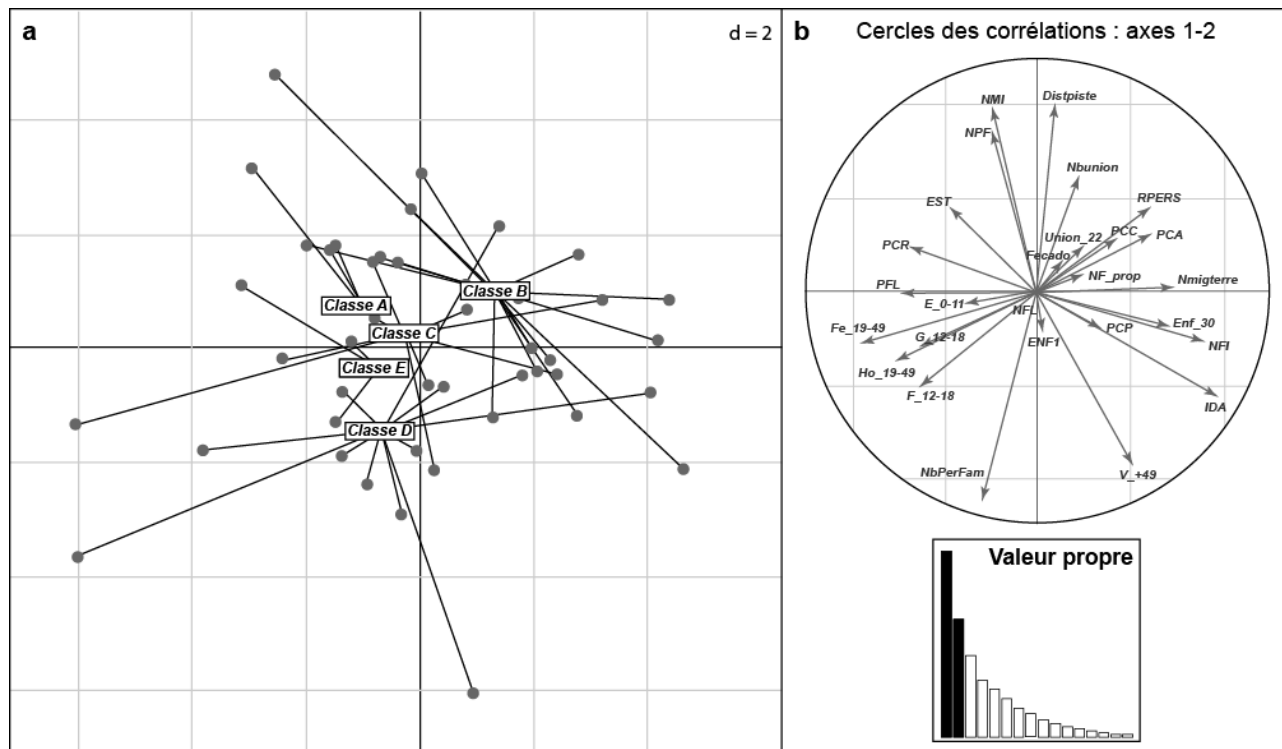


Figure 7 : Plan 1-2 de l'ACP normée du tableau de données agro-économiques au niveau de la ferme. **(a)** Position des points rattachés aux typologies des dynamiques de l'occupation des sols. **(b)** Cercle des corrélations.

Au final, ces analyses confirment des travaux montrant que durant les premières années d'occupation d'une zone pionnière, on observe un remplacement des agriculteurs, ceux qui viennent les premiers ayant une vie plus marquée par la précarité (professionnelle et familiale) que ceux qui s'installent une fois que les conditions minimales de survie (en termes d'infrastructure et de conditions d'exploitation) sont réunies (Velho, 1972 ; Arnauld de Sartre, 2006).

Synthèse des dynamiques paysagères à l'échelle du point : conséquences sur la dynamique des sols

La mise en place de buffers de 50 mètres de rayon autour des points d'échantillonnage a permis de produire des tableaux d'évolution de l'occupation des sols à l'échelle du point afin d'identifier cinq classes synthétiques d'évolution des éléments paysagers entre 1990 et 2007 (Figure 8).

La classe 1 correspond à des buffers dont les éléments paysagers n'ont pas évolué entre 1990 et 2007. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas d'incursions anthropiques,

mais que les prélèvements réalisés par les agriculteurs sont insuffisants pour perturber le signal relevé par satellite. La classe 2 présente des buffers forestiers qui connaissent au cours des années 1990 et 2000 une évolution rapide d'un système forestier préservé vers un système forestier brûlé. La classe 3 subit une dégradation plus précoce que la classe 2, ce qui implique une évolution plus poussée dans les années 2000. En effet, nous constatons que ces buffers enregistrent les premiers signes d'une activité agricole à partir de 2002. Les buffers constituant la classe 4 présentent une dynamique plus précoce, induisant une mosaïque paysagère finale plus agricole. En effet, à partir de 1997, les premiers pâturages destinés à l'élevage bovin se développent largement. A partir des années 2000, ce système agricole est stabilisé. La classe 5 correspond à des buffers dont les dynamiques agricoles sont antérieures aux années 1990. Cependant, les pâturages anciennement exploités ont évolué en friches et broussailles à différents stades de maturité.

