

Identification d'indicateurs de changement d'occupation du sol pour le suivi des mosaïques paysagères

Johan OSZWALD¹

Valéry GOND²

Sylvain DOLÉDEC³

Patrick LAVELLE⁴

¹ Université Rennes 2
Umr Letg (Umr Cnrs 5654), laboratoire Costel
Laboratoire Ecodiv (EA 1293, Rouen)
5, place Henri Le Moal
35000 Rennes
France

² Cirad
UR B&Sef
Campus international de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5
France

³ Université Claude Bernard
Lyon I
Umr Cnrs 5023
69622 Villeurbanne Cedex
France

⁴ Umr Bioemco 7618
Centre Ird Île-de-France
32, avenue Henri Varagnat
93143 Bondy Cedex
France



Installation agricole familiale dans le secteur de Maçaranduba (Pará, Brésil).
Photo V. Gond.

RÉSUMÉ

IDENTIFICATION D'INDICATEURS DE CHANGEMENT D'OCCUPATION DU SOL POUR LE SUIVI DES MOSAÏQUES PAYSAGÈRES

Les travaux récents sur la mise en place d'indicateurs permettant de renseigner le paysage et ses différentes composantes se cantonnent souvent à l'étude de leur composition et/ou de leur structure. Cependant, pour appréhender toute la complexité des mosaïques paysagères, il est important de proposer des indicateurs synthétiques dont la mise au point est d'autant plus pertinente que de nombreuses études mettent les mosaïques paysagères au centre des dynamiques territoriales. Le projet Amaz (2006-2010) a montré le rôle central du paysage dans la biodiversité, la qualité des sols et, plus généralement, dans les services écosystémiques. La cartographie de ces mosaïques en lien avec les dynamiques environnementales et sociétales a pour but d'améliorer les politiques de gestion. Ici, l'article a donc pour ambition de proposer un indicateur paysager synthétique couvrant plusieurs dimensions spatiales et temporelles d'un même paysage.

Mots-clés : télédétection, mosaïque paysagère, métriques, indicateurs spatio-temporels, Statis, indicateur paysager synthétique.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF LAND-USE INDICATORS TO ASSESS CHANGES IN LANDSCAPE MOSAICS

Recent work on the development of suitable indicators to report on landscapes and their various components has often been limited to studies of landscape composition and/or structure. However, to grasp the complexity of landscape mosaics, it is important to have synoptic indicators, whose development is all the more relevant as many studies place landscape mosaics at the heart of territorial dynamics. The AMAZ program (2006-2010) has shown the crucial importance of landscape mosaics for biodiversity, soil quality and ecosystem services in general. The purpose of mapping these mosaics, which are linked to environmental and social dynamics, is to improve management policies. This article proposes a Synthetic Landscape Indicator covering several dimensions of the same landscape in space and time.

Keywords: remote sensing, landscape mosaic, metrics, spatio-temporal indicators, STATIS, Synthetic Landscape Indicator.

RESUMEN

IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE CAMBIO DE OCUPACIÓN DEL SUELO MEDIANTE EL SEGUIMIENTO DE MOSAICOS PAISAJÍSTICOS

Los recientes trabajos sobre el establecimiento de indicadores que permiten informar sobre el paisaje y sus distintos componentes suelen limitarse al estudio de su composición y/o de su estructura. Sin embargo, para comprender toda la complejidad de los mosaicos paisajísticos, es importante proponer indicadores sintéticos, cuyo desarrollo es tanto más oportuno cuanto que numerosos estudios sitúan los mosaicos paisajísticos en el centro de las dinámicas territoriales. El proyecto AMAZ (2006-2010) puso de manifiesto el papel central que juega el paisaje para la biodiversidad, la calidad de los suelos y, de forma más general, para los servicios ecosistémicos. La cartografía de estos mosaicos, vinculados a las dinámicas ambientales y sociales, tiene por objetivo mejorar las políticas de manejo. Por ello, el presente artículo aspira a proponer un indicador paisajístico sintético que abarque varias dimensiones espaciales y temporales de un mismo paisaje.

Palabras clave: teledetección, mosaico paisajístico, indicadores espacio-temporales, STATIS, indicador paisajístico sintético.

Introduction

Au cours de ces dernières décennies, l'extension des dynamiques agricoles a pris une grande ampleur au Brésil, notamment au Nord du pays, dans le bassin amazonien. Les dynamiques de déforestation peuvent être observées en Amazonie à des échelles très locales, par exemple dans le cas des systèmes de défrichement par brûlis des populations migrantes et traditionnelles (THÉRY, 1997). Cependant, ces dynamiques sont largement supplantées par des processus de déforestation beaucoup plus importants en termes de surface déboisée, principalement dus aux acteurs de l'économie mondiale du bois ou de l'agriculture intensive. Ces dynamiques sont surtout le fait de l'« alliance » entre la filière des grandes entreprises du bois et l'élevage bovin, par exemple, même si certaines dynamiques plus récentes sont identifiables, comme la culture du soja, qui se développe dans le Sud-Ouest de l'Amazonie depuis une dizaine d'années (FEARNSIDE, 1988 ; PRODES, 2003).

De par leurs choix de développement, les agriculteurs agissent sur certaines fonctions écologiques des espaces forestiers. De ce fait, ils influencent directement les éléments qui déterminent l'appréciation qu'ils peuvent porter par la suite sur leur qualité paysagère. En retour, la qualité paysagère des milieux naturels ou partiellement anthropisés n'est pas sans conséquences sur les choix de migration comme de spéculation foncière des agriculteurs (ARNAULD DE SARTRE, 2006). Pour rendre compte de ces rétroactions paysagères, des modèles écologiques et économiques sont développés par de nombreux scientifiques. Cependant, il reste très difficile d'identifier des indicateurs spatiaux pertinents pour suivre, quantifier et qualifier l'état paysager ou une chronoséquence paysagère. En effet, la plupart des articles parus récemment sur la question – par exemple reliant paysage et services écosystémiques – utilisent, pour évaluer économiquement les paysages, des cartes de l'occupation des sols à une date t , et dans une moindre mesure des métriques paysagères (*exempli gratia* HEIN *et al.*, 2006 ; TROY, WILSON, 2006). Or, avec le développement de plus en plus important des études traitant des changements environnementaux et de leurs effets sur les services écosystémiques, la mise au point d'indicateurs paysagers synthétisant cette complexité est indispensable. En effet, pour estimer la valeur d'un patrimoine

naturel ou d'une exploitation agricole, à travers les différents services qu'ils peuvent produire, une analyse préalable de l'occupation des sols et de son évolution apparaît indispensable. Ces analyses paysagères sont très souvent réalisées à partir d'une seule dimension, celle de l'occupation des sols relevée à un instant donné (NENGWANG *et al.*, 2009). Ces analyses sont très restrictives puisque, par définition, elles ne prennent pas en considération l'évolution temporelle des dynamiques paysagères. Or, la prise en compte de ces chronoséquences est indispensable à l'identification d'indicateurs spatiaux des dynamiques de l'occupation des sols.

Pour qualifier et quantifier ces processus spatiaux, le présent article propose la mise au point de plusieurs indicateurs paysagers synthétiques. Pour réaliser cette étude, il a été élaboré des indicateurs à une date t (2007) et des indicateurs rétrospectifs sur une chronoséquence (1990-2007). Ces deux approches permettent de prendre en compte les deux types d'analyses paysagères les plus couramment répandus et considèrent à la fois les dynamiques de l'occupation des sols et les dynamiques des structures paysagères. L'article s'attache donc à répondre aux questions suivantes :

- Les dynamiques des éléments paysagers sont-elles mieux renseignées par l'évolution de l'occupation des sols ou par l'évolution des structures paysagères ?
- Peut-on mettre en place plusieurs indicateurs représentant chacun une composante du paysage ?
- Peut-on déduire des pistes de réflexion pour la conception d'un indicateur paysager synthétique ?



Coupe et brûlis de la couverture forestière sur des parcelles de quelques hectares permettant la plantation de denrées agricoles (ici du riz).
Photo V. Gond.

Matériel et méthodes

Trois sites localisés dans l'État du Pará au Brésil (figure 1A-C) ont été étudiés, sélectionnés dans le cadre du programme Amaz. Ces trois sites d'étude sont caractérisés par des dynamiques agricoles récentes et rapides. La zone de Maçaranduba (figure 1E) est la plus anciennement concernée par le passage du front amazonien de déforestation dans les années 1970. Au cours des années 1990, la zone de Maçaranduba a subi la réactivation d'un front secondaire de déforestation par quelques agriculteurs dans les espaces forestiers subsistants (OSZWALD *et al.*, 2010). La zone de Palmarès 2 (figure 1F) est concernée par des dynamiques agricoles plus récentes. C'est à la fin des années 1980 qu'un *fazendeiro* s'y installe pour mettre en place un vaste élevage bovin. En 1994, le *fazendeiro* est exproprié

par des agriculteurs du Mouvement des sans-terre (Mst), qui mettent en culture les 520 lots qu'ils se sont attribués. Enfin, le secteur de Pacaja (figure 1D) est le secteur le plus récemment concerné par le passage du front de déforestation amazonien (figure 1B). En effet, les premières conversions agricoles ont commencé au début des années 1990, à partir de la Transamazonienne sur la perpendiculaire 338 Sud. Ainsi, ces trois sites ont connu des temporalités de mise en place des dynamiques agricoles très différentes, induisant des processus spatiaux distincts. Afin de suivre ces processus spatiaux, nous avons eu recours à la télédétection pour cartographier la dynamique de chacun des sites entre 1990 et 2007.