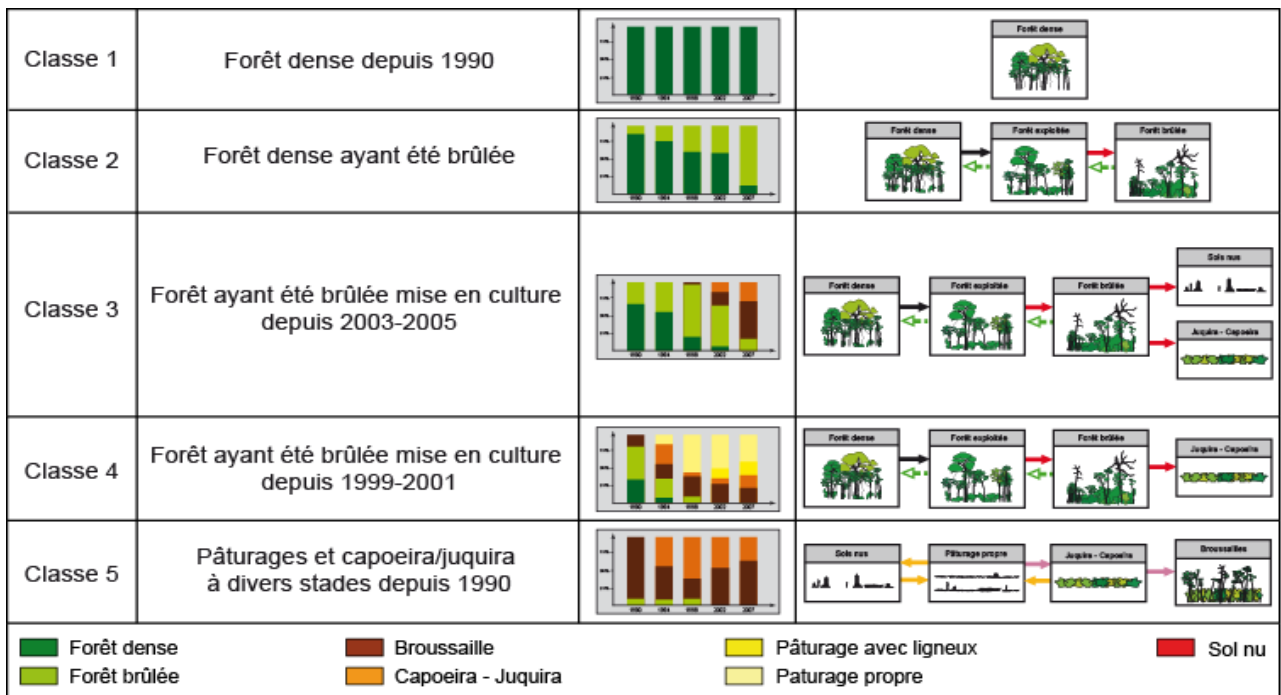


Figure 8 : Présentation des cinq classes de dynamique d'occupation des sols observées à l'échelle des points dans l'assentamento de Pacajá entre 1990 et 2007. Synthèse des dynamiques générales de l'occupation des sols par classes.

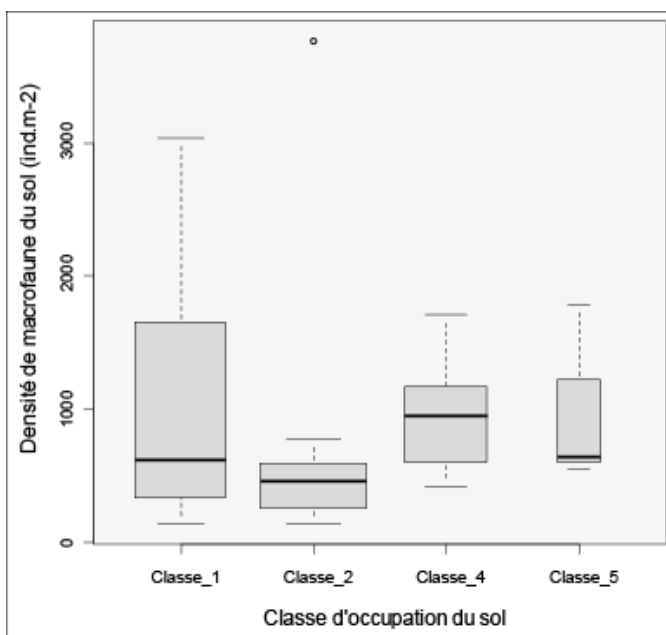


Figure 9 : Densité de macrofaune du sol en fonction de la classe d'occupation du sol. Les boîtes à moustaches représentent le minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^{ème} quartile et maximum. Les points extrêmes sont représentés. La largeur des boîtes est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'observations au sein de chaque classe.

Dans un premier temps, nous allons analyser la relation entre les dynamiques paysagères ou les typologies d'éléments paysagers et la faune du sol. La diversité moyenne de la macrofaune du sol est $10,0 \pm 0,25$ (erreur standard) taxons.m². Il n'y a pas de différence significative entre les classes d'occupation du sol. La densité moyenne est de $830,7 \pm 114,9$ ind.m². La densité varie significativement entre les types de classes d'occupation du sol ($p < 0,05$, test de Kruskal-Wallis, Figure 9). Ce test démontre qu'il y a une relation significative entre les types d'éléments paysagers et la densité moyenne de la macrofaune du sol.

La macrofaune du sol, par son action, participe à de nombreux services écosystémiques, notamment la

fertilité et les services hydriques du sol (Lavelle *et al.*, 2006). La densité de macrofaune du sol montre des différences significatives en fonction du type de classe au niveau du point. La classe 2, forêt ayant été brûlée, présente la plus faible densité de macrofaune. La déforestation par brûlis a des effets dévastateurs sur la macrofaune du sol : durant la combustion, la température peut atteindre 200°C à une profondeur de 15 cm (Gimeno-Garcia *et al.*, 2004). Les invertébrés les moins mobiles, comme les larves, ne peuvent échapper au feu. Les organismes plus mobiles, comme les araignées, ou construisant de profondes galeries souterraines comme les fourmis et les termites, sont moins affectés (Mathieu *et al.*, 2005). Dans un second temps, la perte des micro-habitats (litière, bois en

décomposition...) et du couvert végétal modifie les conditions climatiques du sol (Strehlow et al., 2002) et les sources de nourriture comme la litière pour les organismes s'en nourrissant. La classe 4, c'est-à-dire la forêt ayant été brûlée depuis 1999-2001 actuellement sous forme de juquirá/capoeira, présente en moyenne la densité de macrofaune du sol la plus élevée. La classe 5, représentant les pâturages et les juquirá/capoeira, ne présente pas de densité de macrofaune de densité significativement différente des

autres classes. Les *capoeiras* vieilles peuvent présenter des diversités et densités de macrofaune similaires à la forêt primaire (Mathieu et al., 2005), ce qui peut expliquer ces résultats.

Dans un second temps, une analyse en composantes principales normée a été réalisée sur le tableau de données de SE. L'ACP montre une structure à deux dimensions (histogramme des valeurs propres ; cf. Figure 10).