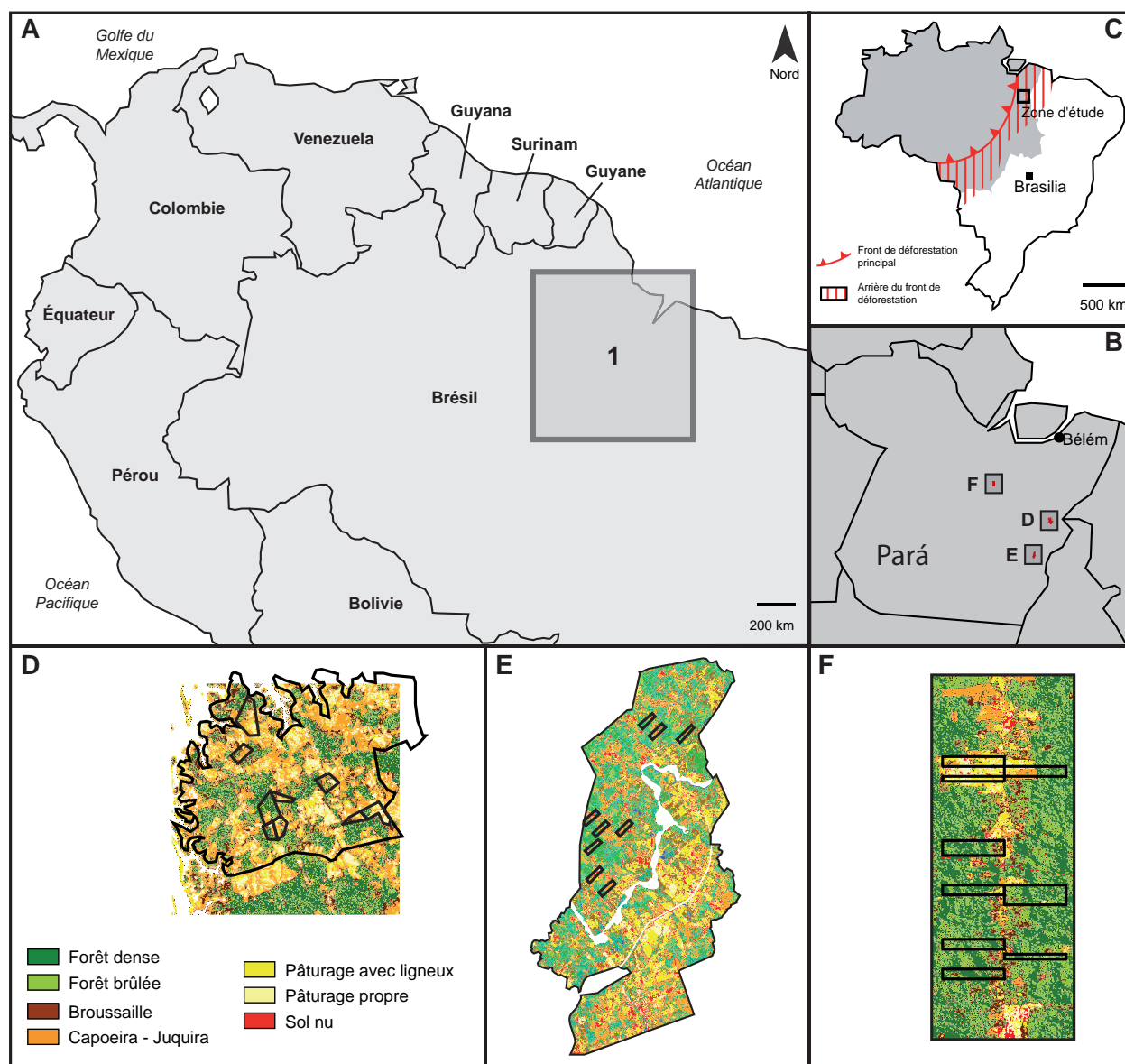


Figure 1.

Carte de localisation des sites d'étude retenus dans le cadre du programme Amaz. Les cartes de présentation des sites correspondent à l'occupation des sols en 2007. A) Localisation du site d'étude en Amazonie brésilienne. B) Localisation des trois sites d'étude dans l'État du Pará. C) Localisation du front de déforestation. D) Site de Maçaranduba. E) Site de Palmarès 2. F) Site de Pacaja.

Les campagnes de terrain, réalisées en 2007-2008, ont fourni les données nécessaires à la différenciation des composantes du paysage. Elles s'inscrivaient dans la perspective d'analyses d'images à plusieurs dates et reposaient sur la collecte des données permettant l'identification spectrale des divers types de parcelles observées *in situ*. Les données obtenues ont permis le traitement et l'interprétation des images satellitaires, mais ont également concouru à l'élaboration d'un système d'information géographique de suivi de la conversion des espaces forestiers (sous ArcGis, version 9.2).

Les relevés effectués par Gps (modèle Garmin 60CX) lors des campagnes de terrain s'appuient sur une fiche conçue pour répondre aux analyses par télédétection. Ces relevés ont été réalisés sous forme de points identifiés préalablement en laboratoire et sous forme de transect, visant à renseigner les successions des composantes paysagères (OSZWALD *et al.*, 2007). Près de 1 000 points Gps ont été recueillis sur les trois sites d'étude. Les fiches obtenues ont été rassemblées par unité, transcrites en pyramide afin d'analyser leur degré de ressemblance et de définir une typologie d'élément paysager. Les relevés ont ensuite été confrontés dans une matrice de confusion afin de distinguer les postes de nomenclature sans ambiguïtés de ceux qui présentent des équivoques. Cette matrice détermine le degré de probabilité d'identification des éléments paysagers. Les éléments paysagers repérés correspondent à une composante de divers peuplements définis par une physiologie et une structure organisée qui constitue son identité. À la suite de ces prétraitements, la typologie finale des éléments paysagers compte huit classes (figure 2). Cette typologie correspond à des catégories assez générales d'occupation des sols afin de faciliter la mise en place de l'analyse rétrospective. Une telle approche se justifie par le haut degré d'anthropisation et la complexité des milieux étudiés (ZONNEVELD, 1989).

Les données satellitaires provenant des plateformes Landsat TM ont été sélectionnées pour cartographier les trois sites d'étude. La résolution du pixel permet de caractériser des surfaces de 900 m² (1/10 d'hectare environ), ce qui est tout à fait adapté à nos sites et aux objectifs de l'étude. Au sein de l'archive, l'acquisition des images durant la saison sèche a été privilégiée afin d'obtenir le maximum de contraste entre les éléments du paysage (forêt, culture, jachère). De plus, cette période correspond à un maximum de disponibilité des données du fait de la faible nébulosité saisonnière. Les biais induits par les facteurs atmosphériques, même s'ils sont minimes, ont été corrigés à l'aide du logiciel 5S et du module Atmosc d'Idrisi (OSZWALD *et al.*, 2007). Les acquisitions d'archives ont ainsi permis de disposer d'images satellitaires pour 1990, 1994, 1998, 2002 et 2007 sur l'ensemble des sites. Ces images ont été corrigées géométriquement grâce à des points Gps remarquables identifiés lors des campagnes de terrain (ponts, croisements de pistes...). À partir du jeu de données thématique collecté sur le terrain et de l'image Landsat TM de 2007, une cartographie de l'occupation des sols a été réalisée. Ensuite, par correspondance spectrale, les images antérieures ont été traitées. Par comparaison, il a alors été possible de reconstituer des classifications d'occupation des sols pour les périodes antérieures, même si le degré de précision est moindre pour les images les plus anciennes. Ce moindre degré de précision n'est pas apparu préjudiciable pour la suite de l'analyse (moins de 10 % d'erreur).

À partir de cette base de données cartographiques, les dynamiques des éléments paysagers sur les différents sites ont ensuite été caractérisées. Un total de 27 fermes avait été sélectionné dans le cadre du programme Amaz, soit 9 fermes par site. Pour renseigner les changements engendrés par les dynamiques agricoles, les facteurs d'évolution communs à chacune des parcelles ont été identifiés à l'aide d'analyses multivariées. Des tableaux de mesure dits tridimensionnels









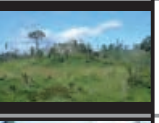





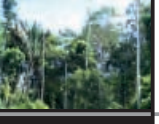


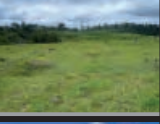


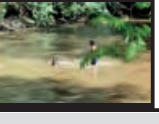



Forêts (F)				Juquira / capoeira (JC)			
Forêt brûlée (FB)				Pâturage avec ligneux (PL)			
Broussaille (BBF)				Pâturage propre (PP)			
Zone en eau (E)				Sol nu (SN)			

Figure 2.