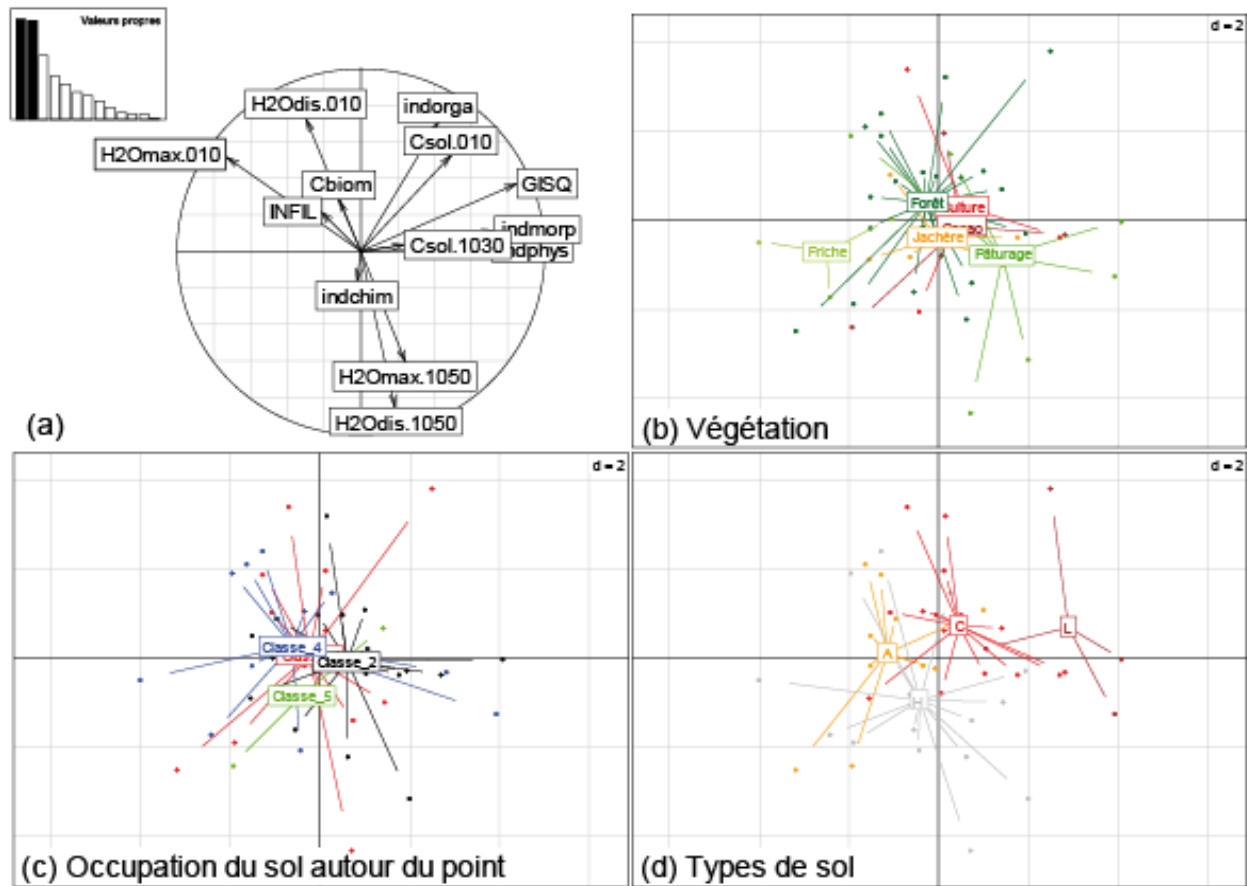


Figure 10 : Plan 1-2 de l'ACP normée du tableau de données de services écosystémiques au niveau du point. **(a)** Cercle des corrélations. Position des points rattachés **(b)** aux types de couverture végétale, **(c)** aux classes de dynamique d'occupation du sol, et **(d)** aux classes de sol (C : cambisols, épaisseur < 0,5 m ; A : argisols, 0,6 m < épaisseur < 1 m ; L : ferralsols ou latosols, épaisseur > 1 m ; H : gleysols ou sols hydromorphes).

Les contributions des variables aux trois premières composantes principales (Tableau 3), représentent 23,0, 22,8 et 14,7 % de l'inertie.

Cela démontre une opposition sur l'axe 1 entre, d'une part l'indicateur global de qualité du sol (GISQ) et les sous-indicateurs physique et morphologique du sol (scores positifs), d'autre part la capacité de stockage maximal de l'eau de la couche superficielle (0-10 cm) du sol (score négatif). Les deux autres sous-indicateurs de qualité du sol, organique et chimique, sont parmi les variables les plus contributives aux axes 2 et 3 respectivement ; de même les autres variables de stockage de l'eau (Tableau 2). Une séparation plus nette des types de sols (Figure 7d) que des couvertures végétales (Figure 7b) est observée sur le premier plan factoriel ; ces deux variables explicatives ont un pouvoir explicatif (R^2) comparable, plus significatif (P simulée) pour la première (Tableau 4).

Par comparaison, la typologie reposant sur l'analyse par télédétection de l'occupation du sol autour des points a un pouvoir explicatif plus faible et non significatif. En complément, les figures 11 et 12 illustrent les variations en fonction de la couverture végétale des indicateurs de services et de quelques variables du sol intervenant dans leur évaluation.

On observe parmi les variations les plus significatives, celles du stock de carbone de la biomasse arborée et arbustive, et de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Ces deux variables sont peu contributives aux deux premiers axes de l'ACP, contrairement aux capacités de stockage de l'eau dans le sol. La capacité de stockage maximale de l'eau de la couche superficielle diminue significativement dans les pâturages, sans incidence sur le sous-indicateur de qualité physique du sol, probablement plus dépendant de la composition granulométrique que de la structure. En effet, un tassement du sol sous pâturage est attesté par les

mesures de densité apparente et de résistance à la pénétration du sol (Figure 12).

| | Comp1 | Comp2 | Comp3 |
|-------------|--------------|--------------|--------------|
| H2Omax.010 | -0,73 | 0,51 | -0,11 |
| H2Odis.010 | -0,30 | 0,73 | -0,28 |
| INFIL | -0,22 | 0,21 | -0,05 |
| Cbiom | -0,12 | 0,28 | 0,66 |
| indchim | -0,02 | -0,17 | -0,78 |
| H2Odis.1050 | 0,19 | -0,85 | 0,13 |
| Csol.1030 | 0,24 | 0,03 | -0,07 |
| H2Omax.1050 | 0,24 | -0,61 | -0,42 |
| indorga | 0,42 | 0,71 | -0,08 |
| Csol.010 | 0,49 | 0,52 | -0,51 |
| indphys | 0,71 | 0,02 | -0,32 |
| indmorp | 0,72 | 0,12 | 0,35 |
| GISQ | 0,85 | 0,37 | 0,29 |

Tableau 3 : Scores des variables indicatrices de services écosystémiques au niveau du point sur les trois premières composantes principales de l'ACP normée, ordonnés suivant le premier axe.

| | Couverture végétale en 2008 | Occupation du sol de 1990 à 2007 | Type de sol |
|----------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------|
| R ² | 0,162 | 0,062 | 0,174 |
| P simulée | 0,040 | 0,561 | 0,001 |

Tableau 4 : Résultats des analyses inter-classes. R² : proportion de la variance expliquée ; P simulée basée sur 999 permutations de Monte Carlo.

4. Discussion

Les écosystèmes contribuent au bien-être des sociétés humaines par quatre grands types de services écosystémiques (SE) :

- L'auto-entretien des écosystèmes à travers la formation des sols, la photosynthèse, les cycles des nutriments, la pollinisation ;
- L'approvisionnement des Hommes en eau, aliments, bois et fibres ;
- La régulation du climat, des crues, de la qualité de l'eau, de l'érosion des sols, de maladies ;
- Les bénéfices esthétiques, éducatifs, récréatifs et spirituels (Daily, 1997 ; Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Étroitement liés à la biodiversité, les SE se réfèrent à des processus écologiques qui se déploient à des échelles très diverses (Portela et Rademacher, 2001). Les SE retenus dans cette recherche (tableau 5) sont la régulation du climat, la régulation du cycle de l'eau et le contrôle de l'érosion du sol. Enfin, nous nous focalisons sur l'aptitude des sols à produire durablement des biens et services, appréciée notamment par la détermination d'indicateurs de leur qualité (Velasquez et al., 2007).

La séquestration du carbone dans le sol et la végétation est mise en avant dans les négociations internationales pour la Réduction des Emissions par la Déforestation et la Dégradation (REDD). Les mécanismes de compensation préconisés, tels que les « crédits carbone », supposent de bien connaître les stocks dans le sol et la végétation et leurs variations en fonction de l'usage des terres, d'où l'intérêt des analyses produites dans le cadre d'AMAZ et présentées dans cette étude (Betts et al., 2008). Par ailleurs, la réduction de la déforestation en Amazonie est conditionnée par l'émergence d'une agriculture durable, en particulier d'une agriculture familiale territorialement stable. Le maintien des petits agriculteurs sur les terres qu'ils ont exploitées suppose d'abord que les ressources en eau et en sol soient conservées. Autrement dit que l'eau des précipitations s'infilte dans le sol, reconstitue la nappe phréatique et la réserve utilisable par les plantes, au lieu de ruisseler à la surface du sol et d'accroître les risques d'érosion en amont et d'inondation en aval (Zimmerman et al., 2006). Pour ce faire, l'analyse spatio-temporelle des impacts de l'agriculture pionnière sur la mosaïque paysagère est indispensable. En effet, ce travail préalable permet de quantifier la stabilité de l'appropriation territoriale issue de l'agriculture familiale. Cette étape préalable permet une meilleure gouvernance des capacités productives du sol qui doivent ensuite être maintenues et même améliorées. Aussi importe-t-il d'évaluer et de comparer les impacts sur les composantes de la fertilité du sol des diverses pratiques agrosylvopastorales.

De plus, l'association d'une approche de l'histoire de la mise en culture de la forêt au travers de la télédétection avec des variables décrivant aujourd'hui les familles vivant sur ces exploitations comporte bien évidemment un biais – celui de l'absence de données socio-économiques précises sur les périodes précédentes. Cependant, nous pouvons en dépit de ces manques signaler plusieurs apports intéressants : les mises en culture sur les fronts pionniers servant au moins autant à créer une rente foncière qu'à permettre la survie d'une famille, les mises en culture permettant de maximiser la rente foncière (le pâturage) aboutissent à des paysages plus homogènes que les usages qui en sont faits aujourd'hui. Cela fournit une piste intéressante, à savoir que la création de certains paysages n'est pas liée à des nécessités agricoles mais à des nécessités de marché : changer les règles de ces marchés, en permettant en particulier une rémunération de paysages en mosaïque tels que ceux que nous venons d'évoquer, peut avoir un certain intérêt.