Typologie des éléments paysagers obtenue à partir de l'analyse d'images satellitaires entre 1990 et 2007. Chaque type est identifié par une symbolique graphique et une photographie permettant de se rendre compte des conditions de terrain (photos J. Oszwald).

ou à trois indices (DOLÉDEC, CHESSEL, 1989) ont été constitués. Le premier indice de ces tableaux identifie les x fermes qui font l'objet de k mesures d'occupation des sols (2^{e} indice) à t dates (de 1990 à 2007, 3^{e} indice). Ensuite, ces tableaux ont été analysés à l'aide de la méthode Statist¹, utilisant des analyses en composantes principales (Acp) ou des analyses factorielles des correspondances (Afc) simultanées et coordonnées sur des tableaux de mêmes formes répétées dans le temps (THIOULOUSE, CHESSEL, 1987 ; GAERTNER *et al.*, 1998 ; BLANC *et al.*, 1998 ; ERNOULT *et al.*, 2006 ; figure 3). Le recours à la méthode Act-Statist (LAVIT *et al.*, 1994) a permis d'identifier les structures spatiales stationnelles communes entre les différentes dates et d'en étudier la stabilité temporelle. La méthode Act-Statist s'appuie sur les corrélations entre tableaux (noté R_v , figure 3 ; ROBERT, ESCOUFIER, 1976, pour le détail mathématique) et recherche un tableau synthétique à partir d'une combinaison de chaque tableau-date appelé compromis (étape dite d'interstructure, figure 3). La seconde étape dite d'intrastructure permet d'identifier la reproductibilité du compromis par chaque tableau-date initial (figure 3). Deux tableaux-dates proches du compromis souligneront une structure paysagère commune entre dates. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel gratuit R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010) et la librairie ade4 (CHESSEL *et al.*, 2004 ; THIOULOUSE *et al.*, 1997).

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, à extension spatiale équivalente, la structure paysagère peut être différente entre deux fermes, surtout dans un contexte de colonisation agricole différencié. Donc, il a été indispensable de s'intéresser également à la structure du paysage au travers de plusieurs métriques paysagères (RIITERS *et al.*, 1995 ; HARGIS *et al.*, 1998 ; LAUSCH, HERZOG, 2002) réparties en trois groupes. Le premier groupe comprend des métriques de taille et de proportion pour suivre la fragmentation spatiale des « patches ». 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 rendent possible la quantification de la complexité des patches et des lisières de patches constituant une ferme. Neuf types de métriques paysagères ont ainsi été retenus :

- Métriques de taille et de proportion : aire totale en hectares (ha), notée TA pour *total area* ; densité de lisière en mètres par hectare (m/ha), notée ED pour *edge density* ; densité moyenne des éléments paysagers, en m/ha, notée MPD pour *mean patch density*.

- Métriques de richesse : richesse paysagère en patch, notée PR pour *patch richness* ; indice de diversité de Shannon, noté SD pour *Shannon's diversity* ; indice de régularité, noté SE pour *Shannon's evenness* ; indice de dominance, noté D pour *dominance index*.

- Métriques de forme, ratio du périmètre divisé par l'aire (MPar) ; indice d'irrégularité noté 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).

À partir de ces métriques ont été élaborés des tableaux tridimensionnels similaires aux tableaux d'occupation des sols, mais spécifiques au suivi de structures du paysage au sein de chaque ferme. Enfin, il a été procédé à une classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward) sur les coordonnées factorielles de fermes issues des Acp et des Act-Statist.

L'analyse des tableaux de données pour les 27 fermes a été réalisée en quatre étapes distinctes. D'abord, les fermes ont été classées en fonction de l'occupation des sols et de leur structure paysagère à une année donnée, en l'occurrence l'année la plus récente (2007) à partir de deux Acp. Puis ont été réitérées deux analyses factorielles sur les tableaux de données multidimensionnels entre 1990 et 2007 à partir d'Act-Statist.

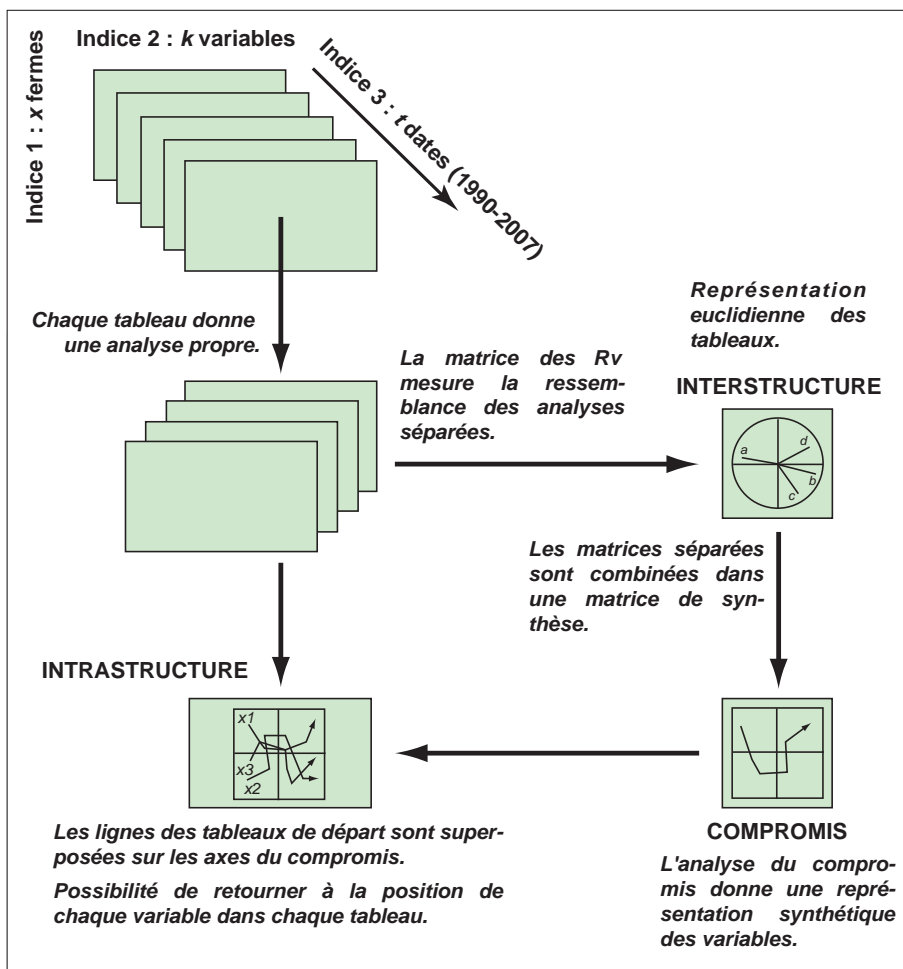


Figure 3. Méthodologie de constitution d'une Act-Statist sur les tableaux de données paysagères.

¹ Structuration des tableaux à trois indices de la statistique (L'HERMIER DES PLANTES, 1976).

Résultats

Classifications spatiales des fermes (2007)

L'occupation des sols

Une Acp normée du tableau des surfaces occupées par les différents types d'éléments paysagers dans chaque ferme en 2007, suivie d'une classification ascendante hiérarchique (Cah, méthode de Ward) sur les coordonnées factorielles de l'ordination des fermes, a permis de mettre en place une première typologie. L'Acp montre une structure à deux dimensions (figure 4b).

La première composante principale (inertie = 38 %) souligne l'ouverture de la mosaïque des éléments paysagers. Les classes 1, 2 et 3 correspondent à des fermes recouvertes principalement de forêts en 2007 (figure 5). La conversion de ces forêts en espaces agricoles est très limitée et marginale. Ces fermes se trouvent essentiellement dans les sites de Palmarès 2 et de Pacaja. Les classes 4 et 5 sont principalement constituées de fermes non forestières avec une majorité de patches de pâturage ou de friche (*juquira/capoeira*). Ces classes correspondent à des fermes de Maçaranduba où les forêts ne sont que des reliques subsistant essentiellement autour du réseau hydrographique (forêt-galerie) ou dans les zones les plus éloignées du siège d'exploitation. La seconde composante principale (inertie = 35 %) montre une opposition entre les variables de forêts, de forêts brûlées et de broussailles sur bas-fonds et les variables relevant d'éléments paysagers en cours de conversion.



Mosaïque agricole sur brûlis ancien avec mélange de jachère (*capoeira*), de culture vivrière (haricot, maïs) et de petits pâturages.
Photo V. Gond.