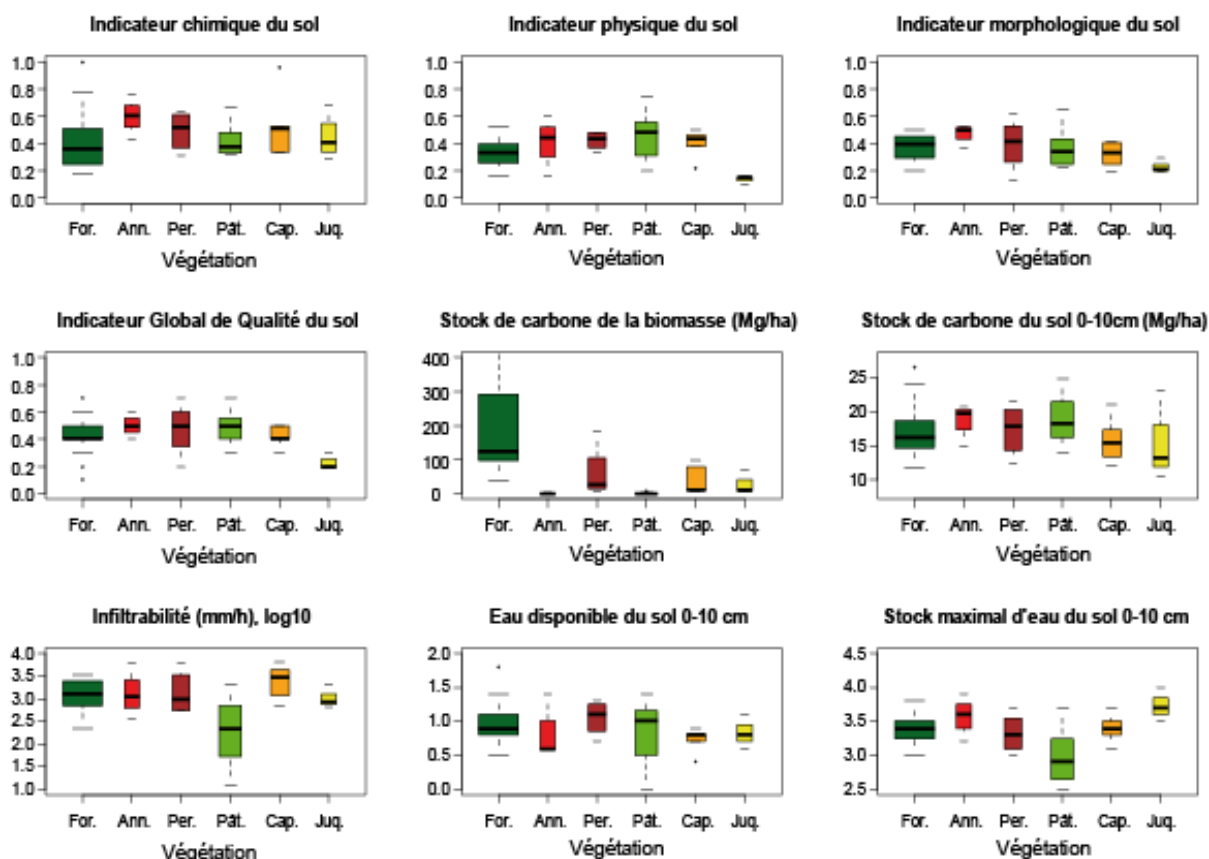


Figure 11 : Variation des indicateurs de services écosystémiques au niveau du point en fonction de la couverture végétale (*For.* : forêt ; *Anu.* : culture annuelle ; *Per.* : culture pérenne ; *Pas.* : pâturage ; *Cap.* : jachère ; *Juq.* : friche succédant à un pâturage).

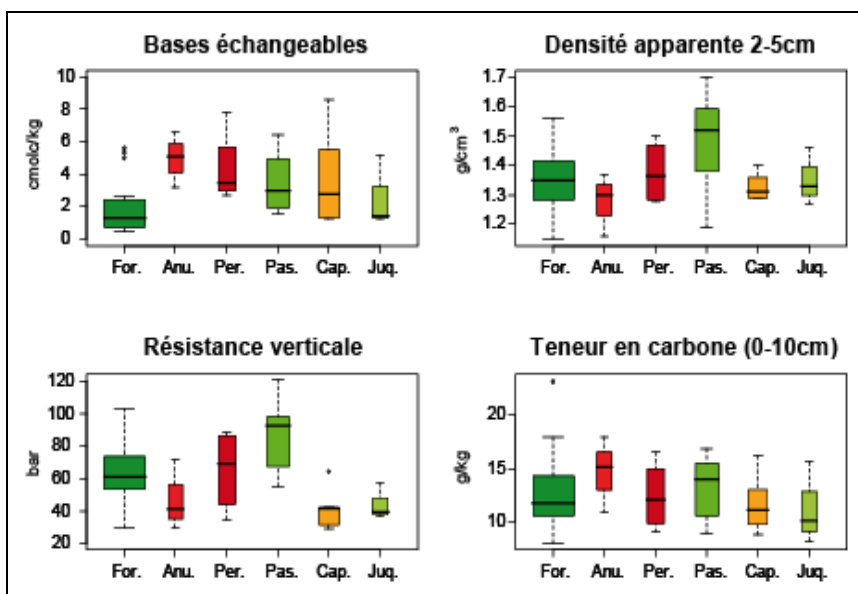


Figure 12 : Variations de la teneur en cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), de la densité apparente, de la résistance à la pénétration et de la teneur en carbone, en fonction de la couverture végétale sur le site de Pacajá (*For.* : forêt ; *Anu.* : culture annuelle ; *Per.* : culture pérenne ; *Pas.* : pâturage ; *Cap.* : jachère ; *Juq.* : friche succédant à un pâturage).

| Services écosystémiques | Processus |
|--|---|
| Régulation du climat | Stockage du carbone dans le sol et la végétation |
| Régulation du cycle de l'eau | Ruissellement de l'eau / Infiltration dans le sol |
| Contrôle de l'érosion du sol | Réserves d'eau biodisponible dans le sol |
| Productions (extractivisme, cultures, élevage) | Fertilité du sol |

Tableau 5 : Services écosystémiques et processus écologiques associés.

L'autre intérêt, méthodologique, tient à l'usage d'analyses *between*. On connaît, par diverses publications, le phénomène de remplacement des premiers agriculteurs, qui ont une forte expérience de la mobilité, par des familles plus capitalisées et plus stables ; mais celui-ci est difficile à confirmer par des analyses statistiques, la caractérisation des différentes populations étant le fait de l'imbrication de facteurs. D'un autre côté, l'histoire de la mise en valeur est elle aussi le fait d'un ensemble de facteurs synthétisés. L'analyse que nous avons menée permet de mettre en correspondance des analyses multivariées entre elles sans recourir à l'analyse de la covariation de types qui sont toujours une simplification de la réalité. Il y a là un espace méthodologique pour montrer l'imbrication entre des phénomènes complexes.

5. Conclusion

La télédétection a été le levier permettant l'intégration des dynamiques spatio-temporelles des territoires étudiés au sein d'un programme transdisciplinaire. Il apparaît que l'analyse des dynamiques paysagères est centrale à la compréhension des impacts du développement des fronts de déforestation sur la biodiversité, sur les sols, plus généralement sur les SE, que ce soit la régulation climatique, la régulation du cycle de l'eau, le contrôle de l'érosion des sols et les productions agricoles. L'ensemble de ces éléments étant pilotés par le contexte socio-économique de chaque ferme, plus généralement de la zone de Pacajá. Plus largement, les contextes régionaux propres à chaque site rendent ce type d'analyse très dépendant des échelles spatiales étudiées.

Remerciements

Projet ANR-O6-BDIV-009 (AMAZ_BD - Biodiversité des paysages amazoniens : déterminants socio-économiques et production de bien et services écosystémiques) et ANR (il faut absolument citer de la même manière AMAZ services écosystémiques). Les auteurs tiennent à remercier les communautés du *travessão* 338 Sud pour leur accueil, l'hébergement et l'accompagnement sur le terrain ainsi que tous les membres des programmes AMAZ. Les auteurs tiennent à remercier plus particulièrement Florence Dubs, Anne-Elizabeth Laques et Marcello Thalès.

Références

Albaladejo, C., Duvernoy, I., Dominguez, C., Veiga, I., 1996. La construction du territoire sur les fronts pionniers. In Albaladejo C. et Tulet J.C. (Dir). Les fronts pionniers de l'Amazonie Brésilienne, la formation de nouveaux territoires. L'Harmattan, Paris, France, pp. 247-278.

Anderson, J.L., Ingram, J.S.I., 1993. Tropical Soil Biology and Fertility. A handbook of methods. 2ème édition, Wallingford, Royaume-Uni.

Arnaud De Sartre, X., 2006. Front pionnier d'Amazonie: Les dynamiques paysannes au Brésil. CNRS éditions, Paris, France, 223 pages.

Betts, R.A., Malhi, Y., Roberts, T., 2008. The future of the Amazon: new perspectives from climate, ecosystem and social sciences. Phil. Trans. R. Soc. B., 363, pp. 1729-1735.

Caldas, M., Walker, R., Arima, E., Perz, S., Aldrich, S., Simmons, C., 2007. Theorizing Land Cover and Land Use

Change: The Peasant Economy of Amazonian Deforestation. Annals of the Association of American Geographers 97(1), 86-110.

Carr, E.R., 2005. Development and the Household: Missing the point? Geojournal 62(1), 71-83.

Chayanov, A.V., 1966. The theory of peasant economy. Richard Irwin Inc., Illinois, Etats-Unis, 317p.

Coy, M., 1996. Différenciation et transformation de l'espace au Nord du Mato-Grosso (Brésil). Contribution à un modèle dynamique des fronts pionniers en Amazonie brésilienne. In Albaladejo C. et Tulet J.C. (Dir). Les fronts pionniers de l'Amazonie Brésilienne, la formation de nouveaux territoires. L'Harmattan, Paris, France, pp. 103-127.