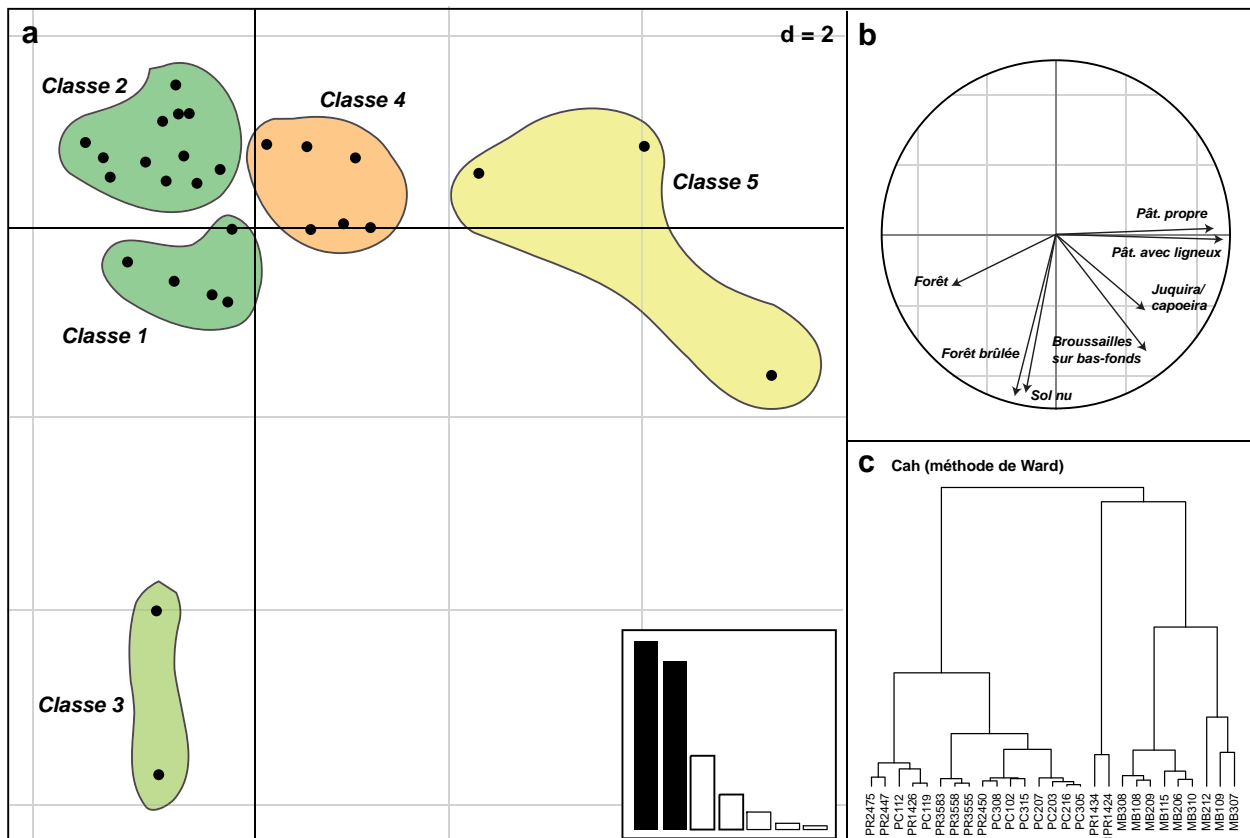


Figure 4.

Méthodologie de constitution de la classification d'occupation des sols des 27 fermes à partir d'une Acp normée avec : (a) carte factorielle des fermes (points) et classification de groupe de fermes (cf. c) ; l'encart représente l'histogramme des valeurs propres ; (b) cercle des corrélations (plan 1-2) permettant d'identifier les variables contributives à la constitution des composantes principales ; (c) dendrogramme issu d'une classification ascendante hiérarchique.

Structure spatiale des éléments paysagers

Une Acp normée du tableau des structures spatiales des éléments paysagers de chaque ferme en 2007, suivie d'une Cah sur les coordonnées factorielles de l'ordination des fermes, a permis de mettre en place une seconde typologie. L'Acp montre une structure à deux dimensions (histogramme des valeurs propres ; figure 6c).

Le premier axe factoriel (inertie = 43 %) est défini par l'opposition entre les fermes majoritairement forestières, caractérisées par des éléments paysagers dénotant une diversité et une faible fragmentation, et des fermes présentant une forte diversité paysagère et une fragmentation maximale, majoritairement constituées d'éléments paysagers agricoles et/ou en jachères. Le second axe factoriel (inertie = 17 %) oppose la forme très complexe des patchs forestiers avec une richesse très faible en éléments paysagers et la forme très complexe des patchs agricoles, marquant une forte emprise de ce type d'occupation des sols et induisant sa fragmentation. Cette analyse est moins performante que précédemment ; en effet, nous constatons qu'il y a moins de corrélation entre les variables (figure 6b). Les classes 1 et 5 correspondent respectivement à des fermes principalement forestières (à 90 %) ou à des fermes composées de quelques patchs forestiers de grande taille. De ce fait, les principales métriques paysagères qui définissent

cette classe sont les indices de complexité de la forme des patchs de forêt et l'indice de dominance, majoritairement forestière (figure 7). Les classes 2 et 4 sont associées aux patchs homogènes de taille moyenne, mais caractérisés par une forte diversité de types d'éléments paysagers (forestiers pour la classe 2 et agricoles pour la classe 4). Enfin, la classe 3 comprend une multitude de petits patchs, c'est-à-dire des fermes très fragmentées, avec une richesse de types d'éléments paysagers importante et une longueur de lisière très forte.

Classifications historiques entre 1990 et 2007

Les classifications historiques des fermes correspondent à des chronoséquences s'appuyant sur les tableaux tridimensionnels d'occupation des sols ou de métriques paysagères.

Dynamique de l'occupation des sols

Le premier axe factoriel du compromis de l'Act-Statis identifie des différences dans le degré d'ouverture/fermeture des mosaïques paysagères (figure 8a). En effet, cet axe est marqué par l'opposition entre les dates où les fermes sont exploitées en pâturage (*id est* ouvertes) et les dates où elles ne sont pas encore ou peu exploitées (*id est* fermées). Cette

opposition est particulièrement marquée entre 1990, date à laquelle les parcelles étudiées n'étaient que très peu mises en valeur, et 1998, avec la mise en place de pâturages. Le second axe factoriel est défini par les formations végétales secondaires dues à l'anthropisation des massifs forestiers ou à l'abandon de patchs agricoles (figure 8a).

Le compromis de l'Act-Statis révèle donc une modification importante de l'occupation des sols entre 1990 et 2007. En effet, les fermes passent d'une emprise spatiale essentiellement forestière à une emprise majoritairement agricole, dominée par les logiques de pâturage. Dans un premier temps, entre 1990 et 1994, se met en place une activité limitée de brûlis. La période 1994-1998 est marquée par une intensification très nette des feux saisonniers, entraînant une forte augmentation des surfaces de forêts brûlées et de broussailles. Suite à ces évolutions, une dynamique de conversion en espaces agricoles se met rapidement en place entre 1998 et 2002. Enfin, entre 2002 et 2007, les fermes étudiées sont définies comme des espaces agricoles à divers stades d'exploitation ou de déprise et caractérisées par la présence de quelques reliques forestières.

La Cah sur les coordonnées factorielles de l'intrastructure permet d'identifier cinq classes à mettre en rapport avec le compromis (figure 8b). La classe 1 regroupe des fermes caractérisées par une valorisation rapide des forêts pour l'élevage. La classe 2 indique une forte présence de sols nus, révélatrice d'une valorisation des

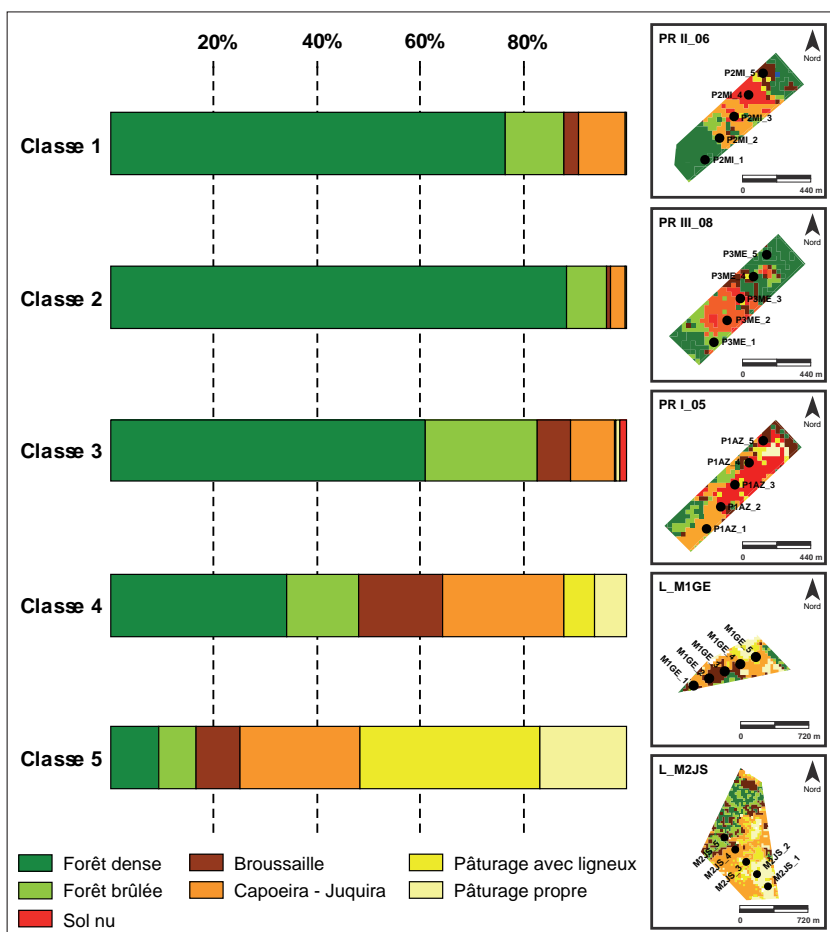


Figure 5.

Représentation thématique de la typologie d'occupation des sols en 2007 sur les 27 fermes de Maçaranduba, Palmarès 2 et Pacaja, issue de la classification ascendante hiérarchique sur les coordonnées factorielles de l'ordination des fermes.



Pâturage ancien envahi par le babacu. Noter au second plan l'arbre forestier isolé (châtaignier du Pará). Photo V. Gond.