Daily, G., 1997. Introduction. In Daily G. (Ed.), Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press, Washington, Etats-Unis, 392p.

Dolédec, S., Chessel D., 1987. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique I- Description d'un plan d'observations complet par projection de variables. Acta Oecologica, Oecologia Generalis 8(3), 403-426.

Fearnside, M.P., 1991. Développement agricole et déforestation en Amazonie brésilienne. In Amazonie : la frontière agricole vingt ans après. Belem, Brésil.

Fearnside, P.M., 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. Conservation biology 19(3), 680-688.

Fortser, B.C., 1984. Derivation of atmospheric correction procedures for Landsat MSS with particular reference to urban data. International Journal of Remote Sensing 5 (5), 799-817.

Gimeno-Garcia, E., Andreu, E.V., Rubio, J.L., 2004. Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires. Geoderma 118, 17-38.

Hargis, C.D., Bissonnette, J.A., David, J.L., 1998. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. Landscape Ecology, 13, 167-186.

Hollander, M., Wolfe, D.A., 1973. Non parametric Statistical Methods. John Wiley & Sons, New-York City, Etats-Unis.

Kergomard, C., 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. Cybergeo 181, 12p.

Laurance, W., Cochrane, M., Gergen, S., Fearnside, P., Delaminica, P., Barber, C., D'angelo, S., Fernandes, T., 2001. The future of the Brazilian Amazon. Science 291 (5503), 438-444.

Lausch, A., Herzog, F., 2002. Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: issues of scale, resolution and interpretability. Ecological Indicators 2(1-2), 3-15.

Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. European Journal of Soil Biology 42, pp. 3-15.

Lavit, C., 1988. Analyse conjointe de tableaux quantitatifs. Masson, Paris, France, 240 pages.

Lavit, C., Escoufier Y., Sabatier R., Traissac P., 1994. The ACT (Statis method). Computational Statistics and Data Analysis 18, 97-119.

Léna, P., 1999. La forêt amazonienne: un enjeu politique et social contemporain. Autrepart 9, 97-120.

- Markham, B.L., Chander G., 2003. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. White Paper, 128p.
- Mathieu, J., Rossi, J.P., Lavelle, P., Martins, P.F.D.S., Rouland, C., Grimaldi M., 2005. Recovery of Soil Macrofauna Communities after Forest Clearance in Eastern Amazonia, Brazil. *Conservation Biology*, 19, pp.1598-1605.
- Millennium Ecosystem assessment, 2005. Synthesis Reports. www.millenniumassessment.org
- Oksanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Simpson, G.L., Stevens, M.H.A., Wagner, H., 2008. *vegan: Community Ecology Package*.
- Oszwald, J., Kouakou, J.M., Kergomard, C., Robin M., 2007. Représenter l'espace pour structurer le temps : l'utilisation des SIG pour comprendre les dynamiques spatiales. *Téledétection* 7(1-4), 271-282.
- Oszwald, J., Lefebvre, A., Arnauld de Sartre, X., Gond, V., Thalès, M., Fretas, R.L., 2010. Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (Brésil) entre 1997 et 2006. *Téledétection* 9(2), 97-111.
- Oszwald, J., Gond, V., Dolédec, S., Lavelle, P., 2011. Identification d'indicateurs de changement d'occupation du sol pour le suivi des mosaïques paysagères. *Bois et Forêts des Tropiques* 307(11), 7-21.
- Portela, R., Rademacher, I., 2001. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. *Ecological Modelling* 143, 115-146.
- R-Development-Core-Team, 2009. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche.
- Riitters, K.H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., Wickham, J.D., Yankee, D.H., Timmins, S.P., Jones, K.B., Jackson, B.L., 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 10, pp. 23-29.
- Rodrigues, A.S.L., Ewers, R.M., Parry, L., Souza Junior, C., Veríssimo, A., Balmford, A., 2009. Boom-and-Bust development patterns across the Amazon deforestation frontier. *Science* 324 (5934), 1435-1437.
- Royston, P., 1982. An extension of Shapiro and Wilk's test for normality to large samples. *Applied Statistics*, 31, 115-124.
- Strehlow, K., Bradley, J., Davis, J., Friend, G.R., 2002. Short term impacts of logging on invertebrate communities in Jarrah forests in south-west Western Australia. *Forest ecology and management* 161, 165-184.
- Thiele, G., 1991. La crisis del barbecho: Una reevaluación. CIAT Informe Técnico, Cali, Colombie, 63p.
- Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 3066-3080.
- Velho Otávio, G., 1972. Frentes de expansão e estrutura agrária. Estudo do processo de penetração numa área da Transamazonica. Zahar editores, Rio de Janeiro, Brésil, 175p.
- Zimmerman, B., Elsenbeer, H., Moraes, J.M., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222, 29-38.