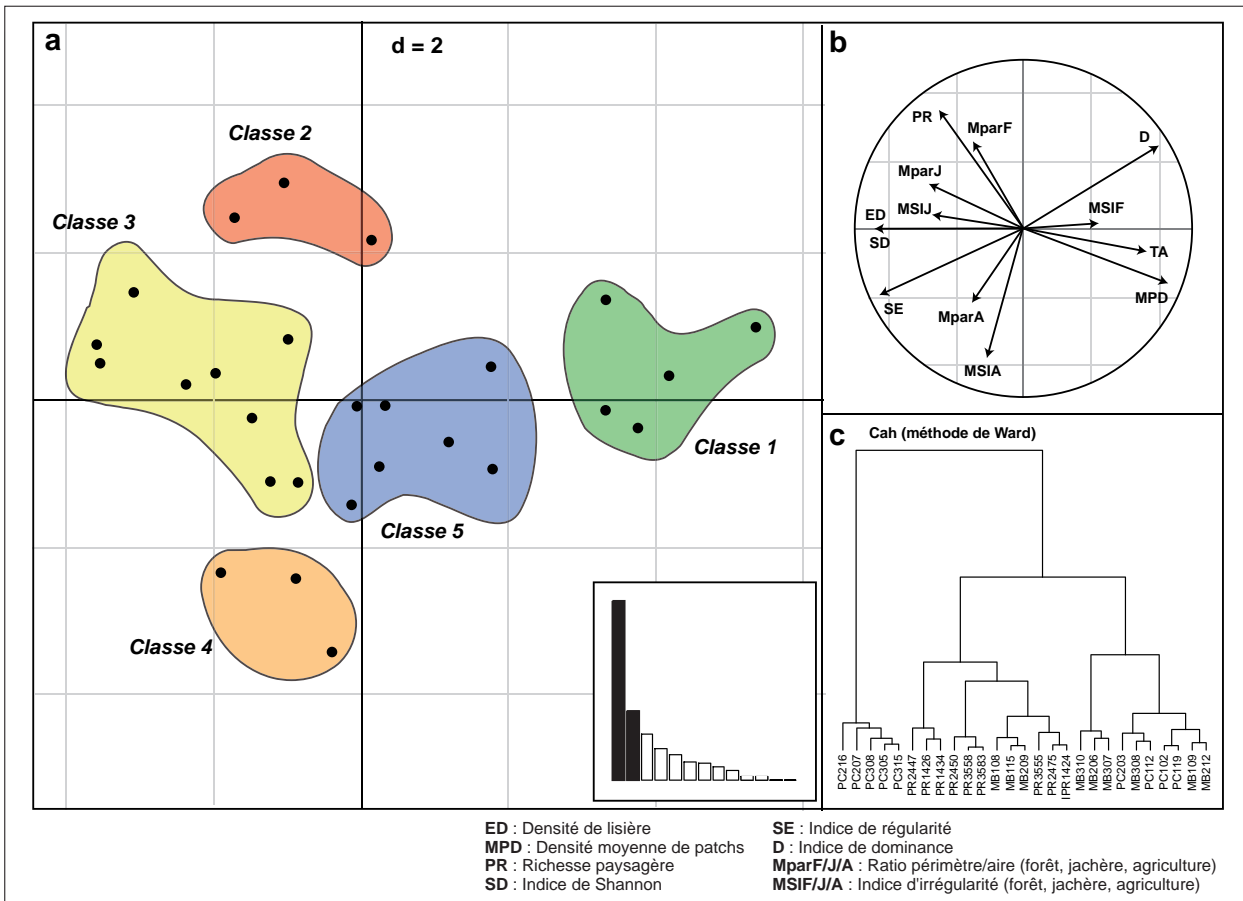


Figure 6.

Méthodologie de constitution de la classification des structures spatiales des 27 fermes à partir d'une Acp normée avec :
 (a) carte factorielle des fermes (points) et classification de groupe de fermes (cf. c) ;
 (b) cercle des corrélations (plan 1-2) permettant d'identifier les variables contributives à la constitution des composantes principales ;
 (c) dendrogramme issu d'une classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward).

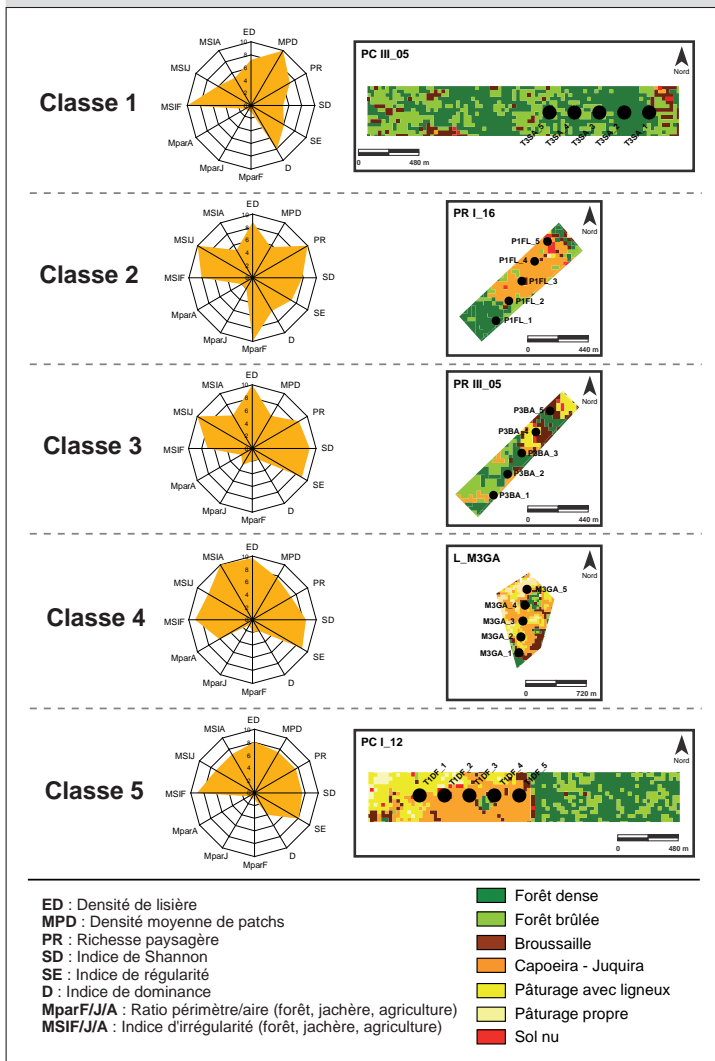


Figure 7.

Représentation thématique de la typologie des structures spatiales en 2007 sur les 27 fermes de Maçaranduba, Palmarès 2 et Pacaja, issue de la classification ascendante hiérarchique sur les coordonnées factorielles de l'ordination des fermes.

forêts pour l'agriculture vivrière. La classe 3 correspond à une logique plus complexe : d'un système pâturé ou en jachère en 1990, ces fermes s'enrichissent entre 1994 et 1998. Après 2002, elles sont de nouveau marquées par des activités de brûlis sur les reliques forestières. Enfin, les classes 4 et 5 connaissent une dynamique en trois temps. Premièrement, entre 1990 et 1994, de nombreux espaces forestiers sont brûlés afin de mettre en place des pâturages. Entre 1994 et 1998, un abandon brutal des anciens pâturages induit un plus fort enrichissement. Enfin, après 1998, ces fermes enregistrent une nouvelle activité de reconquête agricole, mais plus limitée pour la classe 4.

Dynamique des structures paysagères

Le premier axe factoriel du compromis est défini par l'opposition entre les fermes et les dates caractérisées par une diversité et une fragmentation paysagères faibles (1990 et 1994) et les fermes et les dates comportant une diversité et une fragmentation paysagères maximales (2002 et 2007 ; figure 9a). Le second axe factoriel est défini par l'opposition entre les fermes à complexité importante dans la forme des patches de jachère et de pâturage et celles de complexité importante dans la forme des patches de forêt (figure 9a).

Le compromis (figure 9a) montre qu'il y a une modification radicale de la structure paysagère des fermes étudiées entre 1990 et 2007. En effet, en 1990, les fermes sont principalement forestières et majoritairement peu diversifiées. Elles sont donc peu fragmentées, même si différents types de forêts caractérisent ces patches (forêt et forêt brûlée). Entre 1990 et 1998, l'anthropisation des fermes induit une augmentation de la fragmentation. L'année 1998 marque un tournant dans la dynamique des structures paysagères dans les trois sites. Cette dynamique, maximale entre 2002 et 2007, est due au renforcement des défrichements à des fins agricoles. Elle peut être mesurée par la forte croissance des indices de Shannon, ainsi que de la densité de lisière au cours de cette période. À partir de ce compromis, la Cah a permis de distinguer cinq classes (figure 9b). La classe 1 regroupe des fermes caractérisées par un passage très rapide et très intense du stade forestier au stade agricole. Ainsi, elles sont peu complexes en termes de fragmentation et de diversité paysagères. Les classes 2 et 3 sont très proches de la dynamique générale du compromis. La classe 4 concerne des fermes qui sont exclusivement forestières en 1990 et connaissent une forte augmentation des forêts brûlées entre 1990 et 1994. Après 1994, cette classe connaît une augmentation de la diversité paysagère et de l'hétérogénéité des éléments paysagers. Enfin, la classe 5 correspond à des fermes dont la mosaïque paysagère est fragmentée et peu diversifiée.

Mise en place d'un indicateur paysager synthétique

Ainsi, l'analyse multidimensionnelle des tableaux de données pour les 27 fermes des sites de Maçaranduba, Palmarès 2 et Pacaja a permis de définir quatre systèmes de classification, chacun reflétant une dimension paysagère des fermes étudiées. Pour ce faire, à partir des positions des fermes sur les axes factoriels (Acp) ou sur les valeurs de l'intrastructure (Act-Stat), des scores de 0 à 10 ont été attribués à chaque classe. Ces scores reflètent le degré d'artificialisation des compositions ou des structures paysagères.

Les deux premières dimensions paysagères, définies spatialement, présentent des classes indépendantes les unes des autres, que ce soit en termes de structure ou de composition paysagère pour l'année 2007. La première dimension correspond aux différences d'occupation des sols entre les fermes étudiées. Un score proche de 0 témoigne de la présence d'éléments paysagers agricoles et un score proche de 10 signale l'importance des espaces forestiers sur les fermes. La seconde dimension correspond

aux différentes structures paysagères rencontrées dans les fermes échantillonnées. Un indice proche de 0 indique la présence de patches de grande taille, majoritairement non forestiers. Un indice proche de 10 dénote une forte complexité de la forme des patches de forêt.

Les deux dimensions suivantes correspondent à des chronoséquences paysagères. La première chronoséquence permet de suivre les dynamiques d'occupation des sols entre 1990 et 2007 via un indice dont la valeur varie entre 0 et 10. La valeur de 0 représente un espace constitué d'éléments paysagers agricoles ou prairiaux très homogènes depuis 1990. Une valeur de 10 représente des paysages forestiers qui n'ont jamais fait l'objet de dynamiques de déforestation. La seconde chronoséquence présente la dynamique temporelle des métriques paysagères étudiées. Les espaces caractérisés par une valeur de 0 ont connu un passage très rapide et très intense du stade forestier au stade agricole dans les années 1990, c'est-à-dire que les processus de diversification paysagère et d'hétérogénéité se sont mis en place très rapidement dans le temps. Les espaces ayant des valeurs de 10 ont connu des dynamiques récentes, mais de faible ampleur, notamment du point de vue de la diversification des éléments paysagers et de l'évolution de l'hétérogénéité des éléments du paysage. À partir de ces quatre classifications, nous avons mis au point un indicateur paysager synthétique (moyenne des scores variant de 0 à 10 ; figure 10).

Le score final obtenu pour chaque ferme est représentatif de l'emprise anthropique sur la base des quatre dimensions paysagères. Enfin, ces scores synthétiques ont eux-mêmes été regroupés en six classes ordonnées (chiffres entre parenthèses dans la colonne des scores synthétiques ; figure 11).

Les classes 1 et 2 comprennent principalement des fermes dont les éléments paysagers sont des pâturages. Cependant, nous pouvons constater que la classe 2 connaît des dynamiques d'enrichissement récentes plus prononcées que dans la classe 1,

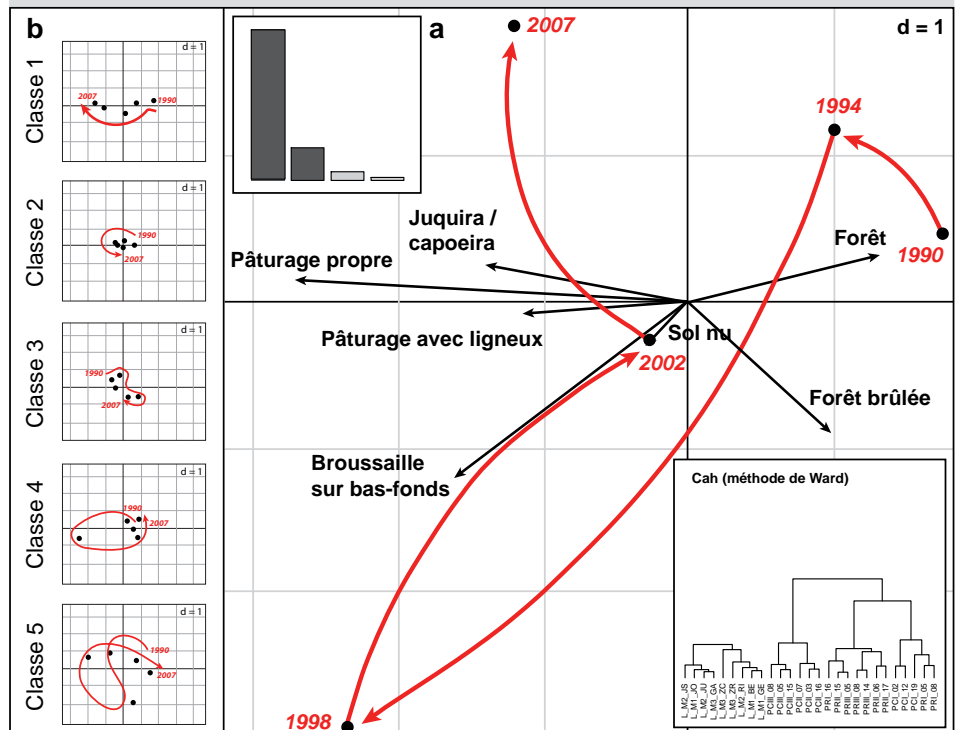


Figure 8.

Méthodologie de constitution des classes de dynamique de l'occupation des sols entre 1990 et 2007 ; (a) compromis temporel de l'Act-Stat et classification ascendante hiérarchique (Cah, méthode de Ward) sur les coordonnées factorielles de l'infrastructure en encart ; (b) trajectoire temporelle moyenne de chaque classe identifiée par la Cah en rapport au compromis temporel.

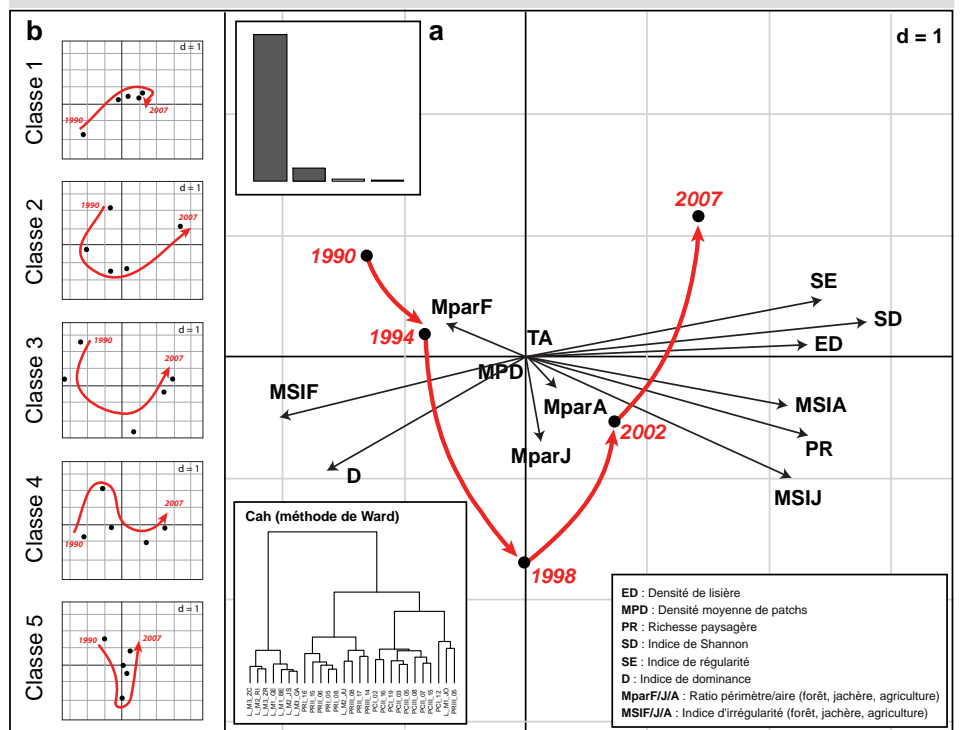


Figure 9.

Méthodologie de constitution des classes de dynamique des structures paysagères entre 1990 et 2007 ; (a) compromis temporel de l'Act-Stat et classification ascendante hiérarchique (Cah, méthode de Ward) sur les coordonnées factorielles de l'infrastructure en encart ; (b) trajectoire temporelle moyenne de chaque classe identifiée par la Cah en rapport au compromis temporel.



Mosaïque de recrûs forestiers et de jachère de pâturages (juquira). Noter l'imbrication des petites parcelles dans le paysage.
Photo V. Gond.

ce qui induit une déprise agricole ces dernières années. La classe 3 est définie par des fermes parmi les plus fragmentées, avec une richesse de types d'éléments paysagers importante et une longueur de lisière très forte. La classe 3 est constituée de fermes caractérisées par des éléments paysagers de pâturages et de broussailles, ce qui correspond à des fermes de Palmarès 2 fortement affectées par les phénomènes de déforestation. Les classes 4 et 5 sont des fermes essentiellement recouvertes de forêts en 2007. Seule une faible part de leur surface totale a été convertie en pâturage ou a subi une dégradation ces dernières années. Ces fermes sont surtout représentatives des zones de Palmarès 2 et de Pacaja. La classe 6 correspond à des fermes dont la conversion des forêts en espaces agricoles reste marginale. Les principales métriques paysagères qui définissent cette classe sont les indices de complexité de la forme des patches de forêt. Cette classe est essentiellement constituée de fermes de Pacaja qui ne sont colonisées que depuis peu de temps.

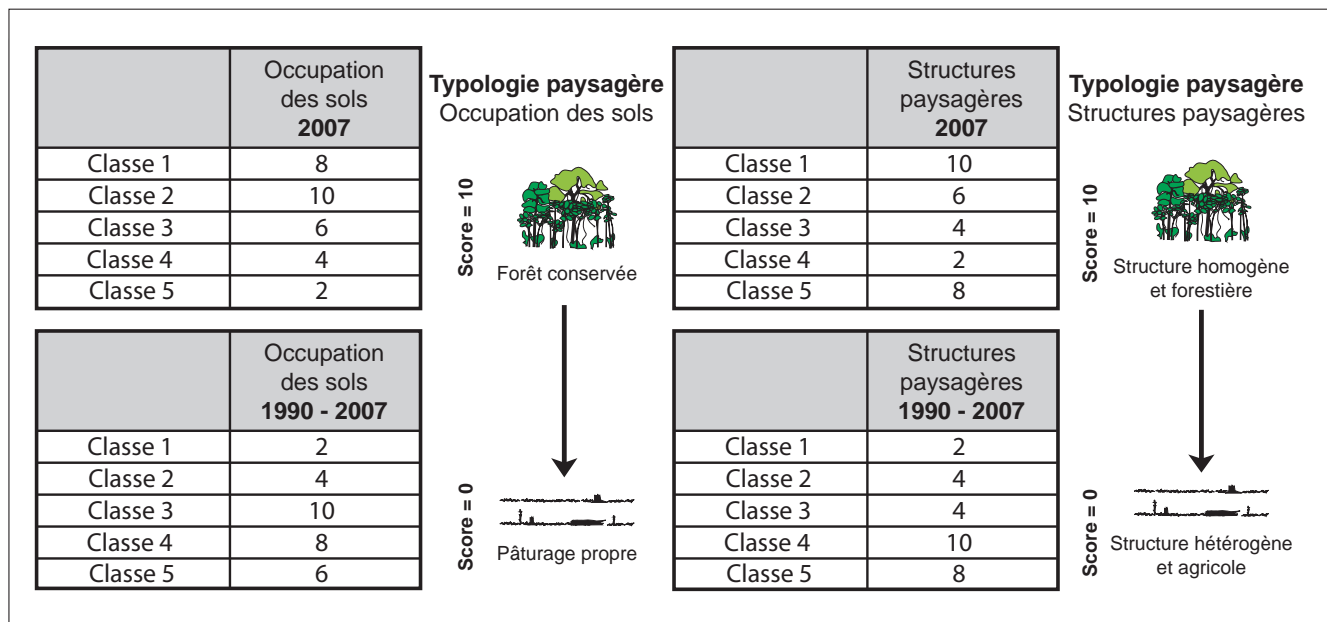


Figure 10. Élaboration de quatre indicateurs paysagers reflétant chacun une dimension particulière des fermes étudiées. Ces scores reflètent le degré d'artificialisation des compositions ou des structures paysagères (2007 et chronoséquences – 1990-2007).

Discussion

Le contexte scientifique actuel tend à favoriser le développement de nombreux indicateurs pouvant servir de « label paysager » en vue de valoriser les services écosystémiques. Dans ce contexte, l'utilisation de l'indicateur paysager synthétique (Ips) s'avère pertinente. En effet, dans le cadre de l'évaluation des services écosystémiques, notamment dans une perspective économique, seules des cartographies d'occupation du sol sont réalisées (HEIN *et al.*, 2006 ; TROY, WILSON, 2006). Cependant, cette simple dimension ne permet pas une réelle prise en compte des mosaïques paysagères, notamment parce que les structures du paysage ne sont pas couplées à l'occupation des sols. Or, il est indéniable que deux entités spatiales peuvent être caractérisées par des surfaces égales, sans pour autant avoir la même structure. De plus, la dimension historique, même récente, apporte une véritable amélioration à l'analyse des mosaïques paysagères en les replaçant dans leur contexte historique régional ou local. Ainsi, deux fermes ayant des caractéristiques similaires à une date *t* peuvent avoir connu des chronoséquences différentes.

Les 27 fermes étudiées ici sont marquées par des dynamiques récentes, avec des mosaïques paysagères qui ont été ou sont encore majoritairement forestières. Néanmoins, les zones de Maçaranduba, de Palmarès 2 et de Pacaja connaissent des dynamiques différenciées qui se recoupent avec l'ancienneté du passage du front de déforestation (figure 12).

	Code de ferme	Occupation des sols 2007	Occupation des sols 1990 - 2007	Structures paysagères 2007	Structures paysagères 1990 - 2007	Score synthétique	Classes	0
Maçaranduba	307	2	2	2	2	2 (1)		10
	109	4	2	2	4	3 (2)		
	310	4	4	2	2	3 (2)		
	108	4	4	4	2	3.5 (2)		
	115	4	4	4	2	3.5 (2)		
	212	2	2	8	2	3.5 (2)		
	209	4	4	4	2	3.5 (2)		
	308	4	4	8	2	4.5 (3)		
206	2	2	8	8	5 (3)	Palmarès 2		
105	6	6	4	4	5 (3)			
108	6	6	6	4	5.5 (3)			
217	8	8	4	4	6 (3)			
314	10	8	4	4	6.5 (4)			
308	10	8	4	4	6.5 (4)			
215	10	8	4	4	6.5 (4)			
206	8	8	6	4	6.5 (4)			
116	8	8	6	4	6.5 (4)	Pacaja		
305	10	8	4	8	7.5 (5)			
112	8	6	8	8	7.5 (5)			
119	8	6	8	10	8 (5)			
102	10	6	8	10	8.5 (5)			
203	10	10	8	10	9.5 (6)			
207	10	10	10	10	10 (6)			
216	10	10	10	10	10 (6)			
305	10	10	10	10	10 (6)			
315	10	10	10	10	10 (6)			
308	10	10	10	10	10 (6)			

Figure 11.

Score de l'indice paysager synthétique pour chaque ferme, calculé à partir des typologies paysagères observées. Les chiffres entre parenthèses dans la colonne des scores synthétiques correspondent aux six classes de scores.

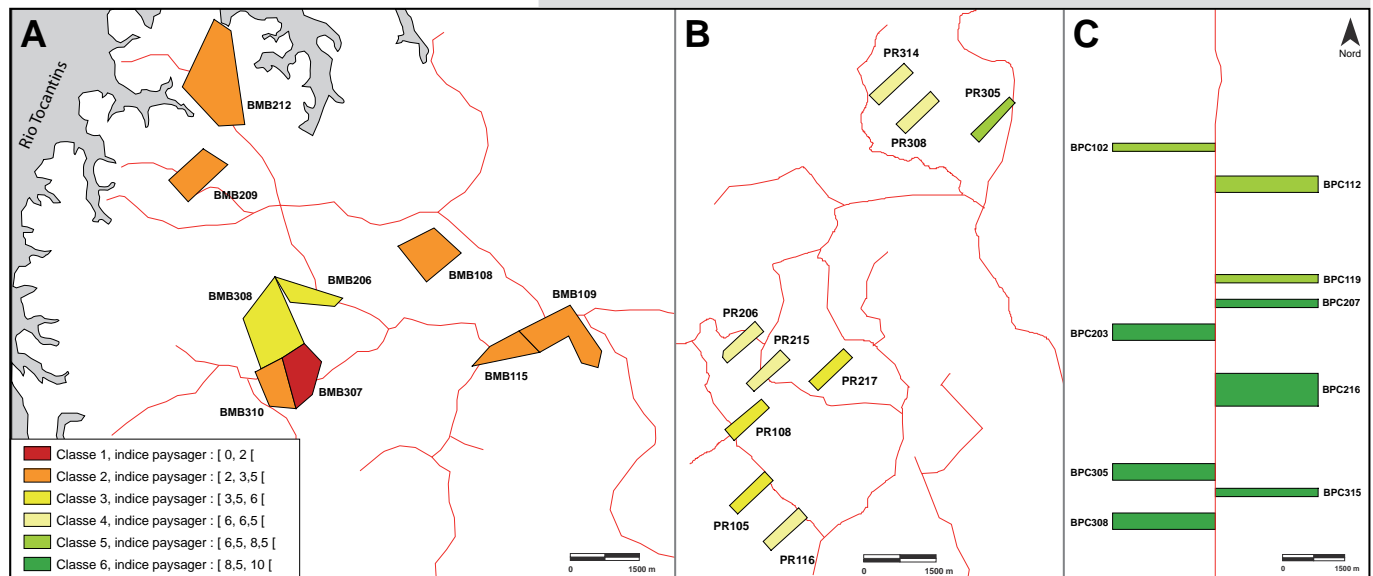


Figure 12.

Carte de l'indice paysager synthétique pouvant être assimilé à un indicateur quantitatif de la qualité paysagère (degré d'anthropisation et d'évolution des structures paysagères). A) Site de Maçaranduba. B) Site de Palmarès 2. C) Site de Pacaja.



L'équipe de géographes au travail pour l'identification de la typologie paysagère. Noter la grande variabilité spatiale et donc la difficulté de caractérisation de ces milieux (ici le site de Palmarès, Pará, Brésil). Photo V. Gond.

Le site de Pacaja est donc le site le plus nouvellement concerné par le passage du front de déforestation principal amazonien. En effet, ce site comprend des mosaïques paysagères majoritairement forestières au sein des neuf fermes de la zone. Au Nord de la zone de Pacaja, les lots 102 et 112 sont les plus valorisés. Cette valorisation précoce est due à la proximité de la Transamazonienne. En effet, la BR 230 dessert la zone de Pacaja au Nord à partir de tronçons perpendiculaires. Ainsi, les premières installations agricoles se sont effectuées d'abord sur les espaces limitrophes de la route principale, facilitant ainsi l'écoulement des productions agricoles. Plus tardivement, les lots 119, 308, 203, 207 et 216 ont été mis en valeur. En effet, ces fermes sont constituées de mosaïques paysagères forestières cultivées en partie depuis une dizaine d'années. Enfin, les sites les moins accessibles sont situés au Sud de la zone. Les fermes 305 et 315 possèdent une mosaïque paysagère largement forestière avec une mise en valeur agricole limitée à la proximité du siège d'exploitation.

Le site de Palmarès 2 est caractérisé par des dynamiques agricoles plus marquées et plus anciennes qu'à Pacaja. Les premières fermes mises en valeur se trouvent au Sud de la zone, à proximité du village de Palmarès 2. L'ensemble des fermes est assez bien desservi par le réseau de pistes, cependant, les distances entre le lieu de résidence (village de Palmarès 2) et la ferme cultivée sont le principal facteur expliquant le degré d'anthropisation de la ferme.

Enfin, les mosaïques paysagères des fermes de Maçaranduba sont majoritairement agricoles depuis environ 20 ans. Seules les fermes 206 et 308 sont valorisées depuis moins de 15 ans, avec une partie de la mosaïque paysagère restant forestière. Ce sont deux fermes de petits exploitants agricoles agro-extractivistes. Les autres fermes de Maçaranduba appartiennent à de petits exploitants agricoles pratiquant l'élevage bovin pour le marché local. La mosaïque paysagère de ces fermes est donc constituée de pâturages à différents stades d'évolution. Les seuls espaces forestiers subsistant sont des friches anciennes (plus de 10 ans), des broussailles sur bas-fonds ou des ripisylves qui jouxtent le réseau hydrographique.

Perspectives

L'indicateur paysager synthétique (Ips) est donc révélateur des dynamiques historiques, mais aussi de la hiérarchisation des fermes en fonction de facteurs spatiaux influant sur les évolutions de l'occupation des sols et des structures paysagères (pistes, réseau hydrographique, polarisation des sièges d'exploitation ou des villages...). Ainsi, l'Ips répond au cahier des charges initial, c'est-à-dire renseigner quantitativement et qualitativement l'état de la mosaïque paysagère d'une ferme ou d'une entité géographique par rapport à un groupe étudié. Ce type d'indice permet donc de répondre à de nombreuses questions connexes aux dynamiques paysagères dans des régions où les évolutions historiques du paysage sont rapides et intenses (les fronts de déforestation, par exemple). En effet, il devient ainsi possible de comparer les dynamiques paysagères avec les différents facteurs socio-économiques ayant des impacts potentiels sur la gestion des fermes (nombre d'enfants, nombre d'ouvriers agricoles travaillant sur la parcelle, montant des aides de l'État...). De même, à une échelle plus large, des politiques publiques différentes peuvent avoir des répercussions notables sur les dynamiques de l'occupation des sols, par exemple avec la construction de marchés de proximité ou l'encouragement institutionnel du développement du front de déforestation agricole. À partir de l'Ips, le suivi de ces répercussions peut rapidement être mis en œuvre.

De plus, l'un des points les plus positifs de cette recherche correspond à la mise en place de quatre indicateurs intermédiaires représentant des dimensions différentes du paysage étudié. En effet, pour certaines questions scientifiques spécifiques, il est possible, à partir de cette méthode, de ne se focaliser que sur certaines dimensions paysagères. Ainsi, dans le cas du suivi des conséquences des dynamiques paysagères sur la biodiversité, il est possible, suivant les taxons étudiés, de se concentrer sur les dynamiques récentes ou les dynamiques anciennes, sur les dynamiques de l'occupation des sols (*id est* la dynamique de certains écosystèmes) ou sur les dynamiques des structures paysagères (*id est* fragmentation du milieu, sauvegarde de corridors entre les principaux patches...). Ce système, malgré sa complexité, permet donc une véritable souplesse dans les analyses connexes pouvant être menées, notamment dans le cadre de collaborations transdisciplinaires.

Grâce à l'ensemble de ces atouts, l'Ips proposé serait donc à même de servir de « label paysager » (GHAZOUL *et al.*, 2009). En effet, pour quantifier la valeur qualitative d'un paysage, ce système à quatre dimensions paraît assez robuste pour prendre en considération l'ensemble des caractéristiques spatiales d'un paysage. De ce fait, un label paysager dérivé de cette méthode renseignerait la valeur intrinsèque d'un paysage, sans pourtant prendre en compte, à l'heure actuelle, des valeurs qualitatives ou sociales du paysage. Ces développements futurs pourraient enrichir considérablement l'indice proposé.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les communautés de Maçaranduba, Palmarès 2 et Pacaja pour leur accueil, l'hébergement et l'accompagnement sur le terrain, ainsi que tous les membres des programmes Amaz. Les auteurs remercient plus particulièrement Iran Véga, Simao Lindoso de Souza et William Assis de l'Université fédérale du Pará à Belém pour la coordination brésilienne du projet, et Florence Dubs, Anne-Elizabeth Laques, Marcello Thalès et Rafael Luis de Araujo Fretas pour leur aide précieuse sur le terrain.

Références bibliographiques

- ARNAULD DE SARTRE X., 2006. Front pionnier d'Amazonie. Les dynamiques paysannes au Brésil. Paris, France, Cnrs éditions, Espaces et Milieux, 223 p.
- BLANC L., CHESSEL D., DOLÉDEC S., 1998. Étude de la stabilité temporelle des structures spatiales par analyses d'une série de tableaux de relevés faunistiques totalement appariés. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 348 : 1-21.
- CHESSEL D., DUFOUR A.-B., THIOULOUSE J., 2004. The ade4 package. I: One-table methods. R News, 4: 5-10.
- DOLÉDEC S., CHESSEL D., 1989. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. Acta Œcologica, 10 : 207-232.
- ERNOULT A., FREIRE-DIAZ S., LANGLOIS E., ALARD D., 2006. Are similar landscapes the result of similar histories? Landscape Ecology, 21: 631-639.
- FEARNSIDE P. M., 1988. Développement agricole et déforestation en Amazonie brésilienne. In : Séminaire « Amazonie : la frontière agricole vingt ans après », Belém, Brésil, 5-7 décembre 1988.
- GAERTNER J. C., CHESSEL D., BERTRAND J., 1998. Stability of spatial structures of demersal assemblages: a multitable approach. Aquatic Living Resources, 11: 75-85.
- GHAZOU J., GARCIA C., KUSHALAPPA C. G., 2009. Landscape labelling: a concept for next-generation payment for ecosystem service schemes. Forest Ecology and Management, 258: 1889-1895.
- HARGIS C. D., BISSONETTE J. A., DAVID J. L., 1998. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. Landscape Ecology, 13: 167-186.
- HEIN L., VAN KOPPEN K., DE GROOT R. S., VAN IERLAND E. C., 2006. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. Ecological Economics, 57: 209-228.
- 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.
- LAVIT C., ESCOUFIER Y., SABATIER R., TRAISSAC P., 1994. The ACT (STATIS method). Computational Statistics and Data Analysis, 18: 97-119.
- L'HERMIER DES PLANTES H., 1976. Structuration des tableaux à trois indices de la statistique. Thèse de 3^e cycle, Université Montpellier II, France, 98 p.
- NENGWANG C., HUANCHENG L., LIHONG W., 2009. A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. Ecological Economics, 68: 2768-2776.
- OSZWALD J., KOUAKOU J. M., KERGMARD C., ROBIN M., 2007. Représenter l'espace pour structurer le temps : l'utilisation des SIG pour comprendre les dynamiques spatiales. Télédétection, 7 : 271-282.
- OSZWALD J., LEFEBVRE A., ARNAULD DE SARTRE X., GOND V., THALES 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. Télédétection, 9 (2) : 97-111.
- PRODES, 2003. Monitoreto da floresta brasileira por satélite. <http://www.obt.inpe.br/prodes/>
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (<http://www.R-project.org>).
- RIITERS 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: 23-29.
- ROBERT P., ESCOUFIER Y., 1976. A unifying tool for linear multivariate statistical methods: the RV coefficient. Applied Statistics, 25: 257-265.
- THÉRY H., 1997. Environnement et développement en Amazonie brésilienne. Paris, France, Belin, 258 p.
- THIOULOUSE J., CHESSEL D., 1987. Les analyses multitableaux en écologie factorielle. Acta Œcologica, 8 : 463-480.
- THIOULOUSE J., CHESSEL D., DOLÉDEC S., OLIVIER J. M., 1997. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. Statistics and Computing, 7: 75-83.
- TROY A., WILSON M. A., 2006. Mapping ecosystem services: practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. Ecological Economics, 60: 435-449.
- ZONNEVELD I. S., 1989. The land unit. A fundamental concept in landscape ecology and its applications. Landscape Ecology, 3: 67-78